

บทนำ

ความสำคัญ ที่มาของปัญหาวิจัย

ในอดีตอาจมองว่าข้าวไร่ (upland rice) เป็นธัญพืชที่มีการปลูกและใช้ประโยชน์จำเพาะสำหรับเกษตรกรในเขตพื้นที่สูงเท่านั้น แต่ในปัจจุบันสำหรับประเทศไทยมีการปลูกและนำมาใช้ประโยชน์ข้าวไร่ในพื้นที่ต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เพื่อวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น เพิ่มรายได้เสริมจากการปลูกพืชหลัก ได้แก่ การปลูกข้าวไร่ในพื้นที่ว่างระหว่างต้นยางพารา หรือการปลูกเพื่อเป็นอาหารสุขภาพตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งพบว่าปัจจุบันมีการจำหน่ายสินค้าเกษตรโดยเฉพาะผลผลิตของพืชพันธุ์พื้นเมืองโดยเกิดจากการรวมกลุ่มของเกษตรกรเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่เกษตรกรผู้ผลิตได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ส่วนหนึ่งสาเหตุที่เกษตรกรเริ่มให้ความสนใจกับการปลูกข้าวไร่เพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องการน้ำเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตน้อยกว่าในการปลูกข้าวนา แต่อย่างไรก็ตามผลผลิตที่ได้เนื่องจากการปลูกข้าวไร่ก็ยังน้อยมากเช่นกัน

การที่ผลผลิตข้าวไร่ต่ำเมื่อเทียบกับข้าวนาสวนมาจากหลายสาเหตุ เช่น การจัดการปัญหาวัชพืช ขาดการบำรุงดินอย่างต่อเนื่อง ขาดน้ำในช่วงของฤดูปลูกเนื่องจากการปลูกข้าวไร่ในพื้นที่สูงอาศัยน้ำฝนเพียงอย่างเดียว และในเรื่องของพันธุกรรมที่มีการปรับปรุงและพัฒนาน้อยกว่าข้าวนาเนื่องจากมีปริมาณการนำไปใช้ประโยชน์รวมทั้งผู้เกี่ยวข้องมีจำนวนน้อยกว่า สำหรับลักษณะที่จำเป็นต่อการให้ผลผลิตสูงข้าวไร่มีหลายลักษณะได้แก่ ความสามารถในการใช้ธาตุอาหารพืช ทนแล้ง ทนร้อน การแข่งขันกับวัชพืช ต้านทานโรคและแมลง เป็นต้น สำหรับลักษณะต้านทานต่อการหักล้มของข้าว เป็นลักษณะที่สำคัญสำหรับทั้งข้าวนาและข้าวไร่ เนื่องจากเป็นลักษณะที่ทำให้สูญเสียผลผลิตได้ตลอดช่วงการปลูก ซึ่งสาเหตุที่ทำให้พืชเกิดการหักล้มเกิดจากหลายปัจจัยร่วมกัน เช่น สภาพแปลง ได้แก่ ความลาดชันหรือปริมาณธาตุอาหารในดิน สภาพอากาศ ได้แก่ ความรุนแรงของฝนหรือลม (หรือกรณีเกิดการขาดน้ำ ลำต้นก็สามารถหักล้มได้เช่นกัน) ปัญหาการแข่งขันสูงกับวัชพืช ประกอบกับการมีพันธุกรรมที่มีศักยภาพในการต้านทานต่อการหักล้มน้อย ก็สามารถเป็นสาเหตุของการหักล้มของข้าวไร่ได้เช่นกัน ซึ่งระยะหรือช่วงที่ข้าวเกิดการหักล้มก็อาจก่อให้เกิดความเสียหายกับผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตได้แตกต่างกัน

ด้วยเหตุนี้ การปรับปรุงพันธุ์หรือพัฒนาพันธุ์ข้าวไร่ให้ต้านทานการหักล้มไม่เพียงแต่จะเพิ่มศักยภาพการผลิตข้าวไร่สำหรับเกษตรกรในพื้นที่สูงหรือพื้นที่ที่ขาดน้ำเท่านั้น แต่ยังสามารถรองรับความต้องการของผู้ผลิตและผู้บริโภคหรือผู้สนใจในอาหารสุขภาพ เกษตรอินทรีย์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรผู้ผลิต เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชุมชนฐานรากในภาคการเกษตรได้ในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ประเมินคุณสมบัติเบื้องต้นของข้าวไร่จำนวน 8 พันธุ์ โดยศึกษาลักษณะทั้งทางกายภาพและเคมีต่อความสามารถในการต้านทานการหักล้ม
2. ประเมินความสามารถในการสร้างลูกผสมระหว่างพันธุ์เดิมที่เกษตรกรยอมรับหรือพันธุ์นอกพื้นที่ที่เกษตรกรสนใจ กับพันธุ์ที่มีลักษณะต้านทานการหักล้มเพื่อใช้เป็นพันธุ์พ่อแม่ตามขั้นตอนการปรับปรุงพันธุ์

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการแสดงลักษณะต้านแรงผลึกหรือการโน้มต้นเพื่อป้องกันความสามารถในการต้านทานการหักล้ม และบันทึกลักษณะทางสรีรวิทยา และกายภาพบางประการที่มีรายงานความเกี่ยวข้องกับความสามารถในการต้านทานการหักล้มของข้าวไร่พันธุ์ที่คัดเลือกไว้
2. วิเคราะห์ลักษณะทางเคมีที่มีรายงานความเกี่ยวข้องกับการแสดงความสามารถในการต้านทานการหักล้มในข้าวไร่พันธุ์ที่คัดเลือกไว้
3. ประเมินลักษณะองค์ประกอบผลผลิตและผลผลิตของข้าวไร่พันธุ์ที่คัดเลือกไว้
4. ประเมินผลร่วมกันระหว่างผลจากข้อที่ 1-3 สำหรับเลือกพันธุ์กรรมที่จะใช้เป็นพ่อแม่ในการผสมพันธุ์
5. สร้างลูกผสมเพื่อใช้สำหรับการปรับปรุงพันธุ์
6. ประเมินความสามารถของลูกผสมจากพ่อแม่พันธุ์ต่าง ๆ

ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ปัจจุบันเกษตรกรและผู้บริโภคเริ่มหันมาสนใจการเกษตรในระบบอินทรีย์ การใช้ประโยชน์จากพืชพันธุ์พื้นเมืองรวมทั้งข้าวพันธุ์พืชเมืองเพิ่มมากขึ้น ส่วนหนึ่งเพราะมีข้อมูลเผยแพร่เกี่ยวกับสารอาหารหรือคุณค่าทางโภชนาการบางประการที่โดดเด่น และเป็นประโยชน์ต่อร่างกายซึ่งสอดคล้องกับความต้องการดูแลสุขภาพสำหรับผู้บริโภคในปัจจุบัน ซึ่งข้าวไร่เป็นข้าวประเภทหนึ่งที่พบว่าส่วนใหญ่ที่มีการใช้ประโยชน์เป็นพันธุ์พื้นเมืองและได้รับการปรับปรุงพันธุ์ค่อนข้างน้อย

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าข้าวไร่จะมีคุณลักษณะที่ได้เปรียบ เช่น การใช้น้ำตลอดช่วงการปลูกค่อนข้างน้อย ทำให้เพียงพอต่อการเพาะปลูกโดยอาศัยน้ำฝนหรือมีการปลูกตั้งแต่ฤดูฝนถึงต้นฤดูหนาว แต่ผลผลิตข้าวไร้นับว่าต่ำเมื่อเทียบกับข้าวนา เนื่องจากข้าวไร่ประสบปัญหาในการปลูกหลายประการ ประกอบกับมีการพัฒนาพันธุ์ให้ต้านทานต่อปัจจัยคุกคามต่าง ๆ เหล่านั้นค่อนข้างน้อย การเผยแพร่หรือนำพันธุ์กรรมข้าวไร่ไปส่งเสริมการปลูกนอกพื้นที่หรือแม้แต่การตัดสินใจปลูกหรือเพิ่มพื้นที่ปลูกสำหรับเกษตรกรรายเดิมเองยังพบว่ามีปัญหา เนื่องจากผลตอบแทนต่ำ เนื่องผลผลิตต่ำแม้ว่าต้นทุนในการผลิตจะน้อยก็ตาม ซึ่งปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งของการปลูกข้าวไร่คือ การหักล้ม เพราะสามารถเกิดได้เนื่องจากทั้งสภาพแวดล้อม พันธุ์กรรม รวมทั้งร่วมกันระหว่างปัจจัยทั้งสองนี้ ยกตัวอย่างเช่น ความรุนแรงของการหักล้มขึ้นกับหลายปัจจัยทั้งสภาพพื้นที่ เช่น การปลูกในพื้นที่ลาดชัน

สามารถส่งผลกระทบต่อระบบรากหรือความสามารถในการจับยึดดิน การได้รับแรงปะทะจากลมและฝน หรือแม้แต่การปลุกในพื้นที่ราบที่มีการแข่งขันของวัชพืชหรือการปลุกภายใต้ร่มเงา การยึดตัวของลำต้นก็อาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการหักล้ม การขาดน้ำในช่วงการปลุกก็สามารถส่งเสริมให้เกิดต้นล้มได้เนื่องจากเนื้อเยื่อลำต้นขาดน้ำ ซึ่งการหักล้มของข้าวไม่ว่าจะเกิดในช่วงใดของการเจริญเติบโตจนถึงระยะการเก็บเกี่ยวล้วนก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลผลิตได้เช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ การปรับปรุงพันธุ์ข้าวไร้ให้ต้านทานการหักล้มเป็นลักษณะที่น่าสนใจ เนื่องจากการหักล้มเป็นปัญหาหนึ่งสำหรับการปลุกข้าวไร้ อย่างไรก็ตาม การพัฒนาพันธุ์ให้มีความสามารถในการต้านทานการหักล้มจำเป็นต้องพิจารณาการยอมรับของเกษตรกรที่มีต่อพันธุ์เดิมด้วย ซึ่งการเลือกใช้ประโยชน์จากพันธุ์ของเกษตรกรมีหลายประเด็นร่วมกัน เช่น ผลผลิต คุณภาพการหุงต้ม รสชาติ ความเชื่อ-ประเพณี และอื่น ๆ

ซึ่งจากงานวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในปีที่ผ่านมา (งบประมาณปี 2558) จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้ทำการศึกษาลักษณะต้านทานการหักล้มในข้าวไร้พันธุ์ที่รวบรวมได้บางส่วนที่มีการใช้ประโยชน์ในพื้นที่กรมอุทยานแห่งชาติแก่งกระจาน ตำบลห้วยสัตว์ใหญ่ อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และบางส่วนที่รวบรวมได้จากอำเภอหนองหญ้าปล้อง จังหวัดเพชรบุรี และพันธุ์ที่ได้รับความอนุเคราะห์ในการนำมาศึกษาวิจัยร่วมจากมูลนิธิโครงการหลวง ทำให้สามารถคัดเลือกพันธุ์ได้ในสองกลุ่มหลัก ๆ ได้แก่ กลุ่มที่หนึ่ง พันธุ์ที่มีลักษณะสัมพันธ์กับการต้านทานการหักล้ม ได้แก่ ลำต้นตั้งตรง แสดงความต้านทานต่อแรงผลัดล้มที่ทำการทดสอบระดับแปลงสูง และกลุ่มที่สอง พันธุ์ที่เกษตรกรมีการใช้ประโยชน์เดิมบางพันธุ์ และบางพันธุ์เกษตรกรให้ความสนใจเนื่องจากมีรูปร่างทางกายภาพที่เกษตรกรตรงตามต้องการ แต่ผลการทดสอบในแปลงพบว่าลำต้นมีการหักล้มทำให้เกิดผลผลิตได้ค่อนข้างยาก การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการต่อยอดงานวิจัยเดิม โดยเป็นการเริ่มต้นงานการปรับปรุงพันธุ์พันธุ์เพื่อเพิ่มลักษณะต้านทานให้แก่ข้าวไร้ ทั้งนี้เพราะแม้ว่าจะมีพันธุ์กลุ่มที่หนึ่งที่มีลักษณะการต้านทานการหักล้ม แต่การใช้พันธุ์เดิมซ้ำ ๆ ในการปลุกข้าวไร้มาอย่างต่อเนื่อง ทำให้เริ่มพบการระบาดของโรคเพิ่มขึ้น เช่น โรคข้าวเมล็ดด่าง เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ การปรับปรุงลักษณะต้านทานต่อการหักล้มโดยการให้เกษตรกรเข้ามามีส่วนทั้งในการคัดเลือกพันธุ์ที่สนใจ (พ่อแม่) ก่อนการผสม และระหว่างการพัฒนาปรับปรุงพันธุ์ จึงเป็นเป้าหมายของงานวิจัยเพื่อให้ได้พันธุ์ที่มีลักษณะที่สัมพันธ์กับการต้านทานการหักล้ม และมีลักษณะอื่น ๆ ที่ตรงความสนใจและความต้องการของเกษตรกร เนื่องจากมีรายวิจัยที่พบว่าบางลักษณะที่บ่งชี้ความสามารถในการหักล้มจะส่งผลต่อการแตกตอของพืชด้วยเช่น การเข้ามามีส่วนร่วมของเกษตรกรจะส่งผลต่อการยอมรับของเกษตรกรเพื่อให้สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ในพื้นที่หรือนอกพื้นที่ได้อย่างทันที

อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยงานการปรับปรุงพันธุ์ที่ขึ้นจำเป็นต้องอาศัยเวลาทำการศึกษานานปี ด้วยเหตุนี้ในปีแรกสามารถดำเนินการได้เฉพาะการประเมินลักษณะพันธุ์ที่คัดเลือกไว้เพื่อการปรับปรุงพันธุ์ และการเริ่มต้นงานปรับปรุงพันธุ์โดยการจับคู่เพื่อสร้างลูกผสมและทำการศึกษาคัดเลือกพันธุ์ที่แสดงออกทางพันธุกรรมที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ข้าวไร่

ข้าวไร่ คือข้าวที่ปลูกในที่ดอนหรือในสภาพไร่ บริเวณไหล่เขาหรือพื้นที่ซึ่งไม่มีน้ำขัง ไม่มีการทำคันนาเพื่อกักเก็บน้ำ และอาจมีการปลูกผสมกับพืชอื่น ไม่มีการให้น้ำ และส่วนใหญ่ไม่มีการพรวนดิน (IRRI, 1990) พื้นที่ปลูกข้าวไร่ทั่วโลกประมาณ 13.2 เพอร์เซ็นต์ของพื้นที่ปลูกข้าวทั่วโลก โดยพื้นที่ปลูกข้าวไร่พบในหลายทวีปทั่วโลก แต่ส่วนใหญ่พบการปลูกในทวีปเอเชีย (66.9 ล้านไร่) แกลลาตินอเมริกา (38.1 ล้านไร่) และแอฟริกา (14.4 ล้านไร่) สำหรับพื้นที่ปลูกในทวีปเอเชียนั้น เอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีพื้นที่ปลูกประมาณ 43 เพอร์เซ็นต์ (28.8 ล้านไร่) ของพื้นที่ปลูกในทวีปเอเชีย ทั้งนี้ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวไร่ประมาณ 6 ล้านไร่ (ชัยฤทธิ์ ดำรงเกียรติ, 2555; Gupta and O'Toole, 1986) อย่างไรก็ตาม ต่อมา Tuhina-Khatun et al. (2015) รายงานว่าพื้นที่ปลูกของข้าวไร่เมื่อเทียบกับพื้นที่ปลูกข้าวทั่วโลกโดยมีพื้นที่ปลูกข้าวไร่เหลือประมาณ 11 เพอร์เซ็นต์ แต่พื้นที่ปลูกข้าวไร่ในทวีปเอเชียมีรายงานเพิ่มขึ้น โดยมีพื้นที่ประมาณ 13 ล้าน เฮกตาร์ หรือประมาณ 81.25 ล้านไร่ (Acuna et al., 2008) โดยในประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวไร่ประมาณ 11 เพอร์เซ็นต์ของพื้นที่ปลูกข้าวทั้งหมด (IRRI, 1998) ทั้งนี้ พื้นที่ปลูกส่วนใหญ่อยู่ในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (Bell and Seng, 2004)

ในประเทศไทยมีการปลูกพื้นที่สูง ซึ่งเป็นเขตอาศัยน้ำฝน เช่น ในพื้นที่ทางภาคเหนือ อีสาน และตะวันตก ที่พื้นที่ปลูกเป็นที่สูง ล้อมรอบด้วยภูเขาสูงชัน ซึ่งเป็นพื้นที่อาศัยของชาวเผ่าต่าง ๆ เช่น ปกาเกอญอ หรือกะเหรี่ยง ม้ง มูเซอ ลัวะ เป็นต้น การปลูกข้าวไร่เพื่อเป็นอาหารยังชีพและสืบทอดมารุ่นต่อรุ่นทำให้ข้าวไร่มีความผูกพันใกล้ชิดกับวัฒนธรรมการดำรงชีวิตของชาวเขาเหล่านั้น จนกลายเป็นประเพณีวัฒนธรรมประจำเผ่า (จิรัฐภูมิ และพรพนา, 2539) ข้าวไร้นอกจากมีบทบาทในการดำรงชีพแล้ว ยังเป็นสิ่งเสริมสร้างความมั่นคงทางอาหารแม้ว่าผลผลิตข้าวไร่จะมีราคาต่ำกว่าข้าวนาสวนก็ตาม (วีรพันธ์, 2556)

ปัจจุบันการปลูกข้าวไร่เป็นทางเลือกหนึ่งที่นาสนใจเพราะใช้ปริมาณน้ำน้อย สามารถปลูกได้ในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ดังนั้นการปลูกข้าวไร่อาจเป็นทั้งการผลิตอาหารในครัวเรือนหรือเพื่อสร้างรายได้โดยเฉพาะเกษตรกรที่มีข้อจำกัดทั้งพื้นที่และงบประมาณในการผลิตพืช

ปัญหาการผลิตข้าวไร่

ปัญหาสำหรับการที่เกษตรกรปลูกข้าวไร่พันธุ์เดิมเป็นระยะเวลานาน ๆ คือ ผลผลิตลดลง การเจริญเติบโตไม่ดี ความสามารถในการต้านทานโรคและแมลงลดลง เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากความถดถอยทางพันธุกรรม (Allard, 1960) ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่ทำให้พบความหลากหลายทางพันธุกรรมส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากประเพณีที่เกี่ยวกับการเพาะปลูกข้าวไร่ของเกษตรกรชาวเขาแบบดั้งเดิม (กรมการข้าว, 2550; ฉวีวรรณ, 2543; จิรัฐภูมิ และพรพนา, 2539) ผลผลิตข้าวไร่ไม่เพียงพอต่อการบริโภค เป็นปัญหาสำคัญของชุมชนในแถบภูเขา ส่งผลให้รายจ่ายของเกษตรกรเพิ่มขึ้นจากการซื้อข้าวเพื่อบริโภค และการย้ายถิ่นฐานเพื่อขายแรงงานนอกชุมชน ปัญหาผลผลิตข้าวไร่ต่ำเกิดจากสาเหตุสำคัญอย่างน้อย 3 ประการคือ 1) การปนกันของเมล็ดพันธุ์ข้าวต่างสายพันธุ์ที่ใช้ในการปลูก ทำให้ต้นข้าวในแปลงมีการสุก-แก่ของเมล็ดข้าวไม่เท่ากัน เมื่อเกษตรกรเก็บเกี่ยวผลผลิตจึงได้ข้าวที่มีเมล็ดลีบปนอยู่มาก 2) ขาดการบำรุงคุณภาพดิน และ 3) ขาดการจัดการเขตกรรมที่เหมาะสม

ข้าวไร่มีการปลูกทั่วโลก เป็นพืชปลูกภายใต้สภาวะปลูกที่แห้งแล้ง ใช้ระบบการผลิตที่ผสมผสานโดยปราศจากระบบชลประทาน โดยพื้นที่ปลูกทั่วโลกคาดว่าจะมีประมาณ 14 ล้านเฮกตาร์ ส่วนใหญ่ผลิตธัญพืช (ต่ำกว่า 1 ตันต่อเฮกตาร์) โดยพบการปลูกประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ของการปลูกข้าวทั่วโลก สภาพแวดล้อมของการปลูกข้าวไร่มีความหลากหลายสูงเพราะมีการปลูกข้าวในพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วโลก ดังนั้นความหลากหลายพบตั้งแต่ระดับความชื้น ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ความลาดชัน พันธุ์ การที่มีความหลากหลายของปัจจัยการผลิตต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน รวมทั้งพันธุ์ปลูก วิธีการปลูก ทำให้คุณภาพของข้าวไร่มีความหลากหลาย ไม่คงที่ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพ ดังนั้นตลาดสำหรับการผลิตข้าวไร่จึงมีจำกัด ในทวีปเอเชียพื้นที่ปลูกข้าวไร่ นับได้มีเริ่มมีความคงตัวในระบบการผลิตมากขึ้น เนื่องจากการปลูกทุกปีและการผลิตมีความเกี่ยวข้องกับการผลิตพืชอื่น รวมทั้งเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ในการเลี้ยงสัตว์ ขณะที่ในทวีปแอฟริกาและแอฟริกาตะวันตก การปลูกข้าวไร่เทียบได้ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การปลูกข้าว แต่สิ่งหนึ่งที่คล้ายกันคือการที่ตลาดสำหรับข้าวไร่ยังคงจำกัด

การหักล้มและสาเหตุการหักล้มของธัญพืช

การหักล้มในธัญพืชมีสองแบบ ได้แก่ การหักล้มของรากและการหักของลำต้น โดยการหักล้มของรากเป็นรูปแบบที่พบมากที่สุดและมักพบในต้นฤดูปลูก สำหรับการหักของลำต้นมักเกิดขึ้นภายหลังเมื่อลำต้นเปราะเนื่องจากเกิดการสุกแก่หรือเนื่องจากการรบกวนของศัตรูพืช (Nelson, 2008)

การหักล้มในธัญพืชเป็นผลทั้งจากลักษณะทางกายภาพของพืชและสิ่งแวดล้อม (Guo *et al.*, 2003a; Yang *et al.*, 2009) เช่น ฝน ลม เป็นต้น การหักล้มในข้าวและข้าวสาลียังขึ้นกับพันธุกรรมด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่นความสัมพันธ์ระหว่างการต้านทานต่อการหักล้มและชนิดของรวง (Ma *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2009a) ซึ่งการหักล้มขึ้นกับหลายปัจจัยทำให้มีการถ่ายทอดทางพันธุกรรมต่ำ (low heritability) ทำให้การเข้าไปคัดเลือกหรือประเมินในชั่วแรกๆ ของการปรับปรุงพันธุ์ทำได้ค่อนข้างยาก (Torro *et al.*, 2011) หากเป็นพันธุ์ที่ต้นสูง ลำต้นเปราะบางจะมีแนวโน้มทำให้เกิดการหักล้มได้มากกว่าพวกพันธุ์กึ่งแคระที่มีพางแข็ง (Yang *et al.*, 2000) ภายใต้เงื่อนไขของความชื้นสูงและความอุดมสมบูรณ์ของไนโตรเจน พันธุ์กึ่งแคระมีแนวโน้มที่จะหักล้มน้อยกว่าพันธุ์มาตรฐาน นอกจากนี้สายพันธุ์ที่มีพางหนาและสั้นจะต้านทานการหักล้มดีกว่าพันธุ์ต้นสูง พืชที่มีต้นทนทานต่อการหักล้มลำต้นจะตั้งตรงเมื่อมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต แต่พืชเหล่านี้ อาจหักล้มได้เมื่อสภาพอากาศเลวร้ายเป็นพิเศษ เช่น ฝนตกหนักหรือลมที่พัดปกคลุม พืชที่มีการหักล้มเร็วหรือล้มง่ายสุดอาจสามารถสังเกตได้จากบริเวณข้อที่พบต่ำ ขณะที่เซลล์ที่อยู่ด้านล่างของข้อที่ยืดยาวจะบังคับให้ต้นตั้งตรง ต้นแก่มีเซลล์ของลำต้นที่แก่ด้วยเช่นกันและจะสูญเสียความสามารถในการยึดตัวอีกทำให้ไม่สามารถฟื้นคืนการหักล้มได้

การให้ปุ๋ยไนโตรเจนสูงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการอ่อนแอต่อการหักล้ม เนื่องจากการเติบโตอย่างสมบูรณ์เต็มที่ เขียวชอุ่มเป็นสาเหตุหนึ่งที่ชักนำการเกิดและแพร่ระบาดของโรคทั้งทางใบ ลำต้น นอกจากนี้ การปลูกพืชที่มีความหนาแน่นขึ้น การใช้เมล็ดปลูกในอัตราที่มากขึ้น การปลูกพืชภายใต้ร่มเงา และการมีความชื้นสูงเช่นในสภาพชื้นและเมฆมากพบว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้พืชมีแนวโน้มเกิดการหักล้ม ซึ่งสภาพแวดล้อมเหล่านี้มีผลต่อการหักล้มแม้แต่กับพันธุ์/สายพันธุ์กึ่งแคระ ดังนั้นการใส่ปุ๋ยในสัดส่วนที่พอดีจะช่วยป้องกันการหักล้มได้ส่วนหนึ่ง แต่ขณะเดียวกันการที่พืชขาดไปแต่สเซียมจะทำให้พืชเปราะซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มแนวโน้มในการหักล้มได้สูงกว่าการ

ใส่โปแตสเซียมเกินหรือสูง (Ookawa *et al.*, 1992, 1993; Ma *et al.*, 2000; Ma and Yamaji, 2006; Nelson, 2008; Yang *et al.*, 2009) เช่นเดียวกับการสเปรย์ 2,4-D ก็ส่งผลให้ต้นลดการหักล้มได้ (Matsubayashi *et al.*, 1967)

ถึงแม้จะมีรายงานต่าง ๆ ที่บ่งชี้ว่าเป็นสาเหตุของการหักล้ม แต่ยังมีทฤษฎีและคำอธิบายที่หลากหลายเกี่ยวกับสาเหตุของการหักล้มในธัญพืช ตัวอย่างเช่น แนวโน้มของการหักล้มในธัญพืชเกี่ยวข้องกับการยืดยาวของลำต้น การเกิดอาหารต้นเหลืองและพอมบางบริเวณปล้องที่อยู่ด้านล่างของลำต้น ซึ่งเป็นผลมาจากการปลูดด้วยเมล็ดต่อหลุมจำนวนมาก หรือการปลูกในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงเกินไป โดยเฉพาะการมีไนโตรเจนในดินสูงจะส่งผลให้ปล้องยืดยาวและอ่อนแอทำให้ลำต้นมีการเอนได้ง่าย ซึ่งการเอนของลำต้นเกิดเนื่องจากหลายปัจจัย ผลที่ตามมาคือเกิดการหักล้มของธัญพืชได้ง่าย (Nelson, 2008)

นอกจากนี้การหักล้มของพืชอาจจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการต้านทานต่อแรงปะทะจากปัจจัยภายนอกของปล้องล่าง ๆ ของต้น (Ma *et al.*, 2000; Wan and Ma, 2003) น้ำหนักของปล้องที่อยู่สูง ๆ ของลำต้นรวมทั้งน้ำหนักของใบและช่อหรือรวงต้องสัมพันธ์กับขนาดของลำต้นซึ่งมีผลต่อความต้านทานการหักล้มของพืชด้วยเช่นกัน การมีส่วนบนลำต้นที่มีน้ำหนักมาก การมีดินยืดยาว และได้รับแรงปะทะจากภายนอกที่รุนแรง สามารถส่งผลต่อปล้องที่ฐานต้นและส่วนราก ด้วยเหตุนี้ ความอ่อนแอของปล้องล่าง และสัดส่วนของส่วนยอดต่อรากเป็นดัชนีหนึ่งที่สามารถบ่งชี้การหักล้มได้ (Kashiwagi and Ishimaru, 2004) นอกจากนี้ความสามารถในการต้านทานการหักล้มของลำต้นยังขึ้นกับขนาดของลำต้นทั้งที่ประเมินจากเส้นผ่าศูนย์กลางลำต้นและความหนาของผนังลำต้น (โดยเฉพาะปล้องตรงฐานล่างของลำต้น) (Nelson, 2008)

การหักล้มเป็นผลมาจากความล้มเหลวของระบบรากที่เกิดจากสาเหตุของโรคและ/หรือความอ่อนแอของลำต้น การหักล้มอาจเป็นผลมาจากการไม่สามารถสปริงตัวกลับของลำต้น รวมทั้งการหักของปล้องล่างของลำต้นหรือการมีรากเอน รากถูกทำลายจนขาด หรือรากถูกถอนขึ้นเนื่องจากปัจจัยภายนอก เช่น ฝนตกหนัก หรือลมแรง เป็นต้น มีการรายงานความสำคัญของระบบรากต่อการป้องกันหรือต้านทานการหักล้ม แต่สำหรับธัญพืชที่มีขนาดเล็กพบว่าการหักล้มส่วนใหญ่เกิดจากลำต้นเอนมากกว่ารากถูกถอนเนื่องจากปัจจัยภายนอก (Nelson, 2008; Torro *et al.*, 2011)

ผลกระทบเนื่องจากการหักล้ม

การหักล้มส่งผลต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของต้น ส่งผลต่อการออกดอก ลดความสามารถในการสังเคราะห์แสง ส่งผลต่อการสะสมคาร์โบไฮเดรต ส่งผลต่อการส่งผ่านธาตุอาหารและความชื้นจากดินไปยังส่วนต่าง ๆ ของต้น กระทบต่อการใช้ประโยชน์ของธาตุอาหารพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพอากาศร้อนชื้น รวมทั้งกระทบต่อการสะสมอาหารของเมล็ดระหว่างที่เมล็ดกำลังพัฒนา การเติมเต็มเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ทำให้ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในเมล็ดลงน้อยลง (Nelson, 2008)

ผลกระทบจากการหักล้มที่ส่งผลต่อผลผลิตขึ้นอยู่กับระยะการเจริญเติบโตของพืช สภาพอากาศขณะเกิดการหักล้มและหลังการหักล้มและความรุนแรงของการหักล้ม คือเมื่อพืชหักล้มก่อนการออกดอก ต้นอาจฟื้นตำแหน่งทำให้ต้นตั้งตรงได้อีกหากสภาพแวดล้อมเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโต แต่ภายใต้สภาพอากาศที่

เลวร้ายพืชจะหักล้มง่ายทำให้ช่อและการสร้างเมล็ดผิดปกติ ถ้าการหักล้มเกิดภายหลังการออกดอกนั้นหมายถึงช่อจะไม่ตั้งตรง ในระยะนี้จำนวนเมล็ดอาจไม่ได้รับผลกระทบแต่น้ำหนักเมล็ดอาจลดลง (Nelson, 2008; Torro *et al.*, 2011) การหักล้มมีผลกระทบที่รุนแรงต่อการสร้างเมล็ด การสุกแก่ที่ไม่สม่ำเสมอ และทำให้มีปัญหาและยุ่งยากในการเก็บเกี่ยว รวมทั้งกระทบต่อผลผลิตโดยทำให้ผลผลิตร่วงหล่น หรืออาจส่งผลให้ต้องทำการเก็บเกี่ยวสองครั้งทำให้เสียเวลาและเพิ่มแรงงาน รวมทั้งส่งผลต่อคุณภาพของเมล็ดที่ลดลงอีกด้วย โดยการที่เก็ดต้นหักล้มและอาจต้องมีการเก็บเกี่ยวก่อนการสุกแก่ที่แท้จริงจะทำให้ความชื้นในเมล็ดสูงและสูญเสียคุณภาพของเมล็ด (Albrecht *et al.*, 1986; Wu, 2000; Nelson, 2008) แต่หากเกิดการหักล้มเมื่อพืชสุกแก่จะพบการสูญเสียผลผลิตน้อยลงตามลำดับ การหักล้มในช่วงสั้น ๆ ระหว่างการออกรวงจะทำให้ผลผลิตลดลงกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ (Nelson, 2008) พบว่าผลผลิตจะลดลงสูงสุดเมื่อเกิดการหักล้มเมื่อมีการโผล่ของช่อประมาณ 10 วัน โดยผลผลิตจะลดลงระหว่าง 15 - 40 เปอร์เซ็นต์ (Nelson, 2008; Torro *et al.*, 2011) อย่างไรก็ตาม พันธุ์ที่มีความสามารถในการให้ผลผลิตสูงอาจพบปัญหาการหักล้มสูงเช่นกัน (Feng-zhuan *et al.*, 2010)

ความสามารถในการต้านทานการหักล้ม

ความสามารถในการต้านทานการหักล้มในข้าวเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีของทั้งลำต้นและแผ่นใบ เช่น ปริมาณโปแตสเซียม (K) ซิลิคอน (Si) และน้ำตาลที่สามารถละลายได้ นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงที่สัมพันธ์กับสรีระของข้าว ความสามารถในการแบกรับน้ำหนักของลำต้น (Ookawa *et al.*, 1992, 1993; Ma *et al.*, 2000; Ma and Yamaji, 2006; Yang *et al.*, 2009) ซึ่งพบว่าความแข็งแรงทางสรีระและความสามารถในการแบกรับน้ำหนักของลำต้นจะลดลงเมื่อเข้าสู่ระยะการออกช่อไปจนถึงการสุกแก่ โดยจะลดลงเร็วที่สุดในระยะน้ำนมของข้าว ขณะที่ปริมาณ K และ Si ในลำต้นและ Si ในแผ่นใบจะเพิ่มขึ้น ขณะที่การสะสม K และ Si ที่แผ่นใบจะลดลงเนื่องจากมีการส่งผ่านธาตุเหล่านี้ออกไปจากแผ่นใบ ความแข็งแรงทางสรีระจะสัมพันธ์ทางบวกกับการสะสม K และ Si ที่ลำต้นระหว่างการเติมเต็มเมล็ดยกเว้นที่ระยะการเกิดช่อ จากการศึกษาความสัมพันธ์ต่าง ๆ พบว่าความสามารถในการต้านทานต่อการหักล้มของข้าว japonica จะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับน้ำตาลที่ละลายได้ในต้นที่ระยะแรกของการเติมเต็มเมล็ด รวมทั้งการสะสม Si ในระยะนี้ที่เพิ่มสูงผ่านการให้ปุ๋ย Si ที่ช่อในระยะดังกล่าว (Feng-zhuan *et al.*, 2010) เช่นเดียวกับองค์ประกอบเคมีอื่น ๆ ได้แก่ ปริมาณแป้ง เซลลูโลส ความเข้มข้นของลิกนิน (Idris *et al.*, 1975; Tinarelli, 1988; Ookawa *et al.*, 1992, 1993; Ma *et al.*, 2000; Ma and Yamaji, 2006; Yang *et al.*, 2009; Bhiah *et al.*, 2010)

ลักษณะทางสรีระอื่น ๆ ที่มีรายงานการเกี่ยวข้องกับการหักล้มของต้นพืช ได้แก่ ความสูงต้น การเปลี่ยนแปลงความสูงเพียงเล็กน้อยของพืชอาจมีอิทธิพลสูงต่อการหักล้ม (Ma *et al.*, 2000) เช่น ในข้าวสายพันธุ์ใหม่ (New plant type) มีการปรับปรุงความสูงประมาณ 100 เซนติเมตรเพื่อเพิ่มการสังเคราะห์แสง และต้านทานการหักล้ม (Kumar *et al.*, 1999) อย่างไรก็ตาม มีรายงานเช่นกันว่าความสูงต้นที่ลดลงในพันธุ์กึ่งต้นเตี้ยไม่ได้เพิ่มลักษณะการต้านทานการหักล้มเพราะกลับยิ่งทำให้น้ำหนักแห้ง (biomass) ลดลง และพันธุ์ที่มีความสูงเท่ากันก็สามารถแสดงการหักล้มได้แตกต่างกัน (Easson *et al.*, 1993) การลดความสูง (วัดจากผิวดินถึงบริเวณฐานรวง) สามารถเพิ่มการต้านทานการหักล้มได้เนื่องจากการลดความสูงของจุดศูนย์กลางโน้มถ่วงของต้น และ

เพิ่มการรับแสงของสัปดาห์ใบต่อทรงพุ่มต้น (Setter *et al.*, 1995; Setter *et al.*, 1997) สำหรับข้าวมีการใช้ลักษณะอื่น ๆ นอกเหนือจากความสูงในการตรวจสอบการหักล้ม (Terashima *et al.*, 1992) เช่นนี้ จึงพบว่าการปรับปรุงพันธุ์ข้าวเพื่อต้านทานการหักล้ม โดยการลดความสูงของลำต้น (Khush, 1999; Kashiwagi *et al.*, 2007; Shahidullah *et al.*, 2011) การเพิ่มความยาวรวงแต่มีการลดตำแหน่งรวงบนต้นที่ลดลง (Yuping and Feng, 2004) ทั้งนี้เพราะพันธุกรรมมีส่วนสำคัญต่อการต้านทานการหักล้ม การเปลี่ยนแปลงที่ระดับพันธุกรรมจึงเป็นเป้าหมายหนึ่งในการเพิ่มความต้านทานให้แก่ข้าว (Ookawa and Ishihar, 1992; Terashima *et al.*, 1992)

นอกจากนี้ ลักษณะกายภาพของธัญพืช เช่น ความหนาของผนังเซลล์และการมีลิกนินสามารถส่งผลต่อความสามารถของพืชที่จะต้านทานแรงปะทะด้านข้าง ความยาวปล้อง เส้นผ่าศูนย์กลางปล้อง ความหนาของลำต้น และน้ำหนักของปล้องเป็นลักษณะที่มีผลต่อความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานการหักล้ม (Verma *et al.*, 2005; Ma *et al.*, 2000; Wan and Ma, 2003) ตัวอย่างเช่น การปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้มีลำต้นส่วนล่างมีขนาดใหญ่ มีความแข็งแรงเพื่อให้มีความต้านทานต่อแรงผลัก (Kashiwagi and Ishimaru, 2004) ซึ่งการเพิ่มความแข็งแรงในส่วนลำต้นของต้นข้าวนี้ถือเป็นอีกเป้าหมายของการปรับปรุงความต้านทานของข้าวต่อการหักล้ม (Kashiwagi *et al.*, 2007) การต้านทานต่อการหักล้มของข้าวสามารถทำได้โดยการลดความยาวปล้องแรกและปล้องที่สองของข้าว หรือการเพิ่มความแข็งแรงของส่วนฐานต้น

การที่ลำต้นมีลักษณะตั้งตรงมีโอกาสที่ต้นจะเกิดการหักล้มน้อย (Grafius and Brown, 1954; Crook and Ennos, 1994) โดยมีรายงานว่าการสร้างเซลล์ลูโลสหรือลิกนินสูงมีความสัมพันธ์ทางบวกต่อการตั้งตรงของพืช และส่งเสริมให้พืชต้านทานการหักล้ม (Ma *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2013) จากการพิจารณาพลศาสตร์ (dynamics) การต้านทานการหักล้มควรพิจารณาในทั้งสองปัจจัย คือน้ำหนักส่วนเหนือดินและความสามารถในการต้านต่อแรงผลักของส่วนล่าง ซึ่งใช้ได้หลายพืชรวมทั้งข้าว (Mulder, 1954; Idris *et al.*, 1975) แต่อย่างไรก็ตามก็ต้องพิจารณาทั้งสองปัจจัยไปพร้อมกันซึ่งค่อนข้างมีความซับซ้อน

การแสดงออกของยีนที่ควบคุมลักษณะการต้านทานต่อการหักล้ม

ในปัจจุบันจะมีการนำงานด้านชีวโมเลกุลเข้ามาช่วยในการศึกษาเกี่ยวกับยีนและการปรับปรุงพันธุ์เพื่อความแม่นยำในการคัดเลือกสายต้น ซึ่งอาจรวมไปถึงการทำให้สามารถลดจำนวนรอบของการผสมกลับได้ (Tanksley *et al.*, 1989; Chen *et al.*, 2000; Hasan *et al.*, 2015) แต่ในการคัดเลือกบางลักษณะที่มีการแสดงออกที่ซับซ้อน การปลูก ศึกษาในแปลง ยังคงเป็นสิ่งจำเป็น และช่วยในการประเมินลักษณะได้เป็นอย่างดี

มีรายงานการต้านทานการหักล้มในข้าวว่าถูกควบคุมด้วยหลายยีน (Kashiwagi and Ishimaru, 2004; Xiao *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2005; Kashiwagi *et al.*, 2008) Kashiwagi and Ishimaru (2004) รายงานว่ายีนที่ถูกควบคุมลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการต้านทานต่อแรงผลักสำหรับส่วนล่างของข้าว (*Oryza sativa*) มีการควบคุมด้วยยีนในลักษณะปริมาณ (Quantitative trait loci; QTLs) โดยพบว่ามียีนที่ควบคุมลักษณะนี้จำนวน 5 ยีน โดยมีบางยีนที่แสดงออกแบบบวก (QTLs ที่ chromosome 5; *prl5* สำหรับการศึกษาในพันธุ์ Kasalath) พบว่าเมื่อมีการแทนที่ตำแหน่ง *prl5* จากพันธุ์ Kasalath แทนที่พันธุ์ Nipponbare (โดยการสร้างสายพันธุ์แฝดหรือมีความแตกต่างในบางตำแหน่งยีน ที่เรียกว่า near-isogenic lines; NILs) ข้าวจะมีน้ำหนักแห้งและความ

