# การทบทวนวิธีการศึกษาผลผลิตและการย่อยสลายเศษซากชีวมวลในวัฏจักรคาร์บอนต่อการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในป่าเขตเส้นศูนย์สูตร

# THE REVIEW OF LITTERFALL PRODUCTION AND DECOMPOSITION METHOD IN CARBON CYCLE AND EFFECT TO $CO_2$ EMISSION IN TROPICAL FOREST

***พงษ์เทพ หาญพัฒนากิจ****

***Phongthep Hanpattanakit****

*สาขาวิชาสิ่งแวดล้อม คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*

*Department of Environment, Faculty of Environmental Culture and Ecotourism, Srinakharinwirot University, Thailand.*

***Corresponding author, E-mail:** phongthep@g.swu.ac.th, hanpattanakit@gmail.com*

**บทคัดย่อ**

ผลผลิตและการย่อยสลายซากพืชมีความสำคัญต่อการหมุนเวียนคาร์บอนจากการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) จากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์และการหมุนเวียนของธาตุอาหารในระบบนิเวศป่าไม้ โดยธาตุอาหารจะถูกสร้างและสะสมในส่วนต่างๆ ของพืชผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง แล้วหมุนเวียนเข้าสู่พื้นป่าโดยกระบวนการย่อยสลายจากจุลินทรีย์และสัตว์ขนาดเล็กในดิน การสลายตัวของซากพืชจะเร็วหรือช้าจะสะท้อนถึงปริมาณแก๊ส $CO_2$ ที่จะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ ทั้งนี้ อัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและกิจกรรมของจุลินทรีย์ ซึ่งการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา รวบรวมข้อมูล เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตและการย่อยสลายซากพืชจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาในพื้นที่ป่าไม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตป่าเส้นศูนย์สูตร เพื่อนำองค์ความรู้ไปใช้อธิบายถึงความสัมพันธ์และกลไกการหมุนเวียนคาร์บอนในระบบป่าไม้และยังสามารถใช้ในการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต โดยผลการรวบรวมข้อมูลผลผลิตซากพืชในระบบนิเวศป่าไม้สามารถจำแนกผลผลิตของซากพืชตามบริเวณการแบ่งเขตเส้นศูนย์สูตรออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ป่าเขตเส้นศูนย์สูตร ป่าเขตอบอุ่น ป่าเขตขั้วโลก ซึ่งค่าเฉลี่ยของซากพืชที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 8.26, 5.43 และ 3.95 ตัน แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$ สำหรับอัตราการย่อยสลายของซากพืชในป่าเขตเส้นศูนย์สูตรก็มีค่าสูงกว่าพื้นที่ป่าในระบบนิเวศป่าไม้ในเขตอื่น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.162-2.813 ต่อเดือน ซึ่งจากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณผลผลิตและอัตราการย่อยสลายซากพืชในเขตป่าร้อนชื้นนั้นมีค่าสูงกว่าในเขตอื่นๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการส่งเสริมกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตในพื้นที่และยังส่งผลต่อการหมุนเวียนธาตุอาหารและแลกเปลี่ยนแก๊ส $CO_2$ ที่มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน

**คำสำคัญ:** การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลผลิตซากพืช การย่อยสลายซากพืช ป่าไม้เขตเส้นศูนย์สูตร

**Abstract**

Litter production and decomposition are important to the carbon cycle, which determined the magnitude of $CO_2$ release to the atmosphere, and the nutrient inputs into the forest ecosystem. Plant nutrients are produced through photosynthesis and accumulated in different plant parts. They are circulated into forest soils through small living organism and microbial decomposition. The decomposition rate depends on environmental conditions and microbial activities. The objectives of this study were to examine, to compare and to analyze the results of previous studies in litterfall production and decomposition in the forest ecosystem, especially, tropical forest zone. The knowledge can be used to explain the relationships and mechanisms of the carbon cycle and its nutrient cycle between forest and atmosphere. Moreover, this reviewed paper has been utilized for developing our knowledge and improving the new research for the future. The results shown that the averages of annual litterfall of tropical, temperate, and polar forests regions were 8.26, 5.43, and 3.95 $ton.ha^{-1}.yr^{-1}$, respectively. The litterfall decomposition rate in tropical forest zone was highest decomposition rate or *k* ranges 0.162-2.813 per month. For the results, they had shown that the litterfall production and decomposition in tropical forest are higher activity rates than other regions. The reasons of results were because of the litterfall decomposition tend to climate variability and geography which are the important factors to control the living organism activities. In addition, the litter production and decomposition are mainly control the nutrient cycle in forest and $CO_2$ exchange in atmosphere also.

**Keywords**: Carbon dioxide emission, Litter production, Litter decomposition, Tropical forest

## บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเกิดขึ้นทั่วทุกมุมโลก โดยจะเห็นได้จากการเกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติซึ่งมีความถี่และความรุนแรงมากขึ้นกว่าในอดีต อาทิเช่น จำนวนครั้งการเกิดพายุทอร์นาโดในประเทศสหรัฐอเมริกา การเกิดพายุหิมะที่เลวร้ายในแถบประเทศยุโรป และการเกิดน้ำท่วมจากพายุฝนในปริมาณมากกว่าปกติทั้งในประเทศไทย จีน ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย เป็นต้น ซึ่งแต่ละครั้งก็สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินและทำลายสถิติความรุนแรงที่เคยเกิดขึ้นมาแล้วในอดีตอีกด้วย จากหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ทำให้เชื่อว่า สาเหตุหลักของการเกิดภัยพิบัติเหล่านี้เกิดมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ (Greenhouse Gases หรือ GHG) ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิโลกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและส่งผลให้สภาพภูมิอากาศมีความแปรปรวน ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของแก๊สเรือนกระจก เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) แก๊สมีเทน ($CH_4$) แก๊สไนตรัสออกไซด์ ($N_2O$) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งสิ้น โดยความเข้มข้นของแก๊ส $CO_2$ เฉลี่ยทั่วโลก ได้เพิ่มขึ้นจาก 285 parts per million on a volume basis (ppmv) ในปี ค.ศ. 1850 เป็น 379 ppmv ในปี ค.ศ. 2005 ซึ่งมีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ย เท่ากับ 1.5 ppmv ต่อปี นับตั้งแต่เริ่มการปฏิวัติอุตสาหกรรม ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิโลกโดยมีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นเดียวกับปริมาณการเพิ่มขึ้น

