

การประเมินความแปรปรวนทางพันธุกรรมและความสามารถในการรวมตัวของลักษณะการทนแล้งในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

Estimation of Genetic Variance and Combining Ability of Drought Tolerance in Maize

นัสมา ดลระหมาน¹ และปัทมา หาญนอก^{1*}

Nasma Donlaman¹ and Pattama Hannok^{1*}

Received: November 5, 2024

Revised: February 25, 2025

Accepted: February 27, 2025

Abstract: Rainfall fluctuations have affected maize productivity, adversely impacting the feed industry in Thailand. Therefore, developing new F₁ maize hybrids with high yields and high levels of drought tolerance could help alleviate yield losses for field maize growers. This study aimed 1) evaluate drought tolerance in hybrid maize 2) assess the combining ability and heritability of drought tolerance in hybrid maize to determine a pattern of gene action controlling drought tolerance trait. Twelve F₁ crosses were developed via North Carolina mating design II and tested in a 2 x 12 factorial in a randomized complete block design with 2 replications, totaling 48 experimental units. The first treatment factor was 12 F₁ crosses, whereas the second one was the watering regimes, categorized as well-watered and water-stressed for a specific period. The fresh weight of husked ears was recorded, and a stress tolerance index was calculated. ANOVA and mean comparison analyses showed that the fresh weights of Ki48 x Nei542010 and Nei452004 x Nei542010 were high under both water-stressed and well-watered regimes, along with a high value of stress tolerance index. Furthermore, this study found that drought tolerance in F₁ maize was genetically controlled by additive gene effects. Hence, selecting parental inbred lines with homozygous alleles for drought tolerance could enhance the drought tolerance of F₁ hybrid. High narrow-sense heritability was also observed in this study. Therefore, careful parental selection is the first important step in developing drought-tolerant single cross-hybrids, which could decrease maize yield losses caused by rainfall fluctuations.

Keywords: Combining ability, North Carolina mating design II, Narrow-sense Heritability, Stress tolerant index

บทคัดย่อ: ความผันผวนของปริมาณน้ำฝนส่งผลกระทบต่อผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ รวมถึงส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมอาหารสัตว์ของประเทศไทยอีกด้วย ดังนั้น การพัฒนาพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสมเดี่ยวที่ให้ผลผลิตสูงและมีความทนทานต่อสภาพแล้งได้ จะช่วยบรรเทาความเสียหายแก่ผลผลิตที่มีต่อเกษตรกรผู้ปลูกข้าวโพดได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ประเมินความสามารถในการทนแล้งของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสม และ 2) ประเมินความสามารถในการรวมตัวและอัตราพันธุกรรมของความทนแล้งในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสม สร้างลูกผสมทั้งหมด 12 คู่ผสมผ่านการใช้แผนการผสมแบบ North Carolina II และนำมาทดสอบในแผนการทดลองแบบ 2 x 12

¹สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

¹Field Crops Department, Faculty of Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai 50290

*Corresponding author: pattama_h@mju.ac.th

factorial in randomized complete block design จำนวน 2 ซ้ำ รวมทั้งหมด 48 หน่วยทดลอง บ้างจัดที่ 1 คือ ลูกผสม จำนวน 12 คู่ผสม ส่วนบ้างจัดที่ 2 คือ รูปแบบการให้น้ำ ได้แก่ การให้น้ำแบบสม่ำเสมอ และการจำกัดการให้น้ำในบางช่วง ทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักฝักสดหลังปลูกเปลือกและคำนวณค่าดัชนีความทนแล้ง ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนและการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย พบว่า คู่ผสม Ki48 x Nei542010 และ Nei452004 x Nei542010 ให้น้ำหนักฝักสดสูงในสภาพเครียดน้ำและสภาพให้น้ำปกติ รวมถึงมีค่าดัชนีการทนทานต่อสภาพเครียดน้ำที่สูงอีกด้วย นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังพบอีกด้วยว่า ลักษณะการทนทานต่อสภาพเครียดน้ำของข้าวโพดคู่ผสมเกี่ยวข้องกับการทำงานของยีนแบบบวก ดังนั้น การเลือกสายพันธุ์พ่อแม่ที่มียีนควบคุมลักษณะดังกล่าวเป็นฮอโมไซกัสของแอลลีลที่ควบคุมลักษณะดังกล่าว จะช่วยส่งผลให้ได้ลูกผสมที่มีลักษณะความทนทานต่อสภาพแล้งได้ดี ลักษณะดังกล่าวมีอัตราการผลิตพันธุ์แบบแคบ (h²) ที่สูง ดังนั้นการให้ความสำคัญกับการเลือกสายพันธุ์พ่อแม่เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการพัฒนาข้าวโพดลูกผสมเดี่ยวให้มีความทนทานต่อสภาพแล้ง ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการบรรเทาความเสียหายของผลผลิตข้าวโพดลูกผสมที่ต้องเผชิญสภาพฝนทิ้งช่วงได้

คำสำคัญ: ความสามารถในการผสม, แผนการผสมชนิด North Carolina II, อัตราการถ่ายทอดทางพันธุกรรมอย่างแคบ, ดัชนีความทนทานต่อสภาพเครียด