หนาแน่นและปริมาณการสะสมคาร์โบไฮเดรตในลำต้นอยู่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตร (ส่วนล่าง) ในแต่ละ NIL สูงอย่างแตกต่างเมื่อเทียบกับพันธุ์ Nipponbare ขณะที่มีลักษณะอื่น ๆ ไม่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อนำมาทดสอบความสามารถในการต้านต่อแรงผลึกในส่วนล่างของต้น และการต้านทานต่อการหักล้มใน NILs แล้วพบว่าเพิ่มความต้านทานได้สองเท่าเมื่อเทียบกับพันธุ์เดิมคือ Nipponbare ทำให้ผลวิจัยกล่าวว่า *prl5* น่าจะส่งผลต่อลักษณะของลำต้นด้านล่างทำให้ NILs นั้นสามารถเพิ่มความต้านทานต่อการหักล้มได้ หรือการปรับปรุงพันธุ์โดยอ้อมโดยการศึกษายีนต้นเดี่ยว (เช่น *sd-1*) ที่ถูกควบคุมโดยยีนร่างกายในสภาพด้อย ได้แก่ แอลลีลด้อย (Aquino and Jennings, 1966; Foster and Rutger, 1978; Mackill and Rutger, 1979) อย่างไรก็ตาม การใช้ข้อมูลทั้งทางสรีรวิทยาและข้อมูลพันธุศาสตร์ปริมาณร่วมกันจึงมีความสำคัญสำหรับการใช้ในการปรับปรุงลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการหักล้ม (Cong *et al.*, 2002; Ishimaru, 2003)

การปรับปรุงพันธุ์ต้านทานต่อการหักล้มและเพื่อเพิ่มผลผลิตโดยการใช้พันธุ์กึ่งแคระ (semi-dwarf) ซึ่งเป็นที่รู้จักในนามของการปฏิวัติเขียวหรือ Green Revolution (Hargrove and Cabanilla, 1979; Peng and Khush, 2003; Yano *et al.*, 2015) แต่การใช้พันธุ์กึ่งแคระก็มีข้อจำกัดเช่นกัน เพราะจะทำให้หน้าหนักต้นทั้งหมดลดลง (แม้ว่าค่าดัชนีการเก็บเกี่ยวหรือ harvest index จะเพิ่มขึ้น) ทำให้ไปรบกวนสมดุลระหว่างส่วนสร้างและส่วนรับอาหาร (source and sink) ทำให้ผลผลิตไม่ได้เพิ่มขึ้น (Flintham *et al.*, 1997; Murai *et al.*, 2002) นอกจากนี้การใช้ลักษณะกึ่งแคระยังถูกควบคุมด้วยยีนที่สามารถไปมีผลทางลบแบบ pleiotrotic หรือการที่ยีนควบคุมการถ่ายทอดลักษณะต้นกึ่งแคระไปมีผลต่อการแสดงออกทางลบของลักษณะของลำต้น (culm morphology) (Yano *et al.*, 2015) เช่น โดยการไปลดเส้นผ่าศูนย์กลางลำต้นหรือความหนา เป็นต้น (Sasaki *et al.*, 2002; Okuno *et al.*, 2014) ด้วยเหตุนี้ ภายหลังจากช่วงปฏิวัติเขียวจึงพบการศึกษาการต้านทานต่อการหักล้มโดยการเพิ่มความแข็งแรงของลำต้น (Ookawa *et al.*, 2010; Islam *et al.*, 2007) ซึ่งได้แก่ ความหนาของลำต้นส่วนล่างหรือฐานและการทนทานต่อการหักซึ่งถือว่าเป็นความแข็งแรงทางกายภาพของลำต้น (Ookawa and Ishihara, 1992)

สำหรับข้าว มีรายงานยีนที่ควบคุมความแข็งแรงของลำต้น ชื่อว่า Strong Culm2 (SCM2) ที่มาจากพันธุ์ Habataki ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวอินดิกา (*indica*) ที่ให้ผลผลิตสูงที่เมื่อมีการย้ายยีนดังกล่าวไปในพันธุ์ดีของญี่ปุ่น (Koshihikari variety) พบว่าทำให้ความแข็งแรงของลำต้นเพิ่มขึ้นโดยการมีเส้นผ่าศูนย์กลางต้นเพิ่มขึ้น ทำให้ทนต่อการหักล้ม (Ookawa *et al.*, 2010) อย่างไรก็ตาม พบว่ายีนกลุ่มที่พบว่าควบคุมความแข็งแรงของลำต้นข้าวได้มีรายงานมาก่อนหน้านี้ว่าควบคุม strigolactone (SL) signaling ซึ่ง SL เป็นฮอร์โมนสำหรับการแตกกิ่งก้านควบคุมการเกิดตาข้าง (Gomez-Roldan *et al.*, 2008; Arite *et al.*, 2009) ก็ต่อมาพบว่า SL มีบทบาทในการส่งเสริมความแข็งแรงของลำต้นและจำนวนช่อดอกย่อยในรวงแต่กลับทำให้การแตกตอของข้าวลดลง (Yano *et al.*, 2015) เช่นเดียวกัน กลุ่มยีน QTL SCM3 พบว่าไปลดจำนวนหน่อแต่ไปเพิ่มผลผลิตจากการมีจำนวนช่อดอกย่อยภายในรวงเพิ่มขึ้น เช่นที่เคยมีการรายงานความสัมพันธ์ทางบวกระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางลำต้นกับจำนวนช่อดอกย่อยต่อรวง (Kojima *et al.*, 2005)

Sarker *et al.* (2007) รายงานการแสดงออกของยีนควบคุมความสามารถในการหักล้มในข้าวสาลีพบว่าถูกควบคุมทั้งอิทธิพลของยีนแบบบวกหรือแบบข่ม (additive หรือ dominance effects) หรือพบการควบคุมของ

ยีนทั้งสองรูปแบบนี้ในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ยังพบการควบคุมแบบข่มข้ามคู่ยีนหรืออีพิสเตซิส (epistasis) (epistasis คือ ยีนที่ส่งอิทธิพลข่มยีนอื่น หรือ ปรากฏการณ์ที่ยีนมากกว่าหนึ่งยีนที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายทอดลักษณะใดลักษณะหนึ่ง) ต่อความแข็งแรงของปล้องที่สอง ความสูง จำนวนข้อต่อต้นและผลผลิตต่อต้นอีกด้วยในบางคู่ผสม โดยพบปฏิกริยาการแสดงออกของยีนเป็นแบบ บวก x บวก (additive x additive epistasis) เพิ่มเข้ามาสำหรับการแสดงออกของยีนแบบบวก สำหรับลักษณะเหล่านี้ สามารถปรับปรุงการคัดเลือกได้ในชั่วที่ประชากรกำลังกระจายตัว ขณะที่พบปฏิกริยาการแสดงออกของยีนเป็นแบบ บวก x ข่ม (additive x dominance gene interaction) สำหรับความยาวของปล้องที่สอง เส้นผ่าศูนย์กลาง และความหนาของผนังปล้องที่สองที่ช่วยต้านการหักล้ม ด้วยเหตุนี้ การถ่ายทอดลักษณะและการคัดเลือกในประชากรที่กำลังกระจายยังสามารถทำได้เมื่อเทียบกับลักษณะที่พบว่าถูกควบคุมโดยยีนที่ไม่ใช่แบบบวกอย่างสมบูรณ์ (completely non-additive genes) หรือถูกควบคุมโดย duplicate epistasis gene action (เกิดปฏิกริยาร่วมระหว่างยีนที่อยู่คนละตำแหน่งที่ต่างควบคุมการเกิดลักษณะหรือฟีโนไทป์ที่เหมือนกัน) (Sarker *et al.*, 2007) ดังนั้นการผสมข้ามระหว่างสองคู่ของพ่อแม่ (biparental mating) ระหว่างลูกผสมที่คัดเลือกไว้ (selected recombinants) ตลอดจนการผสมข้ามระหว่างลูกที่กำลังกระจายที่สนใจคัดเลือกไว้ระหว่างคู่ผสมในชั่วต้น ๆ ของการกระจายทางพันธุกรรม หรือทำการผสมคัดเลือกพันธุ์แบบวงจร (recurrent selection) เพื่อเพิ่มการสร้างความแปรปรวน แล้วตามด้วยการคัดเลือกแบบวิธีการปกติเพื่อปรับปรุงลักษณะต้านทานการหักล้ม (Sarker *et al.*, 2007)

ขณะที่การศึกษาของ Yao *et al.* (2012) พบว่าการแสดงออกของยีนที่ควบคุมลักษณะต่าง ๆ ในข้าวเช่น เส้นผ่าศูนย์กลางลำต้น ความหนาผนังลำต้น น้ำหนักลำต้นต่อเซนติเมตรของปล้องที่สองนั้น พบว่ามีการแสดงออกแบบบวกมากกว่าแบบข่ม ทำให้สามารถใช้การคัดเลือกแบบพันธุ์ประวัติ (pedigree selection) สำหรับปรับปรุงพันธุ์โดยเฉพาะลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางลำต้นและน้ำหนักลำต้น อย่างไรก็ตาม มีบางพันธุ์ที่พบการแสดงออกที่แตกต่างออกไปจากพันธุ์ส่วนใหญ่เช่นกัน การพบว่ายีนมีการแสดงออกแบบบวกในพันธุ์ส่วนใหญ่ทำให้การคัดเลือกง่ายกว่าการแสดงออกที่ไม่ใช่แบบบวก (non-additive genes) แต่จากการศึกษามีรายงานว่า การแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับลักษณะที่สัมพันธ์กับการหักล้มไม่สามารถใช้การแสดงออกแบบบวกหรือข่ม (additive dominance model) ในการนำมาอธิบายผลได้ หรือพบว่ามีการแสดงออกของยีนแบบข่มข้ามคู่ยีนอีพิสเตซิส เช่นเดียวกับการศึกษาของ Rani *et al.* (2015) ที่พบว่าการถ่ายทอดลักษณะที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตและความต้านทานการหักล้มเกือบทั้งหมดพบการแสดงออกของยีนแบบข่มข้ามคู่ยีนอีพิสเตซิสเช่นกัน เช่น เส้นผ่าศูนย์กลางลำต้นมีการแสดงออกแบบ complementary epistasis (ยีนสองตำแหน่งให้ลักษณะที่ส่งเสริมกันเพื่อการแสดงออกของฟีโนไทป์หนึ่ง ๆ) นอกเหนือจากการพบปฏิกริยาร่วมแบบ ข่ม x ข่ม (dominance x dominance interaction) ซึ่ง Rani *et al.* (2015) แนะนำการผสมแบบ biparental mating ในชั่วต้น ๆ ตามด้วยการคัดเลือก ขณะที่ความหนาของลำต้น ความแข็งแรงของลำต้น ความยาวของปล้องกลางและเปอร์เซ็นต์การหักล้มมีการแสดงออกแบบ duplicate epistasis (ยีนต่างตำแหน่งควบคุมการเกิดฟีโนไทป์ที่เหมือนกัน) ซึ่งในกรณีมีการแสดงออกของยีนที่ไม่ใช่แบบบวก (non-additive gene action) ร่วมกับการแสดงออกแบบ duplicate epistasis การใช้ recurrent selection หรือการทำ diallel selection mating (การผสมแบบพบกันหมด) ก็เป็นวิธีที่แนะนำ (Rani *et al.*, 2015)

การพบการแสดงออกแบบอีพิสเตซีส์การผสมแบบ biparental mating ซึ่งเป็นแผนการผสมอย่างสุ่มระหว่างพ่อแม่พันธุ์ เพื่อต้องการให้เกิดการรวมตัวใหม่ของยีนและมีการทำให้ลิงก์เกตของลักษณะที่ไม่เหมาะสมสามารถแยกจากกันได้ เป็นวิธีการที่นำเสนอโดย Comstock and Robinson (1952) ด้วยเหตุนี้ การพิจารณาทั้งพ่อและแม่ พิจารณาลักษณะและรูปแบบการผสม ได้แก่ การทำ biparental mating หรือ recurrent selection หรือ diallel mating ตามด้วยการคัดเลือกแบบปกติ (conventional selection) เป็นวิธีที่แนะนำสำหรับลักษณะทั้งผลผลิตและการต้านทานต่อการหักล้มทั้งในข้าวและข้าวสาลี (Comstock and Robinson, 1952; Sarker *et al.*, 2007; Yao *et al.*, 2012; Rani *et al.*, 2015)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ด้วยเหตุที่ข้าวไร่เป็นข้าวไวแสง สามารถปลูกและเก็บผลผลิตได้เพียงปีละหนึ่งครั้ง ดังนั้นประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในด้านต่าง ๆ ที่สามารถประเมินได้ในการศึกษาภายในเวลาหนึ่งปี จึงเป็นการประเมินความเหมาะสมของการใช้พันธุ์ต่าง ๆ เป็นพ่อแม่ สำหรับงานการปรับปรุงพันธุ์พืช ความเหมาะสม ได้แก่ ประเมินจากความสามารถในการต้านทานการหักล้มทั้งจากค่าทางเคมี และลักษณะทางกายภาพ บางประการ และการประเมินจากความสามารถในการสร้างลูกผสมที่มีลักษณะที่พบว่าสัมพันธ์กับการต้านทานการหักล้ม

ด้านวิชาการ

- เผยแพร่ในวารสารทางวิทยาศาสตร์
- ได้ลูกผสมถึงชั่ว F1 ที่เกิดจากพันธุกรรมพ่อแม่ที่ได้ประเมินคุณสมบัติต้านทานการหักล้ม ซึ่งลูกผสมในชั่วนี้สามารถใช้เริ่มต้นในศึกษา heterosis สร้างลูกผสมกลับ และใช้ในการสร้างลูก F2 ที่เกิดการกระจายทางพันธุกรรมสำหรับใช้ในการคัดเลือกพันธุกรรมที่มีความสามารถต้านทานต่อการหักล้มต่อไปได้

หน่วยงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์

- เกษตรกรทั้งที่ปลูกข้าวและข้าวไร่
- หน่วยงานท้องถิ่นที่เกี่ยวข้องด้านการพัฒนาอาชีพและเสริมสร้างความมั่นคงให้แก่เกษตรกร
- มหาวิทยาลัยหรือสถาบันการศึกษาสามารถนำองค์ความรู้และพันธุ์ไปเผยแพร่ให้แก่เกษตรกรได้

แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยี หรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

1. ระหว่างการดำเนินการวิจัย มีการทำงานร่วมกับเกษตรกรและชุมชน ด้วยเหตุนี้ในแต่รอบการศึกษาวิจัยจะมีการถ่ายทอดวัตถุประสงค์ของการทำวิจัยและเป้าหมายให้ผู้เกี่ยวข้องได้ทราบ
2. มีการทำคู่มือหรือรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการข้าวไร่พันธุ์ท้องถิ่นเพื่อมอบให้ตัวแทนกลุ่มหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสำหรับการให้ความรู้แก่เกษตรกร

คำสำคัญ

ข้าวไร่ ความต้านทานการหักล้ม ปรับปรุงพันธุ์ ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางเคมี

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัย

การประเมินความสามารถในการต้านทานการหักล้มของข้าวไร่ โดยใช้พันธุ์ที่คัดเลือกไว้จำนวน 8 พันธุ์ มาทำการศึกษาและประเมินความสามารถในการนำมาใช้ในการปรับปรุงพันธุ์เพื่อเพิ่มลักษณะต้านทานการหักล้มในข้าวไร่ โดยใช้ข้อมูลร่วมกับความสามารถในการสร้างลูกผสม F1 สำหรับรายชื่อของทั้ง 8 พันธุ์ มีดังนี้

1. PLU-SU-001 (พันธุ์ป้อชูเชื้อลา)
2. PLU-SU-002 (พันธุ์ป้อเกะ)
3. PLU-SU-003 (พันธุ์นาสาร)
4. PLU-SU-004 (พันธุ์ข้าวเหนียวป่าละอู)
5. PLU-SU-005 (พันธุ์ป้อกอบิ)
6. NYP-SU-001 (พันธุ์อ้งเจิงใหญ่)
7. CP-001 (พันธุ์ดอกพะยอม)
8. CM-001 (พันธุ์เล่าสุหยง)

เนื่องจากพันธุ์ข้าวไร่ที่นำมาทำการศึกษาส่วนใหญ่ไวแสง ดังนั้นช่วงของการปลูกคือประมาณเดือนกรกฎาคม-พฤศจิกายน หรือเป็นการปลูกในฤดูกาลที่อาศัยน้ำฝน ทั้งนี้มีการนำพันธุ์ข้าวไร่ที่มีลักษณะตั้งตรงมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ด้วย ได้แก่ พันธุ์ดอกพะยอม

รายละเอียดการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1) เปรียบเทียบความสามารถในด้านแรงผลัก (pushing resistance) และลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการต้านทานการหักล้มในข้าวไร่พันธุ์ที่คัดเลือกเป็นพ่อแม่พันธุ์เพื่อการสร้างลูกผสมในการต้านทานการหักล้ม (ปลูกในแปลง)

การปลูกและเตรียมแปลง : เตรียมแปลงปลูกข้าวไร่ความยาวแปลง 6 เมตร กว้าง 2 เมตร โดยการปลูกข้าวไร่แต่ละพันธุ์ พันธุ์ละ 4 แถวต่อแปลง โดยแถวมีระยะห่างระหว่างแถว 50 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างหลุม 25 เซนติเมตร ปลูกโดยการกระทุ้งและหยอดเมล็ดปลูก ลึกประมาณ 2.5-5 เซนติเมตร หรือประมาณ 1-2 นิ้ว จากนั้นหยอดเมล็ด 3-5 เมล็ดต่อหลุม เมื่อเมล็ดงอกทำการถอนให้เหลือ 2 ต้นต่อหลุม ให้น้ำโดยระบบสปริงเกอร์ในระยะแรก

การกำจัดวัชพืช : กำจัดวัชพืชหนึ่งครั้งหลังการงอกประมาณ 3-4 อาทิตย์

ใส่ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่รองพื้นก่อนปลูก

การเก็บข้อมูล : เก็บข้อมูลการตั้งตรงของต้นข้าว และทดสอบแรงต้าน โดยการหักล้มวัดจากองศาระหว่างแนวของต้นและพื้นดิน โดยองศาที่ลดลงจะใช้ในการประเมินความสามารถในการต้านทานต่อการหักล้มในข้าวพันธุ์ต่าง ๆ การตั้งตรงและการประเมินจากแรงต้าน ประเมินค่าดังต่อไปนี้

1. องศาการตั้งตรงของกิ่งแปลงในข้าวแต่ละพันธุ์
 2. องศาการตั้งตรงของต้นข้าวที่แต่ละต้น (ก่อนการทดสอบการหักล้มโดยวิธีอ้อม)
 3. องศาการสปริงตัวกลับของลำต้นภายหลังการทดสอบการหักล้มโดยวิธีอ้อม
- ร่วมกับการประเมินการตั้งตรงของข้าวในระดับแปลงจากค่าองศาของลำต้น ได้แก่
- กลุ่มหักล้มมาก (very lodging) มี่องศาของลำต้น คือ 0° - 10°
- กลุ่มหักล้มค่อนข้างมาก (rather lodging) มี่องศาของลำต้น คือ 11° - 30°
- กลุ่มหักล้มปานกลาง (moderate lodging) มี่องศาของลำต้น คือ 31° - 50°
- กลุ่มหักลมน้อย (slightly lodging) มี่องศาของลำต้น คือ 51° - 70°
- กลุ่มตั้งตรง (erect type or upright stem) มี่องศาของลำต้น คือ 71° - 90°
- (ดัดแปลงจาก Ünán *et al.*, 2013)

แผนการทดลอง : วางแผนการทดลองแบบบล็อกผสมบรูณ์ หรือ Randomized Complete Block Design (RCBD) จำนวน 4 ซ้ำ มีทั้งหมด 8 ทริตเมนต์ ได้แก่พันธุ์ทั้งหมด 8 พันธุ์ ที่มีขนาดแปลง (กว้าง x ยาว) ของแต่ละพันธุ์ในแต่ละซ้ำ เท่ากับ 2×6 เมตร

วิธีการศึกษา

1.1 ศึกษาความสามารถในการต้านทานการหักล้มโดยวิธีอ้อม

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาการหักล้มของข้าวไร่ที่ปลูกในแปลงที่มีการจำลองสถานการณ์ขึ้นเพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานการหักล้มของพืช ได้แก่ การศึกษาความสามารถในการตั้งตรงของต้นภายหลังการโน้มต้น (the recovery ability after bending) โดยการบันทึกองศาของต้นกับพื้นดินทั้งก่อนและหลังทำการโน้มต้น เป็นการวัดองศาการตั้งของต้นก่อนการทดลองโดยการเทียบกับต้นที่มีลักษณะตั้งตรง จากนั้นทำการโน้มต้นโดยการโน้มให้รวงชิดพื้นแล้วปล่อยต้น ทำการวัดองศาโดยทำองศาเพื่อเปรียบเทียบแตกต่างกันทีละ 10 องศาเป็นฉากหลังของกอหรือต้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นการศึกษาความยืดหยุ่นและความสามารถในการตั้งตัวใหม่ของต้น และพบว่ามีสหสัมพันธ์กับการหักล้มที่พบในแปลง (Jennings *et al.*, 1979; Torro *et al.*, 2011)

ทำการศึกษการหักล้มโดยอ้อมจากการโน้มต้นกับข้าวที่ระยะการสุกแก่ทางสรีรวิทยา (physical maturity stage) ซึ่งระยะดังกล่าวนี้เป็นระยะที่เมล็ดมีการเจริญเติบโตเต็มที่ น้ำหนักแห้งของเมล็ดสูงสุด คุณภาพของเมล็ดดีที่สุด แต่ยังพบความชื้นในเมล็ดค่อนข้างสูง และพบว่าเป็นระยะเสี่ยงต่อการที่ผลผลิตได้รับความเสียหายทั้งจากการหักล้มหรือการเปลี่ยนแปลงความชื้น (ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์) (Harrington, 1972)

1.2 บันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการหักล้ม ได้แก่

1. ประเมินองศาต้นของข้าวทั้งแปลงในแต่ละพันธุ์ (Angle of stem before bending in plot)

2. วัดองศาต้นก่อนการโน้มต้นของข้าวแต่ละต้น (ก่อนการศึกษาความสามารถในการต้านทานการหักล้มโดยวิธีอ้อม) (Angle of stem before bending in individual plant)
3. วัดองศาต้นหลังการโน้มต้นของข้าวแต่ละต้น (Angle of stem after bending in individual plant)
4. คำนวณเปอร์เซ็นต์การสปริงของลำต้น (Springiness percentage) ตามสูตร ดังนี้

$$\text{Springiness percentage (\%)} = \frac{\text{Angle of stem after bending in individual plant}}{\text{Angle of stem before bending in individual plant}} \times 100\%$$

1.3 บันทึกข้อมูลลักษณะทางกายภาพที่ระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยา ดำเนินการในห้องปฏิบัติการ

1. ความยาวปล้องแรก (ล่างสุด) และปล้องที่สอง
2. เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของปล้องแรก และปล้องที่สอง
3. ความหนาของผนังลำต้นของปล้องแรก และปล้องที่สอง (culm wall thickness)

1.4 บันทึกลักษณะทางการเกษตร องค์ประกอบผลผลิต ผลผลิต และกายภาพบางลักษณะ ได้แก่ ความยาวรวง (โดยวัดจากคอรวงถึงปลายรวง) และ น้ำหนักรวง (Mulder, 1954; Ookawa and Ishihara, 1992; Kashiwagi and Ishimaru, 2004; Islam *et al.*, 2007)

1.5 บันทึกลักษณะเคมีในส่วนลำต้นและใบสุกแก่ทางสรีรวิทยา (Feng-zhuan *et al.*, 2010)

1. การสะสมโปแตสเซียม (K content)

คำนวณค่า K ที่สะสมในลำต้น หรือ ใบ = ปริมาณ K (%) x น้ำหนักแห้งของลำต้นเดี่ยว หรือ น้ำหนักแห้งของแผ่นใบที่พบบนลำต้นเดี่ยว

2. การสะสมซิลิคอน (Si content)

คำนวณค่า Si ที่สะสมในลำต้น หรือ ใบ = ปริมาณ Si (%) x น้ำหนักแห้งของลำต้นเดี่ยว หรือน้ำหนักแห้งของแผ่นใบที่พบบนลำต้นเดี่ยว

3. น้ำตาลที่ละลายได้ (soluble sugar content)

คำนวณค่า Soluble sugar ที่สะสมในลำต้น หรือ ใบ = ปริมาณ soluble sugar content (%) x น้ำหนักแห้งของลำต้นเดี่ยว หรือ น้ำหนักแห้งของแผ่นใบที่พบบนลำต้นเดี่ยว

4. ปริมาณแป้ง

คำนวณค่าปริมาณแป้งที่สะสมในลำต้น หรือ ใบ = ปริมาณแป้ง(%) x น้ำหนักแห้งของลำต้นเดี่ยว หรือน้ำหนักแห้งของแผ่นใบที่พบบนลำต้นเดี่ยว

5. ปริมาณเซลลูโลส

คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์เซลลูโลสที่สะสมในลำต้น หรือ ใบ = ปริมาณเซลลูโลส (%) ×
น้ำหนักแห้งของลำต้นเดี่ยว หรือ
น้ำหนักแห้งของแผ่นใบที่พบบนลำต้น
เดี่ยว

6. ปริมาณลิกนิน

คำนวณค่าปริมาณลิกนินที่สะสมในลำต้น หรือ ใบ = ปริมาณลิกนิน (%) × น้ำหนักแห้งของลำ
ต้นเดี่ยว หรือน้ำหนักแห้งของแผ่นใบที่พบบน
ลำต้นเดี่ยว

2. เพิ่มปริมาณเมล็ดพันธุ์ บันทึกข้อมูลลักษณะทางสรีรวิทยาในแปลงปลูก ผลผลิตและองค์ประกอบ ผลผลิตที่ระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยา (Physical maturity) (ปลูกในแปลงและกระถาง)

เนื่องจากพันธุ์ที่นำมาศึกษาวิจัยนี้ บางพันธุ์เกษตรกรไม่ได้นิยมปลูกเนื่องจากยังพบการหักล้มและยุ่งยาก
ในการจัดการภายในแปลงและบางพันธุ์เป็นพันธุ์ที่รวบรวมมาจากต่างพื้นที่ แต่เพิ่งนำมาปลูกทดสอบผลผลิตและ
การหักล้มเบื้องต้นในพื้นที่ ด้วยเหตุนี้เมล็ดพันธุ์จึงมีเมล็ดค่อนข้างน้อย ดังนั้น การศึกษาที่สองนี้จึงเพื่อเป็นการเพิ่ม
ปริมาณเมล็ดพันธุ์ และเพื่อบันทึกข้อมูลทางสรีรวิทยาในแปลงที่สำคัญ ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตไปพร้อม
กัน

วิธีการปลูกและจัดการแปลง เหมือนข้อที่ 1 แต่มีการถอนหรือทำเครื่องหมายสำหรับต้นที่งอกให้
เหลือ 2 ต้นต่อหลุม

ข้อมูลที่บันทึก ได้แก่

1. ความสูงที่ระยะสำรวจ ความสูงทั้งต้น (รวบใบ)
2. การแตกกอ
3. รวงต่อกอ
4. เมล็ดต่อรวง
5. เปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็ม เปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบ
6. น้ำหนักเมล็ด
7. ผลผลิตต่อรวง ผลผลิตต่อกอ

แผนการทดลอง : วางแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มบูรณ์ หรือ Randomized Complete
Block Design (RCBD) จำนวน 4 ซ้ำ มีทั้งหมด 8 ทรีตเมนต์ ได้แก่พันธุ์ทั้งหมด 8 พันธุ์

ปลูกในแปลง : ขนาดแปลง (กว้าง x ยาว) ของแต่ละพันธุ์ในแต่ละซ้ำ เท่ากับ 2 x 6 เมตร

ปลูกในกระถาง : ขนาดกระถาง (เส้นผ่าศูนย์กลาง x ความสูง) เท่ากับ 30 เซนติเมตร x 30 เซนติเมตร จำนวน 8 กระถางต่อหนึ่งพันธุ์

3. การสร้างลูกผสมระหว่างพ่อแม่ที่ทำการคัดเลือกไว้เพื่อการพัฒนาพันธุ์ให้ต้านทานต่อการหักล้ม (ปลูกในกระถางหรือปอซีเมนต์)

วิธีการปลูกและการจัดการ เนื่องจากข้าวไร่ ส่วนใหญ่เป็นข้าวไวแสง ดังนั้นช่วงของการปลูกคือประมาณเดือนกรกฎาคม-พฤศจิกายน หรือเป็นการปลูกในฤดูกาลที่อาศัยน้ำฝน

การปลูก : ปลูกโดยการหยอดเมล็ดที่ความหนาแน่นและระยะความลึกที่ใกล้เคียงกันในทุกพันธุ์ คือ จำนวน 3-5 เมล็ดต่อหลุม ความลึกประมาณ 2.5-5 เซนติเมตร หรือประมาณ 1-2 นิ้ว และที่ระยะปลูกระหว่างแถว x หลุม คือ 25 x 25 เซนติเมตร

การกำจัดวัชพืช : กำจัดวัชพืชหนึ่งครั้งหลังการงอกประมาณ 3-4 อาทิตย์

การเก็บข้อมูล : การหักล้มวัดจากองศาระหว่างแนวของต้นและพื้นดิน โดยองศาที่ลดลงจะใช้ในการประเมินความสามารถในการต้านทานต่อการหักล้มในข้าวพันธุ์ต่าง ๆ

การสร้างลูกผสม

พันธุ์กลุ่ม L (Lodging stem types) พันธุ์ที่เกษตรกรปลูกหรือสนใจแต่เป็นพันธุ์ที่ไม่ต้านทานต่อแรงผลึกหรือต้านทานปานกลางหรือน้อย และแสดงการหักล้มในแปลงปลูกในแปลงเกษตรกร (L01, L02, L03, L04, L05)

พันธุ์กลุ่ม E (Erect stem types) พันธุ์ที่เกษตรกรปลูกมีลักษณะลำต้นตั้งตรงและแสดงการต้านต่อแรงผลึกจากการปลูกในแปลงเกษตรกร (E01, E02)

* ทั้งนี้พันธุ์ทั้งสองกลุ่มมาจากการประเมินพันธุ์ข้าวไร่จากการศึกษาในสองปีที่ผ่านมา (การปลูกปี 2557-2558) โดยได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ในปีงบประมาณ 2558

** มีการนำพันธุ์ข้าวไร่ที่มีลำต้นตั้งตรงที่ได้รับความนิยม ได้แก่ พันธุ์ดอกพะยอม มาร่วมในการสร้างลูกผสมครั้งนี้ด้วย

สร้างลูกผสมแบบ half diallel cross

Crossing	E02	L01	L02	L03	L04	L05
E01	X	X	X	X	X	X
E02		X	X	X	X	X
L01			X	X	X	X
L02				X	X	X
L03					X	X

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะต่าง ๆ ในแต่ละพันธุ์ ตามแผนการทดลองแบบบล็อกสมบูรณ์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และเปรียบเทียบอิทธิพลของทรีตเมนต์ที่พบความแตกต่างกันทางสถิติหรือมีนัยสำคัญด้วยวิธีการของดันแคน (Duncan's New Multiple Range Test; DMRT)
2. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะต่าง ๆ โดยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; r)
3. วิเคราะห์เส้นทางสำหรับลักษณะต่าง ๆ (ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของรวงและของต้น และองค์ประกอบผลผลิต) ต่อผลผลิต (Path analysis) ที่แสดงทั้งอิทธิพลทางตรง (direct effect) และอิทธิพลทางอ้อม (indirect effect)
4. วิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression) สำหรับลักษณะต่าง ๆ (ได้แก่ ลักษณะทางการเกษตร ลักษณะทางกายภาพของลำต้นบางลักษณะ และลักษณะทางเคมีบางประการ) ที่มีผลต่อทั้งการตั้งตรงของลำต้น (พิจารณาจากลักษณะองศาของลำต้นก่อนการโน้มต้น) และต่อความสามารถในการต้านทานการหักล้ม (พิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นภายหลังการโน้มต้น)
5. การศึกษาความดีเด่นของลูกผสม (heterosis) ศึกษาสองแบบคือความดีเด่นเหนือค่าเฉลี่ยพ่อแม่ เรียกว่า relative heterosis หรือเรียกว่า mid-parent heterosis และความดีเด่นเหนือพ่อหรือแม่ที่ดีที่สุด ที่เรียกว่า best-parent heterosis หรือ heterobeltiosis

$$\text{Relative Heterosis} = [F1-MP]/MP \times 100$$

เมื่อ F1 = ค่าของลูกผสมชั่วที่ 1

MP = Mid-parent หรือค่าเฉลี่ยของพ่อและแม่ในลักษณะนั้น ๆ หรือเท่ากับ $[P1+P2]/2$ เมื่อ

P1 และ P2 คือค่าเฉลี่ยของแม่และพ่อ ตามลำดับ

$$\text{Heterobeltiosis} = [F1-BP]/BP \times 100$$

เมื่อ F1 = ค่าของลูกผสมชั่วที่ 1

BP = better parent หรือค่าของพ่อหรือแม่ที่ดีที่สุด ในลักษณะนั้น ๆ

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ R-program version 3.5.1 (R Core Team, 2018)

ระยะเวลาที่ศึกษา

ทำการศึกษาระหว่างเดือนตุลาคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2563

สถานที่ทำวิจัย

1. แปลงเกษตรกร จังหวัดเพชรบุรี
2. แปลงมูลนิธิโครงการหลวง จังหวัดเชียงใหม่ (เฉพาะการสร้างลูกผสม)
3. โรงเรียนปลูกพืช คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขต
สารสนเทศเพชรบุรี
4. ห้องปฏิบัติการเคมี และห้องปฏิบัติการชีววิทยา คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร
มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตสารสนเทศเพชรบุรี

ผลการวิจัยและวิจารณ์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตจากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ผลการศึกษาในปี พ.ศ. 2558-2559 แม้จะไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของแผนการดำเนินงานตามโครงการวิจัยนี้ แต่เนื่องจากมีความเกี่ยวเนื่องกันและเป็นข้อมูลที่เป็นเหตุผลของการคัดเลือกพันธุ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการปรับปรุงพันธุ์ในปี พ.ศ. 2559 เป็นต้นไป ด้วยเหตุนี้ ในผลการศึกษาตามรายงานวิจัยฉบับนี้จะนำเสนอผลการศึกษาที่แสดงความเกี่ยวเนื่องไว้ด้วย ทั้งนี้ข้อมูลวิเคราะห์เหล่านี้ไม่ได้มีการนำเสนอในงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมา

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิต (ผลผลิตเมล็ดต่อกอ) และลักษณะทางการเกษตรที่สำคัญ ได้แก่ ความยาวรวง จำนวนหน่อต่อกอ ความสูงต้น น้ำหนักเมล็ดต่อรวง น้ำหนัก 100 เมล็ด จำนวนเมล็ดต่อรวง เปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ด ของข้าวไร่ที่ปลูกในฤดูฝน ปี 2558 (ค.ศ. 2015) และปี 2559 (ค.ศ. 2016) (ตารางที่ 1)

การศึกษาใน ปี 2558 พบว่าลักษณะความสูงต้นมีความสัมพันธ์ทางบวกกับน้ำหนักเมล็ดต่อรวงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($r=0.5746$) แต่ความสูงต้นพบความสัมพันธ์ทางลบกับเปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($r=-0.5930$)

สำหรับลักษณะผลผลิตต่อกอ พบว่ามีความสัมพันธ์ทางบวกกับทุกลักษณะยกเว้นน้ำหนัก 100 เมล็ด ($r=-0.2173$) และเปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ด ($r=-0.1296$) แม้ว่าจะไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 1) สำหรับลักษณะที่พบความสัมพันธ์ทางบวกกับผลผลิตต่อกอ ได้แก่ ความยาวรวง ($r=0.0505$) จำนวนหน่อต่อกอ ($r=0.0323$) ความสูงต้น ($r=0.2158$) น้ำหนักเมล็ดต่อรวง ($r=0.2411$) และจำนวนเมล็ดต่อรวง ($r=0.1364$)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับลักษณะทางการเกษตรอื่น ๆ พบว่านอกเหนือจากน้ำหนักเมล็ดต่อรวงแล้ว ความสูงต้นพบความสัมพันธ์ทางบวกอย่างไม่มีนัยสำคัญกับจำนวนหน่อต่อกอ ($r=0.1150$) แต่มีความสัมพันธ์ทางลบกับองค์ประกอบผลผลิต ได้แก่ จำนวนเมล็ดต่อรวง ($r=-0.0240$) และน้ำหนัก 100 เมล็ด ($r=-0.3015$) อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นเดียวกัน ทั้งนี้จำนวนหน่อต่อกอพบความสัมพันธ์ทางบวกกับทุกลักษณะรวมทั้งผลผลิตต่อกออย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ดังกล่าวไปแล้วข้างต้น (ตารางที่ 1)

ในปี พ.ศ. 2559 พบความสัมพันธ์ทางบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างจำนวนหน่อต่อกอและความสูงต้น ($r=0.5514$) ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหน่อต่อกอกับลักษณะทางการเกษตรอื่น ๆ พบในทิศทางบวกเช่นกันแม้จะไม่มีนัยสำคัญทางสถิติก็ตาม นอกจากนี้ ความสูงต้นมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทางบวกอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับลักษณะการเกษตรอื่น ๆ รวมทั้งผลผลิตต่อกอด้วยเช่นกัน ($r=0.2514$) (ตารางที่ 1)

ลักษณะน้ำหนักเมล็ดต่อรวงมีความสัมพันธ์ทางลบกับน้ำหนัก 100 เมล็ด อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($r=-0.6024$) และพบความสัมพันธ์ทางลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างน้ำหนักเมล็ดต่อรวงและจำนวนเมล็ดต่อรวง ($r=0.5456$) หรืออาจกล่าวได้ว่ารวงที่พบว่าน้ำหนักเมล็ดสูงเป็นเมล็ดที่มีขนาดเล็ก และอาจมีน้ำหนัก 100 เมล็ดต่ำนั่นเอง นอกจากนี้พบว่าจำนวนเมล็ดต่อรวงเป็นลักษณะเดียวที่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับผลผลิต ($r=0.5673$) โดยพบทิศทางบวก เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางการเกษตรอื่น ๆ กับผลผลิตที่พบในทิศทางบวกแม้ว่าลักษณะเหล่านั้นจะไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติก็ตาม (ตารางที่ 1)

สำหรับลักษณะเปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ดพบความสัมพันธ์ทางบวกกับน้ำหนัก 100 เมล็ด ($r=0.4093$, $r=0.4076$) และจำนวนเมล็ดต่อรวง ($r=0.2719$, $r=0.3269$) ทั้งในปี 2558 และ 2559 ตามลำดับ แม้ความสัมพันธ์ทั้งหมดจะไม่มีนัยสำคัญทางสถิติก็ตาม (ตารางที่ 1) ซึ่งอาจหมายถึงกลุ่มข้าวไร่พันธุ์ที่มีเมล็ดใหญ่อาจมีเปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ดสูงกว่าพันธุ์ข้าวที่มีเมล็ดเล็ก

ลักษณะการแตกกอ (tillering characteristic) ที่ประเมินได้จากจำนวนหน่อต่อกอเป็นลักษณะองค์ประกอบผลผลิตที่สำคัญสำหรับข้าว และระยะการแตกกอของข้าว (rice tillering) เป็นระยะที่มีความสำคัญในการกำหนดการให้ผลผลิตของข้าว (Martinez-Eixarch *et al.*, 2015) การมีความสามารถในการแตกกอสูงหรือมีจำนวนต่อกอมากส่วนใหญ่ข้าวจะให้ผลผลิตที่สูง (Gendua *et al.*, 2009; Martinez-Eixarch *et al.*, 2015) ยกเว้นการเกิดหน่อที่ล่าช้าที่จะทำให้สูญเสียสารอาหารและมีผลไปจำกัดศักยภาพในการให้ผลผลิตของข้าวได้ (Lafarge *et al.*, 2002; Mohapatra and Kariali, 2008) แต่ขณะเดียวกัน การสร้างหน่อที่มากเกินไปอาจทำให้มีบางหน่อที่เป็นหมันหรือไม่มีการสร้างรวง ทำให้มีการสร้างเมล็ดต่อรวงน้อย รวงสั้น และส่งผลต่อการมีผลผลิตที่ลดลงได้ (Peng *et al.*, 1998) แต่การมีจำนวนหน่อที่น้อยก็หมายถึงมีจำนวนรวงน้อยซึ่งกระทบต่อผลผลิตอย่างชัดเจนเช่นกัน (Martinez-Eixarch *et al.*, 2015) การประเมินจำนวนหน่อต่อกอมีความสำคัญเนื่องจากเป็นลักษณะที่สัมพันธ์กับการสร้างจำนวนรวงในระหว่างการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (vegetative growth stage) ขณะที่องค์ประกอบผลผลิตอื่น ๆ ได้แก่ จำนวนเมล็ดต่อรวง (spikelets per panicle) การเติมเต็มเมล็ด (grain filling) และน้ำหนักเมล็ด จะถูกกำหนดในระยะการสืบพันธุ์ (reproductive stage) (Tadahiko, 1997) สำหรับความสัมพันธ์ของลักษณะจำนวนหน่อต่อกอและความยาวรวงพบว่ามีความสัมพันธ์ทางบวกที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติในทั้งสองปีที่ทำการศึกษา ($r=0.1126$ และ 0.2690 สำหรับปี พ.ศ. 2558 และ 2559 ตามลำดับ) ก็อาจประเมินเบื้องต้นได้ว่าพันธุ์ข้าวไร่ที่นำมาศึกษาในครั้งนี้น่าจะมีความสามารถในการแตกต่อค่อนข้างต่ำจนไม่กระทบต่อลักษณะของรวง ได้แก่ ความยาวรวง

