



The Canonical Solar Photosynthesis Geometry Model (CS-PGM): A Deterministic Framework for Quantifying the Absolute Physical Limits of Crop Yield Efficiency

Phisit Suvarnaphaet^{1,*}

¹*Faculty of Animal Sciences and Agricultural Technology, Silpakorn University, Phetchaburi IT Campus*

**Email: suvarnaphaet_p@su.ac.th*

Received <29 Oct. 2025>; Revised <27 Mar. 2026>; Accepted <30 Mar. 2026>

Abstract

Global agricultural output is constrained by the efficiency with which crops convert solar radiation into biomass through Photosynthetically Active Radiation (PAR). Existing crop models, often empirical, frequently incorporate confounding atmospheric and environmental variables, obscuring the fundamental physical limitation imposed by solar geometry. This research introduces the Canonical Solar Photosynthesis Geometry Model (CS-PGM), a deterministic, zero-external-data mathematical framework designed to calculate the Theoretical Maximum Potential Yield (TMPY) for any location on Earth. The CS-PGM rigorously integrates celestial mechanics (H_0), a postulated Canonical Atmosphere ($T_{\text{total}} \approx 0.72$), and the established Light Use Efficiency (LUE) principle ($\text{LUE}_{\text{max}} = 4.8 \text{ g MJ}^{-1} \text{ PAR}$ for C4 plants). These canonical constants represent the absolute thermodynamic limits and optimal clear-sky transmittance, stripping away empirical weather noise. The model's primary contribution is the establishment of a universal, non-empirical benchmark for yield potential, enabling the precise quantification of the Theoretical Yield Gap (TYG). The results confirm the mathematical phenomenon of Isophotic Peak Shifting, showing that TMPY peaks at mid-latitudes (e.g., 74.6 t ha^{-1} at 16° (N/S) for a 120-day season), significantly higher than at the equator (69.0 t ha^{-1}). This demonstrates mathematically that the absolute physical ceiling for biomass is not located at the equator. This transparent, physics-based framework provides policymakers and agricultural researchers with a powerful diagnostic tool for strategic resource allocation, by isolating the maximum potential yield from environmental variability.

Keywords: Theoretical Yield Gap; Solar Geometry; Photosynthesis; Canonical Model; Absolute Yield Limit

แบบจำลองเรขาคณิตการสังเคราะห์ด้วยแสงจากแสงอาทิตย์เชิงบัญญัติ (CS-PGM): กรอบแนวคิดเชิงกำหนดเพื่อหาขีดจำกัดทางฟิสิกส์สมบูรณ์ของประสิทธิภาพผลผลิตพืช

พิสิษฐ์ สุวรรณแพทย์^{1,*}

¹คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตสารสนเทศเพชรบุรี

*Email: suvarnapaet_p@su.ac.th

บทคัดย่อ

ผลผลิตทางการเกษตรทั่วโลกถูกจำกัดด้วยประสิทธิภาพในการแปลงรังสีดวงอาทิตย์เป็นชีวมวลของพืช โดยที่ความแปรปรวนของสภาพอากาศจริงมักจะบดบังขีดจำกัดทางฟิสิกส์พื้นฐานที่กำหนดโดยเรขาคณิตของดวงอาทิตย์ แบบจำลองพืชที่มีอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่มักเป็นเชิงประจักษ์และต้องรวมตัวแปรบรรยากาศและสิ่งแวดล้อมที่ผันผวน ทำให้การกำหนด เพดานทางฟิสิกส์สมบูรณ์ มีความคลุมเครือ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอ แบบจำลองเรขาคณิตการสังเคราะห์ด้วยแสงจากแสงอาทิตย์เชิงบัญญัติ (CS-PGM) ซึ่งเป็นกรอบแนวคิดทางคณิตศาสตร์เชิงกำหนด (Deterministic) ที่ไม่ต้องอาศัยข้อมูลภายนอก (Zero-External-Data) ออกแบบมาเพื่อคำนวณ ผลผลิตศักยภาพสูงสุดเชิงทฤษฎี (TMPY) สำหรับทุกตำแหน่งบนโลก CS-PGM ผสมผสานกลศาสตร์ท้องฟ้า (H_o), สมมติฐานบรรยากาศเชิงบัญญัติ (T_{total}), และหลักการประสิทธิภาพการใช้แสง (LUE) ที่เป็นที่ยอมรับ (LUE_{max}) โดยใช้ค่าคงที่ $T_{total} \approx 0.72$ ซึ่งเป็นค่าการส่องผ่านทางทฤษฎีสูงสุด และ LUE_{max} ที่ $4.8 \text{ g MJ}^{-1} \text{ PAR}$ สำหรับพืช C4 การใช้ค่าคงที่เหล่านี้มีจุดประสงค์เพื่อตัดตัวแปรแทรกซ้อนทางสภาพอากาศออก และสะท้อนถึงขีดจำกัดทางอุณหพลศาสตร์สูงสุดที่เป็นไปได้ การสนับสนุนหลักของแบบจำลองคือการสร้าง เกณฑ์มาตรฐานสากลและที่ไม่ใช่เชิงประจักษ์ สำหรับศักยภาพผลผลิต ทำให้สามารถหา ช่องว่างผลผลิตเชิงทฤษฎี ได้อย่างแม่นยำ ผลการวิจัยยืนยันปรากฏการณ์ การเลื่อนตัวของจุดสูงสุดพลังงานแสง (Isophotic Peak Shifting) โดย TMPY มีค่าสูงสุดที่ละติจูด 16° (N/S) โดยให้ผลผลิต $74.6 \text{ ตันต่อเฮกตาร์}$ สำหรับฤดูปลูก 120 วัน ซึ่งสูงกว่าที่เส้นศูนย์สูตร (69.0 t ha^{-1}) อย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์นี้พิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ว่าขีดจำกัดทางฟิสิกส์สมบูรณ์ของชีวมวลไม่ได้อยู่ที่เส้นศูนย์สูตร กรอบแนวคิดที่โปร่งใสและอิงหลักฟิสิกส์นี้เป็นเครื่องมือวิจัยที่มีประสิทธิภาพสำหรับผู้กำหนดนโยบายและนักวิจัยทางการเกษตรในการจัดสรรทรัพยากรอย่างมีกลยุทธ์