ของแก๊สเรือนกระจก โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.74 $\pm$ 0.18 องศาเซลเซียส [1]

ป่าไม้นับว่ามีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและปริมาณคาร์บอนในชั้นบรรยากาศ เนื่องจากเป็นแหล่งดูดซับแก๊ส $CO_2$ จากบรรยากาศ หรือ carbon sequestration ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง เพื่อนำมาเก็บกักไว้ในรูปของชีวมวล เช่น ใบ กิ่ง ลำต้น และราก ในขณะเดียวกันป่าไม้ก็ปลดปล่อยแก๊ส $CO_2$ กลับสู่บรรยากาศโดยกระบวนการหายใจของพืช (Autotrophic Respiration หรือ Plant Respiration) ได้แก่ การหายใจของส่วนใบ ราก ลำต้น และการปล่อยแก๊ส $CO_2$ จากกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Heterotrophic Respiration หรือ Soil Respiration) ผ่านกระบวนการย่อยซากพืชและสัตว์ของจุลินทรีย์ในดินและการหายใจของสัตว์ในดิน ซึ่งกระบวนการดังกล่าว มีความสำคัญต่อการหมุนเวียนของธาตุอาหารในป่าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยจะเริ่มจากการที่ใบ กิ่ง ดอก ผล และส่วนอื่นๆ ของพืชร่วงหล่นลงสู่ดิน จากนั้นก็จะค่อยๆ สลายตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กโดยกระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา ซึ่งกระบวนการสลายตัวจะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อม กิจกรรมของจุลินทรีย์ และปริมาณผลผลิตของซากพืช ตามลักษณะของป่าในแต่ละบริเวณ และเมื่อซากพืชสลายตัวจะเปลี่ยนเป็นธาตุอาหารสะสมอยู่ตามบริเวณผิวดิน จนกระทั่งมีฝนตกธาตุอาหารดังกล่าวจะถูกนำพาไปกับน้ำที่ซึมลงไป จากนั้นรากของพืชก็จะดูดเอาธาตุอาหารไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต และส่วนที่เหลือจะถูกสะสมกลายเป็นอินทรียวัตถุในดิน

ผลผลิตซากพืชและกระบวนการย่อยสลายของซากพืชในเขตป่าเส้นศูนย์สูตรนับว่ามีความสำคัญต่อการหมุนเวียนธาตุคาร์บอนในระบบโลก เนื่องจากพื้นที่ป่าเส้นศูนย์สูตรเป็นแหล่งสะสมคาร์บอนในปริมาณที่สูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณคาร์บอนที่สะสมในรูปชีวมวลบนโลก [2] และมีผลผลิตขั้นปฐมภูมิจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (Net Primary Product = NPP) สูงถึงร้อยละ 32 ของระบบนิเวศบนโลก [3] ซึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการหมุนเวียนธาตุคาร์บอนจากผลผลิตและการย่อยสลายซากพืชจากอดีตจนถึงปัจจุบัน มีการศึกษาในหลากหลายพื้นที่และกระจัดกระจาย ส่งผลให้ผู้ที่สนใจศึกษาความรู้ยากต่อการเข้าถึงข้อมูลและเสียเวลาและค่าใช้ในการรวบงานวิจัยแต่ละชิ้นเพื่อเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับลักษณะของข้อมูลการหมุนเวียนธาตุคาร์บอนในระบบนิเวศป่าไม้ และต่อยอดงานวิจัยที่มีอยู่ในประเทศให้ทัดเทียมสู่สากลต่อไป ถึงแม้ว่าการศึกษาวิจัยในงานวิจัยสาขาต่างๆ จะมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาคุณภาพการศึกษาภายในประเทศ แต่การรวบรวมและวิเคราะห์ผลงานวิจัยที่มีอยู่ทั้งภายในและภายนอกประเทศนั้นก็สำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน โดยบทความนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาวิจัยปริมาณผลผลิตและการย่อยสลายซากพืช การหมุนเวียนธาตุคาร์บอนจากกระบวนการย่อยสลายเศษซากพืชในระบบนิเวศป่าไม้ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณแก๊ส $CO_2$ ที่มีความสำคัญในการที่จะช่วยให้สามารถคาดการณ์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก

บทความทางวิชาการนี้เป็นการรวบรวมผลงานทางวิชาการตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่มีการเผยแพร่ในงานแสดงผลงานทางวิชาการ บทความวิจัย บทความทางวิชาการ หนังสือ วิทยานิพนธ์ และวารสารทางวิชาการทั้งในและต่างประเทศ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญจากบทความนั้นๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน เป็นต้น เพื่อถอดองค์ความรู้ที่สำคัญและนำมาอธิบายการหมุนเวียนของคาร์บอน

จากการร่วงหล่นและการย่อยสลายซากพืชในระบบนิเวศป่าไม้ นอกจากนี้ ยังได้สรุปถึงข้อดีและข้อเสียพร้อมทั้งวิธีการที่เหมาะสมเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุในการวิจัยเกี่ยวกับเศษซากพืชในเขตป่าแถบเส้นศูนย์สูตรดังตัวอย่างวิธีการต่อไปนี้