อย่างไรก็ตาม การประเมินผลของความสามารถในการแตกกอในระดับแปลงกลับค่อนข้างแปรปรวนเนื่องจากเป็นลักษณะที่ได้รับผลกระทบค่อนข้างสูงเนื่องจากอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับองค์ประกอบผลผลิตอื่น ๆ เช่น จากการศึกษาของ Adhikari *et al.* (2018) ที่พบว่าจำนวนหน่อที่สามารถให้รวงที่ติดเมล็ดต่อพื้นที่ (number of effective tiller/m²) (15.2 เปอร์เซ็นต์) รวมทั้งจำนวนรวงต่อพื้นที่ (number of panicle/m²) (18.9 เปอร์เซ็นต์) มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนจากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (coefficient of variance; CV) ค่อนข้างสูงกว่าลักษณะองค์ประกอบผลผลิตหรือลักษณะทางการเกษตรอื่น ๆ เช่น น้ำหนัก 1000 เมล็ด (10.8 เปอร์เซ็นต์) ความยาวรวง (5.5 เปอร์เซ็นต์) และความสูงต้น (6.9 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวพบว่าค่าสูงเทียบเท่ากับลักษณะผลผลิต (21.8 เปอร์เซ็นต์) หรือเมื่อประเมินจากค่าอัตราพันธุกรรมหรือความสามารถในการถ่ายทอดทางพันธุกรรมแบบกว้าง (broad sense heritability; Hbs) จากการศึกษาของ Adhikari *et al.* (2018) เช่นเดียวกัน พบว่าความสามารถในการแตกกอที่ประเมินจำนวนหน่อที่สามารถให้รวงที่ติดเมล็ดต่อพื้นที่ของข้าวมีค่าค่อนข้างต่ำ (Hbs = 0.12) เช่นเดียวกับจำนวนรวงต่อพื้นที่ (Hbs = 0.18) เมื่อเทียบกับน้ำหนัก 1,000 เมล็ด (Hbs = 0.48) ความยาวรวง (Hbs = 0.39) และความสูงต้น (Hbs = 0.43) และในกรณีศึกษาที่พบว่ามีความสามารถในการถ่ายทอดทางพันธุกรรมต่ำกว่าลักษณะผลผลิต (Hbs = 0.23) รวมทั้ง

ลักษณะจำนวนหน่อที่สามารถให้รวงที่ติดเมล็ดต่อพื้นที่ยังมีค่าความก้าวหน้าพันธุกรรม (genetic advance; GA) ความก้าวหน้าทางพันธุกรรมที่เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (genetics advance as percent of mean; GAM) จากการศึกษาต่ำกว่าลักษณะอื่น ๆ คือมีค่า GA เท่ากับ 4.63 และมีค่า GAM เท่ากับ 4.04 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ลักษณะผลผลิตมีค่า GA และ GAM เท่ากับ 0.71 และ 11.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ด้วยเหตุนี้ การศึกษาหรือการคัดเลือกโดยใช้ลักษณะการแตกกอเป็นลักษณะคัดเลือกอาจทำให้ผลการศึกษาลดเคลื่อนได้เช่นกัน จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ของข้าวไร่ ในปี พ.ศ. 2558-2559 ที่พบความสัมพันธ์ในทิศทางบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างการแตกกอกับความสูงต้นอาจเป็นอีกทางเลือกในการใช้ลักษณะความสูงเป็นลักษณะในการคัดเลือกผลผลิต ทั้งนี้เพราะทั้งการแตกกอและความสูงต้นต่างเป็นลักษณะองค์ประกอบผลผลิตที่สำคัญและพบความสัมพันธ์ทางบวกกับผลผลิตเมล็ดของข้าวไร่แม้จะไม่มีนัยสำคัญทางสถิติก็ตาม ทั้งนี้เพราะผลผลิตเป็นลักษณะเชิงปริมาณ (quantitative trait) ที่มีความซับซ้อน ที่มีความสามารถในการถ่ายทอดทางพันธุกรรมค่อนข้างต่ำ ได้รับผลกระทบเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ หรือเป็นลักษณะที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม (Shrestha *et al.*, 2012) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเป็นลักษณะที่ขึ้นกับหลายลักษณะหรือกล่าวได้ว่าผลผลิตในข้าวเป็นลักษณะที่มีรายงานว่าเกี่ยวข้องกับหลายยีน (Shomura *et al.*, 2008 Oikawa and Kyojuka, 2009; Li *et al.*, 2011a; Xu *et al.*, 2016a)

อย่างไรก็ตาม จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อศึกษาพันธุ์พ่อแม่สำหรับใช้ในการสร้างพันธุ์โดยไม่กระทบต่อการให้ผลผลิต ด้วยเหตุนี้ ความสามารถในการต้านทานต่อการหักล้มกับลักษณะการเกษตรอื่น ๆ รวมทั้งความสูงต้นจำเป็นต้องมีการประเมินเช่นเดียวกัน

การศึกษากาวิเคราะห์เส้นทางของลักษณะการเกษตรและองค์ประกอบผลผลิต

การวิเคราะห์เส้นทาง (Path analysis) ที่แสดงอิทธิพลทางตรง (direct effect) และอิทธิพลทางอ้อม (indirect effect) ได้ทำการศึกษาหลังจากทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตจากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ผลการวิเคราะห์เส้นทางได้แสดงในตารางที่ 2

การศึกษาในปี พ.ศ. 2558 และ 2559 พบอิทธิพลทางตรงของความยาวรวงต่อผลผลิตต่อกอในทิศทางบวก โดยมีค่าอิทธิพลทางตรงและค่าเมื่อเทียบกับอิทธิพลรวม (total effect) เท่ากับ 0.1529 ประมาณ 59.9 เปอร์เซ็นต์ และเท่ากับ 0.1274 ประมาณ 49.2 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาในทั้งสองปี ตามลำดับ (ตารางที่ 2) สำหรับอิทธิพลทางอ้อมผ่านลักษณะอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อผลผลิตต่อกอในการศึกษา ปี 2558 นั้นพบว่ามีความเท่ากับ -0.1025 หรือประมาณ 40.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับอิทธิพลรวม และเท่ากับ 0.1316 หรือประมาณ 50.81 เปอร์เซ็นต์ ในการศึกษาในปี 2559 สำหรับการมีอิทธิพลทางอ้อมผ่านน้ำหนักเมล็ดต่อรวงนั้นพบว่าเป็นลักษณะเดียวที่แสดงค่าอิทธิพลเป็นบวกในทั้งสองปีที่ทำการศึกษา สำหรับค่าอิทธิพลที่เหลือ (residual effect) นั้นมีค่าน้อยจนไม่สามารถรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์ของอิทธิพลรวมได้ในทั้งสองปีที่ศึกษา (ตารางที่ 2)

ลักษณะจำนวนหน่อต่อกอแสดงอิทธิพลทางตรงต่อผลผลิตต่อกอในทิศทางลบ เท่ากับ -0.0102 ในปี 2558 และเท่ากับ 0.1836 ในปี 2559 (ตารางที่ 2) เมื่อกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับอิทธิพลรวมพบว่ามีค่าเท่ากับ 19.4 เปอร์เซ็นต์ และ 45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับทั้งสองปีการศึกษาตามลำดับ สำหรับค่าอิทธิพลทางอ้อมต่อ

ลักษณะผลผลิตต่อกอนั้นพบค่าเป็นบวกในทั้งสองปีที่ศึกษา เท่ากับ 0.0425 ประมาณ 80.6 เปอร์เซ็นต์ ในปี พ.ศ. 2558 และเท่ากับ 0.2243 ประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ ในปี พ.ศ. 2559 ขณะที่อิทธิพลทางอ้อมของจำนวนหน่อต่อกต่อลักษณะผลผลิตต่อกอนั้นผ่านลักษณะความยาวรวง ความสูงต้น จำนวนเมล็ดต่อรวง และเปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ด สำหรับอิทธิพลที่เหลือนั้นมีค่าน้อยมากเช่นกันจนไม่สามารถประเมินเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับอิทธิพลรวมได้ จึงให้ค่าเปอร์เซ็นต์เท่ากับศูนย์ในทั้งสองปีการศึกษา

การศึกษาอิทธิพลทางตรงของลักษณะความสูงต้นต่อผลผลิตต่อก ในปี พ.ศ. 2558 มีค่าเท่ากับ 0.2228 คิดเป็น 65.5 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าอิทธิพลทั้งหมด และ ปี พ.ศ. 2559 มีค่าเท่ากับ 0.0606 คิดเป็น 24.1 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 2) ขณะที่อิทธิพลทางอ้อมของลักษณะความสูงที่ส่งอิทธิพลไปยังผลผลิตมีค่าเท่ากับ 0.0551 และ 0.1206 หรือคิดเป็น 16.2 และ 48 เปอร์เซ็นต์ ในทั้งสองปี ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าอิทธิพลทางอ้อมจะผ่านสองลักษณะอย่างชัดเจนในทิศทางบวก ได้แก่ ความยาวรวงและน้ำหนักเมล็ดต่อรวงในทั้งสองปีการศึกษา ขณะที่ค่าอิทธิพลที่เหลือยังพบว่ามีค่าค่อนข้างสูงอยู่ เท่ากับ 18.3 และ 27.9 เปอร์เซ็นต์ ในทั้งสองปีการศึกษา ตามลำดับ การมีค่าอิทธิพลที่เหลือจากการศึกษาสูง แสดงให้เห็นว่าอาจมีลักษณะอื่น ๆ ที่ได้รับผลกระทบจากความสูงต้นที่ยังไม่ได้มีการศึกษาแต่สามารถส่งผลต่อผลผลิตได้ หรืออีกนัยหนึ่งคือการประเมินค่าอิทธิพลที่หลงเหลืออยู่นี้เพื่อบ่งชี้ว่าปัจจัยหรือลักษณะต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาหรือการทำนายไปยังผลผลิตนั้นเหมาะสมเพียงใดและยังคงหลงเหลือลักษณะอื่น ๆ ที่เหมาะสมหรือน่าจะส่งผลกระทบต่อผลผลิตที่ยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์หรือไม่ เป็นต้น (Akintunde, 2012)

สำหรับอิทธิพลทางตรงของลักษณะน้ำหนักเมล็ดต่อรวงที่มีต่อผลผลิตต่อกอนั้นพบทั้งค่าบวกและค่าลบ เท่ากับ 0.0833 คิดเป็น 31.7 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าอิทธิพลรวมที่สามารถประเมินได้ สำหรับปี พ.ศ. 2558 และเท่ากับ -0.3756 คิดเป็น 41.4 เปอร์เซ็นต์ในปี 2559 และอิทธิพลทางอ้อมผ่านลักษณะอื่น ๆ รวมมีค่าเท่ากับ 0.1686 คิดเป็น 64.2 เปอร์เซ็นต์ในปี 2558 และเท่ากับ 0.1966 คิดเป็น 21.7 เปอร์เซ็นต์ในปี 2559 สำหรับอิทธิพลทางอ้อมผ่านลักษณะสำคัญสามลักษณะได้แก่ ความยาวรวง ความสูงต้น และจำนวนเมล็ดต่อรวง ในทิศทางบวกในทั้งสองปีการศึกษา ขณะที่อิทธิพลที่เหลือมีค่าเท่ากับ -0.0108 คิดเป็น 4.11 เปอร์เซ็นต์ และเท่ากับ 0.3358 คิดเป็น 37 เปอร์เซ็นต์ในทั้งสองปีการศึกษา ตามลำดับ

ลักษณะน้ำหนัก 100 เมล็ด เป็นลักษณะเดียวที่พบว่ามีอิทธิพลทางลบต่อผลผลิตในทั้งสองปีการศึกษา ดังนี้ มีค่าเท่ากับ -0.1957 คิดเป็น 90.1 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าอิทธิพลรวมที่ประเมินได้ สำหรับปี พ.ศ. 2558 และเท่ากับ -0.3450 คิดเป็น 49 เปอร์เซ็นต์ ในปี พ.ศ. 2559 (ตารางที่ 2) อิทธิพลทางอ้อมผ่านลักษณะอื่น ๆ รวมเท่ากับ -0.0216 คิดเป็น 9.9 เปอร์เซ็นต์ ในปี พ.ศ. 2558 และเท่ากับ 0.3059 คิดเป็น 43.4 เปอร์เซ็นต์ ในปี พ.ศ. 2559 สำหรับอิทธิพลทางอ้อมพบความสัมพันธ์ผ่านสามลักษณะ ได้แก่ ความยาวรวง จำนวนเมล็ดต่อรวง และเปอร์เซ็นต์เติมเต็มเมล็ดในทิศทางบวกในทั้งสองปีการศึกษา สำหรับอิทธิพลทางอ้อมมีค่าน้อยมาก คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าอิทธิพลรวมคิดเป็นศูนย์ในทั้งสองปีการศึกษา นั้นแสดงให้เห็นว่าลักษณะที่ใช้ในการศึกษาถึงความสัมพันธ์ร่วมกับน้ำหนัก 100 เมล็ดนั้นเพียงพอสำหรับการศึกษาอิทธิพลต่อผลผลิตต่อก (Akintunde, 2012)

จำนวนเมล็ดต่อรวงแสดงค่าอิทธิพลทางตรงต่อผลผลิตสูงในทิศทางบวกต่อลักษณะผลผลิตเมื่อเทียบกับค่าอิทธิพลรวม มีค่าเท่ากับ 0.0967 คิดเป็น 70.9 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าอิทธิพลรวมที่ประเมินได้ในปี พ.ศ. 2558

และเท่ากับ 0.5952 คิดเป็น 88.1 เปอร์เซ็นต์ในปี พ.ศ. 2559 (ตารางที่ 2) อิทธิพลทางอ้อมสำหรับทั้งสองปี การศึกษามีค่าเป็นบวกเท่ากับ 0.0397 คิดเป็น 29.1 เปอร์เซ็นต์ และเท่ากับ 0.0264 คิดเป็น 3.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับสองลักษณะ ได้แก่ น้ำหนักเมล็ดต่อรวง (เท่ากับ 0.0142 และ 0.0096) และเปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ด (0.0363 และ 0.0594) เป็นลักษณะที่ได้รับอิทธิพลทางอ้อมจากจำนวนเมล็ดต่อรวงที่ส่งผลทางบวกต่อผลผลิตในทั้งสองปีการศึกษา สำหรับค่าอิทธิพลที่เหลือของลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวงที่มีต่อผลผลิตต่อกอนั้นมีค่าน้อยมากในทั้งสองปี มีค่าคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าอิทธิพลรวม เท่ากับ 0 และ 8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับปี พ.ศ. 2558 และ 2559 ตามลำดับ

สำหรับลักษณะสุดท้ายในการศึกษาการวิเคราะห์เส้นทาง ได้แก่ ลักษณะเปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ดที่มีอิทธิพลรูปแบบต่าง ๆ ต่อผลผลิตต่อกอ พบว่าค่าอิทธิพลทางตรงมีค่าเป็นบวก เท่ากับ 0.1338 คิดเป็น 33.7 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าอิทธิพลรวมในปี 2558 และมีค่าเท่ากับ 0.1817 คิดเป็น 49.8 เปอร์เซ็นต์ในปี พ.ศ. 2559 (ตารางที่ 2) อิทธิพลทางอ้อมที่ทำการศึกษาในทั้งสองปีพบว่ามีค่าเป็นลบ โดยมีค่าเท่ากับ -0.2633 คิดเป็น 66.3 และมีค่าเท่ากับ 0.0117 คิดเป็น 3.2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอิทธิพลทางอ้อมพบว่ามีค่าผ่านเฉพาะลักษณะน้ำหนักเมล็ดต่อรวงและจำนวนเมล็ดต่อรวงที่มีค่าเป็นบวกในทั้งสองปีการศึกษา ค่าอิทธิพลที่เหลือเมื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับอิทธิพลรวมพบว่ามีค่าแตกต่างกัน โดยในปี 2558 คิดเป็น 0 เปอร์เซ็นต์ และในปี พ.ศ. 2559 คิดเป็น 47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การบ่งชี้อิทธิพลทางตรงและทางอ้อมของลักษณะต่าง ๆ ที่มีต่อผลผลิตต้องมีการนำผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และการวิเคราะห์เส้นทางมาอธิบายร่วมกัน ทั้งนี้ การเลือกลักษณะเพื่อใช้ในการคัดเลือกสำหรับการให้ผลผลิตสูงเพื่อการพัฒนาพันธุ์พืชขึ้นนั้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญและต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบ (Milligan *et al.*, 1990; Dumlupinar *et al.*, 2012).

จากผลการศึกษาในปี พ.ศ. 2558 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของลักษณะความยาวรวงต่อลักษณะผลผลิตมีค่าน้อยกว่าลักษณะอื่น ๆ ยกเว้นจำนวนหน่อต่อกอ ขณะที่ลักษณะความยาวรวงพบค่าปานกลางในการศึกษาในปี พ.ศ. 2559 (ตารางที่ 1) แม้ว่าจะมีความสัมพันธ์อย่างสูงระหว่างลักษณะความยาวรวงกับลักษณะทั้งจำนวนหน่อต่อกอและน้ำหนัก 100 เมล็ด ในการศึกษาใน พ.ศ. 2558 เช่นเดียวกันที่พบความสัมพันธ์สูงกับลักษณะจำนวนหน่อต่อกอ น้ำหนัก 100 เมล็ด และเปอร์เซ็นต์การเต็มเต็มเมล็ด ในการศึกษาในปี พ.ศ. 2559 แต่จากการวิเคราะห์เส้นทางกลับพบว่าอิทธิพลทางอ้อมที่ผ่านลักษณะจำนวนหน่อต่อกอและน้ำหนัก 100 เมล็ด ไม่มีความเสถียรหรือมีความแปรปรวนระหว่างสองปีทำการศึกษาและมีค่าในทิศทางลบ (ตารางที่ 2) ขณะที่อิทธิพลทางตรงกับผลผลิตค่อนข้างสูงในการวิเคราะห์เส้นทางในทั้งสองปีการศึกษา เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Soni *et al.* (2013) และ Ogunbayo *et al.* (2014) ที่รายงานการพบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความยาวรวงและผลผลิตของข้าว ทั้งนี้หากอธิบายในด้านพันธุกรรม พบว่าลักษณะความยาวรวงในข้าวมีรายงานทั้งสองแบบ คือถูกควบคุมด้วยพันธุกรรมค่อนข้างสูงหรือต่ำเมื่อพิจารณาจากค่าอัตราถ่ายทอดทางพันธุกรรม (heritability) (Ullah *et al.*, 2011; Lestari *et al.*, 2015) และมีนักปรับปรุงพันธุ์ได้ใช้ลักษณะความยาวรวงเป็นลักษณะคัดเลือกสำหรับงานปรับปรุงพันธุ์ข้าวเพื่อการเพิ่มผลผลิตแม้ว่าจะมีการศึกษาที่พบว่า เป็นลักษณะที่มีความสามารถในการถ่ายทอดทางพันธุกรรมค่อนข้างต่ำในหลายคู่ผสม ซึ่งแสดงถึงผลกระทบของอิทธิพลสิ่งแวดล้อมที่สามารถกระทบการแสดงออกของ

ความยาวรวงได้เช่นเดียวกัน (Lestari *et al.*, 2015) และมีรายงานการแสดงออกของยีนสำหรับลักษณะความยาวรวงเป็นแบบบวก (additive gene action) ซึ่งตอบสนองต่อการคัดเลือก รวมทั้งเมื่อทำการศึกษาในลูกผสมพบการกระจายลักษณะที่เป็นการกระจายแบบระฆังคว่ำหรือการกระจายรูปแบบปกติ (normal distribution) ในลูกผสมแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของยีนแบบบวกเช่นกันในการควบคุมลักษณะ (Utami *et al.*, 2006) แต่การคัดเลือกลักษณะที่พบอิทธิพลของยีนแบบบวกแต่มีความสามารถในการถ่ายทอดทางพันธุกรรมที่ต่ำนี้อาจเหมาะสมสำหรับการคัดเลือกในชั่วหลัง ๆ (late generation) (Kumar *et al.*, 2009)

จำนวนหน่อตอกถือเป็นลักษณะที่มีรายงานว่าสำคัญต่อการกำหนดผลผลิตหรือเป็นองค์ประกอบผลผลิตที่สำคัญที่ใช้เป็นลักษณะคัดเลือกเพื่อการปรับปรุงผลผลิตเช่นกัน และพบว่าเป็นลักษณะที่มีความสัมพันธ์ทางบวกระหว่างจำนวนหน่อและผลผลิตเมล็ดของข้าว (Ibrahim *et al.*, 1990; Efisue *et al.*, 2014) อย่างไรก็ตามจากการศึกษานี้ ลักษณะจำนวนหน่อตอกมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับผลผลิตทั้งต่ำและสูงต่อผลผลิตในปีการศึกษา พ.ศ. 2558 และ 2559 ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดความแตกต่างของผลการศึกษาคือการใช้พันธุ์กรรมข้าวไร่ที่อาจมีพื้นฐานทางพันธุกรรมที่แตกต่างกันที่สามารถส่งผลต่อความแปรปรวนของลักษณะสังเกตภายใต้สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันได้ (IRRI, 1984; Gupta and Toole, 1986) โดยเฉพาะการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหน่อตอกและผลผลิตที่ต่างก็เป็นลักษณะที่มีอัตราการถ่ายทอดทางพันธุกรรมค่อนข้างน้อยหรือเป็นลักษณะเชิงปริมาณที่ได้รับผลกระทบของสิ่งแวดล้อมค่อนข้างสูง (Li *et al.*, 2011b; Shrestha *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2016a; Adhikari *et al.*, 2018) และพบว่าลักษณะจำนวนหน่อตอกมีความสัมพันธ์สูงกับความสูงต้นในปี พ.ศ. 2559 เช่นเดียวกับกับการพบอิทธิพลทางอ้อมของลักษณะจำนวนหน่อตอกที่ผ่านความสูงต้นในทิศทางบวกทั้งสองปีการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอิทธิพลทางอ้อมผ่านลักษณะอื่น ๆ สิ่งเหล่านี้อาจบอกได้ว่าหากใช้พันธุ์กรรมเหล่านี้มาใช้ในการปรับปรุงพันธุ์แล้ว ลักษณะจำนวนหน่อตอกอาจไม่ใช่ลักษณะหลักที่ใช้ในการคัดเลือกเพื่อเพิ่มผลผลิต แต่อาจพิจารณาการใช้ความสูงต้นแทนเพราะมีค่าอิทธิพลทางอ้อมจากจำนวนหน่อตอกที่ส่งผลต่อลักษณะผลผลิตในทั้งสองปีการศึกษา

ขณะที่ลักษณะความสูงต้นแสดงความสัมพันธ์ปานกลางจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับผลผลิตตอกในทั้งสองปีการศึกษา (ตารางที่ 1) ทั้งนี้ความสูงแสดงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับลักษณะน้ำหนักเมล็ดต่อรวงและเปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ดแต่ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกันในปี พ.ศ. 2558 (ตารางที่ 1) มากไปกว่านั้นพบว่าความสูงต้นยังมีค่าความสัมพันธ์กับผลผลิตในทิศทางบวกด้วย เมื่อวิเคราะห์เส้นทางเทียบกับค่าอิทธิพลรวม พบว่าความสูงต้นมีค่าอิทธิพลทางตรงกับผลผลิตต่ำกว่าน้ำหนักเมล็ดต่อรวงในปี พ.ศ. 2559 ดังนั้นหากต้องการใช้พันธุ์เหล่านี้ในการปรับปรุงพันธุ์แล้ว ลักษณะความสูงอาจไม่ถึงกับต้องใช้เป็นลักษณะแรกๆ เพื่อใช้ในการคัดเลือกผลผลิตสูงก็ได้

อย่างไรก็ตามความสูงต้นเคยมีการรายงานว่ามีความสัมพันธ์ทางลบกับผลผลิตเช่นกันทั้งในข้าวโอ๊ตและข้าว ทั้งนี้เพราะในอัญพืชต้นสูงมักพบปัญหาการหักล้มที่ส่งผลกระทบต่อผลผลิต (Buerstmayr *et al.*, 2007; Ratna *et al.*, 2015) แต่นอกเหนือจากความสูงต้นแล้วจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ระดับของความสูงต้น (degree of plant height) ดัชนีการหักล้ม (lodging index) ความแข็งแรงของลำต้น และลักษณะอื่น ๆ ที่สัมพันธ์กับลำต้นทั้งทางกายภาพและกายวิภาค (Rocquigny *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2016).

สำหรับน้ำหนักรวงเป็นลักษณะที่มีรายงานว่าถูกใช้สำหรับการเป็นลักษณะคัดเลือกเพื่อเพิ่มผลผลิต เพิ่มน้ำหนักเมล็ด รวมทั้งเพิ่มจำนวนรวงที่ให้ผลผลิตในธัญพืช เช่น ข้าวหรือ pearl millet มาแล้ว (Haryanto *et al.*, 1998; Lestari *et al.*, 2015) แม้จะมีรายงานว่าน้ำหนักรวงทั้งที่มีความสามารถในถ่ายทอดทางพันธุกรรมสูงและต่ำก็ตาม (Akinwale *et al.*, 2011; Lestari *et al.*, 2015) มีการรายงานว่าลักษณะน้ำหนักรวงเป็นลักษณะหนึ่งที่มีความก้าวหน้าในการคัดเลือก (Akinwale *et al.*, 2011) หากพิจารณาในเรื่องของจำนวนยีนและการแสดงออกของยีนแล้ว พบว่าน้ำหนักรวงพบทั้งการถูกควบคุมด้วยยีนจำนวนน้อยและมากในพันธุกรรมข้าวที่แตกต่างกัน แต่สิ่งที่เหมือนกันคือเป็นลักษณะที่มีการแสดงออกของยีนแบบบวกและได้รับอิทธิพลจากการข้ามข้ามยีน (complementary epistasis) ร่วมด้วย (Lestari *et al.*, 2015)

ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทางบวกระดับปานกลางระหว่างลักษณะน้ำหนักรวงและผลผลิตต่อกอในทั้งสองปีทำการศึกษารวมทั้งพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างลักษณะน้ำหนักรวงกับทั้งน้ำหนัก 100 เมล็ดและจำนวนเมล็ดต่อรวงแต่ในทิศทางลบและบวก ตามลำดับ ในปี พ.ศ. 2559 (ตารางที่ 1) จากการวิเคราะห์เส้นทางพบว่าน้ำหนักรวงแสดงอิทธิพลทางบวกกับผลผลิตต่อกอทั้งสองปีการศึกษาแต่พบในทิศทางที่แตกต่างกัน ขณะที่ทั้งลักษณะน้ำหนัก 100 เมล็ดและจำนวนเมล็ดต่อรวงที่พบความสัมพันธ์กับน้ำหนักรวงนั้น (ตารางที่ 1) จากการวิเคราะห์เส้นทางพบว่าเฉพาะจำนวนเมล็ดต่อรวงเท่านั้นที่เมื่อวิเคราะห์ทั้งสองปีแล้วมีทิศทางของอิทธิพลทางอ้อมจากน้ำหนักรวงไปยังผลผลิตเหมือนกัน (ตารางที่ 2) จากผลการศึกษาที่ได้นี้อาจกล่าวได้ว่า ลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวงอาจเหมาะสมในการใช้เป็นลักษณะคัดเลือกเพื่อการเพิ่มผลผลิตได้ ดีกว่าลักษณะน้ำหนักเมล็ดต่อรวง อย่างไรก็ตามยังต้องพิจารณาขนาดของอิทธิพลหลักของลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวงที่ส่งผลต่อผลผลิตต่อกอด้วยเช่นเดียวกัน

สำหรับน้ำหนัก 100 เมล็ดพบว่ามีความสัมพันธ์กับลักษณะผลผลิตต่อกอค่อนข้างต่ำในทั้งสองปี แต่พบความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ดมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ค่อนข้างสูงในทิศทางบวก การพบว่าอิทธิพลทางตรงมีเปอร์เซ็นต์สูง (90.1 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเทียบกับค่าอิทธิพลรวมของน้ำหนัก 100 เมล็ดต่อลักษณะผลผลิตในทิศทางลบ (-0.1957) (ตารางที่ 2) ทั้งนี้ น้ำหนักเมล็ดแม้จะมีค่าความสามารถในการถ่ายทอดทางพันธุกรรมค่อนข้างสูงสำหรับการศึกษาในพันธุกรรมแท้ (inbred genotype) ในข้าว แต่ก็พบว่าเป็นลักษณะที่มีความก้าวหน้าในการคัดเลือกค่อนข้างต่ำ (Ali *et al.*, 2002; Seesang *et al.*, 2013) จากผลการศึกษาเหล่านี้ จึงไม่สามารถรับรองได้ว่าหากมีการนำลักษณะน้ำหนัก 100 เมล็ดมาใช้เป็นลักษณะคัดเลือกเพื่อการเพิ่มผลผลิตแล้ว จะมีความก้าวหน้าสำหรับการเพิ่มผลผลิต

การพบค่าอิทธิพลทางตรงในทิศทางลบของลักษณะน้ำหนัก 100 เมล็ดที่มีต่อผลผลิตอาจหมายถึงการที่จากพันธุกรรมทั้งเจ็ดพันธุ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เมล็ดขนาดเล็กมีความเกี่ยวข้องกับผลผลิตสูง พบค่าอิทธิพลทางอ้อมต่ำสำหรับน้ำหนัก 100 เมล็ด ผ่านลักษณะอื่น ๆ แต่ถ้าพิจารณาระหว่างลักษณะที่ได้รับอิทธิพลทางอ้อมเหล่านี้ พบว่าเปอร์เซ็นต์การเต็มเต็มเมล็ดได้รับค่าอิทธิพลทางอ้อมในทิศทางบวกจากลักษณะน้ำหนัก 100 เมล็ด ในทั้งสองปีการศึกษา นั่นคือผลการศึกษาของทั้งสองลักษณะได้แก่น้ำหนัก 100 เมล็ดและเปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ดเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และการวิเคราะห์เส้นทาง ทั้งการมีค่าสัมประสิทธิ์สูงในทิศทางบวกระหว่างสองลักษณะ (ตารางที่ 1) และการที่ลักษณะ 100 เมล็ด ผ่านอิทธิพลทางอ้อมไปสู่ลักษณะ

เปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ดที่ค่อนข้างสูงในทิศทางบวกทั้งสองปีการศึกษา (ตารางที่ 2) ด้วยเหตุนี้ ลักษณะเปอร์เซ็นต์เติมเต็มเมล็ดสามารถใช้เป็นลักษณะหนึ่งในการคัดเลือกเพื่อเพิ่มผลผลิตได้เมื่อต้องใช้พันธุ์กรรมข้าวไร่เหล่านี้ในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์

ในปี พ.ศ. 2559 เฉพาะลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวงที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับผลผลิตต่อกอ (ตารางที่ 1) และนอกจากนี้ จำนวนเมล็ดต่อรวงยังแสดงความสัมพันธ์ที่มีค่าสูงที่สุดและมีนัยสำคัญกับน้ำหนักเมล็ดต่อรวง ตามด้วยลักษณะจำนวนหน่อต่อกอและเปอร์เซ็นต์เติมเต็มเมล็ดที่มีต่อผลผลิตต่อกออย่างไม่มีนัยสำคัญ ในการวิเคราะห์เส้นทาง พบอิทธิพลทางระหว่างจำนวนเมล็ดต่อรวงต่อลักษณะผลผลิตต่อกอที่มีค่าสูงและคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าอิทธิพลรวมที่สูงในทั้งสองปีการศึกษา (ตารางที่ 2) แม้จะพบอิทธิพลทางอ้อมผ่านลักษณะอื่นเช่นกัน แต่พบว่ามีค่าเพียงเล็กน้อย โดยที่พบค่าอิทธิพลทางอ้อมที่เป็นบวก ได้แก่ การผ่านลักษณะเปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ดและน้ำหนักเมล็ดต่อรวงทั้งในปี พ.ศ. 2558 และ 2559 ทั้งนี้ Sumanth *et al.* (2017) ได้รายงานความสามารถในการถ่ายทอดทางพันธุกรรมจากวิธีศึกษาองค์ประกอบความแปรปรวน (variance component) ของจำนวนเมล็ดต่อรวงในข้าวมีค่าสูง (98.39 เปอร์เซ็นต์) และยิ่งไปกว่านั้น Anjaneyulu *et al.* (2010) ได้แบ่งกลุ่มให้ลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวงเป็นลักษณะที่มีความก้าวหน้าในการคัดเลือกอีกด้วย ซึ่งบ่งชี้ว่าลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวงน่าจะถูกควบคุมด้วยการแสดงออกของยีนแบบบวก ดังนั้นสามารถใช้ลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวงเป็นลักษณะคัดเลือกเพื่อเพิ่มผลผลิตของประชากรได้ (Sumanth *et al.*, 2017) เมื่อนำมาพิจารณาพร้อมกับการศึกษาในครั้งนี้ ลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวงอาจได้รับการแนะนำให้ใช้เป็นลักษณะคัดเลือกเพื่อการเพิ่มผลผลิตเป็นลักษณะแรกๆ

ลักษณะเปอร์เซ็นต์เติมเต็มเมล็ดที่ได้รับอิทธิพลทางอ้อมที่ส่งผลต่อผลผลิตผ่านมาจากหลายลักษณะ ได้แก่ น้ำหนัก 100 เมล็ด และจำนวนเมล็ดต่อรวง และจากการวิเคราะห์เส้นทางของตนเองพบว่าเปอร์เซ็นต์เติมเต็มเมล็ดให้อิทธิพลทางตรงในทิศทางบวกมีค่าปานกลางต่อผลผลิต (ตารางที่ 2) นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เติมเต็มเมล็ดกับผลผลิตยังมีทิศทางที่สวนทางกันในทั้งสองปีการศึกษา (ตารางที่ 1) แม้จะมีการศึกษาที่พบทั้งความสัมพันธ์ทางบวกและอิทธิพลทางตรงในทิศทางบวกของลักษณะเปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ดกับผลผลิตในข้าวเช่นกัน จากการศึกษาของ Agbo and Obi (2005) และ Ranawake and Amarasinghe (2014) ซึ่งอาจเป็นผลของการใช้พันธุ์กรรมที่แตกต่างกัน (Agbo and Obi, 2005; Shahrudin *et al.*, 2014) ดังนี้ ลักษณะเปอร์เซ็นต์เติมเต็มเมล็ดอาจได้รับการแนะนำให้ใช้เป็นลักษณะคัดเลือกลำดับรองลงมาในการคัดเลือกเพื่อการเพิ่มผลผลิตข้าวไร่หากใช้พันธุ์กรรมเหล่านี้ในการศึกษา

ด้วยเหตุนี้ จากการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ด้วยวิธีของ Pearson พบว่าลักษณะผลผลิตต่อกอมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับจำนวนเมล็ดต่อรวงและรองลงมา ได้แก่ ความยาวรวง จำนวนหน่อต่อกอ ความสูงต้น และน้ำหนักเมล็ดต่อรวง สำหรับการวิเคราะห์เส้นทางลักษณะที่มีอิทธิพลทางตรงต่อผลผลิตต่อกอ ได้แก่ จำนวนเมล็ดต่อรวง น้ำหนัก 100 เมล็ด ความยาวรวง และเปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ด และสำหรับการส่งอิทธิพลทางอ้อมไปยังผลผลิตนั้นพบว่าลักษณะต่าง ๆ ส่วนใหญ่จะส่งผ่านอิทธิพลทางอ้อมที่มีค่าสูงไปยังลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ จำนวนเมล็ดต่อรวง เปอร์เซ็นต์เติมเต็มเมล็ด น้ำหนักเมล็ดต่อรวง และความสูงต้น ดังนั้น จากผลการศึกษาอาจกล่าวได้ว่า ลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวง ความยาวรวง และความสูงต้น อาจสามารถใช้เป็นลักษณะคัดเลือก

ลำดับแรกในการคัดเลือกเพื่อเพิ่มผลผลิตข้าวไร่หากมีการใช้พันธุ์กรรมที่มีอยู่สำหรับการปรับปรุงพันธุ์ ขณะที่ลักษณะเปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ด และน้ำหนักเมล็ดต่อรวงอาจใช้เป็นลักษณะคัดเลือกลำดับรองลงมา

ตารางที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างผลผลิต [ผลผลิตเมล็ดตอกอ (GYH) และลักษณะที่สัมพันธ์กับผลผลิต ได้แก่ ความยาวรวง (PL) จำนวนหน่อตอกอ (TNH) ความสูงต้น (PH) น้ำหนักเมล็ดตอรวง (GWP) น้ำหนัก 100 เมล็ด (100-GW) จำนวนเมล็ดตอรวง (GNP) เปอร์เซ็นต์เต็มเต็มเมล็ด (PGF) – ของข้าวไรที่ปลูกฤดูฝน ปี พ.ศ. 2558 (ค.ศ. 2015) และ ปี พ.ศ. 2559

In rainy season, 2015.

