การปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดเพื่อการพัฒนาพันธุ์พืชแบบก้าวกระโดด
Speed Breeding for Rapid Plant Variety Development

จีราพร แก่นทรัพย์[1/*] สุริพัฒน์ ไทยเทศ[2/]
Jeeraporn Kansup[1/*] Suriphat Thaitad[2/]

Received 28 Jan. 2026/Revised 12 Feb. 2026/Accepted 13 Feb. 2026

ABSTRACT

Speed breeding is a technique that employs controlled environmental conditions to accelerate the plant life cycle from vegetative growth to reproductive development. This approach involves the management of key factors such as extended photoperiods, regulated temperature and humidity, increased carbon dioxide concentration, and high plant density cultivation. In certain systems, additional physiological management, including the use of plant growth regulators, may be applied to promote early flowering and rapid seed production. Consequently, this technique enables an increased number of generations per year and reduces the time required for plant breeding programs. Furthermore, the integration of this strategy with advanced technologies, such as high-throughput phenotyping and genotyping, marker-assisted selection, and genome editing, can enhance accuracy and shorten the duration of selecting or developing crop varieties with desirable traits. Therefore, it has emerged as an important strategy to address global food security challenges associated with climate change and population growth. To date, protocols for this technique have been developed for several major economic crops, including rice, maize, and soybean.

Keywords: speed breeding; accelerated plant life cycle; controlled environmental factors; protocol development

[1/] กองวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ ถ.รังสิต-นครนายก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
[1/] Biotechnology Research and Development Division, Rangsit-Nakhon Nayok Rd., Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand
[2/] สถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน ถ.พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ. 10900
[2/] Field and Renewable Energy Crops Research Institute, Phahonyothin Rd., Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand
*** Corresponding author: jkansupthdoa@gmail.com**

บทคัดย่อ

การปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดเป็นเทคนิคที่ใช้การควบคุมสภาพแวดล้อมเพื่อเร่งวงจรชีวิตของพืช ตั้งแต่ระยะเจริญเติบโตจนถึงระยะเจริญพันธุ์ โดยอาศัยการจัดการปัจจัยหลัก เช่น การยืดช่วงแสงให้ยาวขึ้น การควบคุมอุณหภูมิและความชื้น การเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการปลูกพืชในความหนาแน่นสูง ทั้งนี้ในบางระบบอาจมีการจัดการด้านสรีรวิทยาของพืช เช่น การใช้ฮอร์โมนพืช เพื่อกระตุ้นการออกดอกและการสร้างเมล็ดในระยะเวลาที่สั้นลง ส่งผลให้สามารถเพิ่มจำนวนรุ่นต่อปีและลดระยะเวลาในการปรับปรุงพันธุ์ได้ นอกจากนี้การบูรณาการเทคนิคดังกล่าวร่วมกับเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น การศึกษาฟีโนไทป์และจีโนไทป์แบบปริมาณงานสูง การใช้เครื่องหมายโมเลกุลช่วยในการคัดเลือกพันธุ์ และการปรับแต่งจีโนม สามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดระยะเวลาในการคัดเลือกหรือพัฒนาพันธุ์พืชที่มีลักษณะตามต้องการ เทคนิคการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดจึงเป็นแนวทางสำคัญในการตอบโจทย์ความมั่นคงทางอาหารภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก โดยปัจจุบันมีการพัฒนาโปรโตคอลการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดสำหรับพืชเศรษฐกิจหลายชนิด เช่น ข้าว ข้าวโพด และถั่วเหลือง

คำสำคัญ: การปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัด; เร่งวงจรชีวิตพืช; ควบคุมปัจจัยสภาพแวดล้อม; พัฒนาโปรโตคอล

บทนำ

โลกกำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างรุนแรง ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาคการเกษตรอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรและพื้นที่เพาะปลูกลดลง (Lu et al., 2020) และความท้าทายด้านการผลิตอาหารให้เพียงพอต่อจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น รวมถึงปัญหาภาวะทุพโภชนาการในพื้นที่แห้งแล้งและกันดาร กระตุ้นให้นักวิจัยมุ่งพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคนิคขั้นสูงเพื่อเร่งกระบวนการปรับปรุงพันธุ์พืชและเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดเลือกพันธุ์ (Watson et al., 2018; Hickey et al., 2019)

แนวคิดการควบคุมสภาพแวดล้อมเพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตและการออกดอกของพืช เริ่มต้นจากการศึกษาผลของแสงต่อการเจริญเติบโตของพืชเมื่อประมาณ 100 ปีก่อน (Pfeiffer, 1926) ซึ่งเป็นพื้นฐานของระบบการปลูกพืชภายใต้สภาพแวดล้อมควบคุมและแนวคิดการเร่งวงจรชีวิตของพืชในเวลาต่อมา ในช่วงคริสต์ทศวรรษ 1980 องค์การ NASA ร่วมกับมหาวิทยาลัยแห่งรัฐยูทาห์ ศึกษาการให้แสงต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงเพื่อปลูกพืชในสภาวะทรัพยากรจำกัด จนพัฒนาข้าวสาลีแคระพันธุ์ USU-Apogee ได้สำเร็จ (Bugbee and Koerner, 1997) จากองค์ความรู้นี้นักวิจัยจากมหาวิทยาลัยควีนส์แลนด์ได้นำมาประยุกต์ใช้กับพืชไร่ โดยเฉพาะข้าวสาลี และนำเสนอแนวทางการเร่งวงจรชีวิตพืชภายใต้ชื่อ speed breeding (SB) ซึ่งอาศัยการจัดการแสง อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมอย่างเหมาะสม โดย Hickey et al. (2009) มีบทบาทสำคัญที่ทำให้แนวทางนี้ได้รับการยอมรับและใช้แพร่หลายในระดับนานาชาติ

การปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดเป็นชุดเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการจัดการสภาพแวดล้อมในการปลูกพืช เช่น แสง อุณหภูมิ และความชื้น เพื่อเร่งการเจริญเติบโต การออกดอก และการติดเมล็ด ส่งผลให้สามารถเพิ่มจำนวนรุ่นของพืชได้ประมาณ 3–9 รุ่น/ปี ขณะที่แบบดั้งเดิมผลิตได้เพียง 1–2 รุ่น/ปี (Watson et al., 2018) ช่วยเร่งกระบวนการผสมพันธุ์และการคัดเลือก ทำให้สามารถพัฒนาสายพันธุ์ที่มีจีโนไทป์เป็นโฮโมไซกัสและมีความเสถียรทางพันธุกรรมได้ในระยะเวลาที่สั้นลง