**การศึกษาการร่วงหล่นของซากพืช**

โดยทั่วไปแล้ว การศึกษาการร่วงหล่นของซากพืช จะใช้วิธีการวางกระบะรองรับซากพืช (Litter Traps) โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม หรือวงกลม แต่สิ่งสำคัญจะต้องสามารถคำนวณถึงพื้นที่ของรูปทรงนั้นๆ เพื่อใช้ในการคำนวณการร่วงหล่นของซากพืชต่อหน่วยพื้นที่ ทั้งนี้ความสูงของกระบะรองรับซากพืชจะขึ้นอยู่กับพรรณไม้ในป่าแต่ละชนิด โดยต้องไม่ต่ำหรือสูงเกินไปจากพื้นดิน เพราะหากต่ำเกินไปจะทำให้ ซากพืชที่อยู่ด้านล่างเกิดการย่อยสลายหากมีการสัมผัสดิน หรือถ้าสูงเกินไปจะไม่สะดวกต่อการเก็บซากพืช และซากพืชอาจปลิวหล่นเมื่อมีลมหรือพายุที่รุนแรง โดยความสูงมาตรฐานที่งานวิจัยหลายๆ แหล่งจะอยู่ที่ประมาณ 1 เมตรจากพื้นดิน นอกจากความสูงนั้นมีความสำคัญแล้ว วัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์กระบะรองรับซากพืชนั้นก็มีความสำคัญคือต้องมีราคาถูก ง่ายต่อการติดตั้ง คงทนและสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย หากเกิดเหตุฉุกเฉิน เช่น ไฟไหม้แปลงทดลอง เป็นต้น ซึ่งวัสดุที่เหมาะสมในการทำฐานของกระบะควรเป็นท่อ PVC หรือเหล็ก เพราะมีความคงทนต่อสภาพอากาศและน้ำฝน หากเป็นไม้อายุการใช้งานจะสั้นเพราะถูกย่อยสลายจากปลวก จุลินทรีย์ เป็นต้น สำหรับวัสดุที่ใช้ในการรองรับซากพืช ควรทำมาจากวัสดุที่มีความคงทนเช่นเดียวกัน เพราะสภาพแวดล้อมนั้นมีความชื้นหากเป็นพวกผ้าขาวบางหรือพลาสติกอาจผุกร่อนจากฝนหรือแสงแดด วัสดุที่ควรใช้คือตาข่ายไนลอน เพราะมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมและการย่อยสลายจากปลวกอีกด้วย ซึ่งขนาดช่องตาข่ายไนลอนนั้นก็มีความสำคัญเช่นกัน เพราะถ้ากว้างไปจะทำให้เศษซากพืชที่มีขนาดเล็กหลุดรอดออกไปได้เช่นกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของพรรณไม้ในป่าไม้แต่ละชนิด สำหรับจำนวนของกระบะรองรับซากพืชยิ่งมีจำนวนมากและกระจายตัวในปริมาณสูงก็จะทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ แต่สัดส่วนที่เหมาะสมควรมีกระบะกระจายตัวอยู่ประมาณ 10-20 จุด ต่อพื้นที่ 2,500 ตารางเมตร [4] หลังจากติดตั้งกระบะรองรับซากพืชเสร็จเรียบร้อยแล้ว ระยะเวลาในการเก็บซากพืชนั้นก็ไม่ควรห่างมากเกินไป โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในระยะเวลาประมาณ 1 เดือน หลังจากเก็บซากพืชในแต่ละครั้งควรนำมาชั่งและบันทึกน้ำหนักสด หลังจากนั้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หรืออบจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ และนำตัวอย่างที่อบไปชั่งและบันทึกน้ำหนักแห้ง เพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นแล้วนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาน้ำหนักแห้งของซากพืชแต่ละส่วนของพรรณไม้แต่ละชนิดตามสมการที่ 1 และ 2 คือ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักสด} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100 \qquad \text{(สมการที่ 1)}$$

$$\text{น้ำหนักแห้ง} = \frac{100 \times \text{น้ำหนักสด}}{100 + \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น}} \qquad \text{(สมการที่ 2)}$$

**การศึกษาการย่อยสลายของเศษซากพืช**

สำหรับการศึกษาอัตราการย่อยสลายซากพืชนั้นมีวิธีที่หลากหลายมากกว่าการศึกษาการร่วงหล่นของซากพืช ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการที่จะศึกษาว่าจะศึกษาเรื่องในด้านกายภาพ ชีวภาพ เคมี หรือฟิสิกส์ ซึ่งในแต่ละวิธีอาจมีความแตกต่างในการทดลอง เช่น ในการทดลองจำเป็นต้องศึกษาในแปลงวิจัยเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมในพื้นที่นั้นๆ หรือในบางการทดลองจำเป็นต้องสร้างสถานการณ์จำลองบางอย่างในห้องปฏิบัติการเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงในด้านต่างๆ ในสภาวะแวดล้อมที่มีการควบคุม เป็นต้น ซึ่งในการทดลองการหาอัตราการย่อยสลายซากพืชในงานวิจัยส่วนใหญ่ จะทำการทดลองในสถานที่จริงเพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของการย่อยสลายตามสภาพภูมิอากาศนั้นๆ โดยวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือวิธีการบรรจุซากพืชใน ถุงตาข่าย (Litter Bag) ที่ทำจากวัสดุที่มีความคงทนต่อการย่อยสลายและการกัดกินของแมลงและสัตว์ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปลวก ไส้เดือน เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้ ตาข่ายไนล่อนที่ช่องตาข่ายขนาด 1x1 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดของช่องตาข่ายไม่ควรเล็กหรือใหญ่เกินไป โดยถ้ามันมีขนาดเล็กมาก ก็จะไม่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์และสัตว์ต่างๆ เช่น ปลวก ไส้เดือน และแมลงต่างๆ หรือถ้าใหญ่เกินไปก็จะส่งผลต่อการร่วงหล่นของชิ้นส่วนของซากพืชที่ยังไม่ได้ย่อยสลายจนเป็นอินทรีย์วัตถุในดิน ซึ่ง Berg and Laskowski (2006) แนะนำขนาดของช่องตาข่ายควรอยู่ระหว่าง 0.5-1 มิลลิเมตร สำหรับขนาดของถุงใส่ซากพืชนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของใบและปริมาณที่ใส่ซากพืชลงในถุง โดยถ้าใบไม้มีขนาดยาวขนาดถุงก็ควรยาวด้วยเช่นกันเพื่อลดผลกระทบจากการศึกษาและให้เหมือนในธรรมชาติมากที่สุด ข้อควรระวังในการคัดเลือกขนาดถุงบรรจุซากพืช คือ เมื่อบรรจุซากพืชเรียบร้อยแล้ว ซากพืชในถุงจะต้องไม่ทับกันหรือหลวมมากเกินไปควรดูแล้วให้เหมือนตามสภาพธรรมชาติให้มากที่สุด สำหรับการเตรียมตัวอย่างเศษซากพืชเพื่อใช้ในการวิจัยนั้นก่อนการวิจัยจะต้องมีการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นและลดผลความคาดเคลื่อนจากน้ำหนักออกก่อน โดยอุณหภูมิในการอบนั้นมีความสำคัญหากอุณหภูมิสูงไป จะทำให้โครงสร้างและสารประกอบระเหยต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่ออัตราและรูปแบบการย่อยสลายจากกลุ่มผู้ย่อยสลาย [5] ซึ่งแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ การผึ่งซากพืชไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2-4 สัปดาห์ หรือการอบแห้งที่อุณหภูมิ 75-85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวจะไม่ส่งผลกระทบโครงสร้างและสารประกอบระเหยต่างๆ หลังจากเริ่มทำการทดลอง ควรบันทึกระยะเวลาเริ่มต้นให้ชัดเจน และเมื่อถึงเวลาการเก็บซากพืชในแต่ละเดือน จะทำการคัดแยกใบที่เหลืออยู่ในถุงซากพืช ทำความสะอาดดินและสิ่งเจอปนอื่นๆ ให้เหลือแต่ซากพืชและนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักแห้งของซากพืชที่เหลืออยู่ในแต่ละถุง เพื่อนำไปคำนวณอัตราการย่อยสลายของซากพืชแต่ละชนิด ตามสมการคำนวณค่าคงที่ของการย่อยสลาย ($k$) จากสมการ Exponential decay model [6] ตามสมการที่ 3