คำนำ

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (maize) เป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ โดยทั่วโลกมีความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง คิดเป็นร้อยละ 3.90 ปริมาณการส่งออกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทั่วโลกในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (ปี พ.ศ. 2564–2567) อยู่ระหว่าง 1,198.29 - 1,211.77 ล้านตัน (กระทรวงพาณิชย์, 2567) ประเทศไทยมีเนื้อที่เพาะปลูก 6.457 ล้านไร่ เนื้อที่เก็บเกี่ยว 6.404 ล้านไร่ ผลผลิต 4.742 ล้านตัน ผลผลิตต่อเนื้อที่เพาะปลูก 734 กิโลกรัม/ไร่ และผลผลิตต่อเนื้อที่เก็บเกี่ยว 741 กิโลกรัม/ไร่ (กระทรวงพาณิชย์, 2567) ปัจจุบันการผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ ซึ่งมีประมาณการนำเข้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ปี 2563-2566 คิดร้อยละ 2.84 (กระทรวงพาณิชย์, 2566) นอกจากนี้สถานการณ์ภัยแล้งและฝนทิ้งช่วงในปัจจุบันส่งผลให้เกิดการสูญเสียผลผลิตจำนวนมากอีกด้วย จากรายงานของ Laskari *et al.* 2022 กล่าวว่า ความเครียดจากภัยแล้งเป็นปัญหาสำคัญประการหนึ่งในการลดผลผลิตข้าวโพด การผลิตข้าวโพดภายใต้ความเครียดจากภัยแล้งส่งผลให้ผลผลิตชีวมวล ผลผลิตเมล็ด พื้นที่ใบ และน้ำแห้งของรากลดลงสอดคล้องกับการรายงานของ Messina

et al. (2022) ที่พบว่า เมื่อข้าวโพดเผชิญสภาวะของการขาดน้ำในช่วงสะสมน้ำหนักเมล็ด การติดเมล็ดจะลดลง และหากข้าวโพดขาดน้ำในระหว่างการออกดอก จะส่งผลให้การยืดตัวของฝักและไหมลดลง ข้าวโพดอาจไม่ติดเมล็ดในท้ายสุด นอกจากนี้ หากข้าวโพดต้องเผชิญกับความเครียดขั้นรุนแรง หรือช่วงเริ่มก่อนการออกดอก ซึ่งมีสาเหตุจากการไม่ออกของไหมทำให้ข้าวโพดไม่สามารถเกิดการปฏิสนธิและติดเมล็ดได้ การพัฒนาพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ทนทานต่อสภาพแล้ง จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว

แผนการผสมพันธุ์แบบ North Carolina Mating Design II (NCII) เป็นหนึ่งในแผนการผสมที่นิยมใช้ในพันธุศาสตร์เชิงปริมาณ เพื่อประเมินอัตราพันธุกรรม (heritability) และความสามารถในการรวมตัว (combining ability) แผนการผสมพันธุ์แบบ NCII สามารถนำมาใช้ในการประเมินรูปแบบการทำงานของยีนที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมลักษณะที่ต้องการศึกษาได้ (Comstock and Robinson, 1952) โครงการวิจัยปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดทนแล้งจำนวนมากใช้แผนการผสมพันธุ์แบบ NCII ในการสร้างตัวอย่างสำหรับทดสอบ เช่น Ngaboyisonga *et al.* (2019) ศึกษาความสามารถในการผสมของข้าวโพด 17 สายพันธุ์ โดยใช้แผนการผสมพันธุ์แบบ NCII

ในลักษณะผลผลิตและวันออกใหม่พบว่า ลักษณะผลผลิตเมล็ดถูกควบคุมโดยอิทธิพลแบบบวก (additive effect) โดยสายพันธุ์พ่อแม่มีค่าความสามารถในการรวมตัวทั่วไป (general combining ability; GCA) เป็นค่าบวกและมีความแตกต่างทางสถิติ ซึ่งสายพันธุ์เหล่านี้ได้ถูกนำไปพัฒนาข้าวโพดทนแล้งต่อ คล้ายกันกับงานของ Derera *et al.* (2008) ที่ศึกษาการทำงานของยีนที่ควบคุมลักษณะผลผลิตภายใต้สภาวะแล้ง โดยใช้แผนการผสมแบบพันธุ์ NCII เช่นกัน พบว่า การทำงานของยีนแบบบวกมีบทบาทสำคัญต่อผลผลิต โดยมีผลกระทบของความสามารถในการรวมตัวทั่วไปของสายพันธุ์พ่อ (GCA_m) ที่เหนือกว่าการรวมตัวทั่วไปของสายพันธุ์แม่ (GCA_f) สำหรับผลผลิตภายใต้สภาวะแห้งแล้งบ่งชี้ให้เห็นว่า จีโนไทป์ของแม่มีบทบาทที่สำคัญในการกำหนดผลผลิตภายใต้สภาวะแล้ง นอกจากนี้ Erdal *et al.* (2015) ที่ได้ทำการศึกษาความสามารถในการผสมควบคู่กับดัชนีการทนแล้ง (stress tolerance index;

STI) พบว่า สายพันธุ์ที่มีค่าดัชนีการทนแล้งสูงและมีศักยภาพในการให้ผลผลิตที่สูงมากทั้งภายใต้สภาพการปลูกแบบให้น้ำปกติและสภาพขาดน้ำ

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงทำการสร้างลูกผสมของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จากแผนการผสมพันธุ์แบบ NCII เพื่อศึกษารูปแบบการทำงานของยีนที่เกี่ยวข้องกับลักษณะความทนแล้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การสร้างลูกผสมตามแผนการผสมพันธุ์แบบ North Carolina Design II

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สายพันธุ์แท้ จำนวน 8 สายพันธุ์ ได้แก่ Nei542010 Nei9202 Ki48 Ki53 Ki59 Kei1421 Nei492006 และ Nei452004 (Table 1) กำหนดให้สายพันธุ์ Nei542010 และ Nei9202 ใช้เป็นสายพันธุ์พ่อ ขณะที่พันธุ์ที่เหลือใช้เป็นพันธุ์แม่ ลูกผสมทั้งหมดที่ได้มีจำนวน 12 คู่ผสม ดังแสดงใน

Table 1 North Carolina Mating Design II with 12 F1 progenies.