Traits	TNH (X ₂)	PH (X ₃)	GWP (X ₄)	100-GW (X ₅)	GNP (X ₆)	PGF (X ₇)	GYH (X ₈)
PL (X ₁)	0.1126 ns	-0.2032 ns	0.0420 ns	0.1200 ns	-0.0044 ns	-0.2665 ns	0.0505 ns
TNH (X ₂)		0.1150 ns	0.1130 ns	0.1461 ns	0.0970 ns	0.0710 ns	0.0323 ns
PH (X ₃)			0.5746*	-0.3015 ns	-0.0240 ns	-0.5930**	0.2158 ns
GWP (X ₄)				-0.3358 ns	0.1704 ns	-0.4316 ns	0.2411 ns
100-GW (X ₅)					0.0200 ns	0.4093 ns	-0.2173 ns
GNP (X ₆)						0.2719 ns	0.1364 ns
PGF (X ₇)							-0.1296 ns
GYH (X ₈)							

In rainy season, 2016

Traits	TNH (X ₂)	PH (X ₃)	GWP (X ₄)	100-GW (X ₅)	GNP (X ₆)	PGF (X ₇)	GYH (X ₈)
PL (X ₁)	0.2690 ns	-1.392x10 ⁻⁵ ns	-0.0256 ns	0.3860 ns	0.2459 ns	0.3271 ns	0.2590 ns
TNH (X ₂)		0.5514*	0.1271 ns	0.1100 ns	0.3562 ns	0.1667 ns	0.4080 ns
PH (X ₃)			0.0830 ns	0.0610 ns	0.2162 ns	0.0720 ns	0.2514 ns
GWP (X ₄)				-0.6024**	0.5456*	-0.1393 ns	0.1567 ns
100-GW (X ₅)					-0.0230 ns	0.4076 ns	0.0150 ns
GNP (X ₆)						0.3269 ns	0.5673*
PGF (X ₇)							0.3646 ns
GYH (X ₈)							

Note: ns, not significant difference at the 0.05 level of probability

*, significant difference at the 0.05 level of probability

**, significant difference at the 0.01 level of probability

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์เส้นทาง (Path analysis) ที่แสดงผลทางตรง (direct effect) และผลทางอ้อม (indirect effect) ของลักษณะการเกษตรและองค์ประกอบผลผลิต [ความยาวรวง (PL) จำนวนหน่อตอก (TNH) ความสูงต้น (PH) น้ำหนักเมล็ดต่อรวง (GWP) น้ำหนัก 100 เมล็ด (100-GW) จำนวนเมล็ดต่อรวง (GNP) เปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ด (PGF) ต่อลักษณะผลผลิตเมล็ดตอก (GYH)] จากข้อมูลการปลูกสองปี ในปี พ.ศ. 2558-2559

Rainy season, 2015		Rainy season, 2016	
Traits	Effect values (% in total effect)	Traits	Effect values (% in total effect)
<i>Panicle length (PL)</i>		<i>Panicle length (PL)</i>	
Direct effect on GYH	0.1529 (59.9)	Direct effect	0.1274 (49.2)
Indirect effect	-0.1025 (40.1)	Indirect effect	0.1316 (50.8)
TNH	-0.0011	TNH	0.0494
PH	-0.0452	PH	-8.44x10 ⁻⁷
GWP	0.0035	GWP	0.0096
100-GW	-0.0234	100-GW	-0.1332
GNP	-0.0004	GNP	0.1463
PGF	-0.0356	PGF	0.0594
Residual	-1.01x10 ⁻⁸ (0.0)	Residual	1.03x10 ⁻⁸ (0.0)
Total effect	0.0504	Total effect	0.2589
<i>Tiller number hill⁻¹ (TNH)</i>		<i>Tiller number hill⁻¹ (TNH)</i>	
Direct effect	-0.0102 (19.4)	Direct effect	0.1836 (45.0)
Indirect effect	0.0425 (80.6)	Indirect effect	0.2243 (55.0)
PL	0.0172	PL	0.0343
PH	0.0256	PH	0.0334
GWP	0.0094	GWP	-0.0478
100-GW	-0.0285	100-GW	-0.0379
GNP	0.0094	GNP	0.2121
PGF	0.0095	PGF	0.0302
Residual	-9.11x10 ⁻⁹ (0.0)	Residual	5.38x10 ⁻⁹ (0.0)
Total effect	0.0323	Total effect	0.4079
<i>Plant height (PH)</i>		<i>Plant height (PH)</i>	
Direct effect	0.2228 (65.5)	Direct effect	0.0606 (24.1)
Indirect effect	0.0551 (16.2)	Indirect effect	0.1206 (48.0)
PL	0.0311	PL	0.0412
TNH	-0.0012	TNH	-0.0027
GWP	0.0478	GWP	0.0096
100-GW	0.0589	100-GW	-0.1332
GNP	-0.0023	GNP	0.1463
PGF	-0.0793	PGF	0.0594
Residual	-0.0622 (18.3)	Residual	0.0702 (27.9)
Total effect	0.2157	Total effect	0.2514

Continued

Rainy season, 2015		Rainy season, 2016	
Traits	Effect values (% in total effect) ¹	Traits	Effect values (% in total effect)
<i>Grains weight panicle⁻¹</i> (GWP)		<i>Grains weight panicle⁻¹</i> (GWP)	
Direct effect	0.0833 (31.7)	Direct effect	-0.3756 (41.4)
Indirect effect	0.1686 (64.2)	Indirect effect	0.1966 (21.7)
PL	0.0172	PL	0.0412
TNH	-0.0011	TNH	0.0494
PH	0.1280	PH	0.0334
100-GW	0.0657	100-GW	-0.1332
GNP	0.0164	GNP	0.1463
PGF	-0.0578	PGF	0.0594
Residual	-0.0108 (4.11)	Residual	0.3358 (37.0)
Total effect	0.2411	Total effect	0.1567
<i>100 grains weight (100-GW)</i>		<i>100 grains weight (100-GW)</i>	
Direct effect	-0.1957 (90.1)	Direct effect	-0.3450 (49.0)
Indirect effect	-0.0216 (9.9)	Indirect effect	0.3059 (43.4)
PL	0.0183	PL	0.0412
TNH	-0.0014	TNH	0.0494
PH	-0.0672	PH	-8.43x10 ⁻⁷
GWP	-0.0279	GWP	0.0096
GNP	0.0019	GNP	0.1463
PGF	0.0547	PGF	0.0594
Residual	-2.30x10 ⁻⁹ (0.0)	Residual	0.0538 (7.6)
Total effect	-0.2172	Total effect	0.0148
<i>Grains number panicle⁻¹</i> (GNP)		<i>Grains number panicle⁻¹</i> (GNP)	
Direct effect	0.0967 (70.9)	Direct effect	0.5952 (88.1)
Indirect effect	0.0397 (29.1)	Indirect effect	0.0264 (3.9)
PL	-0.0007	PL	0.0412
TNH	-0.0010	TNH	0.0494
PH	-0.0052	PH	-8.44x10 ⁻⁷
GWP	0.0142	GWP	0.0096
100-GW	-0.0039	100-GW	-0.1332
PGF	0.0363	PGF	0.0594
Residual	-1.31x10 ⁻⁹ (0.0)	Residual	-0.0543 (8.0)
Total effect	0.1365	Total effect	0.5674

Percent of grain filling (PGF)		Percent of grain filling (PGF)	
Direct effect	0.1338 (33.7)	Direct effect	0.1817 (49.8)
Indirect effect	-0.2633 (66.3)	Indirect effect	0.0117 (3.2)
PL	-0.0007	PL	0.0411
TNH	-0.0010	TNH	0.0494
PH	-0.0052	PH	-8.43x10 ⁻⁷
GWP	0.0142	GWP	0.0096
100-GW	-0.0039	100-GW	-0.1332
GNP	0.0364	GNP	0.0447
Residual	-4.31x10 ⁻⁹ (0.0)	Residual	0.1712 (47.0)
Total effect	-0.1296	Total effect	0.3646

^{1/} Percent in total effect calculated by determining the ratio of each effect (direct, indirect and residual effects) on total effect which ignored the direction of value in each effect (Dumlupinar *et al.*, 2012).

ค่าเฉลี่ยลักษณะกายภาพของลำต้น ลักษณะทางการเกษตร ลักษณะทางเคมีบางประการ ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของข้าวไร่ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560

ค่าเฉลี่ยของลักษณะต่าง ๆ ของข้าวไร่ที่ปลูกในปี พ.ศ. 2560 ในช่วงฤดูฝนที่จังหวัดเพชรบุรี แสดงในตารางที่ 3-5 ทั้งนี้ลักษณะที่ทำการศึกษาดังนี้

กลุ่มที่ 1 ลักษณะทางกายภาพบางลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการตั้งตรงของข้าว (องศาก่อนการโน้มต้น; degrees of angle before bending, ความสูงของลำต้น; culm height; ความสูงต้น; plant height และความยาวของรวง; panicle height) และลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบโดยอ้อมโดยการโน้มลำต้น [องศาหลังการโน้มต้น (degrees of angle after bending) เปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้น (springiness percentage)] โดยแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 3 พบว่า PLU-SU-003 มีค่าสูงในเกือบทุกลักษณะ รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้น ความสูงของลำต้น และความยาวรวง ขณะที่พันธุ์ PLU-SU-002 และ PLU-SU-004 ที่มีองศาก่อนการโน้มต้นสูงจะมีค่าความยาวรวงสูงด้วย ซึ่งความยาวรวงเป็นลักษณะที่พบในปี พ.ศ. 2558 ด้วยว่าอาจสามารถใช้เป็นลักษณะคัดเลือกพันธุ์ลำดับแรก ๆ ได้เพื่อการเพิ่มผลผลิตข้าวไร่สำหรับพันธุ์กรรมกลุ่มนี้ ขณะที่ PLU-SU-003 และ PLU-SU-005 เป็นสองพันธุ์ที่พบว่ามีความสามารถต้นตั้งตรงเมื่อพิจารณาจากการมีค่าองศาก่อนการโน้มต้นสูงแล้วเมื่อทำการโน้มต้นยังพบว่ามีความสามารถในการสปริงลำต้นกลับได้สูง เมื่อพิจารณาจากค่าองศาหลังการโน้มต้นและค่าเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นที่ใช้ค่าทั้งองศาก่อนการโน้มต้นและหลังการโน้มต้นมาใช้ในการคำนวณ นอกจากนี้ในทั้งสองพันธุ์พบว่ามีลำต้นสูงอีกด้วย โดยมีค่าประมาณ 111 ซม. และ 110.6 ซม. ตามลำดับ ขณะที่พันธุ์ CP-001 และ CM-001 พบว่ามีลำต้นสูงเช่นกัน โดยมีค่าประมาณ 113 ซม. และ 117.4 ซม. แต่กลับพบว่ามีความองศาทั้งก่อนการโน้มต้นและหลังการโน้มต้นค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มพันธุ์ที่ทำการศึกษาร่วมกัน ขณะที่พันธุ์ PLU-SU-001 และ NYP-SU-001 เป็นสองพันธุ์ที่ยังไม่พบลักษณะใดโดดเด่นเมื่อเทียบกับพันธุ์อื่น ๆ

สำหรับความสูงของลำต้น พบทั้งความสัมพันธ์ทางบวกและทางลบกับการหักล้ม ทั้งนี้ต้องพิจารณาค่าของสูงของพันธุ์เหล่านั้นด้วย (Li *et al.*, 2011b; Todake and Shinozaki, 2015; Weng *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018) ตั้งแต่มีการปฏิวัติเขียว (Green revolution) การผลิตข้าวจะให้ความนิยมข้าวต้นสูง เนื่องจากการมีต้นสูงหมายถึงมีพื้นที่ใบหนาแน่นซึ่งหมายถึงการมีประสิทธิภาพในการรับคาร์บอนไดออกไซด์ (Takeda *et al.*, 1983; Kuroda *et al.*, 1989) และการให้ผลผลิตสูงจำเป็นต้องใช้ลำต้นยาวและมีชีวมวลแห้ง (biomass) ที่สูงด้วย แต่การมีลำต้นสูงนั้นต้องต้านทานการหักล้มด้วยเช่นกัน (Nomura *et al.*, 2019) ทำในปัจจุบันการพัฒนาพันธุ์ข้าวต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของลำต้นเป็นลำดับแรก ๆ ควบคู่ไปกับความสูง ซึ่งนับเป็นงานที่ค่อนข้างยากเพราะความแข็งแรงของลำต้นข้าวถูกควบคุมด้วยหลายยีนหรืออาจเรียกได้ว่าเป็นลักษณะเชิงปริมาณ เช่น มีการรายงานถึงความแข็งแรงของลำต้นถูกควบคุมด้วยยีนหลายตำแหน่ง ดังนี้ Strong culm 1 (SCM1) (Nomura *et al.*, 2019) Strong culm 2 (SCM2) (Ikeda-Kawakatsu *et al.*, 2009; Ookawa *et al.*, 2010) Strong culm 3 (SCM3) (Takeda *et al.*, 2003; Minakuchi *et al.*, 2010; Ookawa *et al.*, 2014; Yano *et al.*, 2015) Strong culm 4 (SCM4) (Ookawa *et al.*, 2014) ซึ่งแต่ละกลุ่มมียีนที่เกี่ยวข้องอยู่ในอีกจำนวนมาก เรียกว่าเป็น quantitative trait loci (QTLs) เป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์เส้นทางใน ปี พ.ศ. 2558 พบว่าความสูงส่งผลทางตรงต่อผลผลิตในทิศทางบวก (ตารางที่ 2) และความสูงต้นสามารถใช้เป็นลักษณะคัดเลือกลำดับแรกในการคัดเลือกเพื่อเพิ่มผลผลิตข้าวไร่จากการศึกษาใน ปี พ.ศ. 2558 นั้นอาจหมายความว่าความสูงต้นของกลุ่มข้าวไร่ที่มีนำมาศึกษาในครั้งนี้อาจไม่ได้สูงมากเกินไปจนส่งผลต่อการเพิ่มโอกาสในการหักล้ม ทั้งนี้ ในปี พ.ศ. 2560 ความสูงต้นของข้าวไร่อยู่ระหว่าง 108.8-155 ซม. (ตารางที่ 3)

นอกเหนือจากความสูงของลำต้นแล้วอาจต้องพิจารณาลักษณะอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ความหนาของลำต้น (culm thickness) เส้นผ่าศูนย์กลางลำต้น (culm diameter) หรือเรียกรวม ๆ ว่าเป็นลักษณะทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของลำต้น (physical strength of culms) (Ookawa and Ishihara, 1993) ซึ่งมีรายงานว่าถ้าลักษณะเหล่านี้มีค่าสูงต้นข้าวจะสามารถต้านทานต่อการหักล้มได้ (Kashiwagi *et al.*, 2006; Hirano *et al.*, 2014; Yano *et al.*, 2015; Nomura *et al.*, 2019)

ขณะเดียวกันการนำความยาวรวงมาศึกษาร่วมด้วย พบว่าลักษณะรวงที่สัมพันธ์กับความสูงจะส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานต่อการหักล้มเช่นกัน ทั้งนี้มีรายงานว่าต้นที่มีลำต้นยาวแต่มีรวงหนักจะเปิดโอกาสให้เกิดการหักล้มได้มากนั่นเอง (Ma *et al.*, 2004) เป็นเพราะส่วนเหนือดินของต้นจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่ออุ้มน้ำจากน้ำฝนหรืออื่น ๆ ทำให้ส่วนเหนือดินมีน้ำหนักและเพิ่มโอกาสในการเกิดการหักล้มของต้นได้ โดยเฉพาะเมื่อมีปัจจัยของโรคที่เข้าทำลายลำต้นด้วย หรือมีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนที่มากเกินไปจะทำให้ลำต้นอ่อนแอและสามารถเกิดการหักล้มได้ง่ายขึ้น (Shah *et al.*, 2019) แต่ทั้งนี้การพัฒนาข้าวโดยพิจารณาจากความสูงของต้นต้องพิจารณาร่วมกับอายุการเจริญเติบโตของข้าวด้วยเพราะเกี่ยวข้องกับทรงพุ่ม ประสิทธิภาพการรับแสงตลอดช่วงการเจริญเติบโต ทำให้ทุกลักษณะต้องศึกษาความสัมพันธ์ร่วมกัน (Nomura *et al.*, 2019) ทำให้อาจเป็นไปได้ที่จะมีทั้งข้าวที่มีต้นสูงและมีความสามารถในการต้านทานต่อการหักล้มสูงด้วย รวมทั้งมีผลผลิตที่สูงเช่นกัน ทั้งนี้ต้องพิจารณาการมีความหนาของลำต้นร่วมด้วย เป็นต้น ดังเช่น พันธุ์ PLU-SU-003 และ PLU-SU-005 ที่พบว่าต้นตั้งตรง มีความสามารถในการสปริงลำต้นกลับได้สูงเมื่อทดสอบโน้มต้น และยังพบว่าเป็นพันธุ์ที่มีความสูงลำต้นสูงเมื่อเทียบกับพันธุ์อื่น ๆ

อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามหากประเมินตามเกณฑ์ของ Ünan *et al.* (2013) ทุกพันธุ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ นับว่าเป็นพันธุ์ที่มีลักษณะต้นตั้งตรงทั้งหมดเนื่องจากมีค่าองศาต้นก่อนการโน้มอยู่ระหว่าง 71-90 องศา

กลุ่มที่ 2 ลักษณะทางกายภาพบางลักษณะที่มีรายงานว่าเกี่ยวข้องกับลักษณะทางฟิสิกส์ที่แสดงความแข็งแรงของลำต้น [ความยาวของปล้องแรกและปล้องสอง (นับจากผิวดิน); 1st and 2nd internode length, เส้นผ่าศูนย์กลางของปล้องแรกและปล้องสอง; 1st and 2nd internode diameter, ความหนาของผนังปล้องแรกและปล้องสอง; 1st and 2nd internode thickness] (ตารางที่ 4) ผลการศึกษาพบว่าหลายพันธุ์มีค่าเหล่านี้ใกล้เคียงกันโดยเฉพาะพันธุ์ที่มาจากแหล่งรวบรวมพันธุ์เดียวกัน (PLU-SU) (ยกเว้น PLU-SU-001 ที่ลักษณะต่าง ๆ มีค่าต่ำกว่า) และใกล้เคียงกับพันธุ์ NYP-SU-001 สำหรับพันธุ์ CP-001 มีความหนาของผนังปล้องน้อยและความยาวของปล้องค่อนข้างสั้นในทั้งสองปล้อง ขณะที่พันธุ์ CM-001 มีปล้องยาวทั้งสองปล้องแต่มีความหนาของผนังปล้องและเส้นผ่าศูนย์กลางของปล้องค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับพันธุ์อื่น ๆ

ทั้งนี้การประเมินว่าลักษณะใดมีความสัมพันธ์กับการหักล้มและควรใช้เป็นลักษณะคัดเลือกในกระบวนการปรับปรุงพันธุ์นั้นต้องมีการนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะต่าง ๆ ร่วมกันก่อน ในอัญพืช เช่นในข้าวสาลีและข้าวพบว่าลักษณะที่สัมพันธ์กับการต้านทานการหักล้ม ได้แก่ ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางลำต้น และความหนาของลำต้น ความแข็งแรงของส่วนเหนือและใต้ปล้อง ความหนาของผนังลำต้น การสะสมของลิกนินและเซลลูโลสที่ผนังลำต้น รวมทั้งน้ำหนักรวง (Wang *et al.*, 2011) การสามารถประเมินได้ถึงขนาดของลักษณะต่าง ๆ และไดนามิกส์ของแรงที่ส่งผลต่อการต้านทานการหักล้ม รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเมื่อมีการโน้มของลำต้นต่อการต้านทานการหักล้มก็เป็นสิ่งที่ต้องศึกษาเช่นกัน (Neenan and Spencer-Smith, 1975) แต่การศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ทำการประเมินระบบรากซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในส่วนใต้ดินที่ช่วยให้ข้าวต้านทานต่อการหักล้มเช่นเดียวกัน

สำหรับการศึกษาครั้งนี้พันธุ์ที่รวบรวมจากพื้นที่เดียวกัน ได้แก่ พันธุ์ที่ใช้รหัส PLU-XXX-XXX มีความหนาของผนังลำต้นและเส้นผ่าศูนย์กลางที่ค่อนข้างสูงซึ่งมีรายงานการต้านทานการหักล้ม (Zuber *et al.*, 1999; Okuno *et al.*, 2014; Mariani and Ferrante, 2017) โดยความหนาที่ปล้องแรกจะมีค่าสูงที่สุดและความหนาจะลดลงในปล้องสูงขึ้นไป (Li *et al.*, 2011b) ทั้งเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของผนังลำต้นเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาไปพร้อม ๆ กัน ในการสร้างความต้านทานต่อการหักล้มให้แก่ต้นข้าว (Berry *et al.*, 2003; Islam *et al.*, 2007; Okuno *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017) เช่นเดียวกับเส้นผ่าศูนย์กลางลำต้น ความหนาของลำต้น และความแข็งแรงของลำต้นในข้าวและข้าวสาลีที่มีรายงานว่าจะมีความสัมพันธ์กับความยาวของปล้องสุดท้ายนับจากฐานของลำต้น (ประมาณปล้องที่สาม) ความยาวแผ่นใบ และพื้นที่ตัดขวางของลำต้น (Berry *et al.*, 2004; Upadhyaya *et al.*, 2016) ทั้งนี้เส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้นเป็นลักษณะที่สามารถใช้ในการคัดเลือกได้เพราะมีรายงานว่าที่ตำแหน่งปล้องที่สองนั้น เส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้นเป็นลักษณะเด่นและถูกควบคุมด้วยอิทธิพลของยีนแบบบวก (additive gene effects) (Cui *et al.*, 2002) อย่างไรก็ตาม มีรายงานเช่นกันถึงความสัมพันธ์ทางบวกค่อนข้างสูงสำหรับการต้านทานการหักล้มกับความหนาของผนังลำต้น ($R=0.972$) และกับความหนาของปล้องตั้งแต่ปล้องแรกถึงปล้องที่สาม ($R=0.986$) (Kong *et al.*, 2013) แต่เป็นการศึกษาในข้าวสาลี รวมถึงงานวิจัยอื่น ๆ

ที่รายงานไปในทิศทางเดียวกันเช่นกัน (Xiang *et al.*, 2019; Tripathi *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2017) จึงกล่าวได้ว่าในการศึกษาการการต้านทานต่อการหักล้มของธัญพืชรวมทั้งข้าวนั้น เกี่ยวข้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphological) และกายวิภาค (anatomical) รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีที่ร่วมในลำต้น (Shah *et al.*, 2019)

กลุ่มที่ 3 ลักษณะผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตต่าง ๆ ที่อาจได้รับผลกระทบจากการหักล้ม ได้แก่ จำนวนหน่อต่อหลุม จำนวนรวงต่อหลุม น้ำหนัก 100 เมล็ด เเปอร์เซ็นต์เกิดรวงต่อหลุม จำนวนเมล็ดเต็มเต็มต่อรวง เเปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มเต็มต่อรวง น้ำหนักเมล็ดต่อรวง ผลผลิตต่อสิบหลุมปลูก และผลผลิตต่อพื้นที่ (พื้นที่ 24 ตารางเมตร) (ตารางที่ 5) ผลการศึกษาพบว่าพันธุ์ PLU-SU-002 ให้ผลผลิตต่อสิบหลุมปลูกและต่อพื้นที่สูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ พันธุ์ CP-001 (พันธุ์ดอกพยอม), PLU-SU-003 และ PLU-SU-005 พันธุ์ที่ให้ผลผลิตปานกลางระหว่างกลุ่ม พันธุ์ที่ปลูกเปรียบเทียบกับได้แก่พันธุ์ PLU-SU-001 และ NYP-SU-001 ขณะที่พันธุ์ที่ให้ผลผลิตต่ำที่สุด ได้แก่ พันธุ์ PLU-SU-004 และ CM-001 ซึ่งข้อมูลผลผลิตของข้าวไร่พันธุ์ต่าง ๆ จะเป็นลักษณะที่สำคัญในการร่วมพิจารณาคัดเลือกในระหว่างการปรับปรุงพันธุ์แม้ว่าผลผลิตจะเป็นลักษณะที่มีความแปรปรวนของการแสดงออก ลักษณะสูงเนื่องจากเป็นลักษณะเชิงปริมาณที่ถูกควบคุมด้วยยีนหลายตำแหน่งทั้งกลุ่ม Japonica (Kinoshita *et al.*, 2017) และ indica ก็ตาม (Zaw *et al.*, 2019)

การศึกษาในกลุ่มนี้ให้ความสำคัญกับลักษณะที่เกี่ยวข้องกับรวง (panicle traits) ซึ่งส่วนใหญ่หลายลักษณะเป็นลักษณะเชิงปริมาณเช่นกัน สำหรับลักษณะที่เกี่ยวข้องกับรวงที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั้งข้าวกลุ่ม Japonica และ indica เช่น เเปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ด (Yoshinaga *et al.*, 2013) จำนวนเมล็ดต่อรวง (Takai *et al.*, 2014) น้ำหนักรวง (Yoshinaga *et al.*, 2013) จำนวนรวงต่อต้น (Jia *et al.*, 2019) ความยาวรวง (Ye *et al.*, 2009; Jia *et al.*, 2019) จำนวนเมล็ดเต็มเต็ม (Nakano *et al.*, 2017; Nakano *et al.*, 2019) น้ำหนักเมล็ด (Hariyono and Zaini, 2018) และสำหรับการศึกษาในข้าวไร่ ลักษณะการเติมเต็มเมล็ดเป็นหนึ่งในลักษณะที่สำคัญสำหรับองค์ประกอบผลผลิต (Kadidaa *et al.*, 2017) เช่นเดียวกับจำนวนหน่อที่มีประสิทธิภาพในการให้ รวง มีการศึกษาที่พบว่าผลผลิตมีความสัมพันธ์ทางบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับจำนวนเมล็ดเต็มเต็มต่อรวง ($r=0.61$ และ 0.84) จำนวนหน่อที่สมบูรณ์ต่อต้น ($r=0.23$) และยังพบว่าทั้งสองลักษณะคือหน่อที่สมบูรณ์ต่อต้น (0.0492) และจำนวนเมล็ดเต็มเต็ม (0.547) มีผลทางตรง (direct effect) ต่อผลผลิตจากการศึกษาระดับฟีโนไทป์ (Dabi and Gidesa, 2016)

สำหรับการศึกษาในปี พ.ศ. 2558 ที่พบว่าจำนวนเมล็ดต่อรวงเป็นลักษณะที่พบว่าน่าจะสามารถใช้เป็นลักษณะคัดเลือกลำดับแรกในการคัดเลือกเพื่อเพิ่มผลผลิตข้าวไร่หากมีการใช้พันธุ์กรรมข้าวไร่เหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของพันธุ์กรรมในการปรับปรุงพันธุ์ รองลงมาคือลักษณะเปอร์เซ็นต์เติมเต็มเมล็ด และน้ำหนักเมล็ดต่อรวง ซึ่งจากการศึกษาในปี พ.ศ. 2560 พบว่าพันธุ์ PLU-SU-001 ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีลักษณะต่าง ๆ ในระดับปานกลางจากการศึกษาลักษณะในสองกลุ่มแรก (ตารางที่ 3-4) พบว่ามีลักษณะจำนวนเมล็ดเต็มเต็มและน้ำหนักเมล็ดต่อรวงค่อนข้างสูง เช่นเดียวกับกับพันธุ์ PLU-SU-004 ที่พบว่ามีจำนวนเมล็ดเต็มเต็มต่อรวงและเปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มเต็ม

ค่อนข้างสูง (ตารางที่ 5) สำหรับลักษณะผลผลิตสูงพบในข้าวไร่ พันธุ์ PLU-SU-002, CP-001, PLU-SU-003 และ PLU-SU-005 ตามลำดับ (ตารางที่ 5)

กลุ่มที่ 4 ลักษณะเคมีบางประการในต้นข้าวที่มีรายงานว่าเกี่ยวข้องกับการหักล้ม ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส ลิกนิน น้ำตาลที่ละลายได้ แป้ง ซิลิโคน โพลีแซคคาไรด์ ซึ่งลักษณะทางเคมีพบว่ามีความสัมพันธ์กับการหักล้มใน ธัญพืช เช่น ข้าวหรือข้าวสาลี ไม่ต่างจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาหรือกายวิภาควิทยา (Shah *et al.*, 2019) ใน การศึกษาครั้งนี้มุ่งความสนใจไปที่การโน้มของลำต้นหรือการหักล้มเนื่องของลำต้น (stem bending type or stem lodging) ขณะที่การหักล้มอาจเกิดทั้งสาเหตุเนื่องจากการหักล้มของลำต้นและการหักล้มของรากหรือโคน (root lodging and anchorage failure) (Zuo *et al.*, 2017; Mulsanti *et al.*, 2018) ดังนั้นลักษณะทางเคมีที่ ทำการศึกษาจึงทำการวิเคราะห์เคมีบางลักษณะในส่วนของลำต้นและใบร่วมกัน (ตารางที่ 6)

ลิกนินและเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สะสมในผนังของลำต้น ทั้งสององค์ประกอบมีความจำเป็น ต่อการให้ความแข็งแรงของพืช รวมทั้งต่อต้านความเครียดทั้งจากปัจจัยที่มีและไม่มีชีวิตรวมไปถึงการหักล้มของต้น พืชด้วย (Chen *et al.*, 2011a) การมีลิกนินปริมาณสูงที่บริเวณวาสคิวลาร์บันเดิลหรือมัดท่อลำเลียง (vascular bundle) สามารถเพิ่มความแข็งแรงของผนังเซลล์ได้และสามารถปรับปรุงความแข็งแรงทางฟิสิกส์ของลำต้นพืชได้ อีกด้วย (Shah *et al.*, 2019) แต่ขณะเดียวกัน การมีปริมาณของลิกนินที่บริเวณปล้องประมาณปล้องที่สองของทั้ง ข้าวสาลีและข้าวอาจจะส่งผลต่อเสถียรภาพของการหักของลำต้น (breaking stability) และความยืดหยุ่นของลำ ต้น (elasticity of stems) (Okuno *et al.*, 2014; Zheng *et al.*, 2017) แม้ว่าจะไปเพิ่มเสถียรภาพทางกายภาพ ของปล้องลำต้นก็ตามจากการศึกษาในข้าวสาลี (Peng *et al.*, 2014) พบว่าการสะสมลิกนินร่วมกับกับ คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate matrix) ที่บริเวณผนังเซลล์จะทำให้ลำต้นของพืชมีความแข็งแรงและมีลำต้นตั้ง ตรง (Del Río *et al.*, 2012; Hyles *et al.*, 2017) แม้ว่าจะมีรายงานในข้าวสาลีที่พบว่าโครงสร้างของ คาร์โบไฮเดรตและความเข้มข้นของลิกนินในผนังเซลล์ที่ปล้องล่าง ๆ จะไม่ได้มีความสัมพันธ์กับการหักล้มในข้าว สาลี (Knapp *et al.*, 1987) แต่ก็พบว่าการจัดเรียงตัวและปฏิสัมพันธ์ร่วมของความแตกต่างของโครงสร้าง คาร์โบไฮเดรตและลิกนินในผนังเซลล์ของลำต้นมีความสัมพันธ์กับการต้านทานการหักล้มในข้าวสาลี มีการปรับปรุง พันธุ์ข้าวและข้าวสาลีที่เพิ่มความแข็งแรงของลำต้นและผนังเซลล์ลำดับที่สอง (secondary cell wall) โดยเพิ่ม การสะสมเซลลูโลส ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) แต่ในระดับที่เหมาะสม (Li *et al.*, 2003; Kong *et al.*, 2013)

ด้วยเหตุนี้ อาจกล่าวได้ว่าทั้งเซลลูโลสและลิกนินในผนังเซลล์สามารถเพิ่มความต้านทานต่อการหักล้มได้ (Kashiwagi *et al.*, 2008; Weng *et al.*, 2017) เนื่องจากจะเพิ่มความแข็งแรงของต้นแต่การสะสมเคมีเหล่านี้ใน ส่วนปล้องมากเกินไปจะทำให้ขาดความยืดหยุ่นอาจส่งผลต่อการสปริงตัวของลำต้นเมื่อเกิดการโน้มต้นได้เช่นกัน ต้องทำการประเมินการแสดงออกในทั้งสองลักษณะร่วมกันกับลักษณะทางเคมีเหล่านี้ และจากการผลการศึกษา พบว่าพันธุ์ข้าวไร่ที่มีทั้งเซลลูโลสและลิกนินปริมาณสูงได้แก่ พันธุ์ PLU-SU-001, PLU-SU-002 และ CM-001 ขณะที่พันธุ์ที่พบว่ามีเซลลูโลสสูงแต่มีปริมาณลิกนินอยู่ระดับปานกลางเมื่อเทียบกับพันธุ์อื่น ๆ ได้แก่ พันธุ์ PLU-

SU-003, PLU-SU-005 และ CP-001 (ตารางที่ 6) จากข้อมูลทางเคมีเหล่านี้อาจทำนายได้ว่าพันธุ์เหล่านี้ น่าจะมีลักษณะต้นตั้งตรง แต่ความสามารถในการสปริงตัวหลังการโน้มต้นต้องทำการประเมินต่างหาก

สำหรับซิลิคอนนอกจากเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของข้าวแล้ว ซิลิคอนยังมีผลกระทบต่อความสูงต้น ความสามารถในการต้านทานการหักล้ม ความยาวระหว่างปล้อง ความแข็งแรงจากการโน้มต้น (bending strength) (Fallah, 2008; Waseem *et al.*, 2016) ด้วยเหตุนี้จึงพบการเสริมธาตุซิลิคอนเพื่อป้องกันการหักล้มเช่นเดียวกับการใช้เพื่อเพิ่มความยาวรวง ความยาวของลำต้น ความยาวของปล้องที่สาม (Salman *et al.*, 2012) ขณะเดียวกันการใช้สารละลายซิลิคอนที่เหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ต้นหักล้มลดลง ด้านทานการหักของลำต้น โดยเฉพาะถ้าสามารถไปเพิ่มความยาวระหว่างปล้องที่สาม และปล้องที่สี่ของต้นได้จะยิ่งเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหักล้ม (Salman *et al.*, 2012) นอกจากนี้ซิลิคอนยังสามารถเพิ่มความหนาของผนังเซลล์และขนาดของท่อลำเลียงอีกด้วย (Kim *et al.*, 2002) ซิลิคอนจะป้องกันการสูญเสียน้ำและเพิ่มการรับแสงของใบพืช นอกจากนี้ยังไปปรับปรุงสเคอเรนโคมา (sclerenchyma) ท่อลำเลียงอาหาร (vascular tissues) และเยื่อหุ้มท่อลำเลียง (vascular sheaths) (Tanaka and Park, 1966; Hernandez-Apaolaza, 2014)

ทั้งนี้ผลการทดลองพบว่าพันธุ์ PLU-SU-003 และ PLU-SU-005 มีปริมาณลิกนินในส่วนลำต้นและใบสูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ พันธุ์ PLU-SU-004, CP-001 และ PLU-SU-002

จากทั้งสามลักษณะ ได้แก่ เซลลูโลส ลิกนิน และซิลิคอน พันธุ์ที่มีค่าสูงในทั้งสามลักษณะ ได้แก่ PLU-SU-002 (พันธุ์ดังกล่าวน่าจะมีลักษณะตั้งตรงและมีผนังปล้องหนา) ขณะที่พันธุ์ที่มีปริมาณเซลลูโลสและลิกนินสูงแต่มีปริมาณซิลิคอนค่อนข้างน้อย (พันธุ์ดังกล่าวน่าจะมีลักษณะตั้งตรงแต่มีผนังปล้องบาง) ได้แก่ พันธุ์ PLU-SU-001 และ CM-001 ขณะที่พบว่าพันธุ์ที่มีเซลลูโลสหรือลิกนินลักษณะใดลักษณะหนึ่งมีค่าสูงร่วมกับการมีปริมาณซิลิคอนสูง ได้แก่ พันธุ์ PLU-SU-003, PLU-SU-005 และ CP-001 (ผนังปล้องหนาแต่ต้นอาจไม่มีลักษณะตั้งตรงมากนัก) สำหรับพันธุ์ที่พบว่ามีเฉพาะปริมาณซิลิคอนสูง ได้แก่ PLU-SU-004 (ผนังปล้องหนา) ส่วนพันธุ์ที่พบว่ามีค่าทั้งสามลักษณะปานกลาง ได้แก่ NYP-SU-001 (ผนังปล้องไม่หนามากและต้นไม่ตั้งตรงมาก)

สำหรับคาร์โบไฮเดรตมีรายงานการกลับมาสะสมอีกครั้งที่ลำต้นจะทำให้ข้าวสามารถต้านทานการหักล้มได้ (Kashiwagi *et al.*, 2006) โดยการขนส่งคาร์โบไฮเดรตควบคุมทั้งปริมาณคาร์โบไฮเดรตส่วนที่ไม่เป็นโครงสร้าง (non-structural carbohydrate; NSC) (เช่น น้ำตาลที่ละลายได้และแป้ง) และส่วนที่เป็นโครงสร้าง (structural carbohydrate; SC) (เช่น เซลลูโลสและลิกนิน) (Kokubo *et al.*, 1989; Ookawa *et al.*, 1993; Guo *et al.*, 2003a; Zhang *et al.*, 2009a) แต่ทว่าความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างการย้ายตำแหน่งของคาร์โบไฮเดรตกับความแข็งแรงของลำต้นก็เป็นสิ่งที่ยังไม่มีการอธิบายได้ชัดเจน (Zhang *et al.*, 2017) นอกจากนี้ จากการศึกษาของ Zhang *et al.* (2017) ได้พบว่าพันธุ์ที่ต้านทานต่อการหักล้มจะมีส่วนฐานของลำต้นที่มีการสะสมน้ำตาลที่ละลาย แป้ง เซลลูโลส และลิกนิน ในระยะออกรวงที่สูงกว่าพันธุ์ที่ไม่ต้านทานถึง 132, 73.7, 1.2 และ 62.7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่ระยะการเจริญเติบโตหลังจากนั้นปริมาณน้ำตาลที่ละลายได้และปริมาณแป้งจะมีค่าลดลง แต่พบว่าปริมาณลิกนินจะเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้คาร์โบไฮเดรตในลำต้นจะมีการขนย้ายไปที่เมล็ด ที่ภายหลังระยะการออกรวงพบว่าคาร์โบไฮเดรตส่วนที่เป็นโครงสร้างเมื่อมีมากขึ้นจะทำให้ลำต้นมีความแข็งแรง แต่หากพิจารณาทั้งการ

ให้ผลผลิตและความแข็งแรงของลำต้นแล้วจำเป็นต้องมีทั้งระดับการขนส่งคาร์โบไฮเดรตส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างในระดับปานกลางและมีการสะสมคาร์โบไฮเดรตส่วนที่เป็นโครงสร้างสูงกว่า เพราะหากมีการขนส่งคาร์โบไฮเดรตส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างนี้ไปยังการสร้างเมล็ดมาก แม้ว่าจะส่งเสริมการเพิ่มผลผลิต (Yang *et al.*, 2013; Pan *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2016b) แต่จะไปมีผลต่อการลดคาร์โบไฮเดรตส่วนที่เป็นโครงสร้างลงทำให้เกิดต้นแห้งเร็วและเกิดการหักล้มนั่นเอง (Kashiwagi *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2010b) ด้วยเหตุนี้สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตส่วนที่เป็นโครงสร้างต่อส่วนที่ไม่เป็นโครงสร้างโดยเฉพาะบริเวณฐานของลำต้นจึงมีความสำคัญต่อการประเมินความสามารถความแข็งแรงของลำต้นและประเมินความสามารถในการให้ผลผลิตของข้าวได้ (Zhang *et al.*, 2014) นั่นจึงเป็นที่สังเกตว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน (nitrogen; N) ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการย้ายส่วนของคาร์โบไฮเดรตในต้นพืช (Zhang *et al.*, 2010c) จึงส่งผลต่อการหักล้มของต้นข้าวได้เช่นกัน เพราะการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนที่มากเกินไปจะมีการนำไปใช้เพื่อการสร้างโปรตีนปริมาณสูงในใบ ซึ่งส่งผลไม่เกิดการสะสมคาร์โบไฮเดรต (Kamisaka *et al.*, 1990; Yu, 1995) และปุ๋ยไนโตรเจนที่สูงจะไปลดการสร้างลิกนิน (lignification) และไปลดความหนาของเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทำให้ปล้องยึดและอ่อน (Yang *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2011b; Zhang *et al.*, 2016)

เช่นเดียวกันกับมีการศึกษาในข้าวระหว่างระยะสะสมเมล็ด (grain filling) พบว่าแม้ความแข็งแรงทางกายภาพของต้นจะลดลงเมื่อข้าวเข้าสู่ระยะสุกแก่ แต่ปริมาณโพแทสเซียมและซิลิกอนในลำต้นและปริมาณซิลิกอนในใบข้าวกลับพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น ในระหว่างการสะสมเมล็ดในข้าวความแข็งแรงทางฟิสิกส์จะมีความสัมพันธ์ทางบวกกับปริมาณโพแทสเซียมและซิลิกอน (ยกเว้นที่ระยะออกรวง) รวมทั้งสัมพันธ์กับน้ำตาลที่ละลายได้ในลำต้นทั้งที่ระยะออกรวง (heading stage) และระยะน้ำนม (milky stages) รวมทั้งพบความสัมพันธ์ทางบวกนี้กับซิลิกอนและน้ำตาลที่ละลายได้ในแผ่นใบของข้าวที่ระยะออกรวง และสัมพันธ์กับโพแทสเซียมในแผ่นใบที่ระยะออกรวงและระยะการสะสมเมล็ด นั่นหมายถึงการต้านทานการหักล้มที่ศึกษาในข้าว japonica นั้นสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้จากการเพิ่มน้ำตาลที่ละลายได้ในต้นโดยเฉพาะในระยะการสะสมน้ำหนกเมล็ดไปจนถึงการสามารถใช้ปุ๋ยซิลิกอนได้ในระยะการเติมเต็มเมล็ดในระยะแรก ๆ ของข้าวได้ (Zhang *et al.*, 2010a) มีการศึกษาของ Liu *et al.* (2002) และ Ishimaru *et al.* (2008) ที่พบว่าน้ำตาลที่ละลายได้และการสะสมแป้งที่ลำต้นส่วนฐานจะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการต้านทานการหักของลำต้น การเพิ่มการสะสมแป้งจึงเท่ากับเป็นการลดความแข็งแรงเชิงกล (mechanical strength) ของปล้องโดยเฉพาะปล้องแรกหรือปล้องฐานลำต้นซึ่งจะสามารถพบได้หลังระยะการออกรวงแล้วของข้าว

จากผลการศึกษาในข้าวทั้งแปดพันธุ์พบว่าปริมาณโพแทสเซียมของ CM-001, PLU-SU-004, PLU-SU-002 และ PLU-SU-001 มีค่าสูงสุดเรียงกันตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณลิกนินที่พบในพันธุ์ต่าง ๆ (ตารางที่ 6)

เมื่อทำการศึกษาสัดส่วนระหว่างกลุ่มคาร์โบไฮเดรตส่วนที่เป็นโครงสร้าง (ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลสและปริมาณลิกนิน) กับกลุ่มคาร์โบไฮเดรตส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (ได้แก่ ปริมาณน้ำตาลที่ละลายได้และปริมาณแป้ง) (SC/NSC ratio) พบว่า ข้าวไร่พันธุ์ที่มีสัดส่วนดังกล่าวสูงที่สุดได้แก่ CM-001 (13.17) รองลงมา ได้แก่ ข้าวไร่จำนวนสามพันธุ์ ได้แก่ CP-001 (11.42), PLU-SU-002 (11.10) และ PLU-SU-003 (11.02) ขณะที่พันธุ์ NYP-

SU-001 (6.72) มีค่าสัดส่วนต่ำที่สุด (ตารางที่ 6) ทั้งนี้การเก็บข้อมูลเป็นระยะการเติมเต็มเมล็ดแต่เข้าสู่ระยะการสุกแก่ทางสรีรวิทยาแล้ว ด้วยเหตุนี้ สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่โครงสร้างส่วนใหญ่มีการขนย้ายไปเพื่อการเติมเต็มเมล็ดแล้วทำให้ปริมาณน้ำตาลที่ละลายได้และแป้งที่สะสมในลำต้นและใบอาจมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับปริมาณเซลลูโลสและลิกนิน (Xu *et al.*, 2016b) อย่างไรก็ตามค่า SC/NSC ratio เท่าใดที่จะบ่งชี้การต้านทานการหักล้มนั้นอาจแตกต่างกันในข้าวแต่ละพันธุ์ ทำให้การนำค่าสัดส่วนดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบกันโดยตรงอาจไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้อย่างชัดเจน แต่หากจะนำมาเปรียบเทียบอาจต้องพิจารณาลักษณะร่วมกันหลายลักษณะ เช่น SC/NSC ratio อากาศต้นก่อนการโน้ม อากาศต้นหลังการโน้ม เปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้น ลักษณะกายภาพของปล้อง และผลผลิต มาร่วมในการพิจารณาด้วย (ตารางที่ 3-6) สำหรับพันธุ์ CM-001 ที่พบว่า มี SC/NSC ratio สูงสุด (13.17) นั้นพบว่าไม่ได้มีอากาศต้นก่อนการโน้ม อากาศต้นหลังการโน้ม หรือเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวดีแต่อย่างใด ทั้งนี้พบว่าพันธุ์มีค่า SC สูงอาจให้ต้นข้าวขาดความยืดหยุ่นได้ (Weng *et al.*, 2017) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นค่อนข้างต่ำ (ตารางที่ 3)