$$\ln Y_t = \ln Y_o - kt \quad \text{(สมการ 3)}$$

เมื่อ $Y_t$ : น้ำหนักแห้งของซากพืชที่เหลือจากการย่อยสลายในช่วงเวลา t (กรัม)

$Y_o$ : น้ำหนักแห้งของซากพืชช่วงเริ่มต้น (กรัม)

$k$ : ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายเอ็กโพเนนเชียล (ต่อเดือน)

$t$ : ช่วงเวลาที่แตกต่างระหว่าง $X_t$ และ $X_o$ (เดือน)

สำหรับการคำนวณหาปริมาณแก๊ส $CO_2$ จากกระบวนการย่อยสลายของเศษซากพืชนั้น คำนวณจากน้ำหนักแห้งของซากพืช นำปริมาณชีวมวลมาคูณด้วยสัดส่วนของชีวมวลที่เป็นคาร์บอน (ค่าเฉลี่ยประมาณ 50% ซึ่งมีความแตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดของพืช) และตัวคูณ 3.67 ใช้เพื่อเปลี่ยนคาร์บอนให้อยู่ในหน่วยของแก๊ส $CO_2$ เมื่อซากพืชเหล่านั้นมีการย่อยสลาย

**ผลผลิตและองค์ประกอบของซากพืชในระบบนิเวศป่าไม้**

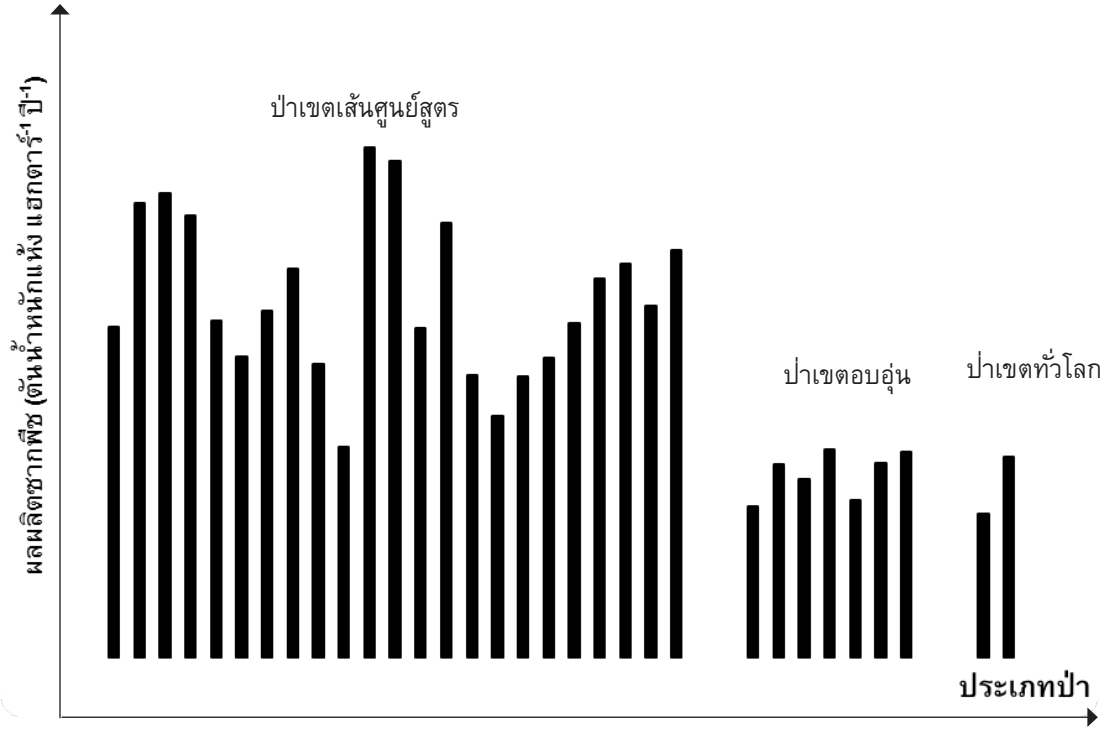
เศษซากพืชไม่ใช่ผลผลิตเดียวที่ระบบนิเวศป่าไม้สร้างขึ้นแต่ซากพืชเหล่านี้มีความสำคัญต่อการหมุนเวียนธาตุอาหารในป่าไม้เป็นอย่างมาก เนื่องจากซากพืชเหล่านี้ อันได้แก่ ใบไม้ กิ่งไม้ ดอก ผล และเมื่อชิ้นส่วนเหล่านี้ตายลง ซากพืชเหล่านี้ก็จะตกลงสู่พื้นดินและถูกย่อยสลายกลายเป็นสารอินทรีย์ที่พืชและจุลินทรีย์ในดินสามารถนำกลับไปใช้ในการเจริญเติบโตและสะสมอยู่ในชั้นดินต่อไป ทั้งนี้ปริมาณผลผลิตของซากพืชในป่าแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่างๆ เช่น สภาพภูมิอากาศ สภาพภูมิประเทศ ความหลากหลายและความหนาแน่นของพรรณพืช เป็นต้น ทั้งนี้ผลผลิตซากพืชในเขตป่านอกเขตเส้นศูนย์สูตร จะมีค่าเท่ากับ 3-5 ตัน แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$ ขณะที่ป่าในเขตเส้นศูนย์สูตร จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 6-12 ตัน แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$ โดยสามารถจำแนกผลผลิตของซากพืชตามบริเวณการแบ่งเขตเส้นศูนย์สูตรออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ป่าเขตเส้นศูนย์สูตร ป่าเขตอบอุ่น ป่าเขตขั้วโลก ซึ่งค่าเฉลี่ยของซากพืชที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 8.26, 5.43 และ 3.95 ตัน แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$ ทั้งนี้ได้แสดงผลผลิตของซากพืชในพื้นที่ป่าไม้แต่ละชนิดทั้งในพื้นที่ประเทศไทยและในต่างประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ความแปรผันของผลผลิตซากพืชในป่าไม้แต่ละชนิดของแต่ละประเทศ