การปรับปรุงพันธุ์พืชแบบเร่งรัด

การปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัด (speed breeding) ประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญหลายประการที่ทำงานร่วมกันเพื่อเร่งวงจรชีวิตของพืชและกระบวนการปรับปรุงพันธุ์ สามารถสรุปเป็น 3 ส่วนหลัก (Reddy et al., 2024) ได้แก่ 1) การควบคุมและดัดแปรสภาพแวดล้อมในการปลูกพืช (optimal controlled environment) เช่น การยืดช่วงแสง การควบคุมอุณหภูมิและความชื้น การจัดการความหนาแน่นของพืช และสารอาหาร เพื่อเร่งการเจริญเติบโตและกระตุ้นการออกดอกของพืช 2) วิธีการคัดเลือกพันธุ์พืชที่เหมาะกับการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัด (selection methods suitable for speed breeding) และ 3) การบูรณาการการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดร่วมกับเทคนิคขั้นสูง (integration with advanced techniques) เช่น การศึกษาฟีโนไทป์และจีโนไทป์แบบปริมาณงานสูง (high-throughput phenotyping and genotyping) การใช้เครื่องหมายโมเลกุลช่วยในการคัดเลือกพันธุ์ และการปรับแต่งจีโนมซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของกระบวนการปรับปรุงพันธุ์ (Figure 1) มีรายละเอียดดังนี้

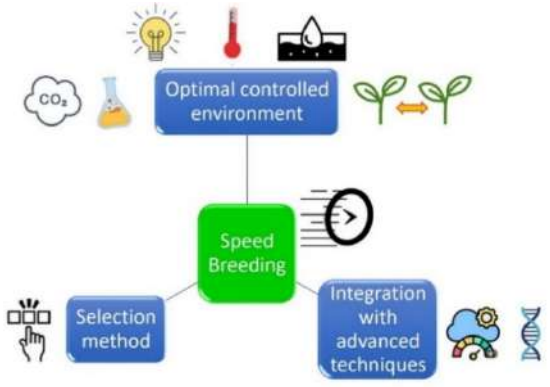


Figure 1 Major components of speed breeding: controlled environment optimization, selection methods, and integration with advanced breeding technologies

1. การควบคุมและดัดแปรสภาพแวดล้อมในการปลูกพืช

1.1 แสง

แสงเป็นแหล่งพลังงานสำหรับกระบวนการสังเคราะห์แสงและทำหน้าที่เป็นสัญญาณจากสิ่งแวดล้อมที่ควบคุมกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชหลายด้าน พืชรับรู้การเปลี่ยนแปลงของสภาพแสงผ่านตัวรับแสง (photoreceptor) เช่น ไฟโตโครม (phytochrome) และโฟโตโทรปิน (phototropin) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในเส้นทางการส่งสัญญาณที่ควบคุมการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช โดยช่วงแสง (photoperiod) คุณภาพแสง (light quality) และความเข้มของแสง (light intensity) ล้วนเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการดังกล่าว (Wu et al., 2025) ช่วงแสง หมายถึง ระยะเวลาที่พืชได้รับแสงและความมืดในแต่ละวัน (Vince-Prue, 1994) คุณภาพแสง หมายถึง องค์ประกอบของความยาวคลื่นของแสงหรือสัดส่วนของแสงในแต่ละช่วงคลื่น ส่วนปริมาณแสง หมายถึง ปริมาณโฟตอนที่พืชได้รับในช่วงเวลาหนึ่ง รวมถึงปริมาณแสงสะสมต่อวัน ความเข้มของแสง หมายถึง อัตราที่พลังงานแสงถ่ายโอนต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งมีบทบาทสำคัญและจำเป็นต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช ในระบบการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดนิยมใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ปล่อยรังสีซึ่งกระตุ้นการสังเคราะห์แสง (photosynthetically active radiation, PAR) ในช่วงความยาวคลื่น 400–700 นาโนเมตร ด้วยความเข้มแสงประมาณ 360–650 μmol m^{-2} s^{-1} เพื่อกระตุ้นการออกดอกและการติดเมล็ดในพืชหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ถั่วลูกไก่ ถั่วลันเตา และคาโนลา ซึ่งช่วยให้สามารถเร่งกระบวนการปรับปรุงพันธุ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ghosh et al., 2018; Watson et al., 2018)

1.2 อุณหภูมิ

การปรับอุณหภูมิของดินและอากาศมีบทบาทสำคัญต่อการงอกและการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งเอื้อต่อการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว การออกดอก การติดเมล็ด และการสุกแก่เต็มที่ ในระบบปลูกภายใต้สภาพแวดล้อมควบคุมมีการใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น ระบบพ่นหมอก ระบบพัดลม และระบบทำความเย็นแบบแผ่น เพื่อรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Wanga et al., 2021) ผลของอุณหภูมิต่อการพัฒนาและระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืชสามารถอธิบายได้ด้วยแนวคิดของอุณหภูมิสะสม (growing degree days, GDD) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดปริมาณความร้อนที่จำเป็นต่อการเข้าสู่ระยะพัฒนาการต่าง ๆ ในวงจรชีวิตของพืช (León Pacheco et al., 2019) อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการงอกของพืชส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 12–30°ซ. ขณะที่อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต การออกดอก และการติดเมล็ดของพืชเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนหลายชนิดอยู่ในช่วง 25–30°ซ. (Wanga et al., 2021) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 33°ซ. ความสามารถในการสืบพันธุ์ของละอองเรณูลดลงและความเป็นหมันเพิ่มขึ้นในพืชหลายชนิด เช่น ข้าวฟ่าง (Singh et al., 2015) และถั่วเหลือง (Wiebbecke et al., 2012) นอกจากนี้ ความเครียดจากความร้อนในช่วงสะสมน้ำหนักเมล็ด (grain filling) ส่งผลให้การสะสมแป้งในข้าวสาลี ข้าว และข้าวโพดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ขณะเดียวกัน อุณหภูมิสูงร่วมกับระดับ CO_2 ที่เพิ่มขึ้นในถั่วเหลืองทำให้ปริมาณของกรดอะมิโนอิสระและความเข้มข้นของโปรตีนรวมลดลง แต่ความเข้มข้นของน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Li et al., 2018)

1.3 ความชื้นในดิน

ความชื้นในดินที่ไม่เพียงพอส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืช ได้แก่ การลดลงของอัตราการสังเคราะห์แสง การเปลี่ยนแปลงของความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ และการปิดปากใบ รวมถึงส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชในดิน (Younis et al., 2018) อีกทั้งส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช เช่น ความสูงของต้น วันออกดอก การติดเมล็ด และการสุกแก่ (Anjum et al., 2017) อย่างไรก็ตาม ในบางกรณี ความเครียดจากภัยแล้งหรือภาวะน้ำท่วมในระดับที่เหมาะสมสามารถกระตุ้นกลไกการหลีกเลี่ยงความเครียดของพืช ส่งผลให้พืชออกดอกและสุกแก่ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ ภายหลังระยะออกดอกสะสมน้ำหนักเมล็ดและการสุกแก่ของเมล็ดสามารถเร่งให้สั้นลงได้โดยการลดความชื้นในดินอย่างค่อยเป็นค่อยไป เช่น ลดความถี่ในการให้น้ำจากทุกวันเหลือสัปดาห์ละ 2 ครั้งในช่วง 4–6 สัปดาห์หลังออกดอก และการงดให้น้ำในสัปดาห์สุดท้ายก่อนเก็บเกี่ยว แนวคิดดังกล่าวได้นำมาใช้ในการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดในพืชหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ คาโนลา และถั่วลูกไก่ (Watson et al., 2018)