คำสำคัญ: ช่องว่างผลผลิตเชิงทฤษฎี; เรขาคณิตของดวงอาทิตย์; การสังเคราะห์ด้วยแสง; แบบจำลองเชิงบัญญัติ; ขีดจำกัดผลผลิตสมบูรณ์

บทนำ

ผลผลิตทางการเกษตรทั่วโลกกำลังเผชิญความท้าทายสำคัญในการตอบสนองความต้องการอาหารที่เพิ่มขึ้น ภายใต้ข้อจำกัดด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การขาดแคลนทรัพยากร และพื้นที่เพาะปลูกที่จำกัด ในมิติทางชีวฟิสิกส์ กระบวนการพื้นฐานที่กำหนดปริมาณชีวมวลและผลผลิตสูงสุดของพืชคือการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งถูกจำกัด (Van Wart *et al.*, 2013) โดยปริมาณรังสีแสงที่พืชใช้ได้ (Photosynthetically Active Radiation: PAR) ตลอดช่วงฤดูปลูก (Zhu, Long and Ort, 2010; Long *et al.*, 2006) ปัจจุบัน การประเมินศักยภาพผลผลิต (Yield Potential: Yp) มักอาศัยแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช (Crop Simulation Models) ที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เช่น DSSAT (Jones *et al.*, 2003), APSIM (Holzworth *et al.*, 2014) หรือ WOFOST (Van Ittersum *et al.*, 2003) ซึ่งส่วนใหญ่ทำงานบนพื้นฐานของประสิทธิภาพการใช้รังสี (Radiation Use Efficiency: RUE) โดยรับข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์รวม (Global Radiation) และตัวแปรสภาพอากาศที่วัดได้จริงมาประมวลผล การใช้ข้อมูลเชิงประจักษ์เหล่านี้ช่วยให้แบบจำลองสามารถคาดการณ์ผลผลิตภายใต้สภาพแวดล้อมของแต่ละท้องถิ่นได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม การนำตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาที่ผันผวน (เช่น ความหนาแน่นของเมฆ หรือปริมาณฝนละออง) มาร่วมคำนวณ กลับสร้างความคลุมเครือในการระบุเพดานผลผลิตสูงสุดทางฟิสิกส์สมบูรณ์ (Theoretical Maximum Potential Yield: TMPY) ซึ่งในทางทฤษฎีควรถูกกำหนดโดย “เรขาคณิตของดวงอาทิตย์ (Solar Geometry)” เท่านั้น ทั้งนี้ คำว่าเรขาคณิตของดวงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ หมายถึงกลุ่มพารามิเตอร์ทางกลศาสตร์ท้องฟ้าที่ควบคุมปริมาณรังสีนอกโลก (Extraterrestrial Radiation: H_0) ได้แก่ ละติจูด (ϕ) มุมเดคลิเนชัน (δ) และมุมชั่วโมงดวงอาทิตย์ตก (ω_s)

จากช่องว่างดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองเรขาคณิตการสังเคราะห์ด้วยแสงจากแสงอาทิตย์เชิงบัญญัติ (CS-PGM) ซึ่งเป็นกรอบแนวคิดทางคณิตศาสตร์เชิงกำหนด (Deterministic framework) ที่พัฒนาขึ้นภายใต้แนวคิดการไม่พึ่งพาข้อมูลสภาพอากาศภายนอก (Zero-External-Data) แบบจำลองนี้ออกแบบมาเพื่อคำนวณค่า TMPY โดยกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาที่ละติจูด 0 ถึง 60 องศา (N/S) เนื่องจากเป็นโซนที่ครอบคลุมพื้นที่เพาะปลูกหลักของโลก (Global Arable Land) สำหรับพื้นที่ในละติจูดที่สูงกว่า 60 องศาขึ้นไป จะมีข้อจำกัดรุนแรงเรื่องอุณหภูมิที่หนาวเย็นและฤดูปลูกที่สั้นเกินไป ซึ่งอยู่นอกเหนือสมมติฐานการผลิตชีวมวลสูงสุดของแบบจำลองนี้ CS-PGM บูรณาการหลักการสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ (1) กลศาสตร์ท้องฟ้าสำหรับคำนวณรังสีนอกโลก (H_0) , (2) สมมติฐานบรรยากาศเชิงบัญญัติที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การส่องผ่านสูงสุดทางทฤษฎี ($T_{total} \approx 0.72$) และ (3) หลักการ LUE สูงสุด โดยกำหนดค่า LUE_{max} ของพืชกลุ่ม C4 ไว้ที่ $4.8 \text{ g MJ}^{-1} \text{ PAR}$ การเลือกใช้สมมติฐานและพารามิเตอร์คงที่เหล่านี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อจำลองสภาวะอุดมคติที่ปราศจากสิ่งกีดขวางทางชั้นบรรยากาศและไร้ข้อจำกัดทางสรีรวิทยา ทำให้สามารถประเมินเพดานผลผลิตสูงสุดทางอุณหพลศาสตร์ที่ถูกกำหนดโดยข้อจำกัดของพลังงานแสงอาทิตย์เพียงปัจจัยเดียวได้อย่างแท้จริง