| ป่าในเขตภูมิภาค | ชนิดป่า/ประเทศ | ผลผลิตรวม (ตัน แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$) | เอกสารอ้างอิง |
|---|---|---|---|
| ป่าเขตร้อนชื้น (Tropical forest) | ป่าดิบเขา หมู่เกาะ New Guinea ประเทศอินโดนีเซีย | 7.55 | [4] |
| | ป่าดิบเขา ประเทศมาเลเซีย | 8.80-12.00 | [7] |
| | ป่าดงดิบ ประเทศมาเลเซีย | 10.60 | [8] |
| | ป่าดงดิบ ประเทศอินโดนีเซีย | 8.44-11.74 | [9] |
| | ป่าดิบแล้ง จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย | 7.71 | [10] |
| | ป่าดิบเขา จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย | 6.88 | [11] |
| | ป่าสักและป่าผลัดใบ จังหวัดลำปาง ประเทศไทย | 7.92 | [12] |
| | ป่าชายเลน จังหวัดระยอง ประเทศไทย | 8.90 | [13] |
| | ป่าพรุ จังหวัดนราธิวาส ประเทศไทย | 6.70 | [14] |
| | ป่าไผ่ จังหวัดกาญจนบุรี ประเทศไทย | 4.81 | [12] |
| | ป่าสัก อายุ 10 ปี จังหวัดลำปาง ประเทศไทย | 11.65 | [15] |
| | ป่าสน อายุ 12 ปี จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย | 11.35 | [12] |
| | ป่าเบญจพรรณ จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย | 7.12 - 7.95 | [16] |
| | ป่าดิบแล้ง จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย | 9.08-10.79 | [16] |
| | ป่าดิบเขา จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย | 6.42-6.49 | [16] |
| | ป่าเต็งรัง จังหวัดราชบุรี ประเทศไทย | 6.42 | [17] |
| | ป่าเบญจพรรณ จังหวัดระยอง ประเทศไทย | 6.86 | [18] |
| | ป่าเบญจพรรณ จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย | 7.63 | [19] |
| | ป่าเบญจพรรณ จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย | 8.65 | [20] |
| | ป่าเบญจพรรณ จังหวัดฉะเชิงเทรา ประเทศไทย | 9.01 | [21] |
| | ป่าเบญจพรรณ จังหวัดฉะเชิงเทรา ประเทศไทย | 8.04 | [21] |
| | ป่าเส้นศูนย์สูตร | 9.3 | [22] |
| ป่าเขตอบอุ่น (Temperate forest) | ป่าสนเขตอบอุ่น | 3.47 | [23] |
| | ป่าไม้ใบใหญ่เขตอบอุ่น | 4.42 | [23] |
| | ป่าสนเขตอบอุ่น | 4.09 | [23] |
| | ป่าสนเขตอบอุ่น | 4.77 | [23] |
| | ป่าไม้ไม่ผลัดใบ, Hokkaido, ประเทศญี่ปุ่น | 3.52-3.69 | [9] |
| | ป่าผลัดใบ, Kyoto, ประเทศญี่ปุ่น | 4.05-4.86 | [24] |
| | ป่าสน | 4.7 | [23] |
| ป่าเขตขั้วโลก (Polar Forest) | Arctic Zone | 3.3 | [23] |
| | Cooling Zone | 4.6 | [23] |

ทั้งนี้ พบว่าป่าเขตร้อนชื้นหรือป่าไม้บริเวณเส้นศูนย์สูตร (Equatorial Zone หรือ Tropical Zone) มีปริมาณผลผลิตของซากพืชมากกว่าพื้นที่ป่าเขตอบอุ่นหรือขั้วโลก (ภาพที่ 1) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ O'Neill & De Angelis (1980) ที่ศึกษาค่าเฉลี่ยของการร่วงหล่นของซากพืชในป่าในเขตขั้วโลก เขตหนาวเย็น เขตอบอุ่น และเขตเส้นศูนย์สูตร มีค่าเท่ากับ 3.40, 4.60, 4.70 และ 9.30 ตัน แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งจากผลความแตกต่างของผลผลิตซากพืชในแต่ละพื้นที่ สาเหตุหลักน่าจะมาจากสภาพภูมิอากาศที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

เช่น อุณหภูมิและน้ำฝน เป็นต้น โดยอุณหภูมิเฉลี่ยในเขตร้อนชื้น มีค่าประมาณอยู่ระหว่าง 20-25 องศาเซลเซียส ส่วนปริมาณน้ำฝนจะมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 2,000 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งจะส่งผลต่อความชื้นในอากาศและการเจริญเติบโตของพืชในป่าในเขตนี้ แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณซากพืชในป่าเขตเส้นศูนย์สูตรหรือเขตร้อนชื้นมีค่าใกล้เคียงกับป่าเขตอบอุ่น เช่น ป่าไผ่ที่จังหวัดกาญจนบุรี (4.81 ตัน แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$) ซึ่งลักษณะของป่าชนิดนี้ มีความหลากหลายของพันธุ์พืชไม่มาก ส่วนใหญ่จะเป็นต้นไผ่ ซึ่งลักษณะของใบที่เรียวเล็กและกิ่งไม้ที่มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์ไม้ในป่าชนิดอื่น เช่น ในป่าเบญจพรรณและป่าเต็งรัง