1.4 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

Jagadish et al. (2016) รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของระดับ CO_2 มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืช และอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนผ่านจากระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นไปสู่ระยะเจริญพันธุ์ในพืชบางชนิด เช่น ถั่วเหลือง ข้าว พิทูเนีย และอะโวคาโด อย่างไรก็ตาม การตอบสนองของพืชต่อระดับ CO_2 แตกต่างกันอย่างมากขึ้นอยู่กับชนิด/พันธุ์ของพืช รวมถึงปัจจัยสภาพแวดล้อมอื่นร่วมด้วย ดังนั้น ารศึกษาระดับ CO_2 ที่เหมาะสมสำหรับการเร่งหรือการชักนำการออกดอกในพืชแต่ละชนิด/พันธุ์จึงมีความจำเป็น ในถั่วเหลืองมีรายงานว่าการควบคุมระดับ CO_2 ให้สูงกว่าค่าบรรยากาศปกติ (>400 ppm) ร่วมกับการได้รับแสงเป็นระยะเวลา 14

ชั่วโมง/วันภายใต้สภาพแวดล้อมควบคุม สามารถช่วยเร่งวงจรการเจริญพันธุ์และสามารถผลิตพืชได้มากถึง 5 รุ่น/ปี (Nagatoshi and Fujita, 2019) อย่างไรก็ตาม การปรับระดับ CO_2 ต้องมีโครงสร้างพื้นฐานและเครื่องมือที่เหมาะสม เช่น ห้องเพาะเลี้ยงหรือห้องปลูกพืชระบบปิด ถังก๊าซ CO_2 และระบบควบคุมความเข้มข้นของก๊าซ รวมถึงต้องคำนึงถึงต้นทุนในการดำเนินงานและการจัดการด้านความปลอดภัยและสุขภาพในการทำงานอย่างเหมาะสม (Wanga et al., 2021)

1.5 ความหนาแน่นของพืช

การปลูกพืชด้วยความหนาแน่นสูงเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนต่ำ พืชเกิดการแข่งขันกันเองทั้งด้านแสง น้ำ และธาตุอาหาร ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช และในบางกรณีอาจนำไปสู่การออกดอกและการสุกแก่ของเมล็ดที่เร็วขึ้น ทำให้เร่งการผลิตรุ่นของพืชได้รวดเร็วขึ้น และยังช่วยรักษาขนาดประชากรที่มากพอสำหรับการคัดเลือกพันธุ์ในแต่ละรุ่น มีรายงานว่าการปลูกพืชด้วยความหนาแน่นสูงสามารถกระตุ้นการออกดอกให้เร็วขึ้นในพืชบางชนิด เช่น ข้าว ข้าวฟ่าง และฝ้าย ภายใต้สภาพแวดล้อมและการจัดการที่เหมาะสม (Wanga et al., 2021) อย่างไรก็ตาม ผลของความหนาแน่นของพืชต่อการเริ่มออกดอกอาจแตกต่างกันไปตามชนิดและพันธุ์พืช รวมถึงสภาพแวดล้อมในการปลูก โดยบางการศึกษาวิจัยไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของการเริ่มออกดอกเมื่อปลูกพืชด้วยความหนาแน่นสูง (Fukushima et al., 2011) ดังนั้น การประยุกต์ใช้เทคนิคการปลูกพืชด้วยความหนาแน่นสูงจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบการตอบสนองของพืชแต่ละชนิดและพันธุ์ก่อนนำไปใช้ในทางปฏิบัติ

1.6 สารอาหารและฮอร์โมนพืช

การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth regulators, PGRs) ร่วมกับสูตรอาหารเพาะเลี้ยงที่เหมาะสมสามารถเร่งการพัฒนาและเพิ่มอัตราการสร้างรุ่นของพืชภายใต้สภาวะควบคุมได้ ตัวอย่างเช่น ในถั่วเลนทิล Bermejo et al. (2016) ได้พัฒนาเทคนิค *in vitro* embryo culture บนสูตรอาหาร Murashige and Skoog (MS) โดยประเมินการใช้ 6-benzylaminopurine (BAP) ซึ่งเป็นไซโตไคนินสังเคราะห์ ร่วมกับวิธี single seed descent (SSD) ส่งผลให้สามารถผลิตได้ถึง 4 รุ่น/ปี นอกจากนี้ การใช้ PGR บางชนิดร่วมกับการควบคุมสภาพแวดล้อมสามารถเพิ่มความเร็วในการพัฒนารุ่นของพืชได้ ตัวอย่างเช่น Mobini and Warkentin (2016) รายงานว่า การใช้ 0.6 µM flurprimidol ซึ่งเป็นสารยับยั้งการสังเคราะห์จิบเบอเรลลิน ร่วมกับการให้แสง 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 21°ซ. สลับช่วงมืดที่ 16°ซ. ภายใต้ระบบไฮโดรโปนิกส์ในถั่วลันเตา (*Pisum sativum*) สามารถเพิ่มจำนวนรุ่นได้ประมาณ 5.3 รุ่น/ปี ซึ่งเร็วกว่าวิธี SSD แบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ

2. วิธีการคัดเลือกพันธุ์พืชที่เหมาะกับการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัด

การผสานการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดกับวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสม ช่วยลดระยะเวลาระหว่างรุ่น และเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการประชากรภายใต้ข้อจำกัดด้านพื้นที่และเวลา (Watson et al., 2018; Wanga et al., 2021) วิธีการคัดเลือกแบบมาตรฐาน (conventional breeding) เช่น bulk selection และ pedigree selection ในพืชผสมตัวเอง หรือ mass selection และ recurrent selection ในพืชผสมข้าม มักใช้เวลานานและต้องคัดเลือกหลายรุ่นในภาคสนามเพื่อให้ได้สายพันธุ์ที่สม่ำเสมอ (Allard, 1999) จึงเป็นข้อจำกัดเมื่อใช้ร่วมกับการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัด ขณะที่วิธีที่มุ่งสร้างสายพันธุ์โฮโมไซกัสอย่างรวดเร็ว เช่น SSD วิธีการสืบเชื้อสายจากฝักเดี่ยว (single pod descent, SPD) และการคัดเลือกพืช