การพบว่า CM-001 มีค่าอากาศต้นทั้งก่อนและหลังการโน้มต้นต่ำ หรือมีลำต้นที่ไม่ตั้งตรงอาจเป็นเพราะมีปล้องที่หนึ่งและปล้องที่ 2 ยาวกว่าพันธุ์อื่น ๆ (ตารางที่ 3-4) ทั้งนี้ความยาวของปล้องล่าง ๆ ของข้าวพบว่ามีสัมพันธ์อย่างมากกับการต้านทานการหักล้ม (Ling, 2007; Zhang *et al.*, 2014; Tian *et al.*, 2017) ทั้งข้าวโดยปกติจะมีปล้องประมาณ 4-7 ปล้อง (Ling, 2007) ปล้องที่ 1 จากการศึกษาในครั้งนี้นับจากผิวดินขึ้นมา แต่ถ้านับจากระบบรากอาจนับเป็นประมาณปล้องที่สามของต้นข้าว ซึ่งการมีปล้องล่าง ๆ (basal internode) ที่มีความยาวพบว่าสัมพันธ์กับการมีลำต้นไม่ตั้งตรงหรือไม่ต้านทานต่อการหักล้มในข้าว (Zhang *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2009b; Zhong *et al.*, 2019) และ CM-001 เป็นพันธุ์ที่มีลำต้นและต้นสูงที่สุดในการทดลองนี้ โดยมีความสูงเท่ากับ 117.4 และ 155 ซม. ตามลำดับ จากที่มีการศึกษาพบว่าการมีสัดส่วน NSC น้อยนั้นอาจกระทบต่อการให้ผลผลิต (Yang *et al.*, 2013; Pan *et al.*, 2016) จากผลการทดลองพบว่าพันธุ์ดังกล่าวนี้มีผลผลิตอยู่ระดับต่ำ (4,042.5 กรัม/24 ตรม.) อยู่ระดับเดียวกับพันธุ์ PLU-SU-004 (3,879.3 กรัม/24 ตรม.) (ตารางที่ 5)

ขณะที่พันธุ์ที่มี SC/NSC ratio ในระดับรองลงมาคือ PLU-SU-002, PLU-SU-003 และ CP-001 โดยมีค่าสัดส่วนอยู่ระหว่าง 11.02-11.42 เป็นสามพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพันธุ์อื่น ๆ (ตารางที่ 5-6)

ขณะที่พันธุ์ NYP-SU-001 ที่มี SC/NSC ratio ต่ำที่สุด (6.72) มีค่าอากาศต้นทั้งก่อนและหลังการโน้ม เปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นมีค่าปานกลาง แต่มีปล้องที่หนึ่งและปล้องที่ 2 สั้นกว่าพันธุ์อื่น ๆ (ตารางที่ 3-4) ซึ่งการมีปล้องล่าง ๆ ที่มีปล้องสั้นมีรายงานสัมพันธ์กับการต้านทานต่อการหักล้มในข้าว (Zhong *et al.*, 2019) และเป็นพันธุ์ที่มีลำต้นและความสูงต้นค่อนข้างเตี้ย (85.3 และ 108.8 ซม.) เมื่อเทียบกับพันธุ์อื่น ๆ อย่างไรก็ตามการประเมินอากาศต้นก่อนการโน้มในการศึกษาครั้งนี้ทำการประเมินเป็นรายต้น ดังนั้นการจะมีลำต้นตั้งตรงหรือไม่ยังขึ้นกับการแตกกอของข้าวด้วยเช่นกัน จากที่มีการศึกษาพบว่าการมีสัดส่วน NSC มากนั้นอาจส่งผลต่อการให้ผลผลิต (Pan *et al.*, 2016) อย่างไรก็ตาม พันธุ์นี้มีผลผลิตอยู่ระดับปานกลาง (4,520.8 กรัม/24 ตรม.) อยู่ระดับเดียวกับพันธุ์ PLU-SU-001 (4,440.4 กรัม/24 ตรม.) (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยองศาต้นทั้งก่อนและหลังการโน้ม เเปอร์เซ็นต์การสปริงของลำต้น และลักษณะทางเกษตรอื่น ๆ ของข้าวไร่ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 (ค.ศ. 2017) ที่จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย

Characters	Varieties								P-value	CV (%)
	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-005	NYP-SU-001	CP-001	CM-001		
Degrees of angle before bending	79.4±5.5 cd	83.6±2.6 ab	85.2±1.8 ab	86.3±1.4 a	85.7±1.6 ab	82.8±2.1 abc	82.0±2.4 bcd	78.2±1.3 d	0.0008 **	2.93
Degrees of angle after bending	25.0±5.8 d	24.6±4.5 d	36.2±6.5 b	29.4±5.4 c	39.8±6.6 a	29.2±2.8 c	30.6±0.9 c	23.2±3.7 d	0.0004 **	6.57
Springiness percentage	31.3±5.8 c	29.5±5.5 c	42.6±8.6 ab	34.1±7.9 bc	46.5±8.5 a	35.3±3.9 bc	37.3±1.8 bc	29.5±4.3 c	0.0016 **	15.13
Culm height (cm)	108.2±5.2 b	100.0±5.5 c	111.0±5.8 ab	100.2±2.6 c	110.6±6.6 ab	85.3±3.0 d	113.0±2.4 ab	117.4±6.1 a	1.91×10 ⁻⁷ **	4.61
Plant height (cm)	130.8±3.2 b	118.4±5.7 d	130.4±6.3 bc	122.6±3.4 cd	131.4±5.8 b	108.8±5.1 e	131.3±3.0 b	155.0±6.7 a	5.79×10 ⁻⁹ **	4.10
Panicle length (cm)	26.1±0.5 bc	26.8±0.8 ab	27.2±0.8 a	27.6±0.7 a	25.1±0.7 cd	24.6±0.6 d	25.3±0.7 cd	25.3±0.7 cd	2.15×10 ⁻⁶ **	2.61

* significant difference at $P \leq 0.05$; ** significant difference at $P \leq 0.01$.

องศาต้นก่อนการโน้ม (Degrees of angle before bending), องศาต้นหลังการโน้ม (Degrees of angle after bending) เเปอร์เซ็นต์การสปริงของลำต้น (Springiness percentage) ความสูงต้น (Plant height) ความสูงลำต้น (Culm height) และความยาวรวง (Panicle length)

หมายเหตุ: นาสาร = PLU-SU-003, บือเกะ = PLU-SU-002, ข้าวเหนียวป่าละอู = PLU-SU-004, ไร่สุหยา = CM-001, อังเจิงใหญ่ = NYP-SU-001, บือกอปี = PLU-SU-005, ดอกพะยอม = CP-001, บือชูช้อลา = PLU-SU-001

ตารางที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของปล้องลำต้นข้าวไร่ที่ปลูกในช่วงฤดูฝนปี พ.ศ. 2560 ที่จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย

Character (cm)	Year	Varieties								P-value	CV (%)
		PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-005	NYP-SU-001	CP-001	CM-001		
1 st Internode length	2017	21.35±1.72b	14.15±0.94	13.55±1.53	14.10±1.18	13.65±2.05	12.70±0.66	13.80±0.75	26.60±0.98	2.08×10 ⁻¹²	8.001
			c	c	c	c	c	c	a	**	
2 nd Internode length	2017	25.70±1.04b	21.15±2.11	18.30±2.01	21.30±1.62	19.50±1.74	15.25±2.09	17.70±0.26d	29.90±3.52	4.41×10 ⁻¹⁰	7.63
			c	d	c	cd	e		a	**	
1 st Internode diameter	2017	0.53±0.01	0.62±0.05	0.67±0.04	0.62±0.05	0.67±0.004	0.63±0.03	0.65±0.10	0.54±0.07	0.005	8.43
		b	a	a	a	a	a	a	b	**	
2 nd Internode diameter	2017	0.47±0.02	0.54±0.04	0.60±0.07	0.53±0.06	0.59±0.03	0.54±0.05	0.55±0.04	0.46±0.07	0.0001	9.46
		b	ab	a	ab	a	ab	a	b	**	
1 st Internode thickness	2017	0.05±0.003d	0.09±0.01	0.08±0.01	0.08±0.01	0.10±0.01	0.09± 0.01	0.07±0.01	0.05±0.01	1.48×10 ⁻⁷	10.67
			ab	c	bc	a	ab	c	d	**	
2 nd Internode thickness	2017	0.04±0.01	0.08±0.01	0.07±0.01	0.07±0.01	0.080±0.01	0.08±0.01	0.07±0.01	0.04±0.01	7.59×10 ⁻⁸	11.69
		c	ab	ab	ab	a	a	b	c	**	

* significant difference at $P \leq 0.05$; ** significant difference at $P \leq 0.01$.

ความยาวปล้องที่ 1 (1st Internode length) เส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่ 1 (1st Internode diameter) ความหนาผนังปล้องที่ 1 (1st Internode wall thickness) ความยาวปล้องที่ 2 (2nd Internode length) เส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่ 2 (2nd Internode diameter) ความหนาผนังปล้องที่ 1 (2nd Internode wall thickness)

หมายเหตุ: นาสาร = PLU-SU-003, บือเกะ = PLU-SU-002, ข้าวเหนียวป่าละอู = PLU-SU-004, ไร่สุหยา = CM-001, อังเจิงใหญ่ = NYP-SU-001, บือกอปี = PLU-SU-005, ดอกพะยอม = CP-001, บือชูช้อลา = PLU-SU-001

ตารางที่ 5 ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของข้าวไร่ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 ที่จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย 12°54'N 99° 54' E)

Character	Year	Varieties								P-value	CV (%)
		PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-005	NYP-SU-001	CP-001	CM-001		
Tillers per hill	2017	13.80±0.73 b	15.30±0.93 a	10.85±0.87 cd	11.15±0.96 c	9.10±0.90 e	10.20±0.49 cde	10.90±0.90 cd	9.70±0.84 de	3.44×10 ⁻⁹ **	7.09
Panicles per hill	2017	11.03±2.34 ab	12.13±1.90 a	7.78±1.58 c	9.20±1.19 abc	8.08±2.36 bc	9.24±2.55 abc	10.85±2.78 ab	8.35±0.95 bc	0.0282 *	19.42
100 grains weight (g)	2017	2.57±0.30 c	3.33±0.22 a	2.42±0.18 c	2.55±0.09 c	2.55±0.15 c	2.51±0.06 c	2.32±0.02 c	2.93±0.12 b	4.22×10 ⁻⁷ **	6.03
Percent of panicles per hill	2017	82.78±2.09 c	86.91±2.22 b	88.10±3.07 b	93.10±1.19 a	87.34±1.15 b	90.31±2.15 ab	94.11±3.37 a	82.78±2.09 c	2.19×10 ⁻¹⁰ **	2.83
Number of filled grains per panicle	2017	117.35±13.4 7ab	154.87± 13.10 b	148.36±19.43 b	179.72± 19.58 a	135.37± 18.95 bc	135.37±18.9 5bc	144.93± 11.58 b	113.19± 11.57 c	5.03 × 10 ⁻⁵ **	10.11
Percent of filled grains per panicle	2017	83.65±3.45 bc	82.99±3.35 c	79.69±4.47 c	92.40±2.14 a	82.28±4.43 c	80.01±3.95 c	88.54±3.25 ab	79.24±1.97 c	1.21×10 ⁻⁵ **	4.01
Grain weight per Panicle (g)	2017	3.67±0.42 abc	3.89±0.47 ab	3.81±0.22 ab	3.52±0.40 bc	3.75±0.38 abc	3.61±0.27 bc	4.15±0.44 a	3.27±0.24 c	0.0419 *	8.72
Yield per 10 hill (g)	2017	2133.35± 184.91 b	2584.59±31 5.05 a	2029.20± 97.00 b	1631.68± 239.95 c	2118.15± 135.26 b	1815.61± 70.06 bc	2087.44± 182.67 b	1666.53± 173.00 c	1.98×10 ⁻⁵ **	9.75
Yield (4*6 m ²) (g)	2017	4440.44± 187.67 bcd	5570.15±63 7.90 a	4950.57± 627.21 abc	3879.30± 752.60 d	4669.54± 563.09 abcd	4520.8530± 246.92 bcd	5229.65± 750.12 ab	4042.5040± 631.41 d	0.0121 *	13.14

* significant difference at P ≤ 0.05; ** significant difference at P ≤ 0.01. จำนวนหน่อต่อหลุม (Tillers per hill) จำนวนรวงต่อหลุม (Panicles per hill) น้ำหนัก 100 เมล็ด (100 grains weight) จำนวนเมล็ดเต็มเต็มต่อรวง (Number of filled grains per panicle) เปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มเต็มต่อรวง (Percent of filled grains per panicle) น้ำหนักผลผลิตเมล็ดต่อรวง (Grain weight per panicle) ผลผลิตต่อ 10 กอ (Yield per 10 hills) ผลผลิตเมล็ดต่อแปลง (Yield; 4*6 m²). นาสาร = PLU-SU-003, บือเกะ = PLU-SU-002, ข้าวเหนียวป่าละอู = PLU-SU-004, ไร่สุหยา = CM-001, อังเจิงใหญ่ = NYP-SU-001, บือกอปี = PLU-SU-005, ดอกพะยอม = CP-001, บือซูซ้อลา = PLU-SU-001

ตารางที่ 6 ลักษณะเคมีบางประการของลำต้นข้าวไร่จำนวนแปดพันธุ์ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 ที่จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย 12°54'N 99° 54' E)

Character	Varieties								P-value	CV (%)
	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-005	NYP-SU-001	CP-001	CM-001		
Cellulose (%)	48.35±3.36 a	48.94±1.90 a	48.15 ±2.23 a	42.17±0.64 c	48.18± 4.13 a	43.73±1.30 bc	46.86 ±1.72 ab	48.49±1.38 a	0.0015 **	4.63
Lignin (%)	6.03±0.98 ab	6.05 ±0.47 ab	4.83±0.27 c	5.14±0.36 bc	4.85± 0.74 c	5.60± 0.68 bc	5.29± 0.73 bc	6.88±0.46 a	0.0019 **	10.95
Soluble Sugar (mg/g)	33.33±1.76 b	31.88±2.41 b	29.72±1.58 bc	26.17±1.79 c	29.98±1.88 bc	50.40±4.34 a	27.52±3.68 c	27.36±1.73 c	2.68 × 10 ⁻¹⁰ **	8.11
Starch (mg/g)	17.22±2.89 bc	17.65±1.07 bc	18.37±2.38 bc	18.75±2.22 b	18.37±2.38 bc	22.99±2.99 a	18.15±1.97 bc	14.67±1.68 c	0.0006 **	13.59
Silicon (mg/g)	30.64±5.11 d	34.26±2.54 abcd	37.83±2.21 ab	36.76±2.85 abc	37.83±2.21 ab	32.36±4.86 bcd	35.76±2.45 abcd	31.42±5.11 cd	0.0273 *	10.09
Potassium (mg/g)	13.80±0.81 abc	14.75±1.91 ab	11.17±1.29 d	15.46±1.86 a	11.16±1.68 cd	12.61±0.42 bcd	10.67±0.72 d	15.77±2.20 a	0.0004 **	11.77
Cellulose+	54.38	54.99	52.98	47.31	53.03	49.33	52.15	55.37		
Lignin (%)										
Cellulose+	543.8	549.9	529.8	473.1	530.3	493.3	521.5	553.7		
Lignin (mg/g) (A)										
Soluble sugar+	50.55	49.53	48.09	44.92	48.35	73.39	45.67	42.03		
Starch (B)										
Ratio A/B	10.76	11.10	11.02	10.53	10.97	6.72	11.42	13.17		

* significant difference at P ≤ 0.05; ** significant difference at P ≤ 0.01.

หมายเหตุ: นาสาร = PLU-SU-003, บือเกะ = PLU-SU-002, ข้าวเหนียวป่าละอู = PLU-SU-004, ไร่สุหยา = CM-001, อังเจิงใหญ่ = NYP-SU-001, บือกอปี = PLU-SU-005, ดอกพะยอม = CP-001, บือชูช้อล = PLU-SU-001

ความสัมพันธ์จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางการเกษตร และลักษณะทางกายภาพของข้าวไร่ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางการเกษตร ลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของข้าวไร่จำนวน 8 พันธุ์ ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 (ตารางที่ 7) พบว่าจำนวนหน่อต่อกอมีความสัมพันธ์ทางสถิติทางบวกกับจำนวนรวงต่อกอ แต่แม้จะพบว่ามีความสูงแต่การที่ความสัมพันธ์มีค่าไม่เท่ากับ 1 แสดงให้เห็นการมีหน่อที่ไม่มีประสิทธิภาพ (non-effective tillers or non-productive tiller) หรือไม่มีการสร้างรวง (non-generated panicles) ก็ยังเป็นปัญหาสำคัญสำหรับการปลูกข้าวไร่ และในการพัฒนาพันธุ์ข้าวไร่ก็ยังคงใช้ลักษณะนี้เป็นลักษณะหนึ่งในการพิจารณาเพื่อการพัฒนาพันธุ์ เนื่องจากพบว่ามีความสัมพันธ์และอิทธิพลต่อการให้ผลผลิต (Nushasanah *et al.*, 2017; Poudel, 2018) ทั้งจำนวนรวงต่อกอและจำนวนหน่อต่อกอพบว่ามีความสัมพันธ์กับการตั้งตรงในทิศทางลบแม้จะไม่มีนัยสำคัญทางสถิติก็ตาม แต่เมื่อทำการโน้มต้นแล้วพบว่าองศาหลังการโน้มมีทิศทางตรงกันข้ามกับการแตกกอและการมีจำนวนรวงต่อกอ ซึ่งความสัมพันธ์นี้มีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับความสามารถในการสปริงตัวของลำต้นพบว่าเป็นไปในทิศทางลบเช่นกัน ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อต้นมีลักษณะตั้งตรงน้อย โอกาสจะประเมินความสามารถในการสปริงของลำต้นจะต่ำไปด้วย ทั้งนี้ในข้าวพบว่าพันธุ์ที่มีการแตกกอสูงมักมีการแผ่ของกอทำให้เมื่อประเมินแต่ละต้นหรือภาพรวมมีโอกาสเจอการโน้มเอียงมากกว่า

การพบความสัมพันธ์ทางบวกระหว่างความสูงต้นและความสูงลำต้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญแสดงให้เห็นว่าความสูงต้นที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากความยาวของใบที่ไม่สัมพันธ์กับความสูงของลำต้น แต่พันธุ์ที่มีต้นสูงมีลักษณะต้นโน้มเอียงมากกว่าพันธุ์ต้นเตี้ยและส่งผลกระทบต่อประเมินความสามารถในการสปริงตัว สำหรับความสูงของต้นและลำต้นมีความสัมพันธ์ทางบวกของความยาวปล้องที่ 1 และ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่อาจพบการมีเส้นผ่าศูนย์กลางผนังปล้องน้อยลง

ทั้งความยาวปล้องและความสูงต้นข้าวที่เหมาะสม (Optimum height) จะไม่เป็นสาเหตุของการหักล้มของต้น (Islam *et al.*, 2007) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าความสูงต้นและความสูงลำต้นของพันธุ์ที่ทำการศึกษานี้ อาจทำการพัฒนาพันธุ์ให้ความสูงลดลงไปอีก การล้มของต้นโดยไม่เกิดการหักส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการหักล้มของรากเป็นส่วนใหญ่ แต่หากเป็นการหักของลำต้นที่หมายถึงการโน้มเอียง หรือการหักของลำต้น โดยมากจะเป็นผลมาจากปล้องล่างๆ ของต้นข้าวและส่งผลให้เห็นการเอนของปล้องที่สูงขึ้นไป ซึ่งไม่ว่าเป็นการต้านทานการหักล้มแบบใดต่างก็ได้รับความสนใจทั้งสิ้น ทั้งนี้ในส่วนของการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหักล้มที่ตำแหน่งปล้องล่าง ๆ กำลังได้รับความสนใจในการพัฒนาพันธุ์ข้าว (Yao *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2016) ด้วยเหตุนี้ การลดความสูงลงอาจทำการลดความยาวของปล้องที่ 1 หรือ 2 เมื่อนับจากผิวดินขึ้นไป ทั้งนี้แนวทางนี้สามารถใช้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างการตั้งตรงของลำต้นหรือความสามารถในการสปริงลำต้นหลังทำการโน้มต้นนี้มีความสัมพันธ์ทางบวกกับเส้นผ่าศูนย์กลางของผนังปล้อง แต่สัมพันธ์ทางลบกับความยาวปล้อง โดยเฉพาะความยาวปล้องแรก ดังนั้นหากต้องการลดความยาวปล้องให้มุ่งเน้นไปที่ปล้องที่ 1 เป็นหลัก

ทั้งนี้ความยาวปล้องมีความสัมพันธ์ระหว่างปล้องที่ 1 และ 2 ในทางบวก แต่พบความสัมพันธ์ทางลบกับเส้นผ่าศูนย์กลาง แต่ในการพัฒนาพันธุ์ข้าวไร่ อาจจำเป็นต้องมีการพิจารณาเพื่อไม่ให้เส้นผ่าศูนย์กลางผนังปล้อง

ลดลงเมื่อต้องการลดความยาวของปล้อง เพราะเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องนั้นมีความสัมพันธ์ทางบวกกับความสามารถในการต้านทานการหักล้ม (Okuno *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017) การคัดเลือกลักษณะปล้องที่ผนังเซลล์หนาและปล้องอวบได้มีการใช้เป็นลักษณะคัดเลือกเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการหักล้ม (Islam *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2009b) เช่นเดียวกับการลดความยาวของปล้องแรกๆ ของต้นข้าวลง (Yang *et al.*, 2009)

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างองค์ลักษณะทางกายภาพของลำต้นกับลักษณะทางการเกษตรบางลักษณะและองค์ประกอบผลผลิตพบว่าพันธุ์ส่วนใหญ่ที่มีการแตกกอหรือมีจำนวนรวงต่อกอจำนวนมากพบว่ารวงมีลักษณะยาวแต่เป็นกลุ่มเมล็ดค่อนข้างใหญ่ แต่พบจำนวนเมล็ดไม่เต็มค่อนข้างมากเช่นกัน ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเมล็ดกับจำนวนเมล็ดเต็มเต็มพบว่าส่วนใหญ่กลุ่มที่มีจำนวนเมล็ดเต็มค่อนข้างสูงหรือมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มต่อรวงสูงจะเป็นกลุ่มเมล็ดที่มีขนาดค่อนข้างเล็ก (no. of filled grain; FG vs 100-grain weight; 100GW, $r = -0.3773$ และ percent of filled grain; PFG vs 100GW, $r = -0.2749$) ขณะที่น้ำหนักเมล็ดต่อรวงแม้จะมีความสัมพันธ์ทางบวกกับขนาดเมล็ดหรือน้ำหนัก 100GW แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้การศึกษาการเติมเต็มของเมล็ดมีความสำคัญ โดยเฉพาะกับการศึกษาในข้าวไร่ เพราะพบว่าเป็นลักษณะที่สัมพันธ์อย่างสูงกับการให้ผลผลิตต่อต้น ดังเช่นการศึกษาของ Kadidaa *et al.* (2017) พบความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตและจำนวนเมล็ดเต็มเต็ม $r = 0.910$ ซึ่งสูงกว่าองค์ประกอบผลผลิตอื่น ๆ

สำหรับลักษณะการตั้งตรงของลำต้นทั้งก่อน (ทั้งภาพรวมแปลงและรายต้น) และหลังการโน้มต้นเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวกลับของลำต้น พบว่าสัมพันธ์ทางลบกับเปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ดนั้นหมายถึงพันธุ์ที่มีลักษณะต้นตั้งตรงและสามารถสปริงลำต้นกลับ (หลังทำการโน้มต้น) ได้ดีนั้น ส่วนใหญ่มีเปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ดได้ค่อนข้างต่ำ (angle of stem before bending of varieties in plot; ABB vs PEG, $r = -0.1676$ และ springiness percentage; SP vs PFG, $r = -0.1419$) ด้วยเหตุนี้ การจะพัฒนาพันธุ์โดยใช้พันธุ์ที่นำมาศึกษาเหล่านี้จำเป็นต้องปรับปรุงลักษณะการเติมเต็มเมล็ดไปพร้อมกันกับการคัดเลือกลักษณะเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหักล้ม แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการตั้งตรงและความสามารถในการสปริงลำต้นกลับหลังการโน้มต้นมีความสัมพันธ์ทางบวกกับน้ำหนักรวง (SP vs grains weight per panicle; GWP, $r = 0.1786$) ซึ่งน่าจะเป็นผลดีต่อการนำพันธุ์กรรมเหล่านี้มาใช้ในการปรับปรุงพันธุ์เช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาลักษณะกายภาพของลำต้นพบว่าความยาวปล้องมีความสัมพันธ์ทางบวกกับน้ำหนัก 100 เมล็ด หรือพันธุ์ที่มีความยาวปล้องสั้นที่เป็นเป้าหมายในการคัดเลือกส่วนใหญ่พบในพันธุ์ที่มีขนาดเมล็ดเล็ก เช่นเดียวกันกับเส้นผ่าศูนย์กลางผนังปล้องและความหนาผนังปล้องทั้งปล้องที่ 1 และ 2 พบว่าส่วนใหญ่จะเจอในพันธุ์ที่มีเมล็ดขนาดเล็กเช่นกัน แต่ขณะเดียวกันลักษณะทางกายภาพเหล่านี้กลับพบว่ามีสัมพันธ์ทางลบกับเปอร์เซ็นต์การเติมเมล็ด ด้วยเหตุนี้อาจกล่าวได้ว่า พันธุ์ที่มีลักษณะการตั้งตรงและต้านทานการหักล้มจากการประเมินโดยการโน้มต้นและจากการประเมินจากลักษณะกายภาพของปล้องลำต้นพบว่าจากพันธุ์ที่นำมาศึกษาส่วนใหญ่มีแนวโน้มจะเจอในพันธุ์ข้าวไร่ที่มีเมล็ดขนาดเล็กแต่มีข้อด้อยคือการมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดไม่เต็มเต็มสูงซึ่งอาจต้องเป็นประเด็นที่ต้องพิจารณาในการปรับปรุงพันธุ์ต่อไป

ตารางที่ 7 ศึกษาความสัมพันธ์จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางการเกษตร ลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของข้าวไร่ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 ที่จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย (12° 59' N and 99° 42' E)

Characteristics	P/H	PH	CH	ABB	ABI	AAB	SP	IL1	IL2	ID1	ID2
P/H	0.6420**	0.0111 ^{ns}	0.0487 ^{ns}	-0.0014 ^{ns}	-0.0104 ^{ns}	-0.2189*	-0.2129 ^{ns}	0.0579 ^{ns}	0.0700 ^{ns}	-0.0415 ^{ns}	-0.0094 ^{ns}
TS		-0.0049 ^{ns}	0.0924 ^{ns}	-0.0229 ^{ns}	0.0027 ^{ns}	-0.2607**	-0.2618 ^{ns}	0.0896 ^{ns}	0.1156 ^{ns}	-0.1132 ^{ns}	-0.0418 ^{ns}
PH			0.7748**	-0.1836*	-0.1231 ^{ns}	-0.1028 ^{ns}	-0.0864*	0.4990**	0.4774**	-0.1639*	-0.1410 ^{ns}
CH				-0.0549 ^{ns}	-0.0312 ^{ns}	0.0094 ^{ns}	0.0102 ^{ns}	0.4039**	0.4009**	-0.0395 ^{ns}	0.0554 ^{ns}
ABB					0.4333**	0.2372**	0.1600*	-0.2395**	-0.0536 ^{ns}	0.1396 ^{ns}	0.1966*
ABI						0.1646*	-0.0361 ^{ns}	-0.2009*	-0.0821 ^{ns}	0.0928 ^{ns}	0.1012 ^{ns}
AAB							0.9780**	-0.3343**	-0.2990**	0.3805**	0.3629**
SP								-0.3096**	-0.2989**	0.3684**	0.3525**
IL1									0.7311**	-0.4430**	-0.4378**
IL2										-0.2938**	-0.3129**
ID1											0.7284**

[Tillers (TS), Panicle/hill (P/H), Plant height (PH), Culm height (CH), Angle of stem before bending of variety in plot (ABB), Angle of stem before bending in individual in plant (ABI), Angle of stem after bending (AAB), Springiness percentage (SP), 1st internode length (IL1), 2nd internode length (IL2), 1st internode diameter (ID1), 2nd internode diameter (ID2), 1st internode thickness (IT1), 2nd internode thickness (IT2), Panicle length (PL), Number of filled grain (FG), Number of non-filled grain (NFG), Percent of filled grain (PFG), Grains weight per panicle (GWP), 100-Grains weight (100GW) in eight varieties] df=158, ** significant difference at the 0.01 level of probability. *significant difference at the 0.05 level of probability. ns not significant difference at the 0.05 level of probability.

ตารางที่ 7 ศึกษาความสัมพันธ์จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางการเกษตร ลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของข้าวไร่ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 (ค.ศ. 2017) ที่จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย (12° 59' N and 99° 42' E) (ต่อเนื่อง)

Characteristics	IT1	IT2	PL	FG	NFG	PFG	GWP	100GW
P/H	-0.0051 ^{ns}	-0.0650 ^{ns}	0.1889*	-0.1708*	-0.0184 ^{ns}	-0.0728 ^{ns}	-0.0899 ^{ns}	0.1918*
TS	-0.0622 ^{ns}	-0.1164 ^{ns}	0.0290 ^{ns}	-0.2086**	-0.0121 ^{ns}	-0.0800 ^{ns}	-0.1412 ^{ns}	0.1362 ^{ns}
PH	-0.3951**	-0.3715**	-0.1416 ^{ns}	0.0190 ^{ns}	-0.0602 ^{ns}	0.0518 ^{ns}	0.0852 ^{ns}	0.1540 ^{ns}
CH	-0.2880**	-0.2690**	-0.0374 ^{ns}	0.0517 ^{ns}	-0.0399 ^{ns}	0.0792 ^{ns}	0.0763 ^{ns}	0.0693 ^{ns}
ABB	0.2277**	0.2472**	0.2777**	0.0234 ^{ns}	0.2081**	-0.1676*	0.0314 ^{ns}	-0.0069 ^{ns}
ABI	0.0896 ^{ns}	0.1897*	0.1654 ^{ns}	-0.0009 ^{ns}	-0.0757 ^{ns}	0.0483 ^{ns}	-0.0593 ^{ns}	-0.1421 ^{ns}
AAB	0.2944**	0.2531**	0.0409 ^{ns}	0.2500**	0.2743**	-0.1271 ^{ns}	0.1689*	-0.1492 ^{ns}
SP	0.2860**	0.2285**	0.0060 ^{ns}	0.2518*	0.2981**	-0.1419 ^{ns}	0.1786*	-0.1287 ^{ns}
IL1	-0.5452**	-0.6253**	-0.1190 ^{ns}	-0.2463**	-0.1876*	0.0383 ^{ns}	-0.0616 ^{ns}	0.3317**
IL2	-0.4579**	-0.5349**	0.0556 ^{ns}	-0.2424**	-0.1764*	0.0297 ^{ns}	-0.0462 ^{ns}	0.3376**
ID1	0.5558**	0.4292**	0.4042**	0.3089**	0.2572**	-0.0470 ^{ns}	0.1867*	-0.2398**
ID2	0.5180**	0.5232**	0.3133**	0.1876*	0.3695**	-0.2097**	0.0133 ^{ns}	-0.2599**
IT1		0.6642**	0.1556 ^{ns}	0.0396 ^{ns}	0.2951**	-0.2130**	-0.0740 ^{ns}	-0.1644*
IT2			0.0315 ^{ns}	0.1222 ^{ns}	0.2699**	-0.1701*	-0.0012 ^{ns}	-0.1812*
PL				0.0326 ^{ns}	-0.0034 ^{ns}	0.0194 ^{ns}	-0.0123 ^{ns}	-0.1227 ^{ns}
FG					0.0739 ^{ns}	0.3905**	0.8490**	-0.3773**
NFG						-0.8260**	0.0446 ^{ns}	0.0326 ^{ns}
PFG							0.3506**	-0.2749**
GWP								0.0848 ^{ns}

[Tillers (TS), Panicle/hill (P/H), Plant height (PH), Culm height (CH), Angle of stem before bending of variety in plot (ABB), Angle of stem before bending in individual in plant (ABI), Angle of stem after bending (AAB), Springiness percentage (SP), 1st internode length (IL1), 2nd internode length (IL2), 1st internode diameter (ID1), 2nd internode diameter (ID2), 1st internode thickness (IT1), 2nd internode thickness (IT2), Panicle length (PL), Number of filled grain (FG), Number of non-filled grain (NFG), Percent of filled grain (PFG), Grains weight per panicle (GWP), 100-Grains weight (100GW) in eight varieties] df=158, ** significant difference at the 0.01 level of probability. *significant difference at the 0.05 level of probability. ns not significant difference at the 0.05 level of probability.

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์และวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายแบบแยกกลุ่มลักษณะของข้าวไร่ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560

การวิเคราะห์ถดถอยใช้เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะแต่แตกต่างจากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ เนื่องจากการวิเคราะห์ถดถอยสามารถอธิบายความเป็นสาเหตุต่อลักษณะใดลักษณะหนึ่งได้ ในการศึกษาครั้งนี้ทำการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายที่ใช้ตัวแปรตามเพียงหนึ่งลักษณะ (Y) และการมีหนึ่งหรือหลายตัวแปรที่เป็นตัวแปรต้นแต่ทำการศึกษาทีละหนึ่งตัวแปร (X) ซึ่งการศึกษาทีละหนึ่งตัวแปรต้นนี้เรียกว่าเป็นการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression) ทั้งนี้ได้ทำการแยกการวิเคราะห์จากกลุ่มของตัวแปรต้นและตัวแปรตามออกเป็น 5 กลุ่ม (ตารางที่ 8-12) ที่จะได้อธิบายต่อไป สำหรับสมการที่จะปรากฏในตารางคือสมการเส้นตรง ดังนี้

$$Y = a + bX$$

เมื่อ ค่า a คือ ค่า intercept และ b คือค่าความชัน คือค่าจุดตัดของแกน y ทั้งนี้ค่าความชันซึ่งเป็นหน่วยของการเปลี่ยนแปลงตามแกน y เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามแกน x หนึ่งหน่วย

ด้วยเหตุนี้ ค่า a จึงเป็นแปรผลไปที่ตำแหน่งของการวิเคราะห์ถดถอย แต่ค่าความชันจะสะท้อนปริมาณความเกี่ยวข้องหรือสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X และ Y ที่กำลังศึกษา ถ้าค่าความชันมีค่าเป็น 0 หมายถึงไม่มีความสัมพันธ์หรือเกี่ยวข้องระหว่างลักษณะที่กำลังศึกษา แต่ถ้าค่าความชันเป็นลบหมายถึงถ้าตัวแปรหนึ่งเพิ่มค่าตัวแปรหนึ่งจะลดลงเท่ากับ $-b$ แต่ถ้าความชันนี้เป็นบวกจะหมายถึงความสัมพันธ์ของสองตัวแปรจะมีขนาดและทิศทางเท่ากับ $+b$ ยิ่งมีค่าความชันมากก็หมายถึงการมีความเกี่ยวข้องของสองลักษณะนั้นมากนั่นเอง (Bangdiwala, 2018) ทั้งนี้การวิเคราะห์ที่ได้มาจากการศึกษาจากการใช้ค่าจริงของลักษณะสองลักษณะดังกล่าว

ในแต่ละตาราง (ตารางที่ 8-12) จากสมการเชิงเส้นอย่างง่ายที่ปรากฏในแต่ละตารางแล้ว การพิสูจน์ว่าสมการนั้น (Regression model) เหมาะสมเพียงใดที่นำไปใช้ในการประมาณการณ์หรือคาดการณ์สำหรับลักษณะตัวแปรตาม คือค่า Y นั้น ก็จะต้องอาศัยการพิสูจน์จากค่าความคลาดเคลื่อน (error) เช่นเดียวกับกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนตามปกตินั่นเอง แต่เป็นการพิสูจน์โดยการใช้ข้อมูลจริงที่รวบรวมมาแล้วดูความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการใช้สมการเชิงเส้นอย่างง่ายนั้น ซึ่งจะเรียกความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้ว่า Residual การทดสอบทางสถิติโดยใช้ F-statistics เช่นกันเพื่อบ่งชี้ความคลาดเคลื่อนหรือในอีกทางหนึ่งคือการบ่งชี้ความแม่นยำสูงของการใช้สมการนั่นเอง

ทั้งนี้ในแต่ละตารางที่นำเสนอจะแสดงค่า R^2 ซึ่งเป็นค่าที่เรียกว่า Coefficient of Determination เป็นค่าที่ใช้ประกอบกับค่าการวิเคราะห์ผลทางสถิติ F-statistic เพื่อบ่งชี้ว่า simple linear regression model นี้สามารถยอมรับได้เพียงใด โดยเป็นการใช้สมการสัดส่วนเทียบระหว่างความคลาดเคลื่อนของค่า Y จากการเปลี่ยนแปลงค่า X ที่สามารถประเมินได้ (sum of square of regression) ต่อค่าความคลาดเคลื่อนรวมคือทั้งที่รู้และไม่มีที่มา (sum of square of total) (ทั้งนี้ในบางการศึกษาอาจนำเสนอค่า R^2 -adjusted) ซึ่งเป็นค่าที่แสดง

การปรับแก้กรณีที่ R^2 มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลมากหรือเป็นการปรับข้อมูลอีกรอบหนึ่ง (ฉลอง สี แก้วลีว, <https://sites.google.com/site/mystatistics01/home>, วันที่สืบค้น 3 มกราคม 2562)

การประเมินการตั้งตรงของลำต้นจากลักษณะองศาของลำต้นก่อนการโน้มต้น (Y) กับลักษณะทางการเกษตรและกายภาพของลำต้นบางลักษณะ (ตารางที่ 8)

ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ถดถอย การทดสอบทางสถิติพบว่าสมการเชิงเส้นที่ใช้ตัวแปรองศาหลังการโน้มต้น และลักษณะทางกายภาพลำต้นทั้งหมด (ยกเว้นเส้นผ่าศูนย์กลางลำต้นของปล้องแรก) แสดงค่านัยสำคัญทางสถิติซึ่งหมายถึงสามารถใช้สมการอย่างง่ายในการทำนายการตั้งตรงของลำต้นได้ ทั้งนี้พบค่าความชันซึ่งแสดงความสัมพันธ์ทางบวกระหว่างองศาหลังการโน้มต้น เส้นผ่าศูนย์กลางปล้อง และความหนาของผนังปล้องขณะที่พบความสัมพันธ์ทางบวกกับความยาวปล้องที่ 1 และ 2 ซึ่งผลการศึกษาเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาสหสัมพันธ์หรือ correlation (ตารางที่ 8)

ทั้งนี้ค่า R^2 ของความหนาผนังปล้องที่ 2 (0.3617) ความยาวปล้องที่ 1 (0.3145) และความหนาผนังปล้องที่ 1 (0.3058) มีค่าสูงที่สุดหรือสามารถยอมรับทั้งสามสมการนี้ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับสมการอื่น สำหรับองศาของลำต้นก่อนการโน้มต้นที่แสดงเป็นค่า X ในตารางเป็นการประเมินรายต้นจึงมีความสัมพันธ์กับองศาของลำต้นก่อนการโน้มต้นที่เป็นภาพรวมรายแปลงนั่นเอง ($R^2 = 0.3305$) (ตารางที่ 8)

ขณะที่ลักษณะทางการเกษตร ได้แก่ ความสูงต้นและความสูงลำต้น และองค์ประกอบผลผลิต ได้แก่ จำนวนหน่อต่อกอและจำนวนรวงต่อกอ ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่หมายถึงการใช้สมการเชิงเส้นอย่างง่ายสำหรับปัจจัยต้นต่าง ๆ เหล่านี้อาจไม่สามารถทำนายการตั้งตรงของกลุ่มข้าวไร่จากพันธุกรรมที่เลือกมาศึกษาเหล่านี้ได้มากนักเพราะมีความคลาดเคลื่อนอื่น ๆ ที่ไม่สามารถอธิบายได้มากนักเอง ทั้งนี้ผลการศึกษาสหสัมพันธ์ก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน (ตารางที่ 8)

การประเมินการตั้งตรงของลำต้นจากลักษณะองศาของลำต้นก่อนการโน้มต้น (Y) กับลักษณะเคมีบางประการ (ตารางที่ 9)