Female parents	Male parents	
	Nei9202	Nei542010
Ki48	Ki48 x Nei9202	Ki48 x Nei542010
Ki53	Ki53 x Nei9202	Ki53 x Nei542010
Ki59	Ki59 x Nei9202	Ki59 x Nei542010
Kei1421	Kei1421 x Nei9202	Kei1421 x Nei542010
Nei452004	Nei452004 x Nei9202	Nei452004 x Nei542010
Nei492006	Nei492006 x Nei9202	Nei492006 x Nei542010

2. การทดสอบลูกผสมในสภาพเครียดจากการขาดน้ำ

ปลูกเมล็ดของลูกผสมทั้ง 12 คู่ผสม ในโรงเรือนระบบปิดที่มีการควบคุมการให้น้ำโดยการใช้ระบบน้ำหยด ปลูกข้าวโพด 1 ต้นต่อถุงในถุงปลูกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตรและสูง 44.5 เซนติเมตร บรรจุวัสดุปลูกที่เตรียมจากดินปลูกและปุ๋ยหมักที่อัตราส่วน 2:1 วางแผนการทดลองแบบ 2x12 factorial in randomized complete block design

จำนวน 2 ซ้ำ และ 5 ต้นต่อคู่ผสมต่อซ้ำ มีหน่วยทดลองทั้งหมด 48 หน่วยทดลอง แต่ละหน่วยทดลองประกอบด้วยข้าวโพดจำนวน 240 ต้น กำหนดให้ปัจจัยที่ 1 คือ ลูกผสมทั้ง 12 คู่ผสม ส่วนปัจจัยที่ 2 คือ รูปแบบการให้น้ำ ได้แก่ 1) การให้น้ำแบบสม่ำเสมอ (WW) ซึ่งให้น้ำในตอนเช้า 1 ครั้งต่อวัน อัตราการให้น้ำเฉลี่ย 29.20 มล.ต่อนาที่ วันละ 30 นาที่ และ 2) การจำกัดการให้น้ำ (WS) เพื่อเหนี่ยวนำสภาพเครียดจากการขาดน้ำ กระทำโดยงดน้ำเป็นเวลา 7 วันเมื่อข้าวโพดมีอายุได้

33 วันหลังปลูกไปจนถึง 39 หลังปลูก จากนั้นดูแลต้นข้าวโพดให้เจริญเติบโต ให้อุณหภูมิ 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 ให้อุณหภูมิสูตร 15-15-15 โดยให้รองพื้นก่อนปลูก อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ (เฉลี่ยต้นละ 5.80 กรัมต่อต้น ครั้งที่ 2 ให้อุณหภูมิ สูตร 46-0-0 ที่อัตรา 44 กิโลกรัมต่อไร่ (เฉลี่ยต้นละ 5.16 กรัมต่อต้น) เมื่อข้าวโพดอายุได้ประมาณ 35 วันหลังปลูก พร้อมกันทุกสายพันธุ์และกำจัดวัชพืช จากนั้นเมื่อข้าวโพดอายุได้ประมาณ 120-125 วัน เริ่มทำการเก็บเกี่ยว น้ำหนักสดหลังปลูกเปลือก (Fresh weight; FW) ซึ่งในทุกครั้งที่ทำการเก็บเกี่ยวจะถูกนำมาชั่งน้ำหนักทันที และน้ำหนักฝักแห้งหลังอบ ที่ 72 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง

โดยในระหว่างที่ข้าวโพดถูกดองน้ำได้ 7 วัน (39 วันหลังปลูก) และกลับมาให้น้ำภายใน 24 ชั่วโมง (40 วันหลังปลูก) เก็บข้อมูลค่าความเขียวใบ (SPAD) โดยใช้เครื่อง SPAD meter จำนวน 10 จุดบนใบ และค่าการม้วนใบ (Leaf rolling: LR) ด้วยสายวัดที่ตรงกลางของใบ

3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางพันธุกรรม

เนื่องจากความเขียวใบเริ่มต้น และขนาดใบแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันตามลักษณะทางพันธุกรรม ดังนั้น ค่า SPAD และ LR จึงถูกนำมาหาค่าความแตกต่าง (Difference: Diff) ก่อนที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดย ค่าความต่างของค่า SPAD และ LR ในระหว่างวันที่ 39 หลังปลูก (งดน้ำที่ 7 วัน) หาได้จากสมการดังนี้

$$\text{Diff} = Y_w - Y_s$$

โดยที่ Y_w = ค่าก่อนงดน้ำของแต่ละสายพันธุ์ และ Y_s = ค่าหลังงดน้ำของแต่ละสายพันธุ์ (เพื่อค้นหาว่าสายพันธุ์ใดมีค่าความเขียวใบ และการม้วนใบลดลงน้อยที่สุด)

และ ค่าความต่างของค่า SPAD และ LR หลังจากกลับมาให้น้ำที่ 40 วันหลังปลูก (ภายใน 24 ชั่วโมง) หาได้จากสมการดังนี้

$$\text{Diff} = Y_r - Y_s$$

โดยที่ Y_r = ค่าหลังจากกลับมาให้น้ำ (rewatering) ของแต่ละสายพันธุ์ และ Y_s = ค่าการงดน้ำที่ 7 วันของสายพันธุ์ (เพื่อค้นหาว่าสายพันธุ์ใดสามารถกลับมาฟื้นตัวได้รวดเร็วที่สุด)

นำข้อมูลน้ำหนักฝักเปลือกเปลือกที่ได้จากข้าวโพดที่ปลูกใน 2 รูปแบบการให้น้ำ (WW และ WS) มาคำนวณค่าดัชนีความทนทานต่อสภาพเครียด โดยใช้สมการของ Fernandez (1992) ดังนี้

$$STI = \frac{Y_s \times Y_p}{\bar{Y}_p^2}$$

โดยที่ Y = ผลผลิตของพืชที่ขาดน้ำ Y_p = ผลผลิตของพืชที่ให้น้ำปกติ และ $\bar{Y}_p$ = ค่ายกกำลังสองของค่าเฉลี่ยของผลผลิตจากทุกจีโนไทป์ที่ได้รับน้ำปกติ