ต้นเดี่ยว (single plant selection, SPS) มีความเหมาะสมมากกว่า วิธีการเหล่านี้สามารถดำเนินการกับประชากรจำนวนมากภายใต้การปลูกแบบความหนาแน่นสูงและใช้พื้นที่เพาะปลูกจำกัด เช่น เรือนเพาะชำหรือเรือนกระจก จึงสอดคล้องกับแนวคิดของการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัด (Allard, 1999; Wanga et al., 2021) อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้อาจลดโอกาสในการคัดเลือกลักษณะเชิงปริมาณที่สัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมภาคสนามในระยะแรก ความท้าทายจึงอยู่ที่การสร้างสมดุลระหว่างการเร่งพัฒนาสายพันธุ์กับการรักษาความแม่นยำในการคัดเลือกฟีโนไทป์ของลักษณะเป้าหมาย

3. การบูรณาการการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดร่วมกับเทคนิคขั้นสูง

การบูรณาการเทคนิคการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดร่วมกับเทคโนโลยีขั้นสูง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและเร่งกระบวนการพัฒนาพันธุ์ให้รวดเร็วยิ่งขึ้น เช่น เทคนิคการศึกษาฟีโนไทป์และจีโนไทป์แบบปริมาณงานสูง ใช้ระบบตรวจวัดและวิเคราะห์อัตโนมัติในการประเมินสรีรวิทยา ผลผลิต และความผันแปรทางพันธุกรรมของประชากรจำนวนมากพร้อมกันได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ (Reddy et al., 2024) การใช้เครื่องหมายโมเลกุลช่วยในการคัดเลือกพันธุ์ (marker-assisted selection, MAS) สามารถคัดเลือกพันธุ์ได้ตั้งแต่ระยะต้นอ่อน จึงช่วยย่นเวลา ประหยัดพื้นที่และลดแรงงานในการจัดการประชากรพืช (Jonah et al., 2011) การปรับแต่งจีโนม (genome editing) ช่วยแก้ไขรหัสพันธุกรรมได้อย่างจำเพาะแม่นยำ สามารถลดระยะเวลาในขั้นตอนเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อที่ยาวนาน ด้วยการเปลี่ยนไปใช้เนื้อเยื่อเป้าหมายอื่น เช่น เอ็มบริโอที่ยังไม่โตเต็มที่ โปรโตพลาสต์ เมล็ดที่โตเต็มที่หรือต้นกล้าที่กำลังงอกแทน (Sebiani-Calvo et al., 2024)

การพัฒนาและประยุกต์ใช้โปรโตคอลการปรับปรุงพันธุ์พืชแบบเร่งรัด

การปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดมุ่งลดระยะเวลารอบรุ่น แต่พืชแต่ละชนิด/พันธุ์มีการตอบสนองต่อช่วงแสง อุณหภูมิ และความเข้มแสงแตกต่างกัน การนำเทคนิคนี้ไปใช้จึงจำเป็นต้องพัฒนาและปรับเปลี่ยนโปรโตคอล (protocol) ให้เหมาะสม เพื่อเร่งการออกดอกและการติดเมล็ดอย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่กระทบต่อความสมบูรณ์ของพืช ซึ่งการออกแบบโปรโตคอลต้องพิจารณาตั้งแต่ชีววิทยาการออกดอก สรีรวิทยาการเจริญเติบโต การพัฒนาของเมล็ด และการบูรณาการเทคนิคเสริมตามวัตถุประสงค์ของโครงการ (Watson et al., 2018; Hickey et al., 2019) ทำให้โปรโตคอลที่ได้มีกรอบแนวคิดร่วมกันในเชิงหลักการ แต่แตกต่างกันในรายละเอียดเชิงเทคนิคตามชนิดพืชและวิธีการปรับปรุงพันธุ์ของพืชแต่ละชนิด

เทคนิคการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดนำมาใช้ในพืชหลายวงศ์ เช่น วงศ์บานไม่รู้โรย ผักกาด ถั่ว และหญ้า รวมถึงข้าวสาลี ข้าว และข้าวบาร์เลย์ (Ćeran et al., 2024) มักมุ่งเน้นลักษณะที่ควบคุมด้วยยีนน้อยตำแหน่งและได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมต่ำ เช่น ความต้านทานโรค การออกดอก ความสูง และสารเคลือบผิวพืช (Watson et al., 2018) สำหรับประเทศไทย มีการประยุกต์ใช้เทคนิคที่สอดคล้องกัน เช่น การเร่งรอบการสร้างรุ่น (RGA) ในข้าว เพื่อศึกษาความไวต่อช่วงแสงและประเมินพันธุกรรมนอกฤดูปลูก ซึ่งช่วยย่นเวลาการปรับปรุงพันธุ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (สิริมาพรและคณะ, 2565) นอกจากนี้ งานวิจัยด้านการควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงเรือนและระบบแสงประดิษฐ์ เช่น ในเมล่อน (เอกรัฐและเดือนแรม, 2562) และผักสลัดภายใต้ไฟ LED (Kapkaew et al., 2024) ยังสะท้อนถึงพื้นฐาน

สำคัญในการต่อยอดสู่ระบบการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดในเขตร้อน

การใช้ประโยชน์ในพืชเศรษฐกิจ

พืชเศรษฐกิจที่มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดค่อนข้างมาก ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด และถั่วเหลือง มีรายละเอียดดังนี้

1. ข้าว

มีการพัฒนาและประสบความสำเร็จอย่างมาก ตัวอย่างเช่น โปรโตคอล SpeedFlower ของสถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ (IRRI) ที่สามารถผลิตข้าวได้ถึง 4–5 รุ่น/ปี ซึ่งเร็วกว่าวิธีดั้งเดิมประมาณ 2 เท่า โดยอาศัยการจัดการสภาพแวดล้อมอย่างเข้มข้น ทั้งสเปกตรัมแสง ความเข้มแสง ช่วงแสง อุณหภูมิ ความชื้น ระดับสารอาหาร และการควบคุมฮอร์โมน ส่งผลให้ข้าวสามารถออกดอกได้ภายในเวลาประมาณ 60 วัน และลดระยะเวลาการสุกแก่ของเมล็ดลงได้ถึง 50% โดยสามารถใช้ได้กับข้าวทั้งกลุ่ม Indica และ Japonica (Kabade et al., 2024) นอกจากนี้ นักวิจัยชาวญี่ปุ่นยังได้พัฒนาระบบ Biotron (Biotron breeding system, BBS) ซึ่งเป็นแนวทางการเร่งรอบรุ่นภายใต้สภาพแวดล้อมควบคุม โดยบูรณาการการควบคุมอุณหภูมิ ช่วงแสง และระดับคาร์บอนไดออกไซด์ ร่วมกับเทคนิคการช่วยเหลือเอ็มบริโอและการกำจัดต้นแขนง (tiller) เพื่อเร่งการพัฒนาของพืช ซึ่งระบบนี้สามารถย่นวงจรชีวิตของข้าวพันธุ์ Nipponbare ให้สั้นลงเหลือเพียงประมาณ 2 เดือน เมื่อเทียบกับการปลูกทั่วไปที่ต้องใช้เวลาประมาณ 4 เดือน (Ohnishi et al., 2011)