เป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือการสร้างเกณฑ์มาตรฐานสากลเชิงคณิตศาสตร์ที่ไม่ใช่การประมาณการเชิงประจักษ์ เพื่อให้สามารถประเมินศักยภาพผลผลิตพืชได้จากหลักฟิสิกส์บริสุทธิ์ (Loomis and Amthor, 1999) การค้นพบค่า TMPY ที่เป็นอิสระจากความแปรปรวนของสภาพอากาศ จะช่วยให้นักวิจัยและผู้กำหนดนโยบายสามารถแยกแยะระหว่างข้อจำกัดทางฟิสิกส์ที่ไม่อาจแก้ไขได้ (เช่น สภาพแสงตามกลศาสตร์ท้องฟ้า) กับข้อจำกัดทางสภาพอากาศหรือการจัดการที่สามารถปรับปรุงได้นอกจากนี้ยังช่วยให้คำนวณช่องว่างผลผลิตเชิงทฤษฎี (Theoretical Yield Gap: TYG) ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการวางแผนยุทธศาสตร์และจัดสรรทรัพยากรเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการเกษตรได้อย่างตรงจุด

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนารอบแนวคิดทางคณิตศาสตร์เชิงกำหนดที่ปราศจากการใช้ข้อมูลสภาพอากาศนำเข้า (Zero-External-Data Deterministic Framework) หรือแบบจำลอง CS-PGM โดยบูรณาการหลักกลศาสตร์ท้องฟ้าและค่าคงที่ทางชีวฟิสิกส์เชิงบัญญัติ (Canonical Constants) เข้าด้วยกันเพื่อจำลองศักยภาพผลผลิตพืช
2. เพื่อคำนวณและสร้างเกณฑ์มาตรฐานสากลของผลผลิตศักยภาพสูงสุดเชิงทฤษฎี (Theoretical Maximum Potential Yield: TMPY) ภายใต้ขอบเขตพื้นที่เพาะปลูกหลักของโลกตั้งแต่ละติจูดที่ 0 ถึง 60 องศา (N/S) โดยให้เป็นค่าที่ถูกจำกัดด้วยปัจจัยทางฟิสิกส์ของเรขาคณิตดวงอาทิตย์โดยสมบูรณ์
3. เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของค่า TMPY ตามการเปลี่ยนแปลงของละติจูด (N/S) สำหรับระบุตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ที่เป็นขีดจำกัดทางฟิสิกส์สมบูรณ์ (Absolute Physical Ceiling) ของการผลิตชีวมวล และอธิบายกลไกการเกิดปรากฏการณ์ Isophotic Peak Shifting

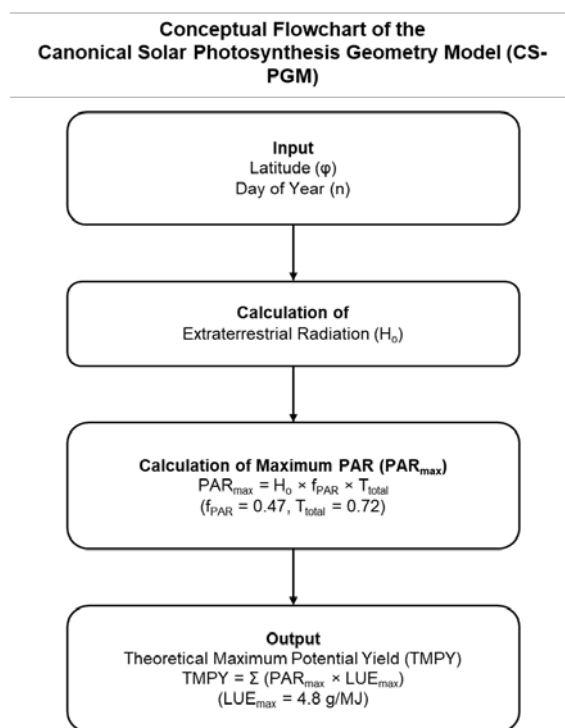
4. เพื่อประยุกต์ใช้ค่า TMPY ที่คำนวณได้เป็นเครื่องมือวินิจฉัยในการกำหนดช่องว่างผลผลิตเชิงทฤษฎี (Theoretical Yield Gap: TYG) ซึ่งจะช่วยแยกแยะความแตกต่างระหว่างข้อจำกัดทางฟิสิกส์สภาพแสงที่ไม่อาจแก้ไขได้ กับข้อจำกัดทางสภาพอากาศจริงที่สามารถจัดการได้ เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการวางแผนส่งเสริมการเกษตรเชิงยุทธศาสตร์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. กรอบแนวคิดของแบบจำลอง (CS-PGM Conceptual Framework)

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงคณิตศาสตร์และแบบจำลอง (Mathematical and Modeling Research) โดยมีระเบียบวิธีหลักในการพัฒนาแบบจำลองเรขาคณิตการสังเคราะห์ด้วยแสงจากแสงอาทิตย์เชิงบัญญัติ (CS-PGM) เพื่อคำนวณผลผลิตศักยภาพสูงสุดเชิงทฤษฎี (TMPY) ขั้นตอนการทำงานหลักแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 1 ได้แก่:

1. การรับข้อมูลนำเข้าและใช้กลศาสตร์ท้องฟ้าคำนวณรังสีดวงอาทิตย์รายวันนอกโลก (H_0)
2. การแปลงค่า H_0 เป็นรังสีแสงที่พืชใช้ได้สูงสุด (PAR_{max}) ภายใต้สมมติฐานการส่องผ่านเชิงบัญญัติ
3. การประยุกต์ใช้หลักการประสิทธิภาพการใช้แสง (LUE) เพื่อแปลง PAR_{max} เป็นชีวมวล (TMPY)