จากนั้นนำข้อมูลน้ำหนักฝักสดหลังปลูกเปลือกมาคำนวณค่าดัชนีความทนทานต่อความแล้ง และนำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของอิทธิพลหลัก รวมถึงประเมินค่าความสามารถในการรวมตัวทั่วไป (general combining ability; GCA) ของข้าวโพดสายพันธุ์พ่อแม่ และความสามารถในการรวมตัวเฉพาะ (specific combining ability; SCA) ของคู่ผสม โดยใช้แพ็คเกจ gpbStat (Patil and Lackshmi, 2020) ใน R v4.4.1 (R Core Team, 2024) พร้อมคำนวณค่าความแปรปรวนทางพันธุกรรมด้วยโปรแกรม PB Tools Version 2.0 (PBTools. 2014)

สำหรับการวิเคราะห์อัตราพันธุกรรมอย่างแคบ (narrow-sense heritability; h^2) ใช้สมการของ Grafius *et al.* (1952) ดังนี้

$$h^2 = \frac{\sigma_f^2 + \sigma_m^2}{\sigma_f^2 + \sigma_m^2 + \sigma_{fm}^2 + \sigma_{e/r}^2} \times 100$$

โดยที่ σ_f^2 σ_m^2 σ_{fm}^2 $\sigma_{e/r}^2$ = ความแปรปรวนทางพันธุกรรมของพันธุ์แม่ พันธุ์พ่อ ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์แม่และพ่อ ค่าความคลาดเคลื่อน และจำนวนซ้ำ ตามลำดับ

ผลการทดลองและวิจารณ์

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอิทธิพลหลัก

ผลการประเมินอิทธิพลหลักของคู่ผสม (crosses) ลักษณะการให้น้ำ (watering) และ ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัย (crosses x watering)

ด้วยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบ Two-way ANOVA ของลักษณะค่าความต่างความเขียวใบ (Diff_SPAD 39 DAP) ค่าความต่างการม้วนใบ ที่งดน้ำ 7 วัน (Diff_LR 39 DAP) และกลับมาให้น้ำภายใน 24 ชั่วโมง (40 DAP) น้ำหนักฝัก (FW) และน้ำหนักแห้ง (TDW) พบว่า อิทธิพลทั้ง 3 ชนิดดังกล่าว มีผลต่อลักษณะทุกลักษณะ ($P \leq 0.001$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัย

(crosses x watering) มีผลต่อลักษณะ SPAD 40 DAP ($P \leq 0.05$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2)

และเมื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของดัชนีความทนทานต่อสภาพเครียดของลักษณะน้ำหนักฝัก (STIFW) แบบ One-way ANOVA พบว่า คู่ผสมมีผลทางสถิติต่อดัชนีความทนทานต่อสภาพเครียด ($P \leq 0.01$) ในขณะที่ บล็อกไม่มีอิทธิพลทางสถิติต่อดัชนีความทนทานต่อสภาพเครียด (Table 3)

Table 2 Analysis of variance (ANOVA) of Difference SPAD and LR at 39 and 40 DAP fresh weight (FW) of 12 F1 progenies under different watering regime (water stress and well water) and stress tolerance index (STI).

SOV	df	MS					
		Diff_SPAD 39 DAP	Diff_SPAD 40 DAP	Diff_LR 39 DAP	Diff_LR 40 DAP	FW	TDW
block	1	0.2	1.047	2.3*	0.81	1	8
cross	11	13.5***	2.159	3.6***	2.02***	1094***	877***
watering	1	1748.9***	27.165***	326.1***	176.41***	16272***	12459***
Cross x watering	11	8.5***	2.827*	2.1***	2.31***	293***	195***
Residuals	23	0.6	1.003	0.4	0.31	35	31

Remark: * $P \leq 0.05$, *** $P \leq 0.001$

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) of stress tolerance index (STI) of FW with 12 F1 progenies under different watering regime (water stress and well water).

SOV	df	SS	MS	F-value	Pr(>F)
Block	1	0.002	0.002	0.285	0.604
Cross	11	1.727	0.157	24.387	3.89×10^{-06} **
Residuals	11	0.071	0.006		

Remark: ** $P \leq 0.001$

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least significant difference (LSD) พบว่าทั้งในสภาพงดน้ำ และสภาพให้น้ำปกติ คู่ผสม Ki48xNei542010 (94.987 และ 66.475 กรัม) และ Nei452004xNei542010 (74.66 และ 59.135 กรัม) ให้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักฝักการให้น้ำสองรูปแบบสูงที่สุดทั้งในลักษณะ FW และ TDW ลำดับ (Table 4) และมีลักษณะที่ติดเมล็ดและค่อนข้างจะสมบูรณ์กว่าคู่ผสมคู่อื่น

(Figure 1) ซึ่งจากการพิจารณาลักษณะของควบคู่เมื่ออยู่ในสภาพขาดน้ำ ที่ 39 วันหลังปลูก พบว่า คู่ผสม Ki48xNei542010 มีค่าความต่างการม้วนใบ (Diff_LR 39 DAP) ลดลงน้อยที่สุด (2.35 เซนติเมตร) และมีการกางใบอย่างรวดเร็วเมื่อกลับมาให้น้ำภายใน 24 ชั่วโมง โดยมีค่า (Diff_LR 40 DAP) วันหลังปลูก อยู่ที่ 4.90 เซนติเมตร และนอกจากนี้ยังพบว่าคู่ผสม Ki53xNei542010 และ Ki452004xNei542010