**ภาพที่ 1** การเปรียบเทียบผลผลิตปริมาณซากพืชในพื้นที่ในป่าเขตเส้นศูนย์สูตร ป่าเขตอบอุ่น และป่าเขตขั้วโลก

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับซากพืชทางด้านป่าไม้นั้น ส่วนใหญ่จะมีการแสดงถึงสัดส่วนทางกายภาพของใบ กิ่ง และส่วนอื่นๆ ซึ่งหมายถึง ดอก ผล ฝัก เป็นต้น โดยพบว่าสัดส่วนเฉลี่ยของ ใบ กิ่ง และส่วนอื่นๆ จากการร่วงหล่นของซากพืชในป่าไม่ผลัดใบ (Evergreen Forest) มีค่าร้อยละเท่ากับ 64, 19 และ 17 ตามลำดับ ขณะที่ผลผลิตในป่าผลัดใบ (Deciduous Forest) มีค่าร้อยละเท่ากับ 80, 15 และ 5 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) จะเห็นได้ว่า สัดส่วนของใบไม้ในป่าผลัดใบมีค่าสูงกว่าป่าไม่ผลัดใบประมาณร้อยละ 25 เนื่องมาจากลักษณะของป่าผลัดใบจะมีการลดการคายน้ำในช่วงฤดูแล้งเนื่องจากสภาพอากาศที่ร้อนและแห้งแล้ง ด้วยการสลัดใบลงพื้นดิน ทำให้สัดส่วนของใบมีค่าสูงกว่าป่าชนิดอื่น ทั้งนี้รูปแบบของการร่วงหล่นของใบและการหมุนเวียนธาตุอาหารในป่าแต่ชนิดมีความแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาลักษณะต่างๆ ที่เป็นเอกลักษณ์ของป่าแต่ละชนิด เพื่อเชื่อมโยงกับการหมุนเวียนคาร์บอนในระบบนิเวศป่าไม้ในภาพใหญ่ต่อไป

**ตารางที่ 2** สัดส่วนทางกายภาพของปริมาณซากพืชที่มีการร่วงหล่นในพื้นที่ป่าไม้ผลัดใบและไม่ผลัดใบ

| ชนิดป่า | ผลผลิตรวม | สัดส่วนของซากพืช (%) | | |
|---|---|---|---|---|
| | (ตัน แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$) | ใบ | กิ่ง | อื่นๆ |
| **1. ป่าไม่ผลัดใบ (Evergreen forest)** | | | | |
| 1.1 ป่าดิบชื้น [12] | 7.86 | 58.46 | 20.23 | 21.31 |
| 1.2 ป่าดิบแล้ง [12] | 8.83 | 67.19 | 17.15 | 15.66 |
| 1.3 ป่าดิบเขา [12] | 4.88 | 66.76 | 17.87 | 15.37 |
| 1.4 ป่าดิบแล้ง [17] | 9.94 | 64.42 | 19.78 | 15.80 |
| 1.5 ป่าดิบเขา [17] | 6.45 | 62.90 | 22.15 | 14.95 |
| **Average** | **7.59** | **63.95** | **19.45** | **16.62** |
| **2. ป่าผลัดใบ (Deciduous Forest)** | | | | |
| 2.1 ป่าเบญจพรรณ [17] | 7.54 | 76.05 | 15.13 | 8.83 |
| 2.2 ป่าเต็งรัง [14] | 6.46 | 84.27 | 13.86 | 1.87 |
| **Average** | **7.00** | **80.16** | **14.50** | **5.35** |

**การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการย่อยสลายซากพืช**

วัฏจักรของธาตุอาหารหรือพลวัติการหมุนเวียนอาหารในระบบนิเวศป่าไม้นั้นมีความสำคัญต่อการดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิตในป่าไม้ โดยเมื่อชิ้นส่วนของพืชตายและร่วงหล่นลงสู่ดิน จากนั้นก็เริ่มกระบวนการย่อยสลายจากสัตว์และจุลินทรีย์ ซึ่งธาตุอาหารต่างๆ พืชและจุลินทรีย์ก็จะนำไปใช้ ส่วนที่เหลือก็จะสะสมอยู่ในดิน หรือเรียกว่าเป็นอินทรีย์วัตถุในดิน และก็จะหมุนเวียนไปตามวงจรนี้ในรอบปี ซึ่งค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลาย (*k*-value) ในป่าไม้แต่ละชนิดก็มีความแตกต่างกัน ถ้าค่า *k* ยิ่งมากก็แสดงถึงอัตราการย่อยสลายจะเร็ว โดยมีงานวิจัยของ Landberg and Gower (1997) ได้ศึกษาอัตราการย่อยสลายเฉลี่ยของซากพืชในเขตภูมิอากาศต่างๆ กัน สามารถสรุปได้ดังนี้ ในป่าเขตขั้วโลกมีค่า k เท่ากับ 0.223-0.446 ต่อเดือน ในป่าเขตอบอุ่น มีค่าเท่ากับ 0.140-0.751 ต่อเดือน และในป่าเขตเส้นศูนย์สูตรหรือร้อนชื้น มีค่าเท่ากับ 0.162-2.813 ต่อเดือน [29] ซึ่งความแตกต่างของการย่อยสลายของซากพืชในระบบนิเวศป่าไม้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ สภาพภูมิอากาศ สารประกอบเคมีในซากพืช และสิ่งมีชีวิตในดิน [25] แต่สำหรับอัตราการย่อยสลายของพรรณไม้ต่างชนิดในระบบนิเวศป่าบริเวณเดียวกัน ปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N ratio) องค์ประกอบของสารอาหารในซากพืช (Nutrient Content) และลักษณะทางสรีวิทยาของซากพืช (Anatomy of Litter) [26] ทั้งนี้ ภาณุมาศ ลาดปาละ (2549) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายซากพืชส่วนใบและค่า C:N ratio ของไม้เด่น 5 ชนิด ได้แก่ ประดู่ป่า (*Pterocarpus Macrocarpus*) แดง (*Xylia xylocarpa*) ตะคร้อ (*Schleichera Oleosa*) โมกหลวง (*Holarrhena Pubescens*) เลียงมัน (*Berrya Albociliata*) และไม้ไผ่เด่น 2 ชนิด ได้แก่ ไผ่บงดำ (*Bambusa Tulda*) และไผ่ไร่ (*Gigantochloa Albociliata*) ในป่าเบญจพรรณ สถานีวิจัยลุ่มน้ำแม่กลอง จังหวัดกาญจนบุรี โดยวิธีการใช้ถุงซากพืช (Litter Bag Method) จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วน