ผลการศึกษาพบว่า มีสองลักษณะที่มีนัยสำคัญทางสถิติซึ่งหมายถึงสามารถใช้สมการอย่างง่ายในการทำนายการตั้งตรงของลำต้นได้ ได้แก่ ปริมาณลิกนินและปริมาณซิลิกอน โดยทั้งสองลักษณะมีค่าความชันของสมการเชิงเส้นอย่างง่ายเป็นลบและบวกตามลำดับ (-2.1752 และ 0.4429 ตามลำดับ) ที่สอดคล้องไปกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่พบค่า r เท่ากับ -0.5148 และ 0.5245 ตามลำดับ ทั้งนี้ระหว่างทั้งสองลักษณะต้น ค่า R^2 ของปริมาณซิลิกอนมีค่าสูงที่สุด (0.2751) (ตารางที่ 9)

ข้อสมมุติฐานจากการพบความสัมพันธ์เป็นลบระหว่างปริมาณลิกนินและความสามารถในการตั้งตรงของต้น แม้จะมีรายงานที่กล่าวถึงความสามารถในการต้านทานการหักล้มที่สัมพันธ์กับปริมาณลิกนินซึ่งสะสมที่ผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall) (Chabannes *et al.*, 2001; Zheng *et al.*, 2017) โดยอยู่ที่ตำแหน่งที่เป็นคาร์โบไฮเดรตเมทริกซ์ของผนังเซลล์ซึ่งช่วยให้ต้นพืชมีความแข็งแรงและช่วยในการตั้งตรงของต้นก็ตาม (Shen *et*

al., 2009) แต่เมื่อมีการปลูกพืชแบบหนาแน่นขึ้น พบว่าความยาวของปล้องแรกๆ จะเพิ่มขึ้น พบความหนาของเนื้อเยื่อบริเวณปล้องมีค่าลดลง รวมทั้งปริมาณลิกนินที่จะมีการสะสมลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น นั่นหมายถึงผลกระทบของปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณลิกนินและส่งผลต่อการตั้งตรงของต้นพืชเช่นกัน นอกเหนือจากพันธุกรรม (Zheng *et al.*, 2017) สำหรับผลการศึกษาในตารางที่ 9 นี้แสดงถึงการตั้งตรง (upward) ของข้าวไร่ ด้วยเหตุนี้อาจต้องวิเคราะห์ที่ความสามารถในการต้านทานต่อการโน้มต้นอีกครั้งหนึ่ง สำหรับซิลิโคนเป็นลักษณะที่พบสัมพันธ์ทางบวกกับเพิ่มการต้านทานการหักล้ม (Waseem *et al.*, 2016) ความยาวระหว่างปล้องที่สามและสี่ของข้าว (Salman *et al.*, 2012) นั่นหมายถึงการใช้ซิลิโคนต่อการปลูกข้าวจะมีจุดเหมาะสมสำหรับการส่งเสริมความแข็งแรงของต้นและเพิ่มความต้านทานการหักล้ม แต่หากเพิ่มซิลิโคนในจุดที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลทางลบได้เพราะความสูงที่ไม่เหมาะสมกับเป็นสาเหตุหนึ่งของการหักล้มเช่นกัน (Islam *et al.*, 2007)

การประเมินเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นภายหลังการโน้มต้น (Y) กับลักษณะทางการเกษตรและกายภาพของลำต้นบางลักษณะ (ตารางที่ 10)

จากผลการวิเคราะห์ถดถอยเพื่อทดสอบสมการเชิงเส้นอย่างง่ายของลักษณะทางการเกษตรบางลักษณะ และลักษณะทางกายภาพบางลักษณะของลำต้นข้าวไร่ต่อเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นภายหลังการโน้มต้น หรืออาจหมายถึงความยืดหยุ่น (elasticity) ของลำต้นนั่นเอง พบว่ามีค่านัยสำคัญทางสถิติสำหรับลักษณะที่เป็นตัวแปรต้นในทิศทางความสัมพันธ์ทั้งทางบวกและทางลบ โดยลักษณะที่พบเหล่านี้มีความสัมพันธ์ทั้งจากการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าความชันการศึกษสมการเชิงเส้นอย่างง่าย สำหรับความสัมพันธ์ทางลบ ได้แก่ จำนวนหน่อต่อกอ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.1821 และความยาวปล้องที่ 1 และ 2 มีค่า R^2 เท่ากับ 0.2033 และ 0.2192 ตามลำดับ และพบความสัมพันธ์ทางบวก ได้แก่ องศาหลังการโน้มต้น มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9748 และ เส้นผ่าศูนย์กลางปล้องทั้งปล้องที่ 1 และ 2 มีค่า R^2 เท่ากับ 0.3095 และ 0.2473 ตามลำดับ (ตารางที่ 10)

ทั้งนี้การมีจำนวนหน่อต่อกอมากพบความสัมพันธ์ในทางลบกับค่าความสามารถในการสปริงตัวของลำต้น นั้นพบว่าในบางกรณีที่มีการเพิ่มปุ๋ยไนโตรเจนในข้าวทำให้การแตกกอเพิ่มขึ้นแต่การหักล้มของลำต้นอาจเพิ่มขึ้น (Wang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013) โดยเกิดจากการไปลดความแข็งแรงทางกลของปล้องล่าง ๆ ลง (Zhang *et al.*, 2015) ทำให้ไปลดความแข็งแรงที่ก่อให้เกิดการหักของลำต้นลงหรือทำให้ต้นโน้มมากขึ้นทั้งในข้าว japonica และ indica (Zhang *et al.*, 2014) เพราะการเสริมปุ๋ยไนโตรเจนที่ทำให้เพิ่มจำนวนกอมากขึ้นจะไปเพิ่มลักษณะที่มีความสัมพันธ์ทางลบกับการต้านทานการหักล้ม เช่น ความยาวปล้อง แต่ไปลดความหนาของปล้อง ทำให้ต้นหักหรือล้มง่ายขึ้น (Wei *et al.*, 2008; Lu *et al.*, 2014) แต่การศึกษาของ Zhang *et al.* (2016) พบว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางลำต้นเพิ่มขึ้น จากหลายรายงานวิจัยพบว่ากายภาพส่วนฐานของลำต้นข้าวมีอิทธิพลต่อการเพิ่มหรือลดความสามารถในการหักล้ม และลักษณะที่เกี่ยวข้องกับฐานของลำต้นได้รับผลกระทบเนื่องจากอิทธิพลของการได้รับแสงซึ่งก็ขึ้นกับดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index; LAI) และการมีจำนวนหน่อต่อกอที่เหมาะสมโดยเฉพาะในระยะเริ่มต้นสร้างรวง (Li, 1979; Ling *et al.*, 1994)

จากการศึกษาพบทั้งหมดในครั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าความยาวปล้องแรก ๆ (ปล้องที่ 1 และ 2) และเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่ 1 และ 2 สามารถใช้เป็นลักษณะคัดเลือกได้ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกัน หรือจากผลการศึกษานี้ความยาวปล้องที่มากอาจทำให้ความสามารถในการสปริงตัวของลำต้นหลังการโน้มลดลง แต่ถ้าหากปล้องมีขนาดหรือเส้นผ่าศูนย์กลางมาก ค่าเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นจะเพิ่มขึ้นหรือมีความสามารถในการต้านทานการหักล้มโดยการโน้มต้นได้เพิ่มขึ้นนั่นเอง

สำหรับองศาหลังการโน้มต้นเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นหลังการโน้มต้น ดังนั้นจึงพบความสัมพันธ์ระหว่างกันค่อนข้างสูง

การประเมินเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นภายหลังจากการโน้มต้น (Y) กับลักษณะเคมีบางประการ (ตารางที่ 11)

ผลการศึกษาพบว่ามีสองลักษณะที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่สามารถใช้สมการอย่างง่ายในการทำนายความสามารถในการสปริงตัวของลำต้นหลังการโน้มหรืออาจกล่าวได้ว่ามีความสามารถในการต้านทานการหักล้มโดยการโน้มเอียงของลำต้นได้ แต่มีความสัมพันธ์ในทางลบทั้งสองลักษณะตัวแปรต้น ได้แก่ ปริมาณลิกนินและปริมาณโพแทสเซียม โดยมีค่าความชันของสมการเชิงเส้นอย่างง่ายเท่ากับ -5.333 และ -1.8593 ตามลำดับ สอดคล้องไปกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่พบค่า r เท่ากับ -0.5568 และ -0.5321 ตามลำดับ (ตารางที่ 11)

ทั้งปริมาณลิกนินและโพแทสเซียมต่างมีรายงานการต้านทานการหักล้มในข้าว (Zhang *et al.*, 2010a; Chen *et al.*, 2011a) รวมทั้งส่งผลดีต่อเสถียรภาพของลำต้นต่อการหักล้มและความยืดหยุ่นของลำต้นด้วย (Zheng *et al.*, 2017) แต่การที่พืชจากต้านทานการหักล้มได้มากน้อยเพียงใดยังขึ้นกับสัดส่วนของสารอินทรีย์ต่างๆ ในต้นข้าว (Knapp *et al.*, 1987; Kong *et al.*, 2013) รวมทั้งสัดส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลางด้วย (slenderness ratio) (Shah *et al.*, 2017) ทำให้การศึกษาความสัมพันธ์อย่างง่ายอาจไม่สะท้อนความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนเหล่านี้ได้ชัดเจนนัก

การประเมินผลผลิต (Y) กับลักษณะทางการเกษตร ภายนอกของลำต้น และองค์ประกอบผลผลิตบางลักษณะ (ตารางที่ 12)

ผลการศึกษาพบว่ามีเพียงลักษณะความยาวปล้องที่ 1 ลักษณะเดียวที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่สามารถใช้สมการอย่างง่ายในการทำนายความสามารถในการให้ผลผลิตจากตัวแปรต้นได้ ทั้งนี้ความยาวปล้องที่ 1 พบความสัมพันธ์ทางลบ ทั้งจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($r = -0.3803$) และค่าความชันที่เป็นลบ (-58.31) ในสมการเชิงเส้นอย่างง่าย ขณะที่ลักษณะอื่น ๆ ไม่พบนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 12)

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะทิศทางของความสัมพันธ์พบว่ามีเพียงลักษณะความยาวปล้องที่ 1 และ 2 และเปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มเต็มเท่านั้นที่แสดงผลทางลบกับผลผลิต การที่เปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มเต็มสูงแต่กลับพบผลผลิตลดลงอาจหมายถึงการให้ผลผลิตสูงในข้าวไร่ชุดที่นำมาศึกษานั้น ส่วนใหญ่พันธุ์หรือแปลงที่ให้ผลผลิตสูงจะมีสัดส่วนของเมล็ดที่ไม่เต็มเต็มมีสูงด้วยเช่นกัน

จากการศึกษานี้เห็นได้ชัดว่าการลดความยาวปล้องอาจเพิ่มทั้งผลผลิตและลดการหักล้มของข้าวไร่ได้

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) และวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) สำหรับลักษณะองศาของลำต้นก่อนการโน้มต้น (angle of stem in plot before bending)(Y) กับลักษณะทางการเกษตรและลักษณะทางกายภาพบางลักษณะ (Xi) ของข้าวไร่ที่ปลูกช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 ที่จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย (12° 59' N and 99° 42' E)

Characters	Correlation coefficient (r)	Y= a + bX	R ²	P-value
Tillers/hill (X ₁)	-0.1162 ns	Y=85.1465-0.1964X	0.0135	0.5264 ns
Panicles/hill (X ₂)	-0.2819 ns	Y=87.0728-0.4349X	0.0795	0.1180 ns
Plant height (X ₃)	-0.3230 ns	Y=96.9557-0.1011X	0.1044	0.0713 ns
Culm height (X ₄)	-0.1532 ns	Y=88.4438-0.0524X	0.0235	0.4025 ns
Angle of stem before bending in plot (X ₅)	0.5749 **	Y=-0.2822+0.9875X	0.3305	5.79 x 10 ⁻⁴
Springiness percentage (X ₆)	0.2660 ns	Y=78.6024+0.1203X	0.0707	0.1412 ns
Angle of stem after bending in plant (X ₇)	0.4136 *	Y76.6087+0.2118=X	0.1710	0.0186 *
1 st internode length (X ₈)	-0.5608 **	Y=89.6556-0.4157X	0.3145	8.43x10 ⁻⁴ **
2 nd internode length (X ₉)	-0.4432 *	Y=89.9516-0.3339X	0.1965	0.0111 *
1 st internode diameter (X ₁₀)	0.2970 ns	Y=73.4000+15.4140X	0.0882	0.0988 ns
2 nd internode diameter (X ₁₁)	0.3695 *	Y=71.7430+20.881X	0.1365	0.0374 *
1 st internode thickness (X ₁₂)	0.5530 **	Y=74.2990+110.9780X	0.3058	0.0010 **
2 nd internode thickness (X ₁₃)	0.6014 **	Y=74.7100+126.0390X	0.3617	2.72x10 ⁻⁴ **

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) และวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) สำหรับลักษณะองศาของลำต้นก่อนการโน้มต้น (angle of stem in plot before bending) (Y) กับลักษณะทางเคมีต่าง ๆ (Xi) ของต้นข้าวไร่ที่ปลูกช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 ที่จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย (12° 59' N and 99° 42' E)

Characters	Correlation coefficient (r)	Y= a + bx	R ²	P-value
Cellulose content (X ₁)	-0.2831 ns	Y=97.9061-0.3171X	0.0801	0.1228 ns
Acid detergent lignin; ADL (X ₂)	-0.5148 **	Y=95.1178-2.1752X	0.2650	0.0030 **
Silicon content (X ₃)	0.5245 **	Y=67.5433+0.4429X	0.2751	0.0021 **
Potassium content (X ₄)	-0.2072 ns	Y=87.2448-0.3274X	0.0429	0.2552 ns
Soluble sugar content (X ₅)	-0.0553 ns	Y=83.7348-0.0258X	0.0031	0.7637 ns
Starch content (X ₆)	0.2612 ns	Y=77.5557+0.2979X	0.0677	0.1505 ns

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) และวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) สำหรับลักษณะเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นภายหลังการโน้มต้น (springiness percentage) (Y) กับลักษณะทางการเกษตรและลักษณะทางกายภาพบางลักษณะ (Xi) ของข้าวไร่ที่ปลูกช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 ที่จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย (12° 59' N and 99° 42' E)

Characters	Correlation coefficient (r)	Y= a + bx	R ²	P-value
Tillers/hill (X ₁)	-0.4268 *	Y=53.9584-1.5986X	0.1821	0.0149 *
Panicles/hill (X ₂)	-0.2321 ns	Y=43.3599-0.7918X	0.0539	0.2011 ns
Plant height (X ₃)	-0.0932 ns	Y=44.7358-0.0645X	0.0087	0.6119 ns
Culm height (X ₄)	0.01882	Y=34.2714+0.01422X	0.0004	0.9186 ns
Angle of stem before bending in plot (X ₅)	0.2723 ns	Y=-51.3428+1.0341X	0.0742	0.1316 ns
Angle of stem before bending in individual (X ₆)	0.2660 ns	Y=-12.9755+0.5880X	0.0707	0.1412 ns
Angle of stem after bending in plant (X ₇)	0.9873 **	Y=2.5366+1.1178X	0.9748	<2.2x10 ⁻¹⁶ **
1 st internode length (X ₈)	-0.4509 **	Y=47.7733-0.7389X	0.2033	0.0096 **
2 nd internode length (X ₉)	-0.4682 **	Y=52.2259-0.7797X	0.2192	0.0069 **
1 st internode diameter (X ₁₀)	0.5563 **	Y=-3.597+63.845X	0.3095	0.0009 **
2 nd internode diameter (X ₁₁)	0.4973 **	Y=2.56+62.13X	0.2473	0.0038 **
1 st internode thickness (X ₁₂)	0.2850 ns	Y=25.966+126.47X	0.0812	0.1138 ns
2 nd internode thickness (X ₁₃)	0.2730 ns	Y=27.550+126.475X	0.0745	0.1307 ns

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) และวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) สำหรับลักษณะเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นภายหลังการโน้มต้น (springiness percentage) (Y) กับลักษณะทางเคมีต่าง ๆ (Xi) ของต้นข้าวไร่ที่ปลูกช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 ที่จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย (12° 59' N and 99° 42' E)

Characters	Correlation coefficient (r)	Y= a + bx	R ²	P-value
Cellulose content (X ₁)	-0.1725 ns	Y=56.4406-0.4381X	0.0298	0.3533 ns
Acid detergent lignin; ADL (X ₂)	-0.5568 **	Y=65.486-5.333X	0.3100	0.0011 **
Silicon content (X ₃)	0.1999 ns	Y=22.8277+0.3733X	0.0400	0.2726 ns
Potassium content (X ₄)	-0.5321 **	Y=60.4106-1.8593X	0.2831	0.0017 **
Soluble sugar content (X ₅)	-0.0052 ns	Y=35.9478-0.0054X	2.72x10 ⁻⁵	0.9774 ns
Starch content (X ₆)	0.01144 ns	Y=30.5711+0.2898X	0.0131	0.5329 ns

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) และวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis) สำหรับลักษณะผลผลิต (Y) กับลักษณะทางการเกษตร ลักษณะกายภาพของลำต้น และองค์ประกอบผลผลิตบางลักษณะ (Xi) ของข้าวไร่ที่ปลูกช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 ที่จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย (12° 59'N and 99° 42'E)

Characters	Correlation coefficient (r)	Y= a + bx	R ²	P-value
Plant height (X ₁)	0.0002 ns	Y=4.66x10 ³ +1.584x10 ⁻² X	5.98x10 ⁻⁸	0.9989 ns
Culm height (X ₂)	0.0426 ns	Y=4344.788+3.009X	0.0018	0.8171 ns
Angle of stem before bending in plot (X ₃)	0.0328 ns	Y=3680.75+11.66X	0.0011	0.8585 ns
Angle of stem before bending in individual (X ₄)	0.0851 ns	Y=3204.38+17.59X	0.0072	0.6435 ns
Angle of stem after bending in plant (X ₅)	0.0483 ns	Y=4510.81+5.114X	0.0023	0.7930 ns
Springiness percentage (X ₁₂)	0.0313 ns	Y=4558.203+2.926X	9.78x10 ⁻⁴	0.8651 ns
1 st internode length (X ₆)	-0.3803 *	Y=5609.72-58.31X	0.1447	0.0318 *
2 nd internode length (X ₇)	-0.3306 ns	Y=5749.84-51.52X	0.1093	0.0645 ns
1 st internode diameter (X ₈)	0.1749 ns	Y=3505+1878X	0.0306	0.3382 ns
2 nd internode diameter (X ₉)	0.2156 ns	Y=3316+2520X	0.0465	0.2361 ns
1 st internode thickness (X ₁₀)	0.2795 ns	Y=3763+11602X	0.0781	0.1213 ns
2 nd internode thickness (X ₁₁)	0.2178 ns	Y=4048.9+9441.9X	0.0474	0.2311 ns
Tillers/hill (X ₁₃)	0.3120 ns	Y=3419.18+109.34X	0.0973	0.0821 ns
Panicles/hill (X ₁₄)	0.2327 ns	Y=3950.92+74.31X	0.0542	0.1999 ns
Percent of panicles/tiller (X ₁₅)	0.0912 ns	Y=3354.66+14.85X	0.0083	0.6194 ns
Panicle length (X ₁₆)	0.2174 ns	Y=2461.90+86.81X	0.0472	0.2321 ns
Percent of filled panicles (X ₁₇)	0.0950 ns	Y=3347.94+14.88X	9.03x10 ⁻³	0.6049 ns
No. filled grains per panicle (X ₁₈)	0.1838 ns	Y=3863.491+5.647X	0.0338	0.3139 ns
No. grains/panicle (X ₁₉)	0.2254 ns	Y=3644.908+6.007X	0.0508	0.2148 ns
Percent of filled grains/panicle (X ₂₀)	-0.1072 ns	Y=5911.06-14.93X	0.0115	0.5593 ns
Panicle weight (X ₂₁)	0.3024 ns	Y=2596.9+557X	0.0915	0.0925 ns
100-grains weight (X ₂₂)	0.1229 ns	Y=3951+268.9X	0.0151	0.5027 ns

การศึกษาความดีเด่นของลูกผสม (เฮตเตอร์โรซิส; heterosis)

ในการศึกษาครั้งนี้แสดงผลการศึกษาความดีเด่นของลูกผสมชั่วที่ 1 ในสองลักษณะ ได้แก่ ความดีเด่นของลูกผสมเหนือค่าเฉลี่ยของพ่อแม่ (Relative heterosis หรือ Mid-parent heterosis หรือ heterosis) และความดีเด่นของลูกผสมที่เกินพ่อหรือแม่ที่ดีที่สุด เรียกว่า heterobeltiosis ดังแสดงในตารางที่ 13-32

การประเมินการแสดงออกของยีนเบื้องต้นจากข้อมูล heterosis จะใช้การอธิบายผลจากฟีโนไทป์ ทั้งนี้หากเป็นการแสดงออกของอิทธิพลยีนแบบบวก (Additive gene affects) จะมีค่าเฉลี่ยของลูกผสมที่ไม่แตกต่างทางสถิติหรือมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของพ่อและแม่ หากมีการข่มบางส่วน (Partial dominance gene affects) ปรากฏที่ลักษณะของฟีโนไทป์ ค่าเฉลี่ยของลูกผสมก็อาจแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของพ่อแต่ไม่เทียบเท่าการแสดงออกของพ่อหรือแม่ และสำหรับการข่ม (dominance gene affects) คือการแสดงออกของลูกผสมจะเท่ากับพ่อหรือแม่ที่สูงหรือต่ำที่สุด และการแสดงออกแบบข่มเกิน (overdominance gene affects) คือการแสดงออกของค่าเฉลี่ยของลูกอยู่เหนือขอบเขตการแสดงออกของพ่อหรือแม่ ทั้งนี้อาจมีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าก็ได้ (Hochholding and Hoecker, 2007; Schnable and Springer, 2013)

ลักษณะความสูง

เริ่มต้นที่การศึกษาลักษณะความดีเด่นของลูกผสมในลักษณะความสูงของต้น (วัดจากผิวดินถึงปลายใบธง) แต่จากการศึกษาตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2558 และ 2560 พบว่าความสูงของต้นไม่ได้มีความสัมพันธ์ทางลบต่อลักษณะที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการต้านทานการหักล้ม ด้วยเหตุนี้ในการศึกษาครั้งนี้พ่อหรือแม่ที่ดีที่สุดจึงยังคงเป็นพ่อหรือแม่ที่มีความสูงที่สุดนั่นเอง (ตารางที่ 13) ผลการศึกษาในทั้ง 18 คู่ผสมพบว่าในการศึกษา relative heterosis มีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของพ่อแม่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจำนวน 4 คู่ผสม แต่ในจำนวน 3 คู่ผสมมีค่าเป็นลบ มีค่าเฉลี่ยความสูงของลูกผสมในคู่ดังกล่าว (PLU-SU-002xPLU-SU-004, NYP-SU-001xPLU-SU-002, NYP-SU-001xCP-001) เท่ากับ 95, 81.75 และ 81.67 ซม. ตามลำดับ ขณะที่คู่ผสมเดียวที่มีค่า heterosis มีนัยสำคัญทางสถิติในทิศทางบวก ได้แก่ PLU-SU-005xPLU-SU-002 มีค่าเฉลี่ยลูกผสมเท่ากับ 137.14 ซม. และเมื่อทำการศึกษาค่า heterobeltiosis พบคู่ผสมที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าพ่อหรือแม่ที่มีความสูงมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจำนวน 5 คู่ผสม โดยมีค่าในทิศทางลบหรือมีความสูงลดลงจำนวน 4 คู่ผสม (PLU-SU-001xCM-001, PLU-SU-005xPLU-SU-003, NYP-SU-001xPLU-SU-002, NYP-SU-001xCP-001) และมีค่าเพิ่มขึ้น 1 คู่ผสม ได้แก่ PLU-SU-005xPLU-SU-002 โดยมีเปอร์เซ็นต์ heterosis และ heterobeltiosis เท่ากับ 20.94 และ 16.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ลักษณะต่อมาที่สัมพันธ์กับความสูงของต้น คือความสูงของลำต้นข้าว เมื่อทำการทดสอบเทียบกับค่าเฉลี่ยพ่อและแม่ และเทียบกับค่าเฉลี่ยของพ่อหรือแม่ที่ดีที่สุดพบว่ามีเพียงคู่ผสมเดียวที่พบนัยสำคัญทางสถิติยิ่ง ($P < 0.01$) เป็นพบค่าในทิศทางลบ ได้แก่ PLU-SU-001xCM-001 ที่มีเปอร์เซ็นต์ heterosis เท่ากับ -17.08 และเปอร์เซ็นต์ heterobeltiosis เท่ากับ -17.98 (ตารางที่ 14)

หากพิจารณาเฉพาะสองลักษณะนี้ คือความสูงต้นและความสูงลำต้น การแสดงออกของยีนไปทางการลดความสูงต้นและลำต้น หรือลักษณะของต้นเดี่ยวเป็นลักษณะข่ม แต่ทั้งนี้ก็มีลักษณะแนวโน้มไปทางการข่มเป็นแบบไม่

สมบูรณ์หรือข่มบางส่วน (incomplete dominant or partial dominance gene action) เช่นเดียวกับกับ รายงานของ Tao *et al.* (2016) ที่พบว่าการแสดงออกของยีนสำหรับความสูงต้นของ indica rice เป็นแบบข่มบางส่วนเช่นกัน แต่ก็มีบางการศึกษาที่พบว่าความสูงต้นมีการแสดงออกแบบข่มเกิน (Tang *et al.*, 2007)

ความสูงต้นเป็นลักษณะที่มีความสำคัญ แต่ทั้งนี้ขึ้นกับพันธุกรรมของพืชด้วย เช่น อายุการเก็บเกี่ยว โดย พันธุกรรมที่มีการแทงช่อดอกล่าช้ามักจะพบค่าความสูงลำต้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและอายุ ออกดอกขึ้นอยู่กับแต่ละพันธุกรรม (Ranawake and Amarasingh, 2014) มีการศึกษาพบว่าการปรับปรุงพันธุ์ เพื่อลดความสูงของพืชเพื่อให้ต้านทานการหักล้ม (Khush, 1999) โดยความสูงต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสม เช่น 70-100 เซนติเมตร ในข้าวสาลี เพื่อให้ได้ประโยชน์ในการสังเคราะห์แสงของพืชและต้านทานการหักล้ม (Flintham *et al.*, 1997) ขณะที่ข้าวสายพันธุ์ใหม่ (New Plant Type) มีการปรับปรุงพันธุ์เพื่อพัฒนา ความสามารถในการสังเคราะห์แสงในทรงพุ่ม โดยปรับปรุงให้มีความสูงประมาณ 100 เซนติเมตร (Kumar *et al.*, 1999) เพราะการลดความสูงลงจากนี้แม้จะทำให้สามารถต้านทานการหักล้มได้ แต่อาจกระทบประสิทธิภาพในการ สังเคราะห์แสงและส่งผลทำให้ผลผลิตลดลงได้ด้วยเช่นเดียวกัน (Flintham *et al.*, 1997) อย่างไรก็ตามอาจมีหลาย ปัจจัยนอกเหนือจากความสูงที่ส่งผลต่อการตั้งตรงหรือการหักล้มของพืช เช่น พันธุกรรม เป็นต้น (Ookawa and Ishihara, 1992; Terashima *et al.*, 1992; Easson *et al.*, 1993)

ตารางที่ 13 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for plant height (measured from soil base to flag leaf) (Higher parent = high plant height) (cm).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	117.60	106.29	105.00	115.67	102.63	95.00	110.00	95.00	111.20
P1	106.67	127.00	100.14	117.80	100.14	109.00	117.80	114.29	106.67
P2	119.25	114.29	117.80	114.29	106.67	111.75	106.67	106.67	109.00
Mid-parent	112.96	120.64	108.97	116.04	103.40	110.38	112.23	110.48	107.83
Heterosis (%) (H)	4.11	-11.90	-3.64	-0.32	-0.75	-13.93	-1.99	-14.01	3.12
t-test for H	1.4655 ns	-2.0290 ns	-0.4542 ns	-0.0672 ns	-0.1120 ns	-2.4923 *	ND	ND	0.7865 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-1.38	-16.31	-10.87	-1.81	-3.79	-14.99	-6.62	-16.88	2.02
t-test for Hb	-0.3508 ns	-2.5227 *	-1.3584 ns	-0.3294 ns	-0.5688 ns	-2.0383 ns	ND	ND	0.4467 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = or heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	111.75	137.14	120.00	104.00	92.50	105.00	81.75	80.00	81.67
P1	117.80	117.80	119.25	11.75	100.14	100.14	100.14	109.00	100.14
P2	106.67	109.00	111.75	114.29	127.00	117.80	109.00	117.80	119.25
Mid-parent	112.23	113.40	115.50	113.02	113.57	108.97	104.57	113.40	109.70
Heterosis (%) (H)	-0.43	20.94	3.90	-7.98	-18.55	-3.64	-21.82	-29.45	-25.55
t-test for H	-0.1763 ns	3.1583 **	1.1576 ns	ND	-1.6390 ns	-0.4542 ns	-4.3534 **	ND	-6.6843 **
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-5.14	16.42	0.63	-9.00	-27.17	-10.87	-25.00	-32.09	-31.52
t-test for Hb	-2.3227 *	2.3382 *	0.1772 ns	ND	-1.2234 ns	-1.3584 ns	-4.7608 **	ND	-6.9754 **

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 14 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for culm height (measured from soil base to base of panicle) (Higher parent = high culm height) (cm).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	85.50	74.29	90.00	87.67	76.83	75.00	77.00	70.00	79.29
P1	80.33	88.60	65.14	88.30	65.14	76.00	88.30	90.57	80.33
P2	90.00	90.57	88.30	90.57	85.50	80.63	80.63	80.33	76.00
Mid-parent	85.17	89.59	76.72	89.44	75.32	78.31	84.46	85.45	78.17
Heterosis (%) (H)	0.39	-17.08	17.31	-1.98	2.01	-4.23	-8.84	-18.08	1.43
t-test for H	0.1026 ns	-3.1249 **	ND	-0.3435 ns	0.2163 ns	ND	ND	ND	0.4733 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-5.00	-17.98	1.93	-3.21	-10.14	-6.98	-12.80	-22.71	-1.30
t-test for Hb	-0.8559 ns	-3.1981 **	ND	-0.5245 ns	-1.1614 ns	ND	ND	ND	-0.3575 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	ND	84.67	85.50	75.00	55.00	ND	ND	ND	ND
P1	88.30	83.30	90.00	80.63	65.14	65.14	65.14	76.00	65.14
P2	80.33	76.00	80.63	90.57	88.60	88.30	76.00	80.33	90.00
Mid-parent	84.32	82.15	85.31	85.60	76.87	76.72	70.57	78.17	77.57
Heterosis (%) (H)	ND	3.06	0.22	-12.38	-28.45	ND	ND	ND	ND
t-test for H	ND	0.7770 ns	0.0333 ns	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	ND	-4.11	-5.00	-17.19	-37.92	ND	ND	ND	ND
t-test for Hb	ND	-1.0698 ns	-0.6714 ns	ND	ND	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ลักษณะการหักล้ม

ลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการหักล้มของข้าวไร่ ประกอบด้วย การตั้งตรงของลำต้นที่ประเมินจากค่าองศาของลำต้นก่อนการโน้มต้นทั้งที่ประเมินโดยภาพรวมของทั้งแปลง (ตารางที่ 15) และการประเมินรายต้นจากต้นที่ต้องการทดสอบความสามารถในการสปริงตัวภายหลังการโน้มต้น (ตารางที่ 16) ค่าองศาต้นภายหลังการโน้มต้น (ตารางที่ 17) และค่าที่เกิดจากการคำนวณ ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นภายหลังการโน้มต้น (ตารางที่ 18) ซึ่งลักษณะชุดนี้ที่เกี่ยวข้องกับการตั้งตรงของพืชเป็นลักษณะที่สำคัญ ซึ่งการตั้งตรงของใบในทรงพุ่มโดยเฉพาะหลังการสร้างรวงจะส่งผลต่อการรับแสงและสังเคราะห์แสง (San-oh *et al.*, 2008) ของใบซึ่งส่งผลต่อการสร้างน้ำหนักแห้งของพืชและผลผลิตในที่สุด (Hay and Porter, 2006)

ผลการศึกษองศาของลำต้นก่อนการโน้มต้นที่ประเมินโดยภาพรวมของทั้งแปลง พบว่า ลูกผสมที่พบว่ามีค่า heterosis มีค่าเป็นบวกอันหมายถึงการมีค่าเฉลี่ยของลูกผสมสูงกว่าพ่อแม่ (มีจำนวน 9 คู่) ใกล้เคียงกับจำนวนลูกผสมที่มีค่า heterosis เป็นลบหรือมีค่าเฉลี่ยของลูกผสมต่ำกว่าพ่อแม่ (มีจำนวน 8 คู่) ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์ heterosis มีค่าค่อนข้างต่ำ คืออยู่ระหว่าง -7.95 ถึง 10.48 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 15) ขณะที่การศึกษา heterobeltiosis พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ลูกผสมที่เกินค่าเฉลี่ยพ่อหรือแม่ที่มีค่าสูงสุดแต่พบในทิศทางลบ จำนวน 10 คู่ผสม พบในทิศทางบวกจำนวน 7 คู่ผสม และให้ค่าเป็นศูนย์ จำนวน 1 คู่ผสม ทั้งนี้ พบการมีนัยสำคัญทางสถิติจำนวน 3 และ 2 คู่ผสมสำหรับ heterosis และ heterobeltiosis ตามลำดับ ที่มีค่าในทิศทางบวกทั้งหมด ได้แก่ PLU-SU-002xPLU-SU-004, NYP-SU-001xPLU-SU-002, NYP-SU-001xCP-001 โดยมีค่า heterosis (และ heterobeltiosis) เท่ากับ 9.36% (7.32%), 5.52%(1.56%) และ 5.82%(4.17%) ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ อาจมีความเป็นไปได้ที่ลักษณะการตั้งตรงของข้าวไร่ในกลุ่มพันธุ์กรรมที่ทำการศึกษานี้มีการแสดงออกของยีนแบบบวกแต่มีโอกาสในการเข้าไปคัดเลือกลักษณะต้นให้ตั้งตรงในลูกผสมได้

ผลการศึกษองศาของลำต้นก่อนการโน้มต้นที่ประเมินจากแต่ละต้น ให้ผลที่ใกล้เคียงกับการประเมินในภาพรวมที่พบเปอร์เซ็นต์ heterosis และ heterobeltiosis ค่อนข้างต่ำและพบทั้งทางบวกและลบ (ตารางที่ 16) ทั้งนี้พบค่า heterosis และ heterobeltiosis ที่มีนัยสำคัญทางสถิติจำนวน 3 คู่และ 1 คู่ผสมตามลำดับ โดยพันธุ์ที่พบนัยสำคัญทางสถิติของ heterosis ในทิศทางบวก (แม้จะไม่มีนัยสำคัญสำหรับ heterobeltiosis) ได้แก่ PLU-SU-002xPLU-SU-004 (7.76%) และ NYP-SU-001xCP-001 (4.93%) (ตารางที่ 16)

ทั้งนี้ การที่พืชมีต้นตั้งตรงในสภาพปกติจะมีความสามารถต้านทานการล้มหรือโน้มต้นทั้งจากแรงโน้มถ่วงลม หรือฝนได้ดีกว่า (Grafius and Brown, 1954; Neenan and Spencer-Smith, 1975; Jezowski *et al.*, 1987; Yuan *et al.*, 1988; Cenci *et al.*, 1984; Crook and Ennos, 1994)

ลักษณะองศาหลังการโน้มต้นที่ประเมินจากแต่ละต้น (ตารางที่ 17) พบค่าเปอร์เซ็นต์ heterosis ในทิศทางบวกจำนวน 16 คู่ผสมและพบในทิศทางลบจำนวน 2 คู่ผสม และเมื่อทำการประเมิน heterobeltiosis พบค่าเปอร์เซ็นต์ในทิศทางบวกจำนวน 10 คู่ผสมและพบในทิศทางลบ 8 คู่ผสม อย่างไรก็ตามพบเปอร์เซ็นต์ heterobeltiosis ทั้งในสองทิศทางมีค่าค่อนข้างสูงในหลายคู่ผสม -61.92 ถึง 144.57 เปอร์เซ็นต์

ด้วยเหตุนี้ สำหรับลักษณะนี้อาจประเมินได้ค่อนข้างยากถึงโอกาสในการแสดงออกของยีนที่ควบคุมลักษณะการสปริงตัวกลับของลำต้น แต่อย่างไรก็ตามลักษณะดังกล่าวนี้ ยังขึ้นกับลักษณะต้นก่อนการทดสอบ

เพราะต้นที่มีลักษณะตั้งตรงมีโอกาสนในการสปริงตัวกลับได้สูงกว่าต้นที่มีลักษณะเอนหรือล้มอยู่แล้ว ดังนั้นจำเป็นต้องประเมินเทียบกับองศาการตั้งตรงของลำต้นก่อนการหักล้ม ทำให้ต้องคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวกลับของลำต้นหลังการโน้มต้น ดังแสดงในตารางที่ 18

สำหรับลักษณะเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นหลังการโน้มต้นซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจากลักษณะองศาก่อนและหลังการโน้มต้น (จากค่าแต่ละต้น) (ตารางที่ 18) ผลการศึกษา heterosis พบค่าเปอร์เซ็นต์ในทิศทางบวกจำนวน 15 คู่ผสม และพบในทิศทางลบจำนวน 3 คู่ผสม โดยในทิศทางบวกมีเปอร์เซ็นต์ heterosis อยู่ระหว่าง 6.02 -135.89 เปอร์เซ็นต์ และในทิศทางลบมีค่าอยู่ระหว่าง -0.23 ถึง -76.31 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ heterobeltiosis พบทั้งในทิศทางบวก (จำนวน 11 คู่ผสม) และทิศทางลบ (จำนวน 7 คู่ผสม) โดยมีค่าสูงสุดในทิศทางบวกเท่ากับ 136.66 เปอร์เซ็นต์ และในทิศทางลบเท่ากับ -76.47 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นจากการพิจารณาการตั้งตรงและความสามารถในการสปริงลำต้นกลับของข้าวไร่ หลังการทดสอบการโน้มต้นแล้วพบว่า การตั้งตรงของต้นอาจถูกควบคุมด้วยการแสดงออกของยีนแบบบวก แต่ความสามารถในการสปริงตัวกลับของลำต้นนั้นประเมินทิศทางการแสดงออกของยีนที่ควบคุมลักษณะได้ค่อนข้างยาก เพราะพบทั้งการแสดง heterosis และ heterobeltiosis ในทั้งสองทิศทางและมีค่าต่ำถึงสูง รวมทั้งที่มีโอกาสพบการแสดงของลูกผสมที่สูงเกินค่าของพ่อแม่ที่มีค่าสูงที่สุดด้วย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมียีนที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการต้านทานการหักล้ม และความสามารถในการสปริงตัวกลับของลำต้นค่อนข้างมาก ทำให้การปรับปรุงพันธุ์และการคัดเลือกลักษณะเพื่อให้ได้ลูกที่มีความสามารถในการต้านทานการหักล้มทำได้ค่อนข้างยาก

ความยาวรวงเป็นลักษณะหนึ่งที่น่าจะบ่งชี้ความหนักของรวงที่อาจส่งผลต่อการรับน้ำหนักของลำต้นและส่งผลต่อการหักล้มของต้นข้าว และยังมีถึงโอกาสในการได้ผลผลิตที่ดีของข้าวด้วย (Tiwari *et al.*, 2011) ผลการศึกษาลักษณะความยาวรวงพบความดีเด่นของลูกผสมเทียบกับค่าเฉลี่ยพ่อแม่ในทิศทางลบ จำนวน 4 คู่ผสม และในทิศทางบวกจำนวน 6 คู่ผสม และมีค่าเปอร์เซ็นต์ heterosis สูงสุดไม่เกิน 31.20 เปอร์เซ็นต์ พบการเกิด heterosis และ heterobeltiosis ในทิศทางบวกและมีนัยสำคัญทางสถิติจำนวน 1 คู่ผสม ได้แก่ PLU-SU-005xCM-001 และพบในทิศทางลบ ได้แก่ CP-001xPLU-SU-002 (ตารางที่ 19) ดังนั้นจากการพิจารณาลักษณะความยาวรวงของข้าวไร่ หลังแล้วพบว่าอาจถูกควบคุมด้วยการแสดงออกของยีนแบบบวก แต่ก็มีการศึกษาในข้าวกลุ่ม indica เช่นกันที่พบการแสดงออกของความยาวรวงเป็นแบบข่มบางส่วน (partial dominance) (Tao *et al.*, 2016)

ตารางที่ 15 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for angle of stem before bending (measured from whole plot).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	80.0	80.0	82.5	77.2	73.1	82.5	85.0	75.0	77.5
P1	78.9	76.0	80.0	77.0	80.0	74.0	77.0	81.4	78.9
P2	77.5	81.4	77.0	81.4	78.9	76.9	76.9	78.9	74.0
Mid-parent	78.2	78.7	78.5	79.2	79.4	75.4	76.9	80.2	76.4
Heterosis (%) (H)	2.31	1.63	5.10	-2.51	-7.95	9.36	10.48	-6.44	138
t-test for H	1.5397 ns	0.7546 ns	2.3797	-0.7943 ns	-1.7378 ns	2.6823 *	ND	ND	0.4578 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	1.41	-1.75	3.12	-5.17	-8.59	7.32	10.39	-7.89	-1.76
t-test for Hb	0.8000 ns	-1.0000 ns	1.3817 ns	-1.6520 ns	-1.8619 ns	1.9912 *	ND	ND	-0.5442 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	72.5	77.9	72.5	75.0	80.0	75.0	81.2	75.0	83.3
P1	77.0	77.0	77.50	76.9	80.0	80.0	80.0	74.0	80.0
P2	78.9	74.0	76.9	81.4	76.0	77.0	74.0	77.0	77.5
Mid-parent	77.9	75.5	77.2	79.2	78.0	78.5	77.0	75.5	78.8
Heterosis (%) (H)	-6.98	3.12	-6.07	-5.25	2.56	-4.46	5.52	-0.66	5.82
t-test for H	-1.1150 ns	1.0252 ns	-1.7031 ns	ND	1.4917 ns	ND	2.9257 *	ND	2.3008 *
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-8.10	1.11	-6.45	-7.89	0.00	-6.25	1.56	-2.60	4.17
t-test for Hb	-1.2817 ns	0.3396 ns	-1.5954 ns	ND	0.0000 ns	ND	0.7537 ns	ND	1.6733 *

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 16 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for angle of stem before bending (measured from individual plant).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	79.5	77.9	81.2	76.1	73.1	82.5	80.0	75.0	78.5
P1	80.0	75.0	80.7	77.0	80.7	75.0	77.0	81.4	80.0
P2	78.1	81.4	77.0	81.4	80.0	78.1	78.1	80.0	75.0
Mid-parent	79.1	78.2	78.9	79.2	80.4	76.6	77.6	80.7	77.5
Heterosis (%) (H)	0.55	-0.46	3.03	-3.92	-9.00	7.76	3.14	-7.08	1.29
t-test for H	0.3988 ns	-0.1619 ns	1.6378 ns	-1.3399 ns	-1.9987 ns	2.2308 *	ND	ND	0.4219 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-0.62	-4.39	0.66	-6.53	-9.40	5.60	2.40	-7.89	-1.88
t-test for Hb	-0.3273 ns	-1.7321 ns	0.37211 ns	-2.2557 *	-2.1086 ns	1.6434 ns	ND	ND	-0.5859 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	72.5	76.4	72.5	75.0	80.0	75.0	78.8	75.0	83.3
P1	77.0	77.0	78.1	78.1	80.7	80.7	80.7	75.0	80.7
P2	80.0	75.0	78.1	81.4	75.0	77.0	75.0	77.0	78.1
Mid-parent	78.5	76.0	78.1	79.8	77.9	78.9	77.9	76.0	79.4
Heterosis (%) (H)	-7.64	0.56	-7.20	-5.99	2.75	-4.89	1.15	-1.32	4.93
t-test for H	-1.2278 ns	0.2067 ns	-2.1427 *	NA	1.8257 ns	ND	0.2736 ns	ND	2.1422 *
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-9.38	-0.72	-7.20	-7.89	-0.88	-2.60	-2.43	-2.60	3.24
t-test for Hb	-1.5000 ns	-0.2553 ns	-1.9912 ns	NA	-1.0000 ns	ND	-0.6089 ns	ND	1.4444 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 17 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for angle of stem after bending (measured from individual plant).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	28.0	29.3	38.8	26.1	28.8	32.5	30.0	30.0	30.0
P1	36.1	21.8	20.7	21.0	20.7	23.0	21.0	22.9	36.1
P2	16.5	22.9	21.0	22.9	36.1	22.2	22.2	36.1	23.0
Mid-parent	26.3	22.3	20.9	21.9	28.4	22.6	21.6	29.5	29.6
Heterosis (%) (H)	6.44	31.16	85.79	19.07	1.19	43.64	38.7	1.75	1.50
t-test for H	0.3339 ns	2.0201 ns	5.7753 **	0.9823 ns	0.0595 ns	0.5599 ns	ND	ND	0.1039 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-22.46	28.12	84.52	14.24	-20.38	41.30	34.83	-16.92	-16.92
t-test for Hb	-1.1039 ns	1.6164 ns	6.7055 **	0.6672 ns	-0.9736 ns	0.5372 ns	ND	ND	-0.8792 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	13.8	30.0	20.0	5.0	42.5	30.0	56.2	25.0	46.7
P1	21.0	21.0	16.5	22.2	20.7	20.7	20.7	23.0	20.7
P2	36.1	23.0	22.2	22.9	21.8	36.1	23.0	21.0	16.5
Mid-parent	28.6	22.0	19.4	22.6	21.3	28.4	21.9	22.0	18.6
Heterosis (%) (H)	-51.85	36.36	3.23	-77.83	99.93	5.59	157.35	13.64	150.80
t-test for H	-1.9938 ns	2.2618 *	0.0605 ns	ND	1.6488 ns	ND	6.2077 **	ND	2.6411 *
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-61.92	30.43	-10.11	-78.12	94.95	-16.92	144.57	8.70	125.29
t-test for Hb	-2.4192 *	1.7487 ns	-0.2121 ns	ND	1.5947 ns	ND	6.1855 **	ND	2.2808 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 18 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for springiness percentage.