มีค่าความต่างความเขียวใบ (Diff_SPAD 40 DAP) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอยู่ที่ 3.56 และ 2.75 ซึ่งจากการศึกษาของ Jangpromma *et al.*, (2010) ที่ได้ประเมินปริมาณคอโรฟิลล์ โดยใช้เครื่อง SPAD ในสภาพขาดน้ำ โดยการเก็บข้อมูลค่า SPAD ที่ 90 วัน จะเห็นได้ชัดว่า สายพันธุ์ 03-4-425 มีค่า SPAD อยู่ที่ 37.30 ส่งผลให้มีค่า คอโรฟิลล์สูงถึง 7.56 ($\mu\text{g cm}^{-2}$) แต่ในขณะที่เดียวกันสายพันธุ์อื่น ๆ ที่มีค่า SPAD ลดลง ค่าคอโรฟิลล์จึงลดลงตามไปด้วย ซึ่งให้เห็นถึง

ความสำคัญของการเก็บค่าความเขียวใบ และจากการศึกษาของ Effendi *et al.* (2019) พบว่า ความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าการม้วนใบของข้าวโพดส่งผลให้ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของใบสูง อุณหภูมิของใบก็จะยิ่งต่ำลง การรักษาปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของใบให้อยู่ในระดับสูงในสภาวะความเครียดจากภัยแล้ง บ่งชี้ถึงความสามารถของต้นข้าวโพดในการดูดซับน้ำในดินเพียงพอผ่านรากที่ลึก และระงับการสูญเสียน้ำผ่านการคายน้ำ

Table 4 Analysis of variance (ANOVA) with LSD test table for SPAD, LR (39 and 40 DAP) FW and TDW of 12 F1crossed under water deficit condition (upper) and well water (lower).

watering	crosses	Diff_SPAD 39 DAP	Diff_SPAD 40 DAP	Diff_LR 39 DAP	Diff_LR 40 DAP	FW	TDW
Water Stress	Kei1421xNei542010	9.50 ef	1.82 abcdefgh	3.8 cd	3.90 cde	56.75 ^{jk}	44.89 ^{ij}
	Kei1421xNei9202	8.65 f	1.42 cdefghi	3.05 de	2.80 ef	35.99 ^m	24.59 ⁱ
	Ki48xNei542010	14.12 c	0.47 efghijk	2.35 e	1.90 f	94.98 ^{de}	66.47 ^{efg}
	Ki48xNei9202	8.41 f	2.52 abcde	2.95 de	3.05 def	56.83 ^{jk}	32.97 ^{kl}
	Ki53xNei542010	14.34 bc	3.56 ab	4.60 bc	3.10 de	68.67 ^{hij}	53.70 ^{hi}
	Ki53xNei9202	11.92 d	1.93 abcdefg	5.40 b	3.40 de	42.47 ^{lm}	29.14 ⁱ
	Ki59xNei542010	9.39 ef	1.46 cdefghi	5.85 b	7.05 a	71.49 ^{ghi}	43.75 ^{ijk}
	Ki59xNei9202	10.92 de	0.13 ghijk	4.77 bc	3.97 cd	49.50 ^{kl}	33.57 ^{jkl}
	Nei452004xNei542010	16.72 a	2.75 abc	8.20 a	4.90 bc	74.66 ^{ghi}	59.13 ^{gh}
	Nei452004xNei9202	14.84 bc	1.70 bcdefghi	4.80 bc	6.00 ab	51.51 ^{kl}	30.71 ⁱ
	Nei492006xNei542010	10.35 de	2.32 abcdef	5.75 b	3.00 def	65.75 ^{ij}	35.80 ^{jkl}
	Nei492006xNei9202	15.79 ab	3.78 a	4.83 bc	4.03 cd	42.33 ^{lm}	24.52 ⁱ
Wall water	Kei1421xNei542010	2.46 g	2.60 abcd	-0.65 fg	0.35 g	79.04 ^{fgh}	56.73 ^{gh}
	Kei1421xNei9202	1.33 gh	0.61 defghij	-1.20 gh	-0.20 g	74.27 ^{ghi}	52.12 ^{hi}
	Ki48xNei542010	0.99 ghi	1.46 cdefghi	-0.45 fg	0.70 g	117.93 ^{ab}	96.61 ^{ab}
	Ki48xNei9202	0.78 hi	0.44 fghijk	-0.70 fg	0.4 g	117.66 ^{ab}	80.43 ^{cd}
	Ki53xNei542010	0.76 hij	0.34 fghijk	-2.00 h	0 g	82.09 ^{fg}	71.58 ^{def}
	Ki53xNei9202	0.63 hijk	-1.51 k	-0.80 fgh	-0.30 g	64.575 ^{ij}	43.47 ^{ijk}
	Ki59xNei542010	0.26 hijk	1.61 bcdefghi	-0.20 fg	0.10 g	104.985 ^{cd}	85.6 ^{bc}
	Ki59xNei9202	-0.55 ijkl	0.48 efghijk	0.30 f	0 g	80.615 ^{fgh}	58.33 ^{gh}
	Nei452004xNei542010	-0.79 jkl	-0.35 ijk	0 fg	0.10 g	128.675 ^a	106.535 ^a
	Nei452004xNei9202	-0.92 kl	-0.91 jk	-0.10 fg	0.10 g	111.22 ^{bc}	77.25 ^{cde}
	Nei492006xNei542010	-1.60 l	-0.15 hijk	-0.10 fg	0 g	90.865 ^{ef}	62.445 ^{fgh}
	Nei492006xNei9202	-3.26 m	1.19 cdefghi	-0.30 fg	-0.15 g	100.91 ^{cde}	74.825 ^{cde}
mean		6.044583	1.238125	2.09	2.0088	77.659	56.0508
F-value		***	*	***	***	***	***
LSD		1.576657	2.071906	1.2588	1.1547	12.2014	11.4874
CV%		12.60904	80.89413	29.1162	27.7869	7.5951	9.9072