ระหว่างปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนของซากพืชส่วนใบ มีค่าระหว่าง 14.38-32.60 โดยพบว่าตะคร้อมีค่า C:N สูงที่สุด แต่มีค่าอัตราการย่อยสลายเฉลี่ยน้อยที่สุด [31] ซึ่ง Taylor et al. (1989) กล่าวว่า อัตราส่วนระหว่าง C:N สามารถใช้บ่งชี้อัตราการย่อยสลายโดยอัตราส่วนมากจะมีอัตราการย่อยสลายช้า [30] แต่อย่างไรก็ตามอัตราการย่อยสลายยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น ปริมาณลิกนิน (Lignin) ซึ่งสามารถเป็นตัวบ่งชี้อัตราการย่อยสลายของซากพืชภายในปีแรก [27] ทั้งนี้ กลไกการย่อยสลายของซากพืชมีความแปรผันทั้งสภาพสิ่งแวดล้อมและองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีที่จะส่งผลต่อการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศจากระบบนิเวศป่าไม้ ซึ่งถ้ามีผลผลิตซากพืชในปริมาณที่สูงและอัตราการย่อยสลายที่รวดเร็วก็จะส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับสู่บรรยากาศที่รวดเร็วเช่นกัน ทั้งนี้ได้มีการสรุปเกี่ยวกับอัตราการย่อยสลายและการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณในพื้นที่ป่าไม้ที่สำคัญประเทศไทย ดังตารางที่ 3 จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้เราทราบเกี่ยวกับการหมุนเวียนของคาร์บอนเพียงส่วนเดียว ซึ่งอีกส่วนที่สำคัญคือการตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศกลับมาสะสมในต้นไม้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งถือว่ามีความสำคัญต่อการศึกษาการหมุนเวียนธาตุอาหารในระบบนิเวศป่าไม้ที่มีความชัดเจนและสมบูรณ์ต่อการประเมินวัฏจักรคาร์บอนในระบบนิเวศป่าไม้

**ตารางที่ 3** อัตราการย่อยสลายของซากพืชและการคำนวณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในป่าไม้ที่สำคัญในประเทศไทย [16, 28]

| ชนิดของป่า | อัตราการย่อยสลาย (ตันน้ำหนักแห้ง แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$) | การปลดปล่อย $CO_2$ (ตัน $CO_2$ แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$) |
|---|---|---|
| 1. ป่าดิบชื้น | 5.86 | 10.75 |
| 2. ป่าดิบแล้ง | 7.44 | 13.65 |
| 3. ป่าดิบเขา | 2.80 | 5.14 |
| 4. ป่าเบญจพรรณ | 2.63 | 4.83 |
| 5. ป่าดิบแล้ง | 5.58 | 10.24 |
| 6. ป่าดิบเขา | 4.14 | 7.60 |

ทั้งนี้ มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาการหมุนเวียนของคาร์บอนในป่าเต็งรังจากการทดลองในพื้นที่จังหวัดราชบุรี Hanpattanakit et al. (2010) ได้เก็บข้อมูลอัตราการปล่อยก๊าซ $CO_2$ จากดินเฉลี่ยในแต่ละเดือน ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 ถึง เดือนมกราคม พ.ศ. 2552 ของดินป่าเต็งรัง พบว่าอัตราปล่อยก๊าซ $CO_2$ จากการหายใจผิวดินในป่าเต็งรัง ในระยะเวลา 1 ปี มีค่าเท่ากับ 8.36 ตันคาร์บอน แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$ หรือ 30.68 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$ โดยการปล่อยแก๊ส $CO_2$ จากการหายใจผิวดินจะเกิดขึ้นมากในช่วงฤดูฝน ระหว่างเดือนพฤษภาคม-สิงหาคม เนื่องจากมีปริมาณซากพืชที่ร่วงหล่นบนพื้นจำนวนมากและสะสมบนผิวดินในช่วงฤดูแล้ง และเมื่อมีความชื้นมากขึ้นในช่วงฤดูฝน ส่งผลให้กิจกรรมต่างๆ ของสิ่งมีชีวิตในดินและพืชเริ่มต้นขึ้นอีกครั้ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Borken et al. (ค.ศ. 1999) ที่รายงานว่าการเพิ่มขึ้น

ของความชื้นในดินส่งผลให้อัตราการปล่อยก๊าซ $CO_2$ จากดินเพิ่มขึ้นและความชื้นในดินยังช่วยให้จุลินทรีย์ในดินที่อยู่ในสภาพพักตัวเนื่องจากอยู่ในสภาพดินที่แห้งสามารถทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งได้สอดคล้องกับอัตราการย่อยสลายของซากพืชที่เกิดขึ้นมากในช่วงเวลาเดียวกัน การปล่อยก๊าซ $CO_2$ จากการย่อยสลายเฉลี่ยของซากพืชส่วนใบในป่าเต็งรัง คำนวณจากปริมาณการร่วงหล่นของซากใบพืชและค่าคงที่การย่อยสลาย มีค่าเท่ากับ 9.45 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$ ซึ่งเมื่อเทียบกับการปล่อยก๊าซ $CO_2$ จากการหายใจผิวดินสู่บรรยากาศที่มีค่าเท่ากับ 30.68 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ แฮกตาร์$^{-1}$ ปี$^{-1}$ พบว่ามีค่าประมาณร้อยละ 30 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจผิวดินทั้งหมด ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 70 อาจมาจากการปล่อยก๊าซ $CO_2$ จากการหายใจของผิวดินในส่วนอื่น ได้แก่ การหายใจของราก และสัตว์ขนาดเล็กในดิน หรือการย่อยสลายซากพืชในส่วนอื่น เช่น กิ่ง ผล ลำต้น เป็นต้น

## สรุป

ผลผลิตซากพืชและการย่อยสลายซากพืชในป่าเขตเส้นศูนย์สูตรมีความสำคัญต่อการหมุนเวียนของวัฏจักรคาร์บอนในชั้นบรรยากาศ ดังนั้นวิธีการการศึกษาที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการบรรลุผลตรงตามวัตถุประสงค์การวิจัยที่ได้ตั้งไว้ อีกทั้งยังช่วยลดข้อจำกัดและข้อผิดพลาดในด้านต่างๆ เช่น ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง และช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการศึกษาวิจัย สำหรับกลไกการแลกเปลี่ยนคาร์บอนในระบบนิเวศป่าไม้ย่อมมีความสำคัญต่อการประเมินปริมาณแก๊สคาร์บอนออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งป่าในเขตเส้นศูนย์สูตรหรือในเขตร้อนชื้นนั้นถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากิจกรรมการดูดกลับและปลดปล่อยคาร์บอนในพื้นป่าเขตเส้นศูนย์สูตรมีปริมาณที่สูงกว่าป่าในเขตอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณผลผลิตและอัตราการย่อยสลายซากพืชในบริเวณนี้

## เอกสารอ้างอิง


[1] IPCC. (2007, May-July). *Global climate change.* สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2550, จาก http://www.ipcc.ch

[2] Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C. and Wisniewski, J. (1994). C pools and flux of global forest ecosystems. *Science*. 263: 185-190.