ภาพที่ 1 Conceptual Flowchart

2. การคำนวณรังสีดวงอาทิตย์

2.1 ตัวแปรนำเข้า (Input Variables)

- ละติจูด (ϕ): กำหนดขอบเขตการคำนวณตั้งแต่ 0° ถึง 60° เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่เพาะปลูกหลักทางการเกษตรทั้งในซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้
- วันของปี (n): กำหนดเป็นฤดูปลูกสมมติ (Canonical Growing Season: CGS) ที่มีระยะเวลา 120 วัน ระยะเวลาดังกล่าวอ้างอิงจากวงจรชีวิตเฉลี่ยของพืชไร่กลุ่ม C4 ที่มีการเจริญเติบโตเร็วและให้ปริมาณชีวมวลสูง (เช่น ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ หรือข้าวฟ่าง) การตรึงกรอบเวลาไว้คงที่ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบศักยภาพการรับแสงข้ามละติจูดบนฐานเวลาเดียวกันได้อย่างเป็นรูปธรรม สำหรับวันเริ่มต้นฤดูปลูก (Day 1) กำหนดให้เป็นวันที่ดวงอาทิตย์ให้พลังงานรังสีสูงสุดในรอบปีของแต่ละละติจูด กล่าวคือ พื้นที่ในซีกโลกเหนือจะเริ่มต้นในช่วงวันครีษมายัน (Summer Solstice) ในขณะที่ซีกโลกใต้จะเริ่มต้นในช่วงวันเหมายัน (Winter Solstice) เพื่อให้แบบจำลองครอบคลุมช่วงเวลา 120 วันที่พื้นที่นั้น ๆ ได้รับความยาวนานของวันสูงสุด

2.2 การคำนวณรังสีดวงอาทิตย์รายวันนอกโลก (H_o)

รังสีดวงอาทิตย์นอกโลก H_o (หน่วย: MJ m⁻² day⁻¹) คำนวณตามหลักกลศาสตร์ท้องฟ้าด้วยสมการของ Duffie and Beckman (2013) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของละติจูด (ϕ), มุมเดคลิเนชัน (δ), และระยะทางโลกระหว่างดวงอาทิตย์ (E_o):

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} E_o [\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s]$$

โดยที่ G_{sc} คือ ค่าคงที่สุริยะ (Solar Constant) (1,367 W/m²) ω_s คือมุมชั่วโมงดวงอาทิตย์ตก ทั้งนี้ เพื่อความแม่นยำในระยะยาวและรองรับความคลาดเคลื่อนในปีอธิกสุรทิน (Leap year) ตัวแปรวันจะถูกระบุในรูปแบบวันที่จูเลียน (Julian Date: J) เพื่อนำมาใช้คำนวณค่ามุมเดคลิเนชัน (δ) ตามสมการ: $\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365.25} (284 + J) \right]$ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ในแต่ละวันตลอดฤดูปลูกอย่างเป็นพลวัต

3. การคำนวณศักยภาพรังสีสูงสุด (PAR_{max})

ขั้นตอนนี้เป็นแปลงค่า H_o ให้เป็น PAR_{max} ซึ่งคือปริมาณรังสีแสงสูงสุดที่พืชสามารถนำไปใช้สังเคราะห์ด้วยแสงได้ภายใต้สภาวะท้องฟ้าใสบริสุทธิ์ (Clear sky) โดยปรับแก้ด้วยพารามิเตอร์เชิงบัญญัติ (Canonical Constants) ดังสมการ:

$$PAR_{max} = H_o \times f_{PAR} \times T_{total}$$

โดยสัดส่วนของ PAR (f_{PAR}) ถูกกำหนดไว้ที่ 0.47 (McCree, 1972) และการส่องผ่านเชิงบัญญัติ (T_{total}) กำหนดไว้ที่ค่า ≈ 0.72 การเลือกใช้ค่า $T_{total} \approx 0.72$ มีพื้นฐานมาจากค่าสัมประสิทธิ์การส่องผ่านทางทฤษฎีสูงสุด (Gueymard, 2003) ซึ่งเปรียบเสมือนท้องฟ้าอุดมคติที่ปราศจากเมฆ หมอกควัน หรือไอน้ำรบกวน เพื่อสร้างเพดานการรับแสงสูงสุดที่ตัดข้อจำกัดทางอุณหพลศาสตร์ทิ้งไปโดยสิ้นเชิง ค่า PAR_{max} รายวันที่คำนวณได้จะถูกใช้เป็นฐานในการประเมินผลผลิตต่อไป

4. การคำนวณผลผลิตศักยภาพสูงสุดเชิงทฤษฎี (TMPY)

ประเมินผลผลิตตามหลักการของแบบจำลองประสิทธิภาพการใช้แสง (LUE Model) ของ Monteith (1977) โดยอินทิเกรตค่า PAR_{max} รายวันตลอดช่วงฤดูปลูก 120 วัน ($n=1$ ถึง 120):

$$TMPY = \sum_{n=1}^{120} (PAR_{max} \times LUE_{max} \times \epsilon_i)$$

ประสิทธิภาพการสกัดกั้นแสง (ϵ_i) กำหนดเป็น 1.0 ตลอดฤดูปลูก ส่วนค่า LUE_{max} กำหนดไว้ที่ 4.8 g MJ⁻¹ PAR ซึ่งเป็นขีดจำกัดสูงสุดทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic limit) สำหรับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช C4 ในสภาวะที่ไม่มี ความเครียดจากน้ำ ธาตุอาหาร หรืออุณหภูมิ (Zelitch, 1992; Slattery and Ort, 2015)