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความทนทานต่อสภาพเครียด (STI) ระหว่างคู่ผสม พบว่า คู่ผสม Ki48xNei542010 (1.215) Nei452004xNei542010 (1.040) Ki59xNei542010 (0.810) และ Ki48xNei9202 (0.725) มีดัชนีความทนทานต่อสภาพเครียดสูง ตามลำดับ (Figure 2) ซึ่งรายงาน

จาก Dorina. (2020) พบว่า HS 880-13, HS 1158-14 และ HS 1156-14 ได้รับเลือกให้เป็นลูกผสมที่มีผลผลิตสูงทั้งในสภาพขาดน้ำ และให้น้ำปกติ ทั้งนี้ยังมีค่า STI สูง ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปพัฒนาต่อเป็นสำหรับข้าวโพดทนแล้ง

Watering	Female		Ki48	Nei452004	Nei492006	KI53	KI59	Kei1421
	Male							
Well Water	Nei9202							
			117.660 ab	111.220 bc	100.91 cde	64.575 ij	80.615 fgh	74.270 fgh
Water Deficit	Nei542010							
			117.935 ab	128.675 a	90.865 ef	82.095 fg	104.985 cd	79.045 fgh
Water Deficit	Nei9202							
			56.830 jk	51.510 kl	42.335 lm	42.475 lm	49.505 kl	35.995 m
Water Deficit	Nei542010							
			94.985 de	74.660 ghi	65.755 ij	68.670 hij	71.490 ghi	56.755 jk

Figure 1 Mean comparison with Least Significance Difference test at 0.01 significant level of 12 F1 crosses for ear weight in grams per plot under water stress and well water conditions.

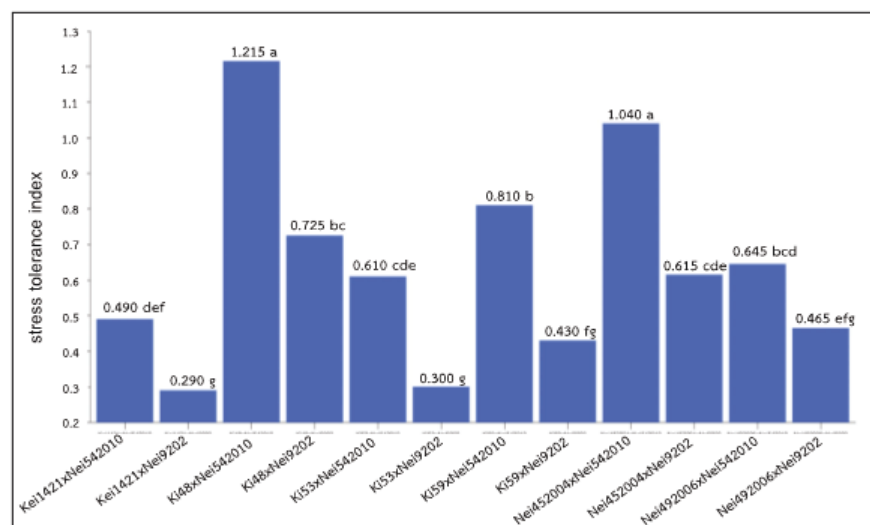


Figure 2 Mean comparison with Least Significance Difference test at 0.01 significant level of 12 F1 crosses for stress tolerance index.

การประเมินความสามารถในการและค่าทางพันธุกรรมของค่าดัชนีความทนทานต่อสภาพเครียด

จากการประเมินความสามารถในการรวมตัวทั่วไป (GCA) ของลักษณะของดัชนีการทนทานต่อสภาพเครียดจากการขาดน้ำ (Table 5) พบว่า พันธุ์พ่อ Nei542010 (12.805) พันธุ์แม่ Ki48 (16.66) และ Nei452004 (3.838) มีค่า GCA เป็นบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พันธุ์เหล่านี้สามารถนำไปพัฒนาต่อเป็นพันธุ์ข้าวโพดทนแล้งและให้ผลผลิตสูงได้ (CIMMYT, 2002) และเมื่อประเมินความสามารถในการรวมตัวเฉพาะ (SCA) ของดัชนีการทนทานต่อความเครียด พบว่า คู่ผสม Ki48xNei542010 (6.272) มีค่า SCA เป็นบวกสูงสุดเพียงคู่เดียว ($P < 0.05$) คล้ายกันกับการศึกษาของ Mustafa et al. (2023) ที่พบว่า คู่ผสม 10137 x Sialkot-13 ผลผลิตต่อต้นสูงที่สุด ให้ค่า SCA เป็นบวก ซึ่งเป็นผลจากยีนแบบข่ม (non-additive gene effect) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าคู่ผสมที่สามารถให้ผลผลิตสูงในสภาพขาดน้ำเหมาะสำหรับนำไปพัฒนาเป็นคู่ผสมที่ให้ผลผลิตสูงต่อไปเนื่องจากสามารถปรับตัวได้ดีเมื่ออยู่ในสภาพแล้ง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่แสดงใน (Table 6) พบว่า ค่าความแปรปรวนที่เกิดจากสภาพแวดล้อม (VE) มีค่าต่ำมาก ($VE = VP - VG$) ส่งผลให้คู่ผสมแสดงผลจากจีโนไทป์ (VG) ได้ดี ดังนั้น การคัดเลือกคู่ผสมที่มีลักษณะดีเด่นจึงมีความแม่นยำ นอกจากนี้ พบว่า อัตราพันธุกรรมแบบแคบ (h^2) ของลักษณะ STI สูงถึง 0.9025 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ลักษณะความทนทานต่อสภาพสภาพเครียดจากการขาดน้ำถูกส่งถ่ายให้รุ่นลูกได้เป็นสัดส่วนที่สูง และเมื่อพิจารณารูปแบบการทำงานของยีนที่เกี่ยวข้องกับลักษณะดัชนีการทนทานต่อสภาพเครียดน้ำ พบว่า ลักษณะดัชนีการทนทานต่อสภาพเครียดจากการขาดน้ำ เกี่ยวข้องกับการทำงานของ