[3] Field, C.B., Behrenfeld, M.J., Randerson, J.T. and Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceans components. *Science*. 281: 237-240.

[4] Edward, P.J. (1977). Studies of mineral cycling in a mountain rain forest in New Guinea. II. The production and disappearance of litter. *Ecology*. 65: 971-992.

[5] Berg, B. and Laskowski, R. (2006). *Litter decomposition: a guide to carbon and nutrient turnover*. UK.

[6] Olson, S.S. (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological Systems. *Ecology*. 44: 322-331.

[7] Proctor, J. (1983). *Tropical litter fall I.* Problems of data comparison, pp. 267-273. In Sutton, S.L. Whitmor, T.C. e and Chadwick, A.C. Tropical Rain Forest: Ecology and Management. Blackwell Scientific Publications, Oxford.

[8] Spain, A.V. (1984). Litterfall and the standing crop of litter in three tropical Australian rain forest. *Ecology*. 72: 942-961.

[9] Hardiwinoto, S., Arianto, D. and Okimori, Y. (1996). *Litter production and nutrient input of logged over forest in the tropical rain forest of Jambi, Sumatra.* pp. 48-58. Proceeding of the FORTPOP' 96: Tropical Forestry in the 21st century. Bangkok: Kasetsart University.

[10] Chunkaew, K. and Boonyawat, S. (1980). An accumulation of litterfall and some nutrients in dry-evergreen forest Sakaerat. *Forestry Research Bulletin*. 66: 1-24.

[11] Boonyawat, S. and Ngampongsai, C. (1974). Analysis of accumulation and decomposition of litter in a hill evergreen forest, Doi Pui, Chiang Mai. *Kogma Watershed Research Bulletin*. p. 17.

[12] Thaiutsa, B., Suwannapinunt, W. and Kaitpraneet, W. (1978). Production and chemical composition of forest litter in Thailand. *Forestry Research Bulletin*. p. 52.

[13] Kooha, B. (1983). *Production and decomposition rate of litter in mangrove near tin mining area and natural mangrove forest*, *Ranong Province.* M.S. Thesis, Kasetsart University. Photocopied.

[14] Bunyavejchewin, S. and Nuyim, T. (1996). Litterfall and nutrient content in Toh-Daeng primary peat swamp forest at Narathiwat province. *Thailand Journal Forest*. 15: 37-47.

[15] Aksornkaew, S., Khemnark, C. and Kaewla-iad, T. (1972). Study on organic matter in teak Plantation. *Forestry Research Bulletin*. p. 23.

[16] Jampanin, S. (2004). *Comparison of litter production and litter decomposition for carbon sequestration assessment in forest ecosystems at Kaeng Krachan National Park, Thailand.* M.S. Thesis. Chulalongkorn University.

[17] Hanpattanakit, P., Chidthaisong, A. and Sanwangsree, M. (2010). *Leaf litter decomposition and $CO_2$ emission from dry dipterocarp forest soil, Ratchaburi Province.* Proceeding of Climate Thailand Conference 2010: National Risks and Opportunities in global Climate Change, Bangkok, Thailand.

[18] Suksawang, S. (1989). *Nutrient Circulation of the Dry Evergreen Forest at Huay Hin Dard Watershed Research Station, Changwat Rayong.* M.S. Thesis, Kasetsart University.

[19] Jamroenprucksa, M. (1981). *Net Primary Production of Dry Evergreen Forest at Namprom Basin, Chaiyapoom Province.* M.S. Thesis, Kasetsart University.

[20] Chinsukjaiprasert, T. (1984). *Nutrient Circulation of the Dry Evergreen Forest at Sakaerat.* M.S. Thesis, Kasetsart University.

[21] Tanee S. (1997). *Nutrient cycle in dry evergreen and mixed deciduous forest in Kow Ang-runi wildlife national reserve, Chachengchow province.* M.S. Thesis, Chulalongkorn University.

[22] O' Neill, R.V. and D.L. DeAngelis. (1980). *Comparative productivity and biomass relations of forest Ecosystems.* In D. Reichle, ed. Dynamic properties of forest ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge.

[23] Liu, C., Westman, C.J., Berg, B., Kutsch, W., Wang, G.Z., Man, R. and Ilvesniemi, H. (2004). Variation in litter-climate relationships between coniferous and broadleaf forests in Eurasia. *Global Ecology Biogeography.* 13: 105-114.

[24] Sakai, M. and Tsutsumi, T. (1986). Carbon cycles of two soil types in cool temperate forest in Japan ( I ). Litter-fall. *Journal Japan Forest Society*. 68: 1-9

[25] Gonzalez, G. and Seastedt, T. R. (2000). Soil fauna and plant litter decomposition in tropical and subalpine forests. *Ecology*. 82: 955-964.

[26] Remezov, N.P. (1964). Decomposition of forest litter and the cycle of elements in an oak forest. *Soviet Soil Science.* 7: 703-711.

[27] Prescott, C.E. et al. (2004). Influence of initial chemistry on decomposition of foliar litter in contrasting forest type in British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research.* 34: 1714-1729.

[28] Glumphabutr, P. (2004). *Nutrients dynamics of natural evergreen forests in eastern region of Thailand*. Ph.D. (Forestry) Thesis, Kasetsart University.

[29] Landsberg, J.J. and Gower, S.T. (1997). *Applications of Physiological Ecology to Forest Management.* Academic Press, New York.

[30] Taylor, B. et al. (1989). Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: A microcosm test. *Ecology*.

[31] ภาณุมาศ ลาดปาละ. (2549). ผลผลิตซากพืชของป่าเบญจพรรณ สถานีวิจัยลุ่มน้ำแม่กลอง. ใน *รวมผลงานวิจัยการศึกษาวัฏจักรคาร์บอนในป่าดิบแล้งสะแกราชและป่าเบญจพรรณลุ่มน้ำแม่กลอง*. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.