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	35.25	37.54	47.70	33.75	39.80	40.07	37.50	40.00	37.66
P1	44.85	29.32	25.84	27.21	25.84	30.64	27.21	27.94	44.85
P2	21.64	27.94	27.21	27.94	44.85	28.33	28.33	44.85	30.64
Mid-parent	33.25	28.63	26.53	27.58	35.35	29.49	27.77	36.40	37.75
Heterosis (%) (H)	6.02	31.11	79.82	22.38	12.60	35.90	35.02	9.90	-0.23
t-test for H	0.3163 ns	2.1001 ns	5.5061 **	1.2088 ns	1.8370 ns	0.4686 ns	ND	ND	-0.0181 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-21.41	28.03	75.28	20.79	-11.27	30.78	32.35	-10.82	-16.04
t-test for Hb	-1.1091 ns	1.4070 ns	6.3401 **	1.0031 ns	-0.6180 ns	0.4162 ns	ND	ND	-0.9027 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	18.82	38.90	27.14	6.67	53.12	47.70	72.52	33.33	56.00
P1	27.21	27.21	21.64	28.33	25.84	25.84	25.84	30.64	25.84
P2	44.85	30.64	28.33	27.94	29.32	27.21	30.64	27.21	21.64
Mid-parent	36.03	28.93	24.99	28.14	27.58	26.53	28.24	28.93	23.74
Heterosis (%) (H)	-47.76	34.47	8.62	-76.31	92.62	79.82	156.78	15.23	135.89
t-test for H	-1.7992 ns	2.5427 *	0.1618 ns	ND	1.5809 ns	5.5061 **	4.4004 **	ND	2.5572 *
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-58.03	26.94	-4.20	-76.47	81.18	75.28	136.66	8.78	116.73
t-test for Hb	-2.2680 *	1.7494 ns	-0.0877 ns	ND	1.4490 ns	6.3400 **	4.2179 99	ND	2.2276 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 19 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for panicle length (cm).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	24.60	24.17	ND	27.00	20.92	24.00	25.00	ND	ND
P1	20.33	25.50	22.92	21.30	22.92	22.40	21.30	19.86	20.33
P2	23.57	19.86	21.30	19.86	20.33	21.62	21.62	20.33	22.40
Mid-parent	21.95	22.68	22.11	20.58	21.62	22.01	21.46	20.10	21.37
Heterosis (%) (H)	12.06	6.56	ND	31.20	-3.28	9.03	16.48	ND	ND
t-test for H	1.2192 ns	0.5608 ns	ND	3.9251 **	-0.4159 ns	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	4.36	-5.23	ND	26.76	-8.73	7.14	15.61	ND	ND
t-test for Hb	0.4515 ns	-0.3508 ns	ND	3.2545 **	-0.8368 ns	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	ND	21.00	18.00	24.00	17.00	ND	ND	ND	ND
P1	21.30	21.30	23.57	21.62	22.92	22.92	22.92	22.40	22.92
P2	20.33	22.40	21.62	19.86	25.50	21.30	22.40	21.30	23.57
Mid-parent	20.82	21.85	22.60	20.74	24.21	22.11	22.66	21.85	23.24
Heterosis (%) (H)	ND	-3.89	-20.35	15.71	-29.78	ND	ND	ND	ND
t-test for H	ND	ND	-7.7843 **	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	ND	-6.25	-23.64	10.98	-33.33	ND	ND	ND	ND
t-test for Hb	ND	ND	-4.1633 **	ND	ND	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ลักษณะทางกายภาพของลำต้น

ลักษณะทางกายภาพของลำต้นที่บ่งชี้จากลักษณะปล้องที่ 1 และ 2 ได้แก่ ความยาวปล้อง เส้นผ่าศูนย์กลางปล้องและความหนาของผนังปล้อง ได้แสดงความดีเด่นของลูกผสม ในตารางที่ 20-25

ผลการศึกษาคความยาวปล้องที่ 1 ของข้าวไร่ลูกผสม พบความดีเด่นเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยพ่อแม่ทั้งในทิศทางบวก (จำนวน 12 คู่ผสม) และทิศทางลบ (จำนวน 6 คู่ผสม) โดยมีเปอร์เซ็นต์ heterosis ในทิศทางบวกอยู่ระหว่าง 2.17-132.01 เปอร์เซ็นต์ และในทิศทางลบมีค่าอยู่ระหว่าง -1.94 ถึง -43.89 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้มีนัยสำคัญทางสถิติทั้งหมด 5 คู่ผสม โดยแสดงในทิศทาง heterosis แบบบวกจำนวน 3 คู่ผสม และแบบลบ จำนวน 2 คู่ผสม (ตารางที่ 20) แต่จากการศึกษาคความสัมพันธ์ระหว่างความยาวปล้องกับความสามารถในการต้านทานการหักล้มที่ประเมินจากการตั้งตรงของต้นและเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นหลังการหักล้ม พบว่าการมีความปล้องที่ 1 และ 2 มีโอกาสได้ต้นที่ตั้งตรงและต้านทานต่อการหักล้มหรือการโน้มต้นมากกว่า ด้วยเหตุนี้ ในการพิจารณา heterosis และ heterobeltiosis จะพิจารณาค่าในทิศทางลบเป็นหลัก และในการศึกษา heterobeltiosis จะเปรียบเทียบกับพ่อหรือแม่ที่มีค่าปล้องสั้นด้วยเช่นกัน

ผลการศึกษาพบการมีเปอร์เซ็นต์ heterosis ในทิศทางลบจำนวน 6 คู่ผสม นั่นคือโอกาสในการได้ลูกผสมที่มีความยาวปล้องลดลง ดังนั้นคู่ผสมที่มีนัยสำคัญทางสถิติของ heterosis ที่มีทิศทางลบ ได้แก่ PLU-SU-001xCM-001 และ PLU-SU-005xCM-001 อย่างไรก็ตามในทั้งสองคู่ผสมนี้เมื่อประเมินลูกผสมเทียบกับพ่อแม่ที่มีปล้องที่ 1 สั้นกว่าแล้ว กลับไม่พบว่ามีความนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 20) การพบค่า heterosis ในทิศทางทั้งบวกและลบและมีค่าหลากหลาย จึงอาจกล่าวได้ว่าลักษณะดังกล่าวน่าจะแสดงอิทธิพลแบบบวก แต่การพบความหลากหลายของค่าเปอร์เซ็นต์อาจเกี่ยวข้องกับจำนวนยีนที่ควบคุมลักษณะที่น่าจะเป็นลักษณะเชิงปริมาณ หรือ Additive multiplicative interaction

ความยาวปล้องแรก เมื่อมีค่าสูงมีโอกาสที่ข้าวมีการยืดหยุ่นหรือสปริงตัวได้ดี เช่นเดียวกับการศึกษาของ Kelbert *et al.* (2004) และ Verma *et al.* (2005) ที่พบความสัมพันธ์ทางลบระหว่างความยาวปล้องกับการตั้งตรงของพืช จากผลการศึกษาอาจกล่าวได้ว่าข้าวพันธุ์ที่มีลักษณะเดิมตั้งตรง และมีค่าองศาหลังการโน้มต้นสูง หรือมีความแตกต่างขององศาหลังการโน้มต้นน้อย การมีปล้องแรกสั้นของข้าว ทำให้โอกาสเกิดการสปริงตัวของลำต้นได้ดี เช่นเดียวกับการศึกษาความยืดหยุ่นของต้นพบปล้องและข้อที่มีอิทธิพลต่อการยืดหยุ่นของต้นจะอยู่ในตำแหน่งล่างของลำต้นมากกว่าตำแหน่งบน และพบว่าค่าการยืดหยุ่นของข้อมีค่าสูงกว่าปล้อง (Kaack and Schwarz, 2001) จากการสังเกต ความยาวปล้องแรกของข้าวไร่มีบางส่วนอยู่ใต้ดิน ซึ่งความยาวปล้องล่างสั้นอาจหมายถึงการมีปล้องบางส่วนอยู่ใต้ดินซึ่งช่วยต้านทานการหักล้ม (Yadav *et al.*, 1980; Jezowski *et al.*, 1987; Dunn and Briggs 1989; Oehme, 1989)

นอกเหนือจากความยาวปล้องแรกแล้ว องค์ประกอบภายใน เช่น ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ (soluble carbohydrate content) และการมีค่าคลินินสูงในปล้องแรก ก็มีผลต่อความต้านทานต่อการหักล้ม เช่นเดียวกัน (Li, 1998; Ma, 2009) ด้วยเหตุนี้การพิจารณานอกจากลักษณะทางกายภาพภายนอกแล้ว องค์ประกอบภายในจึงควรนำมาพิจารณาร่วมกันอีกครั้งหนึ่ง

ลักษณะความยาวปล้องที่ 2 ของข้าวไร่ พบค่า heterosis ในทิศทางลบจำนวน 13 คู่ผสม มีค่าเปอร์เซ็นต์ heterosis อยู่ระหว่าง -0.26 ถึง -45.95 เปอร์เซ็นต์ และทิศทางบวกจำนวน 3 คู่ผสม มีค่าเปอร์เซ็นต์ heterosis อยู่ระหว่าง 0.27-6.26 เปอร์เซ็นต์ แต่พบนัยสำคัญทางสถิติสำหรับค่า heterosis จำนวน 7 คู่ผสมในทิศทางลบทั้งหมด สำหรับการประเมิน heterobeltiosis พบว่ามีนัยสำคัญทางสถิติจำนวน 3 คู่ผสมในทิศทางลบทั้งหมด ได้แก่ คู่ผสม PLU-SU-001xCM-001, PLU-SU-005xCM-001 และ PLU-SU-003xPLU-SU-002 โดยมีเปอร์เซ็นต์ heterobeltiosis เท่ากับ -21.46%, -27.83% และ -19.00% ตามลำดับ (ตารางที่ 21) จากข้อมูลที่ได้ อาจประเมินได้ว่าการแสดงออกของยีนที่ควบคุมความยาวของปล้องที่สองของข้าวไร่น่าจะเกี่ยวกับลักษณะยีนแบบข่มที่ลักษณะปล้องสั้นเป็นยีนข่ม แต่การแสดงออกเป็นแบบข่มไม่สมบูรณ์

ลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่ 1 และ 2 แสดงในตารางที่ 22-23 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าความยาวปล้องที่ 1 มีค่า heterosis ทั้งบวกและลบ แต่พบในทิศทางลบมากกว่า โดยพบในทิศทางบวกจำนวน 3 คู่ผสม (มีเปอร์เซ็นต์ heterosis อยู่ระหว่าง 0.21-46.41 เปอร์เซ็นต์) และพบในทิศทางลบจำนวน 15 คู่ผสม (มีเปอร์เซ็นต์ heterosis อยู่ระหว่าง -5.76 ถึง -44.86 เปอร์เซ็นต์) พบนัยสำคัญทางสถิติสำหรับการประเมิน heterosis ใน 3 คู่ผสม ในทิศทางลบทั้งหมด ได้แก่ คู่ผสม NYP-SU-001xPLU-SU-003 (-14.41%), PLU-SU-005xPLU-SU-003 (-29.01%) และ CP-001xPLU-SU-004 (-22.25%) และสำหรับการประเมิน heterobeltiosis พบค่านัยสำคัญทางสถิติใน 4 คู่ผสม ที่มีค่าในทิศทางลบทั้งหมด ได้แก่ PLU-SU-003xCP-001, PLU-SU-005xPLU-SU-003, CP-001xPLU-SU-004 และ NYP-SU-001xCP-001 โดยมีเปอร์เซ็นต์ heterobeltiosis เท่ากับ -10.40%, -29.99%, -29.45% และ -15.34% ตามลำดับ (ตารางที่ 22) ด้วยเหตุนี้ อาจประเมินได้ว่าการแสดงออกของยีนที่ควบคุมเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่ 1 ของข้าวไร่น่าจะเกี่ยวกับลักษณะยีนแบบข่มที่ลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องน้อยเป็นยีนข่ม แต่การแสดงออกเป็นแบบข่มไม่สมบูรณ์

อย่างไรก็ตาม ลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่หนามีโอกาสได้ต้นตั้งตรงและเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหักล้มของลำต้นได้ ซึ่งพบในคู่ผสมจำนวนน้อยคู่และไม่มียีนสำคัญทางสถิติทั้ง heterosis และ heterobeltiosis

ลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่ 2 พบค่า heterosis ทั้งบวกและลบ แต่พบในทิศทางลบมากกว่า โดยพบในทิศทางบวกจำนวน 6 คู่ผสม (มีเปอร์เซ็นต์ heterosis อยู่ระหว่าง 1.88-33.24 เปอร์เซ็นต์) และพบในทิศทางลบจำนวน 10 คู่ผสม (มีเปอร์เซ็นต์ heterosis อยู่ระหว่าง -2.38 ถึง -89.28 เปอร์เซ็นต์) พบนัยสำคัญทางสถิติสำหรับการประเมิน heterosis ใน 3 คู่ผสม ในทิศทางบวก 1 คู่ผสมและพบในทิศทางลบจำนวน 2 คู่ผสม และสำหรับการประเมิน heterobeltiosis พบค่านัยสำคัญทางสถิติใน 2 คู่ผสม ที่มีค่าในทิศทางลบทั้งหมด ได้แก่ PLU-SU-005xPLU-SU-003 (-26.96%) และ CP-001xPLU-SU-004 (-87.17%) (ตารางที่ 23) ด้วยเหตุนี้ อาจประเมินได้ว่าการแสดงออกของยีนที่ควบคุมเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่ 2 ของข้าวไร่น่าจะเกี่ยวกับลักษณะยีนแบบข่มที่ลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องน้อยเป็นยีนข่ม แต่การแสดงออกเป็นแบบข่มไม่สมบูรณ์ เช่นเดียวกันกับการแสดงออกของยีนที่ควบคุมเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่ 1

จากที่มีการศึกษาความสัมพันธ์ของลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่หนามีโอกาสได้ต้นตั้งตรงและเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหักล้มของลำต้นได้ การพบ heterosis และ heterobeltiosis ในทิศทางลบ อาจทำให้การพัฒนาพันธุ์และการปรับปรุงพันธุ์ต้องดำเนินการอย่างระมัดระวังมากขึ้น

ลักษณะทางกายภาพสุดท้ายของลำต้นที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ คือความหนาของผนังปล้องทั้งปล้องที่ 1 และปล้องที่ 2 ซึ่งเป็นอีกลักษณะหนึ่งที่มีความสัมพันธ์ทางบวกกับการตั้งตรงของลำต้นและความสามารถในการต้านทานการหักล้ม ทั้งองศาหลังการโน้มต้นและเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นหลังการหักล้ม ผลการศึกษาพบว่า ลักษณะความหนาของผนังปล้องที่ 1 พบค่า heterosis ทั้งทางบวก (จำนวน 10 คู่ผสม) (มีเปอร์เซ็นต์ heterosis อยู่ระหว่าง 10-109.07 เปอร์เซ็นต์) และทางลบ (จำนวน 8 คู่ผสม) (มีเปอร์เซ็นต์ heterosis อยู่ระหว่าง -2.55 ถึง -35.48 เปอร์เซ็นต์) พบนัยสำคัญทางสถิติสำหรับการประเมิน heterosis ใน 5 คู่ผสม ในทิศทางบวก 4 คู่ผสม (NYP-SU-001xPLU-SU-005, PLU-SU-005xCM-001, NYP-SU-001xPLU-SU-002, NYP-SU-001xCP-001) และพบในทิศทางลบจำนวน 1 คู่ผสม (PLU-SU-005xPLU-SU-002) สำหรับการประเมิน heterobeltiosis พบค่านัยสำคัญทางสถิติใน 3 คู่ผสม ที่มีค่าในทิศทางบวก จำนวน 2 คู่ผสม ได้แก่ NYP-SU-001xPLU-SU-002 (50.94%) และ NYP-SU-001xCP-001 (89.37%) และมีค่าในทิศทางลบ จำนวน 1 คู่ผสม ได้แก่ PLU-SU-005xPLU-SU-002 (-44.74%) (ตารางที่ 24) ด้วยเหตุนี้ อาจประเมินได้ว่าการแสดงออกของยีนที่ควบคุมความหนาของผนังปล้องที่ 1 ของข้าวไร่ น่าจะเกี่ยวกับการแสดงออกของยีนในลักษณะเชิงปริมาณ ทำให้ประเมินพบความหลากหลายของฟีโนไทป์ในลักษณะดังกล่าว

ลักษณะความหนาของผนังปล้องทั้งปล้องที่ 2 ซึ่งเป็นอีกลักษณะหนึ่งที่มีความสัมพันธ์ทางบวกกับการตั้งตรงของลำต้นและความสามารถในการต้านทานการหักล้ม ทั้งองศาหลังการโน้มต้นและเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นหลังการหักล้มเช่นเดียวกัน ผลการศึกษาพบค่า heterosis ทั้งทางบวก (จำนวน 12 คู่ผสม) (มีเปอร์เซ็นต์ heterosis อยู่ระหว่าง 1.73-156.34 เปอร์เซ็นต์) และทางลบ (จำนวน 4 คู่ผสม) (มีเปอร์เซ็นต์ heterosis อยู่ระหว่าง -3.96 ถึง -40.30 เปอร์เซ็นต์) พบนัยสำคัญทางสถิติสำหรับการประเมิน heterosis ใน 3 คู่ผสม ในทิศทางบวกทั้งหมด (PLU-SU-001xCM-001, PLU-SU-005xCM-001, PLU-SU-002xPLU-SU-004) สำหรับการประเมิน heterobeltiosis ไม่พบว่ามีคู่ผสมใดที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 25) ด้วยเหตุนี้ อาจประเมินได้ว่าการแสดงออกของยีนที่ควบคุมความหนาของผนังปล้องที่ 2 ของข้าวไร่ น่าจะเกี่ยวกับการแสดงออกของยีนในลักษณะเชิงปริมาณเช่นเดียวกันกับความหนาของผนังปล้องที่ 1 ทำให้ประเมินพบความหลากหลายของฟีโนไทป์ในลักษณะดังกล่าว (Additive multiplicative interaction)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการมีความยาวปล้องล่างที่สั้นจะช่วยต้านทานการหักล้มในข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ และข้าวไรย์ (Yadav *et al.*, 1980; Jezowski *et al.*, 1987; Dunn and Briggs 1989; Oehme, 1989) ขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางของปล้องซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุกรรมของพืชและฤดูกาลในการปลูก (Kaack and Schwarz, 2001) พบว่าในกลุ่มธัญพืช (ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวไรย์ และข้าว) การมีเส้นผ่าศูนย์กลางลำต้นที่ใหญ่จะช่วยต้านทานการหักล้ม (Norden and Frey, 1959; Jellum, 1962; Mukherjee *et al.*, 1967; Jezowski *et al.*, 1987; Dunn and Briggs, 1989) เช่นเดียวกับความหนาของลำต้นในธัญพืชจะช่วยส่งเสริมการต้านทานการหักล้มเช่นเดียวกัน (Dunn and Briggs, 1989; Yuan *et al.*, 1988)

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการมีเส้นผ่าศูนย์กลาง และความหนาของลำต้นพบว่าส่งผลต่อการหักล้มของพืช (Verma *et al.*, 2005) แต่โดยแท้จริงแล้วการหักล้มของพืชขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือดินคือการมีความแข็งแรงของแรงยึด (tensile strength) ของปล้องแรก และส่วนที่ 2 คือการฉีกขาดของราก (Karim and Jahan, 2013) ด้วยเหตุนี้ การปฏิบัติที่ไม่เหมาะสม เช่น การปลูกโดยใช้จำนวนเมล็ดหนาแน่นอาจทำให้ความยาวลำต้นเพิ่มสูงขึ้น และลดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้น รวมทั้งปริมาณหรือจำนวนรากอาจลดลง ส่งผลให้ข้าวไม่มีโอกาสหักล้มเพิ่มสูงขึ้น (Keller *et al.*, 1999)

ด้วยเหตุนี้ ลักษณะความยาวปล้องแรก เส้นผ่าศูนย์กลางปล้องแรก (ปล้องล่างสุด) และความหนาปล้องกลาง น่าจะเป็นลักษณะที่ใช้ในการทำนายความสามารถในการต้านทานการหักล้มได้ โดยการมีความยาวปล้องแรกสั้น และการมีค่าของลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องแรกรวมทั้งความหนาของปล้องกลางสูง อาจสามารถใช้ทำนายพันธุ์กรรมที่มีความสามารถต้านทานการหักล้มได้ดี ด้วยเหตุนี้ การสามารถคาดคะเนการแสดงออกของยีนมีความสำคัญต่อการวางแผนการปรับปรุงพันธุ์ข้าวได้

ตารางที่ 20 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for 1st internode length (best parent indicated from shorter internode) (cm).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	14.10	10.29	14.50	12.06	15.75	10.00	12.00	9.00	13.50
P1	10.44	16.70	13.43	14.10	13.43	9.20	14.10	18.14	10.44
P2	11.19	18.14	14.10	18.14	10.44	10.38	10.38	10.44	9.20
Mid-parent	10.82	17.42	13.76	16.12	11.94	9.79	12.24	14.29	9.82
Heterosis (%) (H)	30.36	-40.96	5.35	-25.22	31.95	2.17	-1.94	-37.04	37.44
t-test for H	1.6230 ns	-3.4793 **	0.3585 ns	-2.7517 *	1.4761 ns	0.2186 ns	ND	ND	3.0843 **
Heterobeltiosis (%) (Hb)	35.00	-38.41	7.98	-14.50	50.80	8.70	15.66	-13.83	46.74
t-test for Hb	1.8748 ns	-2.0200 ns	0.3743 ns	-1.1246 ns	2.2489 *	0.7493 ns	ND	ND	2.9318 *

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	13.00	15.00	15.50	8.00	13.00	15.00	26.25	12.00	25.33
P1	14.10	14.10	11.19	10.38	13.43	13.43	13.43	9.20	13.43
P2	10.44	9.20	10.38	18.14	16.70	14.10	9.20	14.10	11.19
Mid-parent	12.27	11.65	10.78	14.26	15.06	13.76	11.31	11.65	12.31
Heterosis (%) (H)	5.93	28.76	43.77	-43.89	-13.70	8.98	132.01	3.00	105.83
t-test for H	0.3751 ns	1.2167 ns	0.8397 ns	ND	-0.7515 ns	ND	9.7765 **	ND	5.8641 **
Heterobeltiosis (%) (Hb)	24.47	63.04	49.40	-22.89	-3.19	11.70	185.33	30.43	126.44
t-test for Hb	1.3343 ns	2.0556 ns	0.8936 ns	ND	-0.1359 ns	ND	13.0671 **	ND	6.0562 **

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 21 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for 2nd internode length (best parent indicated from shorter internode) (cm).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	18.00	19.93	18.50	16.89	17.58	16.67	15.00	20.00	14.40
P1	17.78	25.38	22.43	23.40	22.43	21.00	23.40	28.43	17.78
P2	18.12	28.43	23.40	28.43	17.78	18.62	18.62	17.78	21.00
Mid-parent	17.95	26.90	22.91	25.91	20.10	19.81	21.01	23.10	19.39
Heterosis (%) (H)	0.27	-25.92	-19.26	-34.83	-12.53	-15.88	-28.61	-13.43	-25.73
t-test for H	0.0248 ns	-3.9447 **	-2.3143 *	-8.9378 **	-1.2845 ns	-2.9333 *	ND	ND	-5.5509 **
Heterobeltiosis (%) (Hb)	1.25	-21.46	-17.52	-27.83	-1.09	-10.51	-19.46	12.50	-19.00
t-test for Hb	0.1128 ns	-3.1619 *	-1.5319 ns	-4.9375 **	-0.1063 ns	-1.1935 ns	ND	ND	-3.0300 **

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	16.25	22.14	18.50	25.00	18.00	18.50	ND	12.00	ND
P1	23.40	23.40	18.12	18.62	22.43	22.42	22.43	21.00	22.43
P2	17.78	21.00	18.62	28.43	25.38	23.40	21.00	23.40	18.12
Mid-parent	20.59	22.20	18.38	23.53	23.90	22.91	21.71	22.20	20.28
Heterosis (%) (H)	-21.07	-0.26	0.68	6.26	-24.69	-19.26	ND	-45.95	ND
t-test for H	-1.3144 ns	-0.0258 ns	0.0461 ns	ND	-5.6375 **	-2.3143 *	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-8.59	5.44	2.07	34.23	-19.75	-17.52	ND	-42.86	ND
t-test for Hb	-0.4569 ns	0.5099 ns	0.1296 ns	ND	-2.1291 ns	-1.5319 ns	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 22 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for 1st internode diameter (best parent indicated from wider internode) (cm).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	0.635	0.537	0.580	0.674	0.570	0.600	0.540	0.340	0.591
P1	0.663	0.570	0.669	0.682	0.669	0.620	0.682	0.570	0.663
P2	0.709	0.570	0.682	0.570	0.663	0.578	0.578	0.663	0.620
Mid-parent	0.686	0.570	0.675	0.626	0.666	0.599	0.630	0.617	0.642
Heterosis (%) (H)	-7.4	-5.76	-14.11	7.74	-14.41	0.21	-14.25	-44.86	-7.90
t-test for H	-1.9714 ns	-0.5970 ns	-1.9336 ns	1.6010 ns	-2.2308 *	0.0260 ns	ND	ND	-1.3631 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-10.41	-5.76	-14.96	-1.11	-14.74	-3.26	-20.82	-48.74	-10.90
t-test for Hb	-2.8840 *	-0.4016 ns	-1.8802 ns	-0.1916 ns	-2.0182 ns	-0.3475 ns	ND	ND	-1.5772 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	0.478	0.606	0.500	0.840	0.580	0.580	0.575	0.480	0.600
P1	0.682	0.682	0.709	0.578	0.669	0.669	0.669	0.620	0.669
P2	0.663	0.620	0.578	0.570	0.570	0.682	0.620	0.682	0.709
Mid-parent	0.673	0.651	0.643	0.574	0.619	0.675	0.644	0.651	0.689
Heterosis (%) (H)	-29.01	-6.96	-22.25	46.41	-6.34	-14.11	-10.75	-26.27	-12.87
t-test for H	-4.5663 **	-0.9438 ns	-3.9844 **	ND	-0.3650 ns	-1.9336 ns	-0.8423 ns	ND	-2.0536 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-29.99	-11.19	-29.45	45.45	-13.25	-14.96	-14.00	-29.62	-15.34
t-test for Hb	-4.2962 **	-1.4676 ns	-3.3857 **	ND	-0.8361 ns	-1.8802 ns	-1.098 ns	ND	-2.5254 *

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 23 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for 2nd internode diameter (best parent indicated from wider internode) (cm).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	0.585	0.484	0.565	0.667	0.435	0.553	0.470	0.260	0.511
P1	0.547	0.485	0.559	0.599	0.559	0.520	0.599	0.466	0.547
P2	0.662	0.466	0.599	0.466	0.547	0.540	0.540	0.547	0.520
Mid-parent	0.605	0.475	0.579	0.532	0.553	0.530	0.570	0.506	0.533
Heterosis (%) (H)	-3.24	1.88	-2.38	25.23	-21.28	4.40	-17.47	-48.64	-4.19
t-test for H	-0.4718 ns	0.1650 ns	-0.2622 ns	5.4522 **	-0.4322 ns	0.6359 ns	ND	ND	-0.4101 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-11.70	-0.15	-5.68	11.30	-22.12	2.47	-21.54	-52.44	-6.52
t-test for Hb	-1.1949 ns	-0.0118 ns	-0.6466 ns	2.0818 ns	-0.4506 ns	0.3231 ns	ND	ND	-0.6063 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	0.438	0.579	0.085	0.670	0.460	0.610	ND	0.380	ND
P1	0.599	0.599	0.662	0.540	0.559	0.5586	0.559	0.520	0.559
P2	0.547	0.520	0.540	0.466	0.485	0.599	0.520	0.599	0.662
Mid-parent	0.573	0.560	0.601	0.503	0.522	0.579	0.539	0.560	0.610
Heterosis (%) (H)	-23.63	3.41	-85.86	33.24	-11.84	5.39	ND	-89.28	ND
t-test for H	-6.2771 **	0.3808 ns	-13.9703 **	ND	-0.8236 ns	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-26.96	-3.41	-87.17	24.07	-17.65	1.84	ND	-36.56	ND
t-test for Hb	-6.2731 **	-0.3958 ns	-9.2527 **	ND	-1.1981 ns	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 24 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for 1st internode wall thickness (best parent indicated from wider thickness) (cm).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	0.085	0.089	0.082	0.081	0.108	0.113	0.070	0.060	0.089
P1	0.094	0.082	0.070	0.080	0.070	0.106	0.080	0.057	0.094
P2	0.086	0.057	0.080	0.057	0.094	0.084	0.084	0.094	0.106
Mid-parent	0.090	0.070	0.075	0.069	0.082	0.095	0.082	0.076	0.100
Heterosis (%) (H)	-5.92	27.31	10.00	18.29	30.74	19.46	-14.50	-20.84	-11.20
t-test for H	-0.6149 ns	1.5034 ns	1.2042 **	2.1311 *	1.5471 ns	1.2487 ns	ND	ND	-1.2098 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-10.00	8.01	3.12	1.39	13.82	6.92	-16.42	-36.47	-16.04
t-test for Hb	-1.0327 ns	0.4385 ns	0.4286 ns	0.1818 ns	0.7673 ns	0.4353 ns	ND	ND	-1.3714 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	0.085	0.059	0.070	0.140	0.095	0.082	0.160	0.060	0.163
P1	0.080	0.080	0.086	0.084	0.070	0.070	0.070	0.106	0.070
P2	0.094	0.106	0.084	0.057	0.082	0.080	0.106	0.080	0.086
Mid-parent	0.087	0.093	0.085	0.070	0.076	0.075	0.088	0.093	0.078
Heterosis (%) (H)	-2.55	-37.02	-17.65	98.73	25.00	10.00	81.82	-35.48	109.07
t-test for H	-0.2961 ns	-3.7632 **	-1.2594 ns	ND	0.7387 ns	1.2042 ns	9.5990 **	ND	7.8276 **
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-10.00	-44.74	-18.84	67.16	15.85	3.12	50.94	-43.40	89.37
t-test for Hb	-1.0000 ns	-3.7446 **	-1.1200 ns	ND	0.4848 ns	0.4286 ns	4.8756 **	ND	5.6179 **

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 25 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for 2nd internode wall thickness (best parent indicated from wider thickness) (cm).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	0.063	0.073	0.080	0.086	0.063	0.097	0.070	0.050	0.072
P1	0.066	0.048	0.054	0.058	0.054	0.076	0.058	0.039	0.066
P2	0.066	0.039	0.058	0.039	0.066	0.063	0.063	0.066	0.076
Mid-parent	0.066	0.043	0.056	0.048	0.060	0.069	0.060	0.052	0.071
Heterosis (%) (H)	-4.40	69.29	42.49	77.19	5.70	39.23	15.84	-3.96	1.73
t-test for H	-0.4030 ns	2.6108 *	1.7486 ns	2.7713 *	0.4906 ns	4.0981 **	ND	ND	0.1483 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-4.91	53.38	37.93	47.51	-3.39	27.19	11.36	-23.73	-5.26
t-test for Hb	-0.3693 ns	2.0220 ns	1.6132 ns	2.0206 ns	-0.2783 ns	2.0972 ns	ND	ND	-0.3602 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	0.070	0.054	0.070	0.130	0.070	0.080	ND	0.040	ND
P1	0.058	0.058	0.066	0.063	0.054	0.054	0.054	0.076	0.054
P2	0.066	0.076	0.063	0.039	0.048	0.058	0.076	0.058	0.066
Mid-parent	0.062	0.067	0.065	0.051	0.051	0.056	0.065	0.067	0.060
Heterosis (%) (H)	13.31	-18.98	8.44	156.34	37.54	42.49	ND	-40.30	ND
t-test for H	0.5886 ns	-1.0311 ns	0.4909 ns	ND	0.9345 ns	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	6.78	-28.57	5.66	106.82	28.95	37.93	ND	-47.37	ND
t-test for Hb	0.2998 ns	-1.8447 ns	0.3101 ns	ND	0.7555 ns	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ลักษณะองค์ประกอบผลผลิต

ลักษณะองค์ประกอบผลผลิตที่สำคัญของข้าวไร่ได้แก่ การมีความสามารถในการแตกกอ และการมีหน่อที่มีประสิทธิภาพในการสร้างรวงได้ ซึ่งเป็นลักษณะที่มีรายงานความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดและสอดคล้องกับการให้ผลผลิต (Tiwari *et al.*, 2011) ด้วยเหตุนี้ ในตารางที่ 26-27 เป็นการวิเคราะห์ผลของความดีเด่นของลูกผสมต่อทั้งสองลักษณะนี้

ผลการศึกษากำหนดหน่อต่อต้น (ตารางที่ 26) พบค่า heterosis มีนัยสำคัญทางสถิติจำนวน 5 คู่ผสม ทั้งนี้ 4 คู่ พบการแตกกอลดลง และพบว่ามีเพียงคู่ผสมเดียวที่ลูกผสมมีการแตกกอเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพ่อแม่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ NYP-SU-001xPLU-SU-001 แต่ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยการแตกกอของลูกผสมยังนับว่าต่ำอยู่ คือ เท่ากับ 3 หน่อต่อต้น หรือมีค่า 22.81 เปอร์เซ็นต์ของ heterosis อย่างไรก็ตามเมื่อทำการศึกษาค่าเฉลี่ยของลูกผสมเทียบกับพ่อหรือแม่ที่มีการแตกกอสูงสุดในคู่ผสมนี้ กลับไม่พบความแตกต่างทางสถิติ โดยมีเปอร์เซ็นต์ heterobeltiosis เท่ากับ 15.38 สำหรับคู่ผสมที่เหลือ 4 คู่ผสมนั้นพบว่ามีการแตกกอลดลง โดยพบว่าจำนวนหน่อที่สร้างขึ้นในคู่ผสมเหล่านี้มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของพ่อแม่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิตินั้น เมื่อเทียบกับพ่อหรือแม่ที่มีการแตกต่อสูงสุด ยิ่งพบความแตกต่างทางลบอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ คู่ผสม ดังนี้ NYP-SU-001xPLU-SU-005, PLU-SU-002xPLU-SU-004, PLU-SU-005xPLU-SU-003 และ NYP-SU-001xPLU-SU-002 ทั้งนี้คู่ผสมทั้ง 4 คู่ ให้ลูกผสมที่มีการแตกกอลดลงน้อยกว่าอยู่ระหว่าง 1.5-2.0 หน่อต่อกอ ทั้งนี้การพบจำนวนหน่อต่อกอที่มีค่า heterosis ในลูกผสมเป็นลบก็เคยมีรายงานมาก่อนหน้านี้ (Tiwari *et al.*, 2011)

ลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดหน่อคือการสร้างรวง สำหรับจำนวนรวงต่อกอของข้าวไร่ทั้ง 18 คู่ผสม (ตารางที่ 27) พบว่ามี 3 คู่ที่ heterosis มีนัยสำคัญทางสถิติ โดย 2 ใน 3 มีค่า heterosis ทิศทางลบหรือการที่ลูกผสมมีจำนวนรวงต่อกอลดกว่าค่าเฉลี่ยที่พบในพ่อแม่ ได้แก่ คู่ผสม NYP-SU-001xPLU-SU-005 และ PLU-SU-005xPLU-SU-003 ขณะที่คู่ผสมที่พบ heterosis ในทิศทางบวกคือการมีลูกผสมที่มีจำนวนรวงต่อกอสูงกว่าค่าเฉลี่ยพ่อแม่และแม่ ได้แก่ NYP-SU-001xPLU-SU-001 สำหรับความดีเด่นของลูกผสมเหนือค่าเฉลี่ยพ่อแม่ที่ให้จำนวนรวงต่อกอสูงสุดในแต่ละคู่ผสมพบว่า มีคู่ผสมจำนวน 4 คู่ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ทั้งนี้ทุกคู่ผสมพบเปอร์เซ็นต์ heterobeltiosis ในทิศทางลบทั้งหมด ได้แก่ คู่ผสม NYP-SU-001xPLU-SU-005, PLU-SU-005xCM-001, PLU-SU-002xPLU-SU-004 และ PLU-SU-005xPLU-SU-003 ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยจำนวนรวงต่อกอ (เปอร์เซ็นต์ heterobeltiosis) ของจำนวนรวงต่อกอในคู่ผสมเหล่านี้ เท่ากับ 1.50 (-48.28%), 2.22 (-23.37%), 2.00 (-27.27%) และ 1.00 (-65.52%) ตามลำดับ