ยีนแบบบวก (additive) เนื่องจากค่า dominance ratio มีค่าต่ำกว่า 1 (Table 5) เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการทำงานของยีนที่ได้จากรายงานของ Erdal et al. (2015) ยังมีการวิเคราะห์รูปแบบการทำงานของยีนในลักษณะอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตในการทนแล้งในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ภายใต้สภาพขาดน้ำ พบว่า วันออกดอกต่อผู้ ช่วงห่างระหว่างวันออกดอกต่อผู้และวันออกใหม่ (anthesis-silking interval) และจำนวนฝักต่อต้น ถูกควบคุมด้วยยีนแบบบวก แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่า ความสูง น้ำหนัก 1,000 g เมล็ด และผลผลิตถูกควบคุมด้วยยีนแบบข่ม (dominant) ทั้งนี้ได้ทำการเลือกสายพันธุ์ Ant I-91 x TK 72 เป็นคู่ผสมที่ดีที่สุดซึ่งมีค่า STI ของผลผลิตสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม Falconer and Mackay (1996) แนะนำว่า ค่าอัตราพันธุกรรมขึ้นอยู่กับชนิดของประชากร และสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ ดังนั้น ค่าที่สังเกตได้จะมีความแตกต่างออกไปตามประชากร สภาพแวดล้อม และลักษณะเฉพาะของการประมาณค่าพันธุกรรม

จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ในการพัฒนาข้าวโพดลูกผสมเดี่ยวให้มีความทนทานต่อสภาพเครียดจากการขาดน้ำ จำเป็นอย่างยิ่งที่นักปรับปรุงพันธุ์ต้องให้ความสำคัญในการคัดเลือกสายพันธุ์พ่อและแม่ ที่มียีนเป็น homozygous ในตำแหน่งของอัลลีลที่ควบคุมลักษณะทนแล้ง เพื่อให้ลูกผสมได้รับยีนดังกล่าว และแสดงออกได้อย่างเต็มที่อันเป็นผลมาจากการทำงานของยีนแบบบวกสะสม ซึ่งในทางกลับกันจากการรายงานของ Singh et al. (1993) และ Quinby and Liang (1969) พบว่า ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในความแตกต่างของผลผลิตน้ำหนักสด จำนวนเมล็ดต่อฝัก เกิดจาก อัลลีลแบบ dominant (Aa) ซึ่งหากต้องการลูกผสมสายพันธุ์ใหม่ ๆ ในสภาพ heterozygous จะมีประสิทธิภาพมากกว่า homozygous ที่มีอัลลีลเป็น AA และ aa

Table 5 Estimates of general combining ability (GCA) under well-water (WW) water stress (WS) and Stress tolerance index of 8 parental lines

lines	FW_WW	FW_WS	STI_FW
Males			
Nei542010	4	10.354***	12.805**
Nei9202	-4	-10.354***	-12.805**
Females			
Kei1421	-19.833***	-18.312***	-12.872**
Ki48	17.167***	20.062***	16.66**
Ki53	-22.333***	-4.312	-3.675*
Ki59	-0.333	1.188	1.25
Nei452004	25.667***	5.188	3.838*
Nei492006	-0.333	-3.812	-5.202*

Remark: * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$ **Table 6** Estimates of specific combining ability (SCA) for Stress tolerance index of 12 F1 crosses

F1 crosses	FW_WW	FW_WS	STI_FW
Kei1421xNei542010	-3	0.146	-2.425
Kei1421xNei9202	-4	-3.229	2.425
Ki48xNei542010	6.5	4.146	6.272*
Ki48xNei9202	4.5	-0.354	-6.272
Ki53xNei542010	1.5	-7.354	0.292
Ki53xNei9202	-5.5	6.646	-0.292
Ki59xNei542010	3	-0.146	-1.813
Ki59xNei9202	4	3.229	1.813
Nei452004xNei542010	-6.5	-4.146	-1.23
Nei452004xNei9202	-4.5	0.354	1.23
Nei492006xNei542010	-1.5	7.354	-1.095
Nei492006xNei9202	5.5	-6.646	1.095
Genotypic Variance (VG)	391.730	248.505	0.078
Phenotypic Variance (VP)	410.518	292.828	0.084
Additive variance (VA)	749.124	1.250	0.100
dominant variance (VD)	297.218	4.833	0.005
Narrow sense heritability (h ²)	0.703	0.187	0.903
Dominance Ratio	0.891	2.781	0.307