2. ข้าวโพด

มีรายงานการศึกษาที่ใช้การปรับช่วงแสงเพื่อเร่งการเจริญเติบโตและย่นวงจรชีวิตของข้าวโพดในลักษณะเดียวกับเทคนิคการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดค่อนข้างจำกัด อย่างไรก็ตาม แนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดเวลาการพัฒนาสายพันธุ์แท้คือ เทคนิคดับเบิลแฮพลอยด์ (double haploid, DH) (Chaikam et al., 2019) ซึ่งเป็นการชักนำพืชที่พัฒนาจากเซลล์แฮพลอยด์ (n) ให้เพิ่มโครโมโซมเป็นดิพลอยด์ (2n) ส่งผลให้พืชที่ได้มีความเป็นโฮโมไซกัสเกือบสมบูรณ์ในทุกตำแหน่งของจีโนม วิธีนี้ช่วยย่นระยะเวลาการสร้างสายพันธุ์แท้ให้เหลือเพียง 2–3 รุ่น เมื่อเทียบกับวิธีผสมตัวเองแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้เวลาถึง 7–8 รุ่น (Mitiku, 2022) นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่นำเทคนิคการปรับแต่งจีโนมมาช่วยสนับสนุนระบบดังกล่าว โดย Li et al. (2021) รายงานว่าการทำให้ยีน *Zea mays PHOSPHOLIPASE D3* (*ZmPld3*) สูญเสียการทำงาน ส่งผลให้อัตราการแท้งของเมล็ดทั้งจากการผสมตัวเองและการผสมข้ามเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการแท้งของเมล็ดนี้เป็นตัวบ่งชี้ทางอ้อมของการเหนี่ยวนำให้เกิดแฮพลอยด์ แสดงถึงศักยภาพของการปรับแต่งยีนในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบการผลิตดับเบิลแฮพลอยด์เพื่อเร่งรัดกระบวนการพัฒนาสายพันธุ์แท้ของข้าวโพดให้รวดเร็วยิ่งขึ้น

3. ถั่วเหลือง

Nagatoshi และ Fujita (2019) ได้พัฒนาโปรโตคอลการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดสำหรับถั่วเหลืองคุณภาพสูงของญี่ปุ่นพันธุ์ Enrei ซึ่งสามารถลดระยะเวลาการเพาะปลูกจาก 102–132 วัน เหลือเพียง 70 วัน ส่งผลให้สามารถผลิตถั่วเหลืองได้มากถึง 5 รุ่น/ปี เมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกแบบดั้งเดิมที่ให้ผลผลิตเพียง 1–2 รุ่น/ปี ล่าสุด Taku et al. (2024) รายงานการศึกษาถั่วเหลืองฝักสดโดยใช้ modified speed breeding approach ภายใต้การควบคุมช่วงแสง อุณหภูมิ และการเสริม CO_2 เพื่อย่นระยะเวลาระหว่างรุ่น โดยลดระยะเวลาได้ 6–34 วัน ขึ้นกับจีโนไทป์

ส่งผลให้เพิ่มจำนวนรุ่นเป็นประมาณ 4–4.5 รุ่น/ปี จากเดิม 1–2 รุ่น/ปี พร้อมทั้งคงอัตราการงอกของเมล็ดอยู่ในระดับสูง (73–100%) นอกจากนี้ การใช้เครื่องหมายโมเลกุลช่วยคัดเลือกร่วมกับการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัด ช่วยให้สามารถคัดเลือกลักษณะที่ต้องการของถั่วเหลืองได้ตั้งแต่ระยะต้นกล้า (Jonah et al., 2011) ซึ่งการเร่งรอบรุ่นในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้นี้ ช่วยลดระยะเวลา พื้นที่ และต้นทุนในการปรับปรุงพันธุ์ลงอย่างมีนัยสำคัญ (Watson et al., 2018; Wanga et al., 2021)

การที่การปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดประสบความสำเร็จในพืชบางชนิดมากกว่าพืชชนิดอื่นนั้น มีความสัมพันธ์กับความแตกต่างทางชีววิทยาและสรีรวิทยาของพืชแต่ละชนิดเป็นสำคัญ โดยเฉพาะระบบการสืบพันธุ์ ซึ่งพืชผสมตัวเอง เช่น ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ และถั่วลันเตา สามารถสร้างสายพันธุ์โฮโมไซกัสและตรึงลักษณะพันธุกรรมได้รวดเร็วภายใต้การเร่งรอบรุ่น เนื่องจากไม่ต้องควบคุมการผสมเกสรข้ามต้น (Watson et al., 2018) ในทางตรงกันข้าม พืชผสมข้ามจะมีความซับซ้อนในการจัดการมากกว่าเพื่อรักษาความบริสุทธิ์ของสายพันธุ์ขณะเดียวกัน ความไวต่อช่วงแสงก็เป็นปัจจัยสำคัญ โดยพืชที่ไม่ไวต่อช่วงแสงมักออกดอกได้ดีภายใต้การให้แสงยาวนานประมาณ 20–22 ชั่วโมง/วัน ส่วนพืชที่ไวต่อช่วงแสงสูงอาจไม่ตอบสนองต่อโปรโตคอลมาตรฐานหรือเกิดความผิดปกติในระยะสืบพันธุ์ได้ (Vince-Prue, 1994) นอกจากนี้ พืชที่มีระยะก่อนเข้าสู่ระยะสืบพันธุ์ยาวนาน (Long juvenile phase) เช่น ไม้ผลหรือไม้ยืนต้น มีข้อจำกัดทางชีววิทยาพื้นฐานที่ทำให้การเร่งรอบรุ่นเป็นไปได้ยาก แม้จะควบคุมสภาพแวดล้อมเพื่อช่วยเร่งการเจริญเติบโตได้เพียงบางส่วนก็ตาม

ความท้าทายและแนวทางการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงพันธุ์พืชแบบเร่งรัดในอนาคต

การปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดแม้จะมีศักยภาพสูงในการลดเวลาพัฒนาสายพันธุ์ แต่ยังมีปัจจัยคอขวดหลายประการ เช่น ความไวต่อช่วงแสงและอุณหภูมิของพืช คุณภาพและความงอกของเมล็ดที่ลดลงจากการเก็บเกี่ยวก่อนสุกเต็มที่ ตลอดจนข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐานและต้นทุนพลังงานในการควบคุมสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในประเทศกำลังพัฒนา นอกจากนี้ ระบบดังกล่าวยังต้องอาศัยงบประมาณสูงและบุคลากรเฉพาะทางที่มีความเชี่ยวชาญด้านสรีรวิทยาพืชและเทคโนโลยีชีวภาพ ในการจัดการระบบควบคุมแสง อุณหภูมิ ความชื้น ตลอดจนเครื่องมือประเมินฟีโนไทป์และจีโนไทป์ ส่งผลให้การใช้งานในเชิงปฏิบัติยังคงมีข้อจำกัด (Shimelis et al., 2019; Wanga et al., 2021) ยิ่งกว่านั้น โปรโตคอลส่วนใหญ่ในปัจจุบันยังครอบคลุมพืชเศรษฐกิจเพียงบางชนิดและไม่สามารถนำไปปรับใช้กับพืชชนิดอื่นได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาโปรโตคอลให้เหมาะสมกับลักษณะทางชีววิทยาและระบบการปรับปรุงพันธุ์ที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่