5. การวิเคราะห์ผลลัพธ์

ดำเนินการรันแบบจำลองเพื่อประเมินค่า TMPY ตลอดช่วงละติจูด 0° ถึง 60° (N/S) โดยวิเคราะห์หาระดับผลผลิตชีวมวลรวมตลอดฤดูปลูก (Total PAR Integration) เพื่อระบุจุดสูงสุดสัมบูรณ์ (Absolute Peak) และอธิบายกลไกทางฟิสิกส์ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Isophotic Peak Shifting

6. การดำเนินการและเครื่องมือทางคอมพิวเตอร์ (Computational Implementation and Tools)

การทำงานของแบบจำลอง CS-PGM ดำเนินการผ่านการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Python ในสภาพแวดล้อม Google Colaboratory อัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ถูกออกแบบให้คำนวณค่า H_o และ PAR_{max} แบบรายวันอย่างละเอียด (Daily Integration) ตลอด 120 วัน โดยใช้ไลบรารีทางวิทยาศาสตร์ (NumPy และ Pandas) เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนจากการใช้ค่าเฉลี่ยแบบหยาบ ข้อมูลผลลัพธ์ที่ผ่านการสอบเทียบความถูกต้องตามหลักกลศาสตร์ท้องฟ้าถูกส่งออกเพื่อวิเคราะห์และนำเสนอเชิงกราฟิก

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การกระจายตัวของ TMPY และการค้นพบจุดสูงสุดเชิงทฤษฎี

ผลการประมวลผลค่าผลผลิตศักยภาพสูงสุดเชิงทฤษฎี (TMPY) สำหรับฤดูปลูก 120 วัน จากแบบจำลอง CS-PGM แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการกระจายตัวตามละติจูดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear distribution) ซึ่งเป็นผลสะท้อนโดยตรงจากพลวัตของเรขาคณิตดวงอาทิตย์ อันเป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบของแสงและความยาวนานของวัน ดังที่แสดงในตารางที่ 1 จากการสอบเทียบอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์อย่างละเอียดตามหลักกลศาสตร์ท้องฟ้า พบว่าค่า TMPY มีความผันผวนอย่างชัดเจน โดยมีค่าสูงสุดสมบูรณ์ (Absolute Peak) อยู่ที่ละติจูด 16° (N/S) ซึ่งให้ผลผลิตสูงถึง 74.6 t ha⁻¹ ต่อฤดูปลูก ในขณะที่ผลผลิตศักยภาพที่เส้นศูนย์สูตร (0°) มีค่าเพียง 69.0 t ha⁻¹ ต่อฤดูปลูก (ตารางที่ 1) การค้นพบนี้เป็นการตอกย้ำด้วยหลักฐานทางคณิตศาสตร์ว่า เพดานทางฟิสิกส์สมบูรณ์สำหรับการผลิตชีวมวลของพืช C4 ไม่ได้กระจุกตัวอยู่ที่บริเวณที่ดวงอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากที่สุดเพียงอย่างเดียว

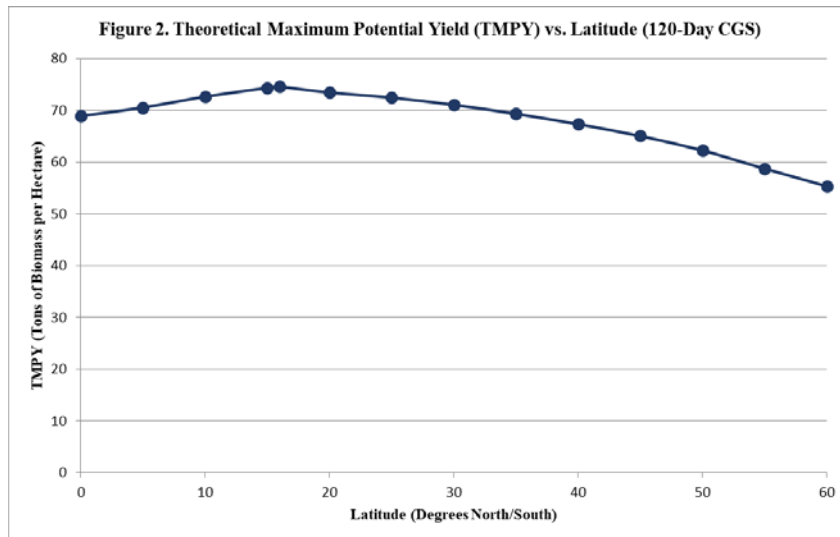
ตารางที่ 1 ผลการคำนวณ TMPY ที่ละติจูดสำคัญตามแบบจำลอง CS-PGM

Latitude (ϕ)	Average Daily H_o (MJ/m ²)	Average Daily PAR_{max} (MJ/m ²)	Total PAR (MJ/m ² /CGS)	TMPY (t ha ⁻¹ season ⁻¹)
0°	35.39	11.97	1,437	69.0
16° (Peak)	38.25	12.94	1,553	74.6
20°	37.73	12.77	1,532	73.5
25°	37.17	12.58	1,509	72.5
35°	35.60	12.05	1,446	69.4
60°	28.44	9.62	1,155	55.4