Remark: * $P \leq 0.05$

สรุป

จากการทดสอบลูกผสมทั้ง 12 คู่ผสมที่ได้จากแผนการผสมแบบ NCII ของสายพันธุ์พ่อแม่จำนวน 8 สายพันธุ์ โดยการศึกษา การคัดเลือกพ่อแม่ที่ให้ผลผลิตดี มีสมรรถนะรวมตัวทั่วไปดี สมรรถนะในการรวมตัวแบบเฉพาะ และมีค่าดัชนีทนสภาพเครียดสูง อาจมีแนวโน้มจะให้ลูกผสมที่มีสมรรถนะการผสมเฉพาะสูงได้ เช่นที่พบในคู่ผสมของ คู่ผสม Ki48xNei542010 ทั้งในแบบทดสอบภายใต้สภาพการให้น้ำแบบปกติและสภาพเครียดน้ำในโรงเรือนระบบปิด โดยลักษณะการทนทานต่อสภาพเครียดน้ำของข้าวโพดคู่ผสมเกี่ยวข้องกับการทำงานของยีนแบบบวก ดังนั้น การเลือกพันธุ์พ่อแม่ที่มียีนควบคุมลักษณะดังกล่าวเป็น homozygous ณ ตำแหน่งอัลลีลที่ควบคุมลักษณะดังกล่าว จะช่วยส่งผลให้ได้ลูกผสมที่มีลักษณะความทนทานต่อสภาพแล้งได้ดี นอกจากนี้ พบว่า ความทนทานต่อสภาพแล้งมีอัตราพันธุกรรมแบบแคบ (h^2) ที่สูง ดังนั้น การให้ความสำคัญกับการเลือกพันธุ์พ่อแม่ที่มีลักษณะทนทานต่อสภาพเครียดน้ำที่ดี จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการบรรเทาความเสียหายของผลผลิตข้าวโพดลูกผสมที่ต้องเผชิญสภาพฝนทิ้งช่วงได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย โดยมอบทุน "ทุนศิษย์กัณ ภูมิ" ประจำปีการศึกษา 2663 ให้แก่ผู้วิจัย มา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงพาณิชย์. 2566. กองส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตร 1 กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์. (ระบบออนไลน์). แหล่งข้อมูล: <https://regional.moc.go.th/th/file/get/file/2023122527fc40bb85fc4fee7b16f939636afc80090537.pdf> (26 ตุลาคม 2567).
- กระทรวงพาณิชย์. 2567. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ประจำปี สัปดาห์ที่ 3 เดือนมิถุนายน 2567. (ระบบออนไลน์). แหล่งข้อมูล: <https://regional.moc.go.th/th/file/get/file/202406254ef9b51ff3a70f017b939ea1df5ae930100426.pdf> (3 ตุลาคม 2567).

- CIMMYT. 2002. Maize inbred lines released by CIMMYT: A Compilation of 475 CIMMYT maize lines (CMLs). CIMMYT, Mexico.
- Comstock, R. and H. Robinson. 1952. Estimation of average dominance of genes. pp.494-516. *In*: Heterosis. North Carolina State College.
- Derera, J., P. Tongoona, B.S. Vivek and M.D. Laing. 2008. Gene action controlling grain yield and secondary traits in southern African maize hybrids under drought and non-drought environments. *Euphytica* 162(3): 411-422.
- Dorina, B. 2020. Screening for drought tolerance in maize hybrids using new indices based on resilience and production capacity. *Economic Engineering in Agriculture and Rural Development* 20: 2285-3952.
- Effendi, R., R. Priyanto, M. Aqil and M. Azrai . 2019. Drought adaptation level of maize genotypes based on leaf rolling, temperature, relative moisture content, and grain yield parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 175: 1755-1315.
- Erdal, S., P. Mehmet, O. Ahmet, A. Koksai, and S. Suleyman. 2015. Combining abilities of grain yield and yield related traits in relation to drought tolerance in temperate maize breeding. *Turkish Journal of Field Crops* 20(2): 203-212.
- Falconer, D.S. and T.F.C. Mackay. 1996. Introduction to quantitative genetics. 4th ed. Longman, Essex, UK. 464 p.

- Fernández, G.C.J. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. Department of Agricultural Economics, University of Nevada Reno, USA.
- Grafius, J.E., W.L. Nelson and V.A. Dirks. 1952. The heritability of yields in barley as measured by early generation bulked progenies. *Agronomy Journal* 44: 253-257.
- Jangpromma, N., P. Songsri, S. Thammasirirak and P. Jaisil. 2010. Rapid assessment of chlorophyll content in sugarcane using a SPAD chlorophyll meter across different water stress conditions. *Asian Journal of Plant Science* 9: 368-374.
- Laskari, M., G. Menexes, I. Kalfas, I. Gatzolis and C. Dordas. 2022. Water stress effects on the morphological, physiological characteristics of maize (*Zea mays* L.) and on environmental cost. *Agronomy* 12(10): 2386.
- Messina, C., I.A. Ciampitti, D. Berning, D. Bubeck, G. Hammer and M. Cooper. 2022. Sustained improvement in tolerance to water deficit accompanies maize yield increase in temperate environments. *Crop Science* 62(6): 2138-2150.
- Mustafa, A., Naeem, A., Kausar, H., Ismail, S., Mubarak, S., Kanwal, B., Abbas Naqvi, S.M.T., Ahmed, Z. and Maqbool, R., 2023. Genetic analysis of wheat accessions for yield contributing traits under water deficit condition. *Journal of Agricultural Research* 61(1).
- Ngaboyisonga, C., F. Nizeyimana, M.K. Gafishi, T. Ndayishimiye, J. Mbarushimana, J. Nyirabashyitsi, P. Mutanyagwa and A. Nyombayire. 2019. Combining ability for grain yield and silking of maize inbred lines derived from three open pollinated varieties released for mid altitudes of Rwanda: Comparison of Diallel and North Carolina Design II. *African Crop Science Journal* 27(1): 59-75.
- Patil, N. and R.G. Lakshmi. 2020. Comprehensive statistical analysis of plant breeding experiments. 4070606, doi:10.5281/zenodo.
- PBTools. 2014. Biometrics and breeding informatics, North Carolina design II, International Rice Research Institute, Los Baños, Laguna. 149 p.
- Quinby, J.R. and G.H. Liang. 1969. Leaf number and duration to floral initiation and flowering of sorghum parents and hybrids. *Canadian Journal of Genetics and Cytology* 11: 275-280.
- R Core Team. 2024. R: A Language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Singh, K.B., R.S. Malhotra, M.H. Halila, E.J. Knights and M.M. Verma. 1993. Current status and future strategy in breeding chickpea for resistance to biotic and abiotic stresses. *Euphytica* 73: 137-149.