การควบคุมสภาพแวดล้อมอย่างเข้มงวดอาจก่อให้เกิดความเครียดทางสรีรวิทยาแก่พืช โดยเฉพาะการให้อุณหภูมิสูงและช่วงแสงยาวนานต่อเนื่อง ซึ่งอาจรบกวนพัฒนาการและความมีชีวิตของละอองเรณูตลอดจนกระบวนการผสมเกสร จนทำให้การติดเมล็ดและผลผลิตลดลง (Vignolio et al., 2018) นอกจากนี้ สภาพแวดล้อมที่ต่างจากธรรมชาติมากอาจกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับอีพีเจเนติก (epigenetic changes) หรือการเปลี่ยนรูปแบบการแสดงออกของยีนโดยลำดับดีเอ็นเอคงเดิม ซึ่งส่งผลต่อความเสถียร

และความสม่ำเสมอของลักษณะทางพันธุกรรมในระยะยาว (Lloyd and Lister, 2022) ดังนั้น การออกแบบโปรโตคอลการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดจึงต้องคำนึงถึงขีดจำกัดทางสรีรวิทยาของพืชควบคู่กับการเร่งรอบรุ่น พร้อมทั้งต้องมีระบบจัดการและสำรองเมล็ดพันธุ์เพื่อลดความเสี่ยงจากการสูญเสียทรัพยากรพันธุกรรม

นอกจากนี้ ยังควรพิจารณาผลกระทบต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์และความแข็งแรงของต้นกล้า (seed vigor) ซึ่งอาจส่งผลต่อความงอกและการเจริญเติบโตในรุ่นถัดไป อีกทั้ง การปลูกพืชภายใต้สภาพแวดล้อมควบคุมที่แตกต่างจากภาคสนามอย่างมาก อาจส่งผลต่อเสถียรภาพของลักษณะเชิงปริมาณที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม (genotype × environment interaction) เมื่อนำไปประเมินภายใต้สภาพแวดล้อมจริง ลักษณะบางประการอาจแสดงออกแตกต่างจากที่คัดเลือกไว้ ดังนั้น การประเมินความเสถียรของลักษณะและการทดสอบภาคสนามยังมีความจำเป็นควบคู่กับการใช้ระบบการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัด

แนวทางการพัฒนาในบริบทของประเทศเขตร้อน ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยเฉพาะประเทศไทยที่มีศักยภาพในการปลูกพืชได้หลายรอบ/ปี ซึ่งเอื้อต่อการใช้เทคนิคการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัด เช่น การเร่งรอบการสร้างรุ่นในข้าวนอกฤดูปลูก (สิริมาพรและคณะ, 2565) รวมถึงการควบคุมสภาพแวดล้อมและช่วงแสงในเขตร้อน (Watson et al., 2018; Hickey et al., 2019) แม้การใช้ระบบควบคุมสภาพแวดล้อมอย่างเข้มงวดในไทยยังอยู่ในระยะเริ่มต้น มีการพัฒนาโรงงานผลิตพืช (plant factory) ในหลายระดับ ตั้งแต่งานวิจัยของหน่วยงานภาครัฐ เช่น การพัฒนาโรงงานผลิตพืชต้นแบบโดยศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติในอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศ (ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ, 2561) แหล่งศึกษาและสาธิตเทคโนโลยี เช่น โรงงานผลิตพืชของ EECi BIOPOLIS จ.ระยอง (เขตนวัตกรรมระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก, ม.ป.ป.) ไปจนถึงการประยุกต์ใช้ในเชิงธุรกิจ โครงสร้างพื้นฐานเหล่านี้จึงเป็นฐานสำคัญในการทดสอบและพัฒนาโปรโตคอลการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดให้เหมาะสมกับบริบทของประเทศในอนาคต

วิธีการปรับปรุงพันธุ์พืชของประเทศไทยมีองค์ประกอบที่สอดคล้องและสามารถต่อยอดกับแนวคิดการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดได้ โดยเฉพาะ MAS ในพืชเศรษฐกิจ เช่น ถั่วเหลืองโปรตีนสูง มันสำปะหลังต้านทานโรคใบด่าง และสับปะรดต้านทานโรคยอดเน่า (จีราพรและคณะ, 2568) การใช้ MAS ช่วยให้คัดเลือกลักษณะเป้าหมายได้ตั้งแต่ระยะต้นกล้าและลดเวลาประเมินฟีโนไทป์ ซึ่งเมื่อผสานกับการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดที่มุ่งลดช่วงเวลาระหว่างรุ่น จะช่วยเพิ่มความแม่นยำและอัตราความก้าวหน้าทางพันธุกรรมต่อหน่วยเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อและการควบคุมสภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการของไทย ยังเป็นต้นทุนสำคัญที่ช่วยสนับสนุนการพัฒนาระบบนี้ในอนาคต

การประยุกต์ใช้การปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดในระบบการปรับปรุงพันธุ์พืชเขตร้อนรวมถึงประเทศไทย อาจไม่จำเป็นต้องอยู่ในรูปแบบของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมแบบสมบูรณ์ทั้งหมด แต่สามารถพัฒนาเป็นแนวทางการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดแบบยืดหยุ่น ต้นทุนต่ำ และปรับใช้ได้ตามบริบทของพืชและพื้นที่ โดยอาศัยการใช้โรงเรือนแบบง่าย การยืดช่วงแสงเฉพาะบางระยะ การเร่งรอบรุ่นในช่วงนอก

ฤดูเพาะปลูก หรือการบูรณาการร่วมกับเทคนิคที่มีการใช้อยู่แล้ว เช่น การใช้เครื่องหมายโมเลกุลช่วยในการคัดเลือกพันธุ์ และการช่วยเหลือเอ็มบริโอ (embryo rescue) ซึ่งสามารถเพิ่มจำนวนรุ่นต่อปีได้โดยไม่เพิ่มต้นทุนอย่างมีนัยสำคัญรวมถึงการใช้เทคโนโลยีดิจิทัลและการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น การใช้ระบบควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติร่วมกับ AI เพื่อทำนายการเจริญเติบโตและเพิ่มความแม่นยำของการคัดเลือกพันธุ์ (Tardieu et al., 2017) ทั้งนี้ ความร่วมมือระหว่างสถาบันวิจัย หน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน และเครือข่ายระดับนานาชาติ จะมีบทบาทสำคัญในการผลักดันให้เทคนิคการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดสามารถนำไปประยุกต์ใช้อย่างยั่งยืนในระบบการปรับปรุงพันธุ์พืชสมัยใหม่ (Hickey et al., 2019)