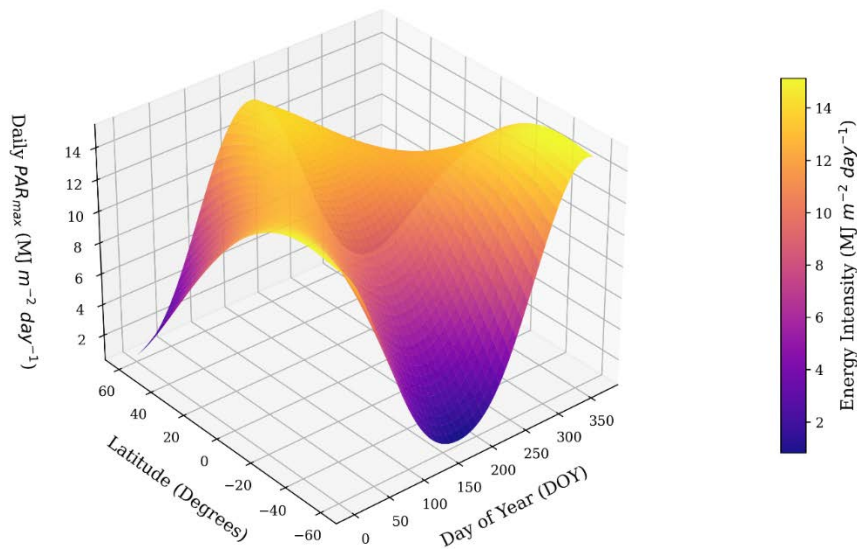
การอธิบายปรากฏการณ์ Isophotic Peak Shifting

ผลการคำนวณในตารางที่ 1 และรูปแบบโค้งพาราโบลาในภาพที่ 2 เป็นการยืนยันถึงการมีอยู่ของปรากฏการณ์ Isophotic Peak Shifting กลไกหลักทางฟิสิกส์ที่ขับเคลื่อนปรากฏการณ์นี้ เกิดจากการต้านทานกัน (Trade-off) ระหว่าง “ความเข้มแสง” และ “ระยะเวลาสะสมแสง” กล่าวคือ แม้บริเวณเส้นศูนย์สูตร (0°) จะได้รับความเข้มของแสงดวงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่สูงสุด แต่กลับถูกจำกัดด้วยความยาวนานของวัน (Daylength) ที่คงที่เพียงประมาณ 12 ชั่วโมงตลอดทั้งปี ในทางกลับกัน เมื่อขยับขึ้นไปทีละละติจูด 16° ถึง 20° (N/S) ในช่วงฤดูปลูก (ซึ่งเริ่มต้นในช่วงวันครีษมายันหรือวันเหมายัน) พื้นที่เหล่านี้จะได้รับประโยชน์จากความยาวนานของวันที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (มากกว่า 13 ชั่วโมงต่อวัน) เมื่อนำมาอินทิเกรตเพื่อหาผลรวมของการสะสมพลังงาน (Total PAR Integration) ตลอดระยะเวลา 120 วัน จึงส่งผลให้พลังงานแสงสะสมรวมมีค่าสูงกว่าที่เส้นศูนย์สูตรอย่างชัดเจน

เพื่ออธิบายกลไกทางฟิสิกส์ที่อยู่เบื้องหลังปรากฏการณ์ Isophotic Peak Shifting ให้เห็นภาพชัดเจนยิ่งขึ้น ภาพที่ 3 แสดงการกระจายตัวเชิงพื้นที่และเวลาแบบ 3 มิติของปริมาณรังสีแสงที่พืชใช้ได้สูงสุดรายวัน (PAR_{max}) ซึ่งสะท้อนถึงอิทธิพลของเรขาคณิตดวงอาทิตย์อย่างเป็นพลวัต พื้นผิวโค้ง (Surface plot) นี้แสดงให้เห็นถึง "เทือกเขาพลังงาน" ที่ไม่ได้แบนราบ แต่มีจุดยอด (Peak) อยู่ในช่วงกลางปี (รอบวันครีษมายัน) สำหรับซีกโลกเหนือ และช่วงปลายปี/ต้นปี (รอบวันเหมายัน) สำหรับซีกโลกใต้ การที่แบบจำลอง CS-PGM กำหนดให้ฤดูปลูก 120 วันเริ่มต้นในช่วงเวลาดังกล่าว จึงเปรียบเสมือนการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟในบริเวณที่สูงที่สุดของเทือกเขานี้ ซึ่งความกว้างของฐานเทือกเขา (ความยาวนานของวัน) ที่ละติจูด 16° ถึง 20° (N/S) มีอิทธิพลต่อการสะสมพลังงานรวมเหนือกว่าความเข้มแสงที่จุดศูนย์สูตรอย่างชัดเจน



ภาพที่ 2 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่าง TMPY และละติจูด



ภาพที่ 3 การกระจายตัวเชิงพื้นที่และเวลาแบบ 3 มิติของปริมาณรังสีแสงที่พืชใช้ได้สูงสุดรายวัน (PAR_{max}) ตามละติจูดและวันของปี (DOY)

คุณค่าทางนวัตกรรมการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ช่องว่างผลผลิต

แบบจำลอง CS-PGM มีนวัตกรรมที่โดดเด่นในการสร้างเกณฑ์มาตรฐานเชิงบัญญัติ (Canonical Benchmark) ที่เป็นอิสระจากความผันผวนของสภาพอากาศจริง (Zero-External-Data) ทำให้สามารถกำหนดช่องว่างผลผลิตเชิงทฤษฎี (Theoretical Yield Gap: TYG) ได้อย่างแม่นยำ (Lobell, Cassman and Field, 2009) โดยคำนวณจากสมการ $TYG = TMPY - Y_{actual}$ (เมื่อ Y_{actual} คือผลผลิตที่วัดได้จริงในพื้นที่)