การพบจำนวนหน่อต่อกอและจำนวนรวงต่อกอดำในข้าวไร่เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ข้าวไร่มีผลผลิตต่ำไป ด้วยจากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าในพันธุ์ที่มีความสามารถในการแตกกอลด อาหารที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจะส่งผ่านไปยังต้นหรือหน่อเดิมเพื่อนำไปสร้างองค์ประกอบของเนื้อเยื่อต้น เช่น เซลล์ลูโลส (Yang *et al.*, 2009) หรือลิกนินซึ่งส่งเสริมให้พืชมีลำต้นแข็ง (Ma *et al.*, 2000; Okuno *et al.*, 2014) ซึ่งการสร้างเซลล์ลูโลสหรือลิกนินสูงมีรายงานว่ามีความสัมพันธ์ทางบวกต่อการตั้งตรงของพืชและส่งเสริมให้พืชต้านทานการหักล้ม (Zhang *et al.*, 2013)

ด้วยเหตุนี้ หากพิจารณาเฉพาะสองลักษณะนี้ คือความสามารถในการแตกกอและการให้รวงต่อกอของข้าวไร่ การแสดงออกของยีนส่วนใหญ่ไปทางการมีการแตกกอและมีจำนวนรวงลดลง หรือลักษณะของการแตกกอ

น้อยเป็นลักษณะข่ม แต่ทั้งนี้ก็มีลักษณะแนวโน้มไปทางการข่มเป็นแบบไม่สมบูรณ์ (incomplete or partial dominant gene action) ทั้งนี้มีการศึกษาในข้าวลูกผสมสายพันธุ์ติกกลุ่ม indica ที่พบว่าการแสดงออกของจำนวนหน่อต่อต้นมีการแสดงออกแบบปฏิกริยาร่วมระหว่างการแสดงออกของยีนแบบข่ม (dominance x dominance gene action) (Zhou *et al.*, 2012) และแบบข่มเกิน (overdominance gene action) (Tao *et al.*, 2016)

สำหรับลักษณะต่อไป ได้แก่ ลักษณะเมล็ดเต็มเต็มต่อต้น (ตารางที่ 28) จำนวนเมล็ดต่อต้น (ตารางที่ 29) เปอร์เซนต์เมล็ดเต็มเต็ม (ตารางที่ 30) น้ำหนัก 100 เมล็ด (ตารางที่ 31) และน้ำหนักเมล็ดต่อรวง (ตารางที่ 32)

สำหรับจำนวนเมล็ดเต็มเต็มต่อต้น สามารถเก็บข้อมูลได้ค่อนข้างน้อย คือ 7 คู่ผสมจากทั้งหมด 18 คู่ผสม โดยการประเมินเทียบกับค่าเฉลี่ยพ่อแม่พบค่าเปอร์เซนต์ heterosis ในทิศทางบวกจำนวน 3 ใน 7 คู่ผสม (มีเปอร์เซนต์ heterosis อยู่ระหว่าง 15.74-99.81 เปอร์เซนต์) และพบในทิศทางลบ จำนวน 4 ใน 7 คู่ผสม (มีเปอร์เซนต์ heterosis อยู่ระหว่าง -4.48 ถึง -72.46 เปอร์เซนต์) โดยไม่พบว่ามีคู่ผสมใดที่มีค่า heterosis ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับการประเมิน heterobeltiosis ไม่พบว่ามีคู่ผสมใดที่มีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับค่าประเมินดังกล่าวนี้ (ตารางที่ 28) อย่างไรก็ตามการพิจารณาความเป็นไปได้ของการแสดงออกของยีนจำเป็นต้องพิจารณาไปพร้อมกันกับลักษณะจำนวนเมล็ดต่อต้นและเปอร์เซนต์เมล็ดเต็มเต็มในตารางที่ 29-30 ร่วมด้วย

จำนวนเมล็ดต่อต้นที่ทำการประเมิน heterosis และ heterobeltiosis จากที่สามารถประเมินได้ 7 คู่ผสม พบเปอร์เซนต์ heterosis ในทิศทางบวก จำนวน 4 คู่ผสม (มีเปอร์เซนต์ heterosis อยู่ระหว่าง 9.35-70.73 เปอร์เซนต์) และพบในทิศทางลบจำนวน 4 คู่ผสม (มีเปอร์เซนต์ heterosis อยู่ระหว่าง -6.83 ถึง -70.13 เปอร์เซนต์) แต่ไม่พบว่ามีคู่ผสมใดที่มีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับการประเมิน heterosis เช่นเดียวกับการประเมิน heterobeltiosis ที่ไม่พบว่ามีคู่ผสมใดที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 29)

สำหรับลักษณะเปอร์เซนต์การเต็มเต็มเมล็ดของข้าวไร่ แสดงในตารางที่ 30 พบผลการประเมิน heterosis เทียบกับพ่อแม่และแม่ พบใน 8 คู่ผสม ในทิศทางบวก จำนวน 5 คู่ผสม (มีเปอร์เซนต์ heterosis อยู่ระหว่าง 3.37-15.18 เปอร์เซนต์) และในทิศทางลบจำนวน 3 คู่ผสม (มีเปอร์เซนต์ heterosis อยู่ระหว่าง -5.56 ถึง -68.62 เปอร์เซนต์) และพบไม่พบว่ามีคู่ผสมใดที่มีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับการประเมิน heterosis เช่นเดียวกับการประเมิน heterobeltiosis ไม่พบว่ามีคู่ผสมใดที่มีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นกัน

การพบค่า heterosis ทั้งทางบวกและลบและมีค่าเปอร์เซนต์ที่หลากหลายและไม่ถึง 100 เปอร์เซนต์ สำหรับการประเมิน heterobeltiosis ทั้งในทิศทางใด ของสามลักษณะ ได้แก่ จำนวนเมล็ดเต็มเต็มต่อรวง จำนวนเมล็ดต่อรวง และเปอร์เซนต์เมล็ดเต็มต่อรวง อาจหมายถึงการแสดงออกของยีนที่ไม่ได้เป็นแบบข่ม และอาจไม่สามารถบ่งชี้ได้ชัดถึงการแสดงออกว่าเป็นอิทธิพลของยีนแบบบวกหรือแบบข่มแบบไม่สมบูรณ์ เนื่องจากความแตกต่างของพันธุกรรมพ่อแม่ที่ใช้ในการศึกษา นอกจากนี้ลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวงและเปอร์เซนต์เมล็ดเต็มต่อรวงยังเป็นลักษณะที่มีรายงานว่าถูกควบคุมด้วยหลายยีนในลักษณะเชิงปริมาณทำให้การแสดงออกของยีนมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้พบความแตกต่างของผลการศึกษาเช่นกัน โดยการศึกษาของ Zhou *et al.* (2012) ในข้าวลูกผสมสายพันธุ์ติกกลุ่ม indica พบว่าผลผลิต จำนวนเมล็ดต่อรวง มีการแสดงออกแบบข่มเกิน (Overdominance/pseudo-overdominance gene action) และการศึกษาของ Tao *et al.* (2016) พบว่าข้าวกลุ่ม indica นี้มีการแสดงออกของยีนแบบข่มบางส่วนสำหรับจำนวนเมล็ดและผลผลิต เป็นต้น

องค์ประกอบผลผลิตอีกสองลักษณะ ได้แก่ น้ำหนัก 100 เมล็ด (ตารางที่ 31) และน้ำหนักเมล็ดต่อรวง (ตารางที่ 32) ผลการประเมิน heterosis เทียบกับค่าเฉลี่ยของพ่อและแม่ พบเปอร์เซ็นต์ heterosis ในทิศทางบวกจำนวน 7 ใน 8 คู่ผสมที่สามารถเก็บข้อมูลได้ และมี 1 คู่ผสมที่พบว่ามีความสำคัญทางสถิติ ได้แก่ คู่ผสม PLU-SU-001xCM-001 (14.77 เปอร์เซ็นต์) ขณะที่ไม่พบความสำคัญทางสถิติในคู่ผสมใด ๆ สำหรับการประเมิน heterobeltiosis ทั้งนี้พบเปอร์เซ็นต์ heterobeltiosis อยู่ในช่วงระหว่าง -33.77 ถึง 29.99 เปอร์เซ็นต์

สำหรับน้ำหนักเมล็ดต่อรวง (ตารางที่ 32) ผลการประเมิน heterosis เทียบกับค่าเฉลี่ยของพ่อและแม่ พบเปอร์เซ็นต์ heterosis ในทิศทางบวกจำนวน 4 ใน 8 คู่ผสมที่สามารถเก็บข้อมูลได้ และมี 1 คู่ผสมที่พบว่ามีความสำคัญทางสถิติแต่ในทิศทางลบ ได้แก่ คู่ผสม CP-001xPLU-SU-004 (-73.35 เปอร์เซ็นต์) และเป็นคู่ผสมเดียวกันที่พบความสำคัญทางสถิติสำหรับการประเมิน heterobeltiosis (-76.16 เปอร์เซ็นต์)

แสดงให้เห็นว่าลักษณะน้ำหนัก 100 เมล็ดและน้ำหนักเมล็ดต่อรวงน่าจะไม่ใช่การแสดงออกของยีนแบบซิมสมบอร์นเช่นกันและการพบทั้งในทิศทางบวกและลบก็อาจเป็นการแสดงออกของยีนแบบบวกในลักษณะเชิงปริมาณหรือถูกควบคุมด้วยยีนหลายยีน

ทั้งนี้พบว่าหลายลักษณะที่สำคัญที่ทำการศึกษาในครั้งนี้อาจมีความเป็นไปได้ในการแสดงออกของยีนแบบบวกเนื่องจากพบค่า heterosis และ heterobeltiosis ในทิศทางบวกและลบ และการพบเปอร์เซ็นต์สูง-ต่ำ ในทั้งสองทิศทางแสดงให้เห็นว่าหลาย ๆ ลักษณะอาจมีการแสดงออกของอิทธิพลยีนแบบบวกหลายตำแหน่งยีนที่มีความซับซ้อน (Additive multiplicative interaction) ซึ่งสามารถพบได้ในหลายลักษณะที่สำคัญของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นความซับซ้อนของปฏิกริยาร่วมระหว่างองค์ประกอบผลผลิตหรือระหว่างลักษณะด้วยตนเอง (Dan *et al.*, 2015) ทั้งนี้การแสดงออกของยีนอาจเป็นแบบ Epistasis และ digenic interaction (ความเป็นไปได้ในการทำงานร่วมกันของยีนสองตำแหน่ง) ด้วยก็ได้เช่นกันสำหรับบางลักษณะที่มีการแสดงออกที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน (Shi *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2013b) และทั้งนี้จากการศึกษาของ Zhou *et al.* (2012) ในข้าวลูกผสมสายพันธุ์ดีกลุ่ม indica พบว่าน้ำหนักเมล็ดมีการแสดงออกแบบซิมเกิน (Overdominance/pseudo-overdominance gene action) เช่นเดียวกับลักษณะผลผลิตและจำนวนเมล็ดต่อรวง ขณะที่การศึกษาของ Tao *et al.* (2016) พบการแสดงออกของยีนแบบซิมบางส่วน (partial dominance) สำหรับน้ำหนัก 1,000 เมล็ดและผลผลิต และการแสดงออกแบบซิมเกินสำหรับลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวง เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้อยู่ระหว่างการศึกษาลูกผสมชั่วที่ 1 ซึ่งการกระจายทางพันธุกรรมของการผสมพันธุ์นั้นสามารถดำเนินการในชั่วที่พบการกระจายพันธุกรรมและแสดงฟีโนไทป์ของลูกผสมที่แตกต่างกันในประชากร ซึ่งมีลักษณะต่างจากประชากรพ่อแม่ (transgressive segregating generation) ทำให้นักวิจัยสามารถเข้าไปคัดเลือกพันธุกรรมที่ต้องการได้ (Kuczyńska *et al.*, 2007; Rieseberg *et al.*, 1999)

แม้องค์ประกอบผลผลิตจะมีการแสดงออกที่ซับซ้อน และมีการควบคุมด้วยหลายยีน มีการแสดงออกเชิงปริมาณ แต่ท้ายที่สุดก็ยังคงมีความจำเป็นต่อการการคัดเลือกเพื่อการเพิ่มผลผลิต แต่ทั้งนี้นอกเหนือจากการรู้การแสดงออกของยีนเพื่อการวางแผนการพัฒนาพันธุ์แล้ว จำเป็นต้องมีการศึกษาต่อเนื่องถึงอัตราพันธุกรรม ทั้งนี้เพราะการเลือกลักษณะคัดเลือกควรเลือกองค์ประกอบผลผลิตที่มีความสามารถในการถ่ายทอดทางพันธุกรรมสูง (high heritability) น่าจะมีความเหมาะสมในการเลือกใช้เป็นลักษณะคัดเลือกเพื่อการเพิ่มผลผลิตของข้าวมากกว่า

ลักษณะที่มีความสามารถในการถ่ายทอดทางพันธุกรรมต่ำทั้งเนื่องจากการถูกควบคุมด้วยหลายยีนและได้รับอิทธิพลเนื่องจากสิ่งแวดล้อมสูง (Prasad *et al.*, 2001; Sürek and Beşer, 2005) ผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักเมล็ดข้าวมีค่าการถ่ายทอดทางพันธุกรรมค่อนข้างสูง (Sürek and Beşer, 2005; Vanisree *et al.*, 2013)

สำหรับการทำนายการแสดงออกของยีนควบคุมลักษณะต่าง ๆ โดยอาศัยทิศทางการแสดงออกของค่า heterosis และขนาดของค่า heterobeltiosis ได้แสดงไว้ในตารางที่ 33 ซึ่งได้ทำการประเมินไว้แล้วในการอภิปรายของแต่ละลักษณะเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 26 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for number of tillers per hill.

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	3.00	2.86	1.50	2.44	2.00	2.00	4.00	2.00	3.30
P1	2.44	2.60	2.29	3.00	2.29	2.40	3.00	2.57	2.44
P2	2.75	2.57	3.00	2.57	2.44	2.75	2.75	2.44	2.40
Mid-parent	2.60	2.59	2.64	2.79	2.37	2.58	2.88	2.51	2.42
Heterosis (%) (H)	15.51	10.50	-43.24	-12.25	-15.44	-22.33	39.13	-20.25	36.24
t-test for H	1.0241 ns	0.1599 ns	-3.3723 **	-1.4940 ns	-1.3722 ns	-2.8912 *	ND	ND	1.9219 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	9.09	9.89	-50.00	-18.52	-18.18	-27.27	33.33	-22.22	3.500
t-test for Hb	0.6248 ns	0.1506 ns	-4.1963 **	-2.0244 ns	-1.4469 ns	-2.39 *	ND	ND	1.7549 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	1.50	2.86	3.50	2.00	3.00	1.00	1.50	3.00	2.33
P1	3.00	3.00	2.75	2.75	2.29	2.29	2.29	2.40	2.29
P2	2.44	2.40	2.75	2.57	2.60	3.00	2.40	3.00	2.75
Mid-parent	2.72	2.70	2.75	2.66	2.44	2.64	2.34	2.70	2.52
Heterosis (%) (H)	-44.90	5.82	27.27	-24.83	22.81	-62.16	-35.96	11.11	-7.33
t-test for H	-2.3272 *	0.4174 ns	1.4142 ns	ND	2.9608 *	ND	-2.4460 *	ND	-0.4963 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-50.00	-4.76	27.27	-27.27	15.38	-66.67	-37.50	0.00	-15.15
t-test for Hb	-2.7643 *	-0.3570 ns	1.4256 ns	ND	1.6330 ns	ND	-2.3772 *	ND	-1.1220 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 27 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for number of panicles per hill.

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	2.40	2.57	1.50	2.22	1.75	2.00	4.00	1.00	2.80
P1	2.00	2.60	1.86	2.90	1.86	2.00	2.90	2.29	2.00
P2	2.75	2.29	2.90	2.29	2.00	2.75	2.75	2.00	2.00
Mid-parent	2.38	2.44	2.38	2.59	1.93	2.38	2.82	2.14	2.00
Heterosis (%) (H)	1.05	5.26	-36.94	-14.29	-9.26	-15.79	41.59	-53.33	40.00
t-test for H	0.1150 ns	0.3003 ns	-2.4163 *	-1.4888 ns	-0.5216 ns	-1.6846 ns	ND	ND	1.6522 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-12.73	-1.10	-48.28	-23.37	-12.50	-27.27	37.93	-56.25	40.00
t-test for Hb	-0.7536 ns	-0.0645 ns	-4.1184 **	-2.914 **	-0.7276 ns	-2.3932 *	ND	ND	1.5965 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	1.00	2.57	3.50	2.00	3.00	1.00	1.25	3.00	2.00
P1	2.90	2.90	2.75	2.75	1.86	1.86	1.86	2.00	1.86
P2	2.00	2.00	2.75	2.29	2.60	2.90	2.00	2.90	2.75
Mid-parent	2.45	2.45	2.75	2.52	2.23	2.38	1.93	2.45	2.30
Heterosis (%) (H)	-59.18	4.96	27.27	-20.56	34.62	-57.96	-35.19	22.45	-13.18
t-test for H	-9.7883 **	0.3484 ns	1.4142 ns	ND	3.2657 **	ND	-18943 ns	ND	-1.3927 ns
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-65.52	-11.33	27.27	-27.27	15.38	-65.52	-37.50	3.45	-27.27
t-test for Hb	-10.5846 **	-0.9459 ns	1.4256 ns	ND	1.6330 ns	ND	-1.8605 ns	ND	-1.0469 ns

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 28 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for filled grains per hill.

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	108.0	70.9	ND	178.0	107.8	ND	99.0	32.0	ND
P1	142.8	81.5	82.9	88.5	82.9	86.5	88.5	89.7	142.8
P2	106.7	89.7	88.5	89.7	142.8	82.6	82.6	142.8	86.5
Mid-parent	124.7	85.6	85.7	89.1	112.8	84.5	85.5	116.2	114.6
Heterosis (%) (H)	-13.41	-17.21	ND	99.81	-4.48	ND	15.74	-72.46	ND
t-test for H	-0.7252 ns	-0.8225 ns	ND	2.3291 *	-0.1970 ns	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-24.34	-20.98	ND	98.51	-24.52	ND	15.74	-72.58	ND
t-test for Hb	-1.1252 ns	-0.9317 ns	ND	2.2007 ns	-1.0196 ns	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	ND	ND	118.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
P1	88.5	88.5	106.7	82.6	82.9	82.9	82.9	86.5	82.9
P2	142.8	86.5	82.6	89.7	81.5	88.5	86.5	88.5	106.7
Mid-parent	115.6	87.5	94.6	86.1	82.2	85.7	84.7	87.5	94.8
Heterosis (%) (H)	ND	ND	25.21	ND	ND	ND	ND	ND	ND
t-test for H	ND	ND	1.8027 ns	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	ND	ND	11.04	ND	ND	ND	ND	ND	ND
t-test for Hb	ND	ND	0.5258 ns	ND	ND	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 29 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for number of grains per hill (total grains).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	148.0	96.1	ND	224.3	136.5	ND	149.0	43.0	ND
P1	171.9	105.5	121.1	146.8	121.1	110.8	146.8	116.0	171.9
P2	171.4	116.0	146.8	116.0	171.9	125.7	125.7	171.9	110.8
Mid-parent	171.7	110.8	134.0	131.4	146.5	118.3	136.3	143.9	141.3
Heterosis (%) (H)	-13.78	-13.19	ND	70.73	-6.83	ND	9.35	-70.13	ND
t-test for H	-1.0849 ns	-0.6556 ns	ND	1.5956 ns	-0.3833 ns	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-13.89	-17.12	ND	52.82	-20.58	ND	1.50	-74.98	ND
t-test for Hb	-0.7922 ns	-0.7541 ns	ND	1.3292 ns	-0.9943 ns	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	ND	ND	168.0	154.0	ND	ND	ND	ND	ND
P1	146.8	146.8	171.4	125.7	121.1	121.1	121.1	110.8	121.1
P2	171.9	110.8	125.7	116.0	105.5	146.8	110.8	146.8	171.4
Mid-parent	159.3	128.8	148.6	120.9	113.3	134.0	116.0	128.8	146.3
Heterosis (%) (H)	ND	ND	13.07	27.42	ND	ND	ND	ND	ND
t-test for H	ND	ND	0.8194 ns	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	ND	ND	-2.00	22.50	ND	ND	ND	ND	ND
t-test for Hb	ND	ND	-0.1114 ns	ND	ND	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 30 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for filled grains percentage.

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	71.90	71.19	ND	80.99	77.52	ND	66.44	74.42	ND
P1	78.79	78.87	68.51	61.81	68.51	73.38	61.81	78.81	78.79
P2	60.31	78.81	61.81	78.81	78.79	66.05	66.05	78.79	73.38
Mid-parent	69.55	78.84	65.16	70.31	73.65	69.72	63.93	78.80	76.09
Heterosis (%) (H)	3.37	-9.71	ND	15.18	5.26	ND	3.93	-5.56	ND
t-test for H	0.3132 ns	-1.2737 ns	ND	1.5457 ns	0.6135 ns	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-8.75	-9.75	ND	2.76	-1.61	ND	0.5929	-5.58	ND
t-test for Hb	-0.8579 ns	-0.9653 ns	ND	0.3148 ns	-0.2022 ns	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	ND	ND	71.13	22.73	ND	ND	ND	ND	ND
P1	61.81	61.81	60.31	66.05	68.51	68.51	68.51	73.38	68.51
P2	78.79	73.38	66.05	78.81	78.87	61.81	73.38	61.81	60.31
Mid-parent	70.30	67.60	63.18	72.43	73.69	65.16	70.94	67.60	34.41
Heterosis (%) (H)	ND	ND	12.58	-68.62	ND	ND	ND	ND	ND
t-test for H	ND	ND	1.2396 ns	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	ND	ND	7.69	-71.16	ND	ND	ND	ND	ND
t-test for Hb	ND	ND	0.7694 ns	ND	ND	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 31 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for 100-grains weight (g).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	2.884	3.187	ND	2.587	2.538	ND	2.900	2.690	ND
P1	2.327	2.998	2.216	2.374	2.216	2.516	2.374	2.557	2.327
P2	2.110	2.557	2.374	2.557	2.327	2.184	2.184	2.327	2.516
Mid-parent	2.219	2.777	2.295	2.465	2.271	2.350	2.279	2.442	2.422
Heterosis (%) (H)	29.99	14.766	ND	4.92	11.71	ND	27.24	10.16	ND
t-test for H	-49.3712 **	2.2473 *	ND	1.2324 ns	1.2443 ns	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	23.93	6.327	ND	1.17	9.04	ND	32.77	5.22	ND
t-test for Hb	1.0058 ns	0.7479 ns	ND	0.2878 ns	0.9572 ns	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	ND	ND	2.290	1.570	ND	ND	ND	ND	ND
P1	2.374	2.374	2.110	2.184	2.216	2.216	2.216	2.516	2.216
P2	2.327	2.516	2.184	2.557	2.998	2.374	2.516	2.374	2.110
Mid-parent	2.351	2.445	2.147	2.370	2.607	2.295	2.366	2.445	2.163
Heterosis (%) (H)	ND	ND	6.65	-33.77	ND	ND	ND	ND	ND
t-test for H	ND	ND	1.0468 ns	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	ND	ND	4.84	-38.59	ND	ND	ND	ND	ND
t-test for Hb	ND	ND	0.7548 ns	ND	ND	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 32 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for grains weight per panicle (g).

Crosses	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parent 1 (P1)	PLU-SU-003	PLU-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-005	NYP-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-001	CM-001	PLU-SU-003
Parent 2 (P2)	CP-001	CM-001	PLU-SU-005	CM-001	PLU-SU-003	PLU-SU-004	PLU-SU-004	PLU-SU-003	PLU-SU-002
F1	3.716	2.437	ND	4.323	2.970	ND	2.870	0.860	ND
P1	4.337	2.540	1.887	2.149	1.887	2.060	2.149	2.280	4.337
P2	2.307	2.280	2.149	2.280	4.337	1.820	1.820	4.337	2.060
Mid-parent	3.322	2.410	2.018	2.214	3.112	1.940	1.984	3.308	3.198
Heterosis (%) (H)	11.86	1.13	ND	95.23	-4.56	ND	44.62	-74.00	ND
t-test for H	-11.3387 **	0.0427 ns	ND	2.9125 ns	-0.2627 ns	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	-14.31	-4.05	ND	89.62	-31.51	ND	33.55	-80.17	ND
t-test for Hb	-0.7978 ns	-0.1121 ns	ND	2.6194 ns	-2.0853 ns	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

Crosses	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Parent 1 (P1)	PLU-SU-005	PLU-SU-005	CP-001	PLU-SU-004	NYP-SU-001	NYP-SU-001	NYP-SU-001	PLU-SU-002	NYP-SU-001
Parent 2 (P2)	PLU-SU-003	PLU-SU-002	PLU-SU-004	CM-001	PLU-SU-001	PLU-SU-001	PLU-SU-002	PLU-SU-005	CP-001
F1	ND	ND	0.550	0.550	ND	ND	ND	ND	ND
P1	2.149	2.149	2.307	1.820	1.887	1.887	1.887	2.060	1.887
P2	4.337	2.060	1.820	2.280	2.540	2.149	2.060	2.149	2.307
Mid-parent	3.243	2.104	2.064	2.050	2.214	2.018	1.974	2.104	2.097
Heterosis (%) (H)	ND	ND	-73.35	-73.17	ND	ND	ND	ND	ND
t-test for H	ND	ND	-3.7993 **	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Heterobeltiosis (%) (Hb)	ND	ND	-76.16	-75.88	ND	ND	ND	ND	ND
t-test for Hb	ND	ND	-3.0113 *	ND	ND	ND	ND	ND	ND

*Significant at $P \leq 0.05$; ** Significant at $P \leq 0.01$; Relative heterosis = heterosis; ND = Non detectable

ตารางที่ 33 Heterosis for the hybrids in relative heterosis and heterobeltiosis for all characteristics.

Crosses (P1 x P2)	Plant height	Culm height	No. Tillers/hill	No. Panicles/hill	Angle stem before bending (plot)	Angle stem before bending (individual)	Angle stem after bending (individual)	Spinginess percentage	Panicle length	relative heterosis (%) /heterobeltiosis (%)	
1) PLU-SU-003xCP-001	4.1/-1.4	0.4/-5.0	16/9.1	1.0/-12.7	2.3/1.4	0.6/-0.6	6.4/-22.5	6.0/-21.4	12.1/4.4		
2) PLU-SU-001xCM-001	-12/-16	-17/-18	10/9.9	5.3/-1.1	1.6/-1.8	-0.5/-4.4	31.2/28.1	31.1/28.0	6.6/-5.2		
3) NYP-SU-001xPLU-SU-005	-3.6/-10.9	17.3/1.9	-43/-50	-36.9/-48.3	5.1/3.1	3.0/0.7	85.8/84.5	79.8/75.3	ND/ND		
4) PLU-SU-005x CM-001	-0.3/-1.8	-2.0/-3.2	-12/-19	-14.3/-23.4	-2.5/-5.2	-3.9/-6.5	19.1/14.2	22.4/20.8	31.2/26.8		
5) NYP-SU-001xPLU-SU-003	-0.8/-3.8	2.0/-10.1	-15/-18	-9.3/-12.5	-8.0/-8.6	-9.0/-9.4	1.2/-20.4	12.6/-11.3	-3.3/-8.7		
6) PLU-SU-002xPLU-SU-004	-14/-15	-4.2/-7.0	-22/-27	-15.8/-27.3	9.4/7.3	7.8/5.6	43.6/41.3	35.9/30.8	9.0/7.1		
7) PLU-SU-001xPLU-SU-004	-2.0/-6.6	-8.8/-12.8	39/33	41.6/37.9	10.5/10.4	3.1/2.4	38.7/34.8	35.0/32.4	16.5/15.6		
8) CM-001xPLU-SU-003	-14/-17	-18/-22	-20/-22	-53.3/-56.2	-6.4/-7.9	-7.1/-7.9	1.8/-16.9	9.9/-10.8	ND/ND		
9) PLU-SU-003xPLU-SU-002	3.1/2.0	1.4/-1.3	36/3.5	40.0/40.0	1.4/-1.8	1.3/-1.9	1.5/-16.9	-0.2/-16.0	ND/ND		
10) PLU-SU-005xPLU-SU-003	-0.4/-5.1	ND/ND	-45/-50	-59.2/-65.5	-7.0/-8.1	-7.6/-9.4	-51.8/-61.9	-47.8/-58.0	ND/ND		
11) PLU-SU-005xPLU-SU-002	21/16	3.1/-4.1	5.8/-4.8	5.0/-11.3	3.1/1.1	0.6/-0.7	36.4/30.4	34.5/26.9	-3.9/-6.2		
12) CP-001xPLU-SU-004	3.9/0.6	0.2/-5.0	27/27	27.3/27.3	-6.1/-6.4	-7.2/-7.2	3.2/-10.1	8.6/-4.2	-20.4/-23.6		
13) PLU-SU-004xCM-001	-8.0/-9.0	-12/-17	-25/-27	-20.6/-27.3	-5.2/-7.9	-6.0/-7.9	-77.8/-78.1	-76.3/-76.5	15.7/11.0		
14) NYP-SU-001xPLU-SU-001	-19/-27	-28/-38	23/15	34.6/15.4	2.6/0.0	2.8/-0.9	99.9/95.0	92.6/81.2	-29.8/-33.3		
15) NYP-SU-001xPLU-SU-001	-3.6/-10.9	ND/ND	-62/-67	-58.0/-65.5	-4.5/-6.2	-4.9/-2.6	5.6/-16.9	79.8/75.3	ND/ND		
16) NYP-SU-001xPLU-SU-002	-22/-25	ND/ND	-36/-38	-35.2/-37.5	5.5/1.6	1.2/-2.4	157.4/144.6	156.8/136.7	ND/ND		
17) PLU-SU-002xPLU-SU-005	-29/-32	ND/ND	11.1/0.0	22.4/3.4	-0.7/-2.6	-1.3/-2.6	13.6/8.7	15.2/8.8	ND/ND		
18) NYP-SU-001xCP-001	-26/-32	ND/ND	-7.3/-15.2	-13.2/-27.3	5.8/4.2	4.9/3.2	150.8/125.3	135.9/116.7	ND/ND		
Estimate gene action	Partial dominant (short plant height allele)	Partial dominant (short culm height allele)	Partial dominant (low tillers number allele)	Partial dominant (low panicles number allele)	Additive gene action	Additive gene action	Additive multiplicative interaction	Additive multiplicative interaction	Additive gene action		

ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะต่าง ๆ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตจากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของข้าวไร่ โดยนำผลการศึกษาปี พ.ศ. 2560 มาอภิปรายผลร่วมกับการศึกษาในปี พ.ศ. 2558-2559 เพื่อให้สามารถประเมินผลการศึกษาได้ชัดเจนยิ่งขึ้น แม้ว่าการศึกษาในปี พ.ศ. 2558-2559 จะไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของแผนการดำเนินการตามโครงการวิจัยนี้

ผลการศึกษา ปี พ.ศ. 2558-2559 จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของลักษณะต่าง ๆ โดยการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และการวิเคราะห์เส้นทางของลักษณะการเกษตรและองค์ประกอบผลผลิตไปยังลักษณะผลผลิต จากการศึกษาจากเจ็ดพันธุ์ พบว่าการให้ผลผลิตต่อกอมีความสัมพันธ์ทางบวกกับจำนวนเมล็ดต่อรวง แม้ว่าจะมีความสัมพันธ์ทางบวกอย่างไม่มีนัยสำคัญระหว่างผลผลิตต่อกอกับลักษณะอื่น ๆ ได้แก่ ความยาวรวง จำนวนหน่อต่อกอ ความสูงต้น และน้ำหนักเมล็ดต่อรวง ทั้งการศึกษาในปี พ.ศ. 2558-2559 สำหรับการวิเคราะห์เส้นทางไปยังการให้ผลผลิต พบว่าการให้ผลผลิตได้รับอิทธิพลโดยตรงในทิศทางบวกจากลักษณะเหล่านี้ ได้แก่ จำนวนเมล็ดต่อรวง ความยาวรวง ความสูงต้น และเปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ด ซึ่งหมายถึงสามารถใช้ลักษณะทางกายภาพของต้นและรวงร่วมในการคัดเลือกได้เช่นกัน และความสูงต้นที่สัมพันธ์จากการวิเคราะห์เส้นทางมีอิทธิพลทางบวกต่อผลผลิตนั้นหมายถึงความสูงของกลุ่มพันธุ์ข้าวไร่ที่ใช้ในการศึกษาไม่ได้กระทบต่อการให้ผลผลิต ขณะเดียวกันผลผลิตต่อกอพบว่าได้รับอิทธิพลทางอ้อมในทิศทางลบผ่านเปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ด นั่นคือ การมีเมล็ดลีบยังคงเป็นปัญหาสำคัญสำหรับข้าวไร่ แม้ในการปลูกที่มีระบบน้ำเพื่อช่วยบรรเทาความแห้งแล้งระหว่างการปลูกก็ตาม ด้วยเหตุนี้ สำหรับการศึกษาร่วมกันในปี พ.ศ. 2558-2559 กล่าวได้ว่า จำนวนเมล็ดต่อรวง ความยาวรวง และความสูงต้น ส่งผลทางบวกต่อการให้ผลผลิตและสามารถใช้เป็นลักษณะคัดเลือกหลักได้ในการปรับปรุงพันธุ์ข้าวไร่ที่ใช้พันธุ์กรรมของข้าวไร่ชุดดังกล่าวนี้ หรือสำหรับพันธุ์กรรมชุดดังกล่าวนี้มีความสูงต้นที่ไม่ได้เป็นอุปสรรคต่อการให้ผลผลิต ขณะที่เปอร์เซ็นต์การเติมเต็มเมล็ดและน้ำหนักเมล็ดต่อรวงสามารถใช้เป็นลักษณะคัดเลือกรองลงมาได้ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องประเมินลักษณะเหล่านี้ร่วมกับความสามารถในการต้านทานการหักล้ม

ผลการศึกษาลักษณะกายภาพของลำต้น ลักษณะทางการเกษตร ลักษณะทางเคมีบางประการ ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของข้าวไร่ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 พบว่าพันธุ์ PLU-SU-003 และ PLU-SU-005 ที่พบว่ามีต้นตั้งตรง มีความสามารถในการสปริงลำต้นกลับได้สูงเมื่อทดสอบโน้มต้นพบว่าพันธุ์ที่มีความสูงลำต้นสูงเมื่อเทียบกับพันธุ์อื่น ๆ และยังเป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงอีกด้วย ขณะที่พันธุ์ PLU-SU-001 และ PLU-SU-004 ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีลักษณะการตั้งตรงและความสามารถในการสปริงตัวหลังการโน้มต้นในระดับปานกลางแต่มีลักษณะอื่น ๆ ที่ดี ได้แก่ PLU-SU-001 มีจำนวนเมล็ดเติมเต็มต่อรวงและน้ำหนักเมล็ดต่อรวงค่อนข้างสูง เช่นเดียวกับกับพันธุ์ PLU-SU-004 ที่พบว่ามีจำนวนเมล็ดเติมเต็มต่อรวงและเปอร์เซ็นต์เมล็ดเติมเต็มค่อนข้างสูง

เซลลูโลสและลิกนินในผนังเซลล์สามารถเพิ่มความต้านทานต่อการหักล้มได้ เนื่องจากจะเพิ่มความแข็งแรงของต้นแต่การสะสมเคมีเหล่านี้ในส่วนปล้องมากเกินไปจะทำให้ขาดความยืดหยุ่นอาจส่งผลการสปริงตัวของลำต้นเมื่อเกิดการโน้มต้นได้เช่นกัน ทั้งนี้พันธุ์ PLU-SU-003 และ PLU-SU-005 เป็นพันธุ์ที่มีลักษณะตั้งตรง ผนังปล้องหนา และมีความสามารถในการสปริงตัวสูงนั้น มีปริมาณเซลลูโลสและซิลิกอนสูงแต่มีปริมาณลิกนินอยู่ระดับปานกลางเมื่อเทียบกับพันธุ์อื่น ๆ แต่พันธุ์ที่มีปริมาณเซลลูโลส ลิกนินและซิลิกอนสูงทั้งสามลักษณะ ได้แก่ PLU-SU-002 แม้จะมีลักษณะตั้งตรงและผนังปล้องหนาแต่ก็มีเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นต่ำ

ขณะที่พันธุ์ที่มีปริมาณซิลิคอนค่อนข้างน้อยจะมีผนังปล้องบาง ได้แก่ พันธุ์ PLU-SU-001 และ CM-001 และพันธุ์ที่มีเฉพาะปริมาณซิลิคอนสูง ได้แก่ PLU-SU-004 จะมีผนังปล้องหนา สำหรับปริมาณโพแทสเซียมจะมีปริมาณที่สอดคล้องกับปริมาณลิกนิน สำหรับพันธุ์ที่มีสัดส่วนของน้ำตาลส่วนที่เป็นโครงสร้าง (เซลลูโลสและลิกนิน) ต่อส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (น้ำตาลที่ละลายได้และแป้ง) ในระดับปานกลางให้ผลผลิตสูงสุด ได้แก่ พันธุ์ PLU-SU-002, PLU-SU-003, PLU-SU-005 และ CP-001 โดยมีค่าสัดส่วนอยู่ระหว่าง 11.02-11.42 เป็นสามพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพันธุ์อื่น ๆ

ด้วยเหตุนี้ พันธุ์ PLU-SU-003 และ PLU-SU-005 สามารถจัดอยู่ในกลุ่มต้นตั้งตรงและต้านทานต่อการหักล้มได้ ขณะที่พันธุ์อื่น ๆ ได้แก่ PLU-SI-001, PLU-SU-002, PLU-SU-004, CM-001, NYP-SU-001 และ CP-001 เป็นพันธุ์ที่มีลักษณะเด่นอื่น ๆ เช่น องค์ประกอบผลผลิตและผลผลิต ซึ่งสามารถนำมาใช้เพิ่มการพัฒนาพันธุ์หรือเพิ่มการตั้งตรงและต้านทานการหักล้มของลำต้นได้

จากศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางการเกษตร และลักษณะทางกายภาพของข้าวไร่ที่ปลูกในปี พ.ศ. 2560 แม้ว่าจากพันธุ์กรรมที่ใช้ในการศึกษาจะมีความสูงที่ไม่กระทบต่อการให้ผลผลิตในการศึกษา ปี พ.ศ. 2558-2559 แต่มีความสัมพันธ์ทางลบกับการตั้งตรงของต้น ความสามารถในการสปริงตัวหลังการโน้มต้น และอาจไปลดความสามารถในการต้านทานการหักล้ม ทั้งนี้ ความสูงของต้นข้าวสัมพันธ์กับความยาวของปล้องที่ 1 หรือ 2 (เมื่อนับจากผิวดินขึ้นไป) แต่เมื่อพิจารณาจากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างการตั้งตรงของลำต้นหรือความสามารถในการสปริงลำต้นหลังทำการโน้มต้นนี้พบว่าสัมพันธ์ทางลบกับความยาวปล้อง โดยเฉพาะความยาวปล้องแรก ดังนั้นหากต้องการลดความยาวปล้องให้มุ่งเน้นไปที่ปล้องที่ 1 เป็นหลัก และพบความสัมพันธ์ทางบวกกับเส้นผ่าศูนย์กลางของผนังปล้องซึ่งน่าจะเกี่ยวกับการเพิ่มปริมาณซิลิคอน

ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเมล็ดกับการเติมเต็มของเมล็ดพบว่าส่วนใหญ่กลุ่มที่มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มต่อรวงสูงน่าจะเป็นมาจากพันธุ์ที่มีขนาดเมล็ดค่อนข้างเล็ก

การจะพัฒนาพันธุ์ข้าวไร่ที่ต้องการปรับปรุงลักษณะการเติมเต็มเมล็ดไปพร้อมกันกับการคัดเลือกลักษณะเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหักลมนั้นพบว่ากลุ่มที่มีจำนวนเมล็ดเต็มค่อนข้างสูงหรือมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มต่อรวงสูงจะเป็นกลุ่มเมล็ดที่มีขนาดค่อนข้างเล็ก นอกจากนี้พบว่า การตั้งตรงและความสามารถในการสปริงลำต้นกลับหลังการโน้มต้นมีความสัมพันธ์ทางบวกกับน้ำหนักรวง ซึ่งน่าจะเป็นผลดีต่อการนำพันธุ์กรรมเหล่านี้มาใช้ในการปรับปรุงพันธุ์ และใช้ลักษณะดังกล่าวในการคัดเลือกเช่นกัน

เมื่อพิจารณาลักษณะกายภาพของลำต้นพบว่าความยาวปล้องมีความสัมพันธ์ทางบวกกับน้ำหนัก 100 เมล็ด หรือพันธุ์ที่มีความยาวปล้องสั้นที่เป็นเป้าหมายในการคัดเลือกส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ที่มีขนาดเมล็ดขนาดเล็ก เช่นเดียวกับเส้นผ่าศูนย์กลางผนังปล้องและความหนาผนังปล้องทั้งปล้องที่ 1 และ 2 สูงพบว่