สรุปและข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัด เป็นแนวทางสำคัญในการรับมือกับความท้าทายด้านความมั่นคงทางอาหารภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การเพิ่มขึ้นของประชากรโลก และข้อจำกัดด้านทรัพยากรการผลิต โดยอาศัยการควบคุมและดัดแปรสภาพแวดล้อมในการปลูกพืชเพื่อเร่งการเจริญเติบโต การออกดอก และการติดเมล็ด ส่งผลให้สามารถเพิ่มจำนวนรุ่น/ปี และลดระยะเวลาในการพัฒนาสายพันธุ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ การจัดการสภาพแวดล้อม การเลือกใช้วิธีการคัดเลือกพันธุ์ที่สอดคล้องกับการเร่งรอบรุ่น และการบูรณาการเทคนิคขั้นสูง ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำ เทคนิคนี้ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในพืชเศรษฐกิจสำคัญ โดยมีการปรับโปรโตคอลให้เหมาะสมกับชีววิทยาและลักษณะเฉพาะของพืชแต่ละชนิด แต่ยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุน โครงสร้างพื้นฐาน และความเชี่ยวชาญ รวมถึงความเสี่ยงจากความเครียดทางสรีรวิทยาของพืช แนวทางที่เหมาะสมคือการพัฒนาการปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดในรูปแบบที่ยืดหยุ่น ใช้ต้นทุนต่ำ และสอดคล้องกับทรัพยากรที่มีอยู่ โดยต่อยอดจากเทคนิคที่ใช้อยู่แล้ว เช่น การเร่งรอบรุ่นและการใช้เครื่องหมายโมเลกุลช่วยในการคัดเลือกพันธุ์ ควบคู่กับการบูรณาการเทคโนโลยีสมัยใหม่และการสร้างความร่วมมือระหว่างภาคส่วน เพื่อให้การปรับปรุงพันธุ์แบบเร่งรัดสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

เขตนวัตกรรมระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก. ม.ป.ป. โรงงานผลิตพืช. แหล่งข้อมูล: https://www.eeci.or.th/infrastructures/โรงงานผลิตพืช. สืบค้น: 28 มกราคม 2569.

จีราพร แก่นทรัพย์ มัลลิกา นวลแก้ว ภานุวัฒน์ มูลจันทะ สุวลักษณ์ ศันสนีย์ รัชนี โสภา และอ้อยทิน ผลพานิช. 2568. ความก้าวหน้าของงานวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพในการปรับปรุงพันธุ์พืชต้านทานโรคของกรมวิชาการเกษตร. วารสารวิชาการเกษตร. 43(2): 212-226.

ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ. 2561. ไบโอเทค สวทช. หวังใช้ “Plant Factory” มุ่งพัฒนาการเกษตรของประเทศอย่างยั่งยืน. แหล่งข้อมูล: https://www.nstda.or.th/th/news/11749-20180124-plant-factory. สืบค้น: 28 มกราคม 2569.

สิริมาพร โคตะเสนา จิรวัฒน์ สนิทชน สมพงศ์ จันทร์แก้ว และธิดารัตน์ มอญขาม. 2565. เทคนิค rapid generation advance ในการศึกษาพันธุกรรมการถ่ายทอดลักษณะความไวต่อช่วงแสงในคู่ผสมระหว่างข้าวอายุสั้นพันธุ์ ULR368 และพันธุ์ กข6 ในการประเมินนอกฤดูปลูก. วารสารแก่นเกษตร. 50(2): 340–347.

เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด และเดือนแรม แพ่งเกี่ยว. 2562. การควบคุมความชื้นในดินสำหรับโรงเรือนเมล่อน. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 11(2): 269–278.

Allard, R.W. 1999. Principles of Plant Breeding. 2nd ed. John Wiley & Sons. 264 p.

Anjum, S.A., U. Ashraf, A. Zohaib, M. Tanveer, M. Naeem, I. Ali, T. Tabassum and U. Nazir. 2017. Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: a review. Zemdirbyste-Agriculture. 104(3): 267–276.

Bermejo, C., I. Gatti and E. Cointry. 2016. *In vitro* embryo culture to shorten the breeding cycle in lentil (*Lens culinaris* Medik). Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 127(3): 585-590.

Bugbee, B. and G. Koerner. 1997. Yield comparisons and unique characteristics of the dwarf wheat cultivar 'USU-Apogee'. Advances in Space Research. 20(10): 1891-1894.

Ćeran, M., D. Miladinović, V. Đorđević, D. Trkulja, A. Radanović, S. Glogovac and A. Kondić-Špika. 2024. Genomics-assisted speed breeding for crop improvement: present and future. Frontiers in Sustainable Food Systems. 8: 1383302.

Chaikam, V., W. Molenaar, A.E. Melchinger and P.M. Boddupalli. 2019. Doubled haploid technology for line development in maize: technical advances and prospects. Theoretical and Applied Genetics. 132(12): 3227–3243.

Fukushima, A., H. Shiratsuchi, H. Yamaguchi and A. Fukuda. 2011. Effects of nitrogen application and planting density on morphological traits, dry matter production and yield of large grain type rice variety Bekoaoba and strategies for super high-yielding rice in the Tohoku region of Japan. Plant Production Science. 14(1): 56-63.

Ghosh, S., A. Watson, O.E. Gonzalez-Navarro, R.H. Ramirez-Gonzalez, L. Yanes, M. Mendoza-Suárez, J. Simmonds, R. Wells, T. Rayner, P. Green, A. Hafeez, S. Hayta, R.E. Melton, A. Steed, A. Sarkar, J. Carter, L. Perkins, J. Lord, M. Tester, A. Osbourn, M.J. Moscou, P. Nicholson, W. Harwood, C. Martin, C. Domoney, C. Uauy, B. Hazard, B.B.H. Wulff and L.T. Hickey. 2018. Speed breeding in growth chambers and glasshouses for crop breeding and model plant research. Nature Protocols. 13(12): 2944-2963.

Hickey, L.T., A.N. Hafeez, H. Robinson, S.A. Jackson, S.C.M. Leal-Bertioli, M. Tester, C. Gao, I.D. Godwin, B.J. Hayes and B.B.H. Wulff. 2019. Breeding crops to feed 10 billion. Nature Biotechnology. 37(7): 744–754.

Hickey, L.T., M.J. Dieters, I.H. DeLacy, O.Y. Kravchuk, D.J. Mares and P.M. Banks. 2009. Grain dormancy in fixed lines of white-grained wheat (*Triticum aestivum* L.) grown under controlled environmental conditions. Euphytica. 168(3): 303-310.

Jagadish, S.V.K., R.N. Bahuguna, M. Djanaguiraman, R. Gamuyao, P.V.V. Prasad and P.Q. Craufurd. 2016. Implications of high temperature and elevated CO_2 on flowering time in plants. Frontiers in Plant Science. 7: 00913.

Jonah, P.M., L.L. Bello, O. Lucky, A. Midau and S.M. Moruppa. 2011. Review: the importance of molecular markers in plant breeding programmes. Global Journal of Science Frontier Research. 11(5): 5-12.