เพื่อให้เห็นภาพการประยุกต์ใช้อย่างเป็นรูปธรรม เมื่อนำค่า TMPY สูงสุดที่คำนวณได้ (74.6 t ha^{-1}) ไปเปรียบเทียบกับสถิติผลผลิตจริงสูงสุดระดับโลก (World Record Yields) ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ซึ่งเป็นตัวแทนของพืช C4 ที่มีประสิทธิภาพสูง พบว่าสถิติโลกปัจจุบันที่ปลูกภายใต้การจัดการเชิงประจักษ์ขั้นสูงในสภาพอากาศจริง มักจะให้ผลผลิตสูงสุดอยู่ที่ไม่เกิน $35\text{--}40 \text{ t ha}^{-1}$ การเปรียบเทียบนี้สะท้อนให้เห็นว่า แม้จะมีการจัดการธาตุอาหารและระบบชลประทานอย่างสมบูรณ์แบบ แต่ผลผลิตจริงยังคงห่างจากเพดานทางฟิสิกส์สมบูรณ์อยู่เกือบ 50% ช่องว่างขนาดใหญ่ (TYG) อธิบายได้ด้วยการสูญเสียพลังงานจากการดูดกลืนและการกระเจิงของแสงโดยชั้นบรรยากาศ (Atmospheric transmittance loss) ที่เกิดจากเมฆและละอองลอยในสภาพแวดล้อมจริง รวมถึงขีดจำกัดในการกระจายแสงเข้าสู่ทรงพุ่มของพืช (Canopy light interception)

ข้อค้นพบนี้จึงถือเป็นเครื่องมือวิจัยเชิงยุทธศาสตร์ที่สำคัญ สำหรับผู้กำหนดนโยบายในการประเมินขีดจำกัดสูงสุดที่เป็นไปได้ของการผลิตอาหาร เพื่อประกอบการพิจารณาจัดสรรความสำคัญและการลงทุนในเทคโนโลยีการเกษตร เช่น การพัฒนาสภาพแวดล้อมควบคุม (Controlled Environment Agriculture) ให้เหมาะสมกับศักยภาพทางกลศาสตร์ท้องฟ้าในแต่ละพื้นที่

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะจากการวิจัย

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาแบบจำลองเรขาคณิตการสังเคราะห์ด้วยแสงจากแสงอาทิตย์เชิงบัญญัติ (CS-PGM) ซึ่งเป็นกรอบแนวคิดทางคณิตศาสตร์เชิงกำหนดที่ปราศจากการพึ่งพาข้อมูลสภาพอากาศจริง (Zero-External-Data) แบบจำลองดังกล่าวสามารถระบุพาดานทางฟิสิกส์สมบูรณ์สำหรับศักยภาพผลผลิตพืช C4 บนโลกได้อย่างเป็นรูปธรรม ภายใต้ขอบเขตพื้นที่เพาะปลูกหลักของโลกตั้งแต่ละติจูด 0° ถึง 60° (N/S)

ผลการวิจัยหลักที่ได้จากการสอบเทียบอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ สามารถสรุปได้ดังนี้:

1. จุดสูงสุดเชิงทฤษฎี (Absolute Physical Ceiling): ค่าผลผลิตศักยภาพสูงสุดเชิงทฤษฎี (TMPY) ที่สะสมตลอดฤดูปลูก 120 วัน มีค่าสูงสุดสมบูรณ์อยู่ที่ 74.6 t ha^{-1} โดยจุดสูงสุดนี้ไม่ได้อยู่ที่เส้นศูนย์สูตร แต่เกิดขึ้นที่ละติจูด 16° (N/S) ซึ่งจัดเป็นพาดานผลผลิตชีวมวลทางอุณหพลศาสตร์ที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้บนโลก
2. ปรากฏการณ์ Isophotic Peak Shifting: งานวิจัยยืนยันทางคณิตศาสตร์ว่า TMPY ที่ละติจูด 16° สูงกว่าที่เส้นศูนย์สูตร (0°) ซึ่งมีค่า 69.0 t ha^{-1} อยู่ประมาณ 8.1% ปรากฏการณ์นี้เป็นผลมาจากอิทธิพลของ “ความยาวนานของวัน” ในช่วงฤดูปลูก (ซึ่งเริ่มต้นในช่วงวันครีษมายันหรือวันเพ็ญ) บริเวณละติจูด 16° ถึง 20° จะมีความยาวนานของวันเฉลี่ยที่สมดุลและเอื้อต่อการสะสมพลังงานแสงรวมตลอด 120 วัน ได้เหนือกว่าบริเวณเส้นศูนย์สูตรที่มีกลางวันยาวเพียง 12 ชั่วโมงคงที่
3. เกณฑ์มาตรฐานใหม่สำหรับการวิเคราะห์ช่องว่างผลผลิต: การใช้พารามิเตอร์เชิงบัญญัติ (เช่น $T_{\text{total}} \approx 0.72$ และ $LUE_{\text{max}} = 4.8 \text{ g/MJ}$) ช่วยสร้างเกณฑ์มาตรฐานสากลที่เป็นอิสระจากสภาพอากาศจริง ทำให้สามารถนำค่า TMPY ไปประเมิน “ช่องว่างผลผลิตเชิงทฤษฎี (TYG)” เทียบกับผลผลิตจากฐานข้อมูลจริงได้อย่างแม่นยำ เพื่อแยกแยะข้อจำกัดทางสภาพแสงที่แก้ไขไม่ได้ ออกจากข้อจำกัดทางสภาพอากาศหรือการจัดการที่สามารถพัฒนาได้

ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

เพื่อขยายขอบเขตคุณค่าทางวิชาการและการประยุกต์ใช้แบบจำลอง CS-PGM งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคตดังนี้:

1. การเปรียบเทียบเชิงวิเคราะห์กับฐานข้อมูลผลผลิตจริง (Empirical Yield Comparison) ควรมีการวิจัยต่อยอดโดยนำค่า TMPY ที่คำนวณได้ ไปเปรียบเทียบเชิงวิเคราะห์กับสถิติผลผลิตจริงระดับโลก (World Record Yields) หรือค่า Yield Potential (Y_p) จากแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์จริง (Global Radiation) ในพื้นที่ละติจูดต่าง ๆ เพื่อประเมิน “ขนาดของการสูญเสียศักยภาพผลผลิตจากชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Loss)” เช่น อิทธิพลของความหนาแน่นของเมฆและฝุ่นละอองในแต่ละภูมิภาค
2. การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์เชิงบัญญัติ (Sensitivity Analysis) ควรมีการศึกษาความอ่อนไหวของแบบจำลองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่เชิงบัญญัติ (โดยเฉพาะค่า LUE_{max}) เพื่อรองรับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีชีวภาพและพันธุวิศวกรรมของพืชในอนาคต ที่อาจเพิ่มขีดความสามารถในการแปลงพลังงานแสงให้สูงทะลุขีดจำกัดเดิม
3. การประยุกต์ใช้เชิงยุทธศาสตร์และการกำหนดนโยบาย เสนอให้ใช้ CS-PGM เป็นเครื่องมือพื้นฐานในการวางแผนยุทธศาสตร์ความมั่นคงทางอาหารระดับชาติหรือระดับโลก โดยชี้เป้าหมายการลงทุนด้านเทคโนโลยีการเกษตรขั้นสูง (เช่น ระบบชลประทานอัจฉริยะ หรือโรงเรือนควบคุมสภาพแวดล้อม) ไปยังเขตละติจูด 15° ถึง 20° (N/S) เป็นลำดับแรก เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพแฝงทางกลศาสตร์ท้องฟ้า (Theoretical Return on Light) สูงที่สุดในการผลิตชีวมวล

จริยธรรมการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงคณิตศาสตร์และแบบจำลอง (Mathematical and Modeling Research) ซึ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองเชิงกำหนด (Deterministic Model) โดยใช้หลักการทางกลศาสตร์ท้องฟ้าและค่าคงที่ทางฟิสิกส์เชิงบัญญัติ (Canonical Constants) เป็นหลักในการคำนวณ ผลผลิตศักยภาพสูงสุดเชิงทฤษฎี (TMPY) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึง ไม่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในมนุษย์ สัตว์ หรือการทดลองภาคสนามที่มีความเสี่ยงต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

การใช้เครื่องมือปัญญาประดิษฐ์

ผู้วิจัยขอเปิดเผยว่าได้มีการใช้เครื่องมือปัญญาประดิษฐ์ (AI tools) เพื่อสนับสนุนงานเขียนบทความนี้ บทบาทของ AI เครื่องมือปัญญาประดิษฐ์ (เช่น Google Gemini หรือ Grammarly) ถูกใช้ในบทบาทสนับสนุนด้านภาษาอังกฤษเท่านั้น โดยเน้นการปรับปรุงสำนวนและกระชับเนื้อหาในส่วนบทคัดย่อ ไวยากรณ์ภาษาอังกฤษ การแปลบทคัดย่อเป็นภาษาอังกฤษและการปรับปรุงความชัดเจนของภาษาอังกฤษ (Language Refinement) ผู้นิพนธ์เป็นผู้รับผิดชอบต่อความถูกต้องของข้อมูล การวิเคราะห์ และข้อสรุปทางวิชาการทั้งหมดในบทความนี้

References

- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (2013). **Solar engineering of thermal processes**. John Wiley & Sons.
- Gueymard, C. A. (2003). Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. **Solar Energy**, 74(5), 355-379.
- Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G., Zurcher, E. J., Herrmann, N. I., McLean, G., Chenu, K., Van Oosterom, E. J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A. D., Brown, H., Whish, J. P. M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L. W., Peake, A. S., Poulton, P. L., Hochman, Z., Thorburn, P. J., Gaydon, D. S., Dalgliesh, N. P., Rodriguez, D., Cox, H., Chapman, S., Doherty, A., Teixeira, E., Sharp, J., Cichota, R., Vogeler, I., Li, F. Y., Wang, E., Hammer, G. L., Robertson, M. J., Dimes, J. P., Whitbread, A. M., Hunt, J., Van Rees, H., McClelland, T., Carberry, P. S., Hargreaves, J. N. G., MacLeod, N., McDonald, C., Harsdorf, J., Wedgwood, S. and Keating, B. A. (2014). APSIM–evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software**, 62, 327-350.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijssman, A. J. and Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. **European journal of agronomy**, 18(3-4), 235-265.
- Lobell, D. B., Cassman, K. G. and Field, C. B. (2009). Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. **Annual review of environment and resources**, 34, 179-204.
- Long, S. P., Zhu, X. G., Naidu, S. L. and Ort, D. R. (2006). Can improvement in photosynthesis increase crop yields?. **Plant, Cell & Environment**, 29(3), 315-330.
- Loomis, R. S. and Amthor, J. S. (1999). Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. **Crop Science**, 39(6), 1584-1596.
- McCree, K. J. (1972). The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. **Agricultural Meteorology**, 9, 191-216.
- Monteith, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical transactions of the royal society of London. B, Biological Sciences**, 281(980), 277-294.
- Slattery, R. A. and Ort, D. R. (2015). Photosynthetic energy conversion efficiency: setting the baseline for gauging future improvements in important food and biofuel crops. **Plant Physiology**, 168(2), 383-392.
- Van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., Van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L. and Goudriaan, J. (2003). On approaches and applications of the Wageningen crop models. **European journal of agronomy**, 18(3-4), 201-234.
- Van Wart, J., Van Bussel, L. G. J., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N. D., Claessens, L., Van Ittersum, M. K. and Cassman, K. G. (2013). Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. **Field crops research**, 143, 44-55.
- Zelitch, I. (1992). Control of plant productivity by regulation of photorespiration. **BioScience**, 42(7), 510-516.
- Zhu, X. G., Long, S. P. and Ort, D. R. (2010). Improving photosynthetic efficiency for greater yield. **Annual review of plant biology**, 61(1), 235-261.