Kabade, P.G., S. Dixit, U.M. Singh, S. Alam, S. Bhosale, S. Kumar, S.K. Singh, J. Badri, N.R.G. Varma, S. Chetia, R. Singh, S.K. Pradhan, S. Banerjee, R. Deshmukh, S.P. Singh, S. Kalia, T.R. Sharma, S. Singh, H. Bhardwaj, A. Kohli, A. Kumar, P. Sinha and V.K. Singh. 2024. SpeedFlower: a comprehensive speed breeding protocol for *indica* and *japonica* rice. Plant Biotechnology Journal. 22(5): 1051-1066.

Kapkaew, C., A. Rithranron, S. Kalawong and P. Rungrueng. 2024. Effect of commercial LED light on growth and yield of Salinas lettuce and butterhead lettuce. Advanced Science Journal. 24(2): 59–74.

León Pacheco, R.I., E.M. Correa Álvarez, J.L. Romero Ferrer, H. Arias Bonilla, J.C. Gómez-Correa, M.J. Yacomelo Hernández and L. Pérez Artiles. 2019. Accumulation of degree days and their effect

on the potential yield of 15 eggplant (*Solanum melongena* L.) accessions in the Colombian Caribbean. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. 72(3): 8917–8926.

Li, Y., Z. Lin, Y. Yue, H. Zhao, X. Fei, L.E., C. Liu, S. Chen, J. Lai and W. Song. 2021. Loss-of-function alleles of ZmPLD3 cause haploid induction in maize. Nature Plants. 7(12): 1579-1588.

Li, Y., Z. Yu, J. Jin, Q. Zhang, G. Wang, C. Liu, J. Wu, C. Wang and X. Liu. 2018. Impact of elevated CO_2 on seed quality of soybean at the fresh edible and mature stages. Frontiers in Plant Science. 9: 1413.

Lloyd, J.P.B. and R. Lister. 2022. Epigenome plasticity in plants. Nature Reviews Genetics. 23(1): 55–68.

Lu, W., X. Ye, J. Huang and G.S.A. Horlu. 2020. Effect of climate change induced agricultural risk on land use in Chinese small farms: implications for adaptation strategy. Ecological Indicators. 115: 106414.

Mitiku, T. 2022. Review on haploid and double haploid maize (*Zea mays*) breeding technology. International Journal of Agricultural Science and Food Technology. 8(1): 52–58.

Mobini, S.H. and T.D. Warkentin. 2016. A simple and efficient method of in vivo rapid generation technology in pea (*Pisum sativum* L.). In Vitro Cellular & Developmental Biology–Plant. 52(5): 530-536.

Nagatoshi, Y. and Y. Fujita. 2019. Accelerating soybean breeding in a CO_2-supplemented growth chamber. Plant and Cell Physiology. 60(1): 77-84.

Ohnishi, T., M. Yoshino, H. Yamakawa and T. Kinoshita. 2011. The biotron breeding system: a rapid and reliable procedure for genetic studies and breeding in rice. Plant and Cell Physiology. 52(7): 1249-1257.

Pfeiffer, N.E. 1926. Microchemical and morphological studies of effect of light on plants. Botanical Gazette. 81(2): 173-195.

Reddy, N., B. Thomas and P.T. Aiswarya. 2024. Speed breeding: the future of crop improvement. Krishi Science. 5(6): 22-25.

Sebiani-Calvo, A., A. Hernández-Soto, G. Hensel and A. Gatica-Arias. 2024. Crop genome editing through tissue-culture-independent transformation methods. Frontiers in Genome Editing. 6: 1490295.

Shimelis, H., E.T. Gwata and M.D. Laing. 2019. Crop Improvement for Agricultural Transformation in Southern Africa. pp. 97–103. In: Transforming Agriculture in Southern Africa (London, UK: Routledge). 346 p.

Singh, V., C.T. Nguyen, E.J. van Oosterom, S.C. Chapman, D.R. Jordan and G.L. Hammer. 2015. Sorghum genotypes differ in high temperature responses for seed set. Field Crops Research. 171: 32–40.

Taku, M., M. Saini, R. Kumar, P. Debbarma, N.K.K. Rathod, R. Onteddu, D. Sharma, R. Pandey, K. Gaikwad, S.K. Lal and A. Talukdar. 2024. Modified speed breeding approach reduced breeding cycle to less than half in vegetable soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. Physiological and Molecular Biology of Plants. 30(9): 1463–1473.

Tardieu, F., L. Cabrera-Bosquet, T. Pridmore and M. Bennett. 2017. Plant phenomics, from sensors to knowledge. Current Biology. 27(15): R770-R783.

Vignolio, O.R., L.R. Petigrosso, I.M. Rodríguez and N.L. Murillo. 2018. Effects of temperature, photoperiod and defoliation on flowering time of Lotus tenuis (Fabaceae) in Buenos Aires, Argentina. Experimental Agriculture. 54(3): 417-427.

Vince-Prue, D. 1994. The Duration of Light and Photoperiodic Responses. pp. 447-490. In: Photomorphogenesis in Plants, R.E. Kendrick and G.H.M. Kronenberg (eds.). Dordrecht: Springer Netherlands.

Wanga, M.A., H. Shimelis, J. Mashilo and M.D. Laing. 2021. Opportunities and challenges of speed breeding: a review. Plant Breeding. 140(2): 185-194.

Watson, A., S. Ghosh, M.J. Williams, W.S. Cuddy, J. Simmonds, M.D. Rey, M. Asyraf Md Hatta, A. Hinchliffe, A. Steed, D. Reynolds, N.M. Adamski, A. Breakspear, A. Korolev, T. Rayner, L.E. Dixon, A. Riaz, W. Martin, M. Ryan, D. Edwards, J. Batley, H. Raman, J. Carter, C. Rogers, C. Domoney, G. Moore, W. Harwood, P. Nicholson, M.J. Dieters, I.H. DeLacy, J. Zhou, C. Uauy, S.A. Boden, R.F. Park, B.B.H. Wulff and L.T. Hickey. 2018. Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. Nature Plants. 4(1): 23-29.

Wiebbecke, C.E., M.A. Graham, S.R. Cianzio and R.G. Palmer. 2012. Day temperature influences the male-sterile locus *ms*9 in soybean. Crop Science. 52(4): 1503–1510.

Wu, W., L. Chen, R. Liang, S. Huang, X. Li, B. Huang, H. Luo, M. Zhang, X. Wang and H. Zhu. 2025. The role of light in regulating plant growth, development and sugar metabolism: a review. Frontiers of Plant Science. 15: 1507628.

Younis, A., A. Riaz, M. Qasim, F. Mansoor, F. Zulfiqar, U. Tariq, M. Ahsan, M.K. Naseem and Z.M. Bhatti. 2018. Screening of marigold (*Tagetes erecta* L.) cultivars for drought stress based on vegetative and physiological characteristics. International Journal of Food and Allied Sciences. 3(2): 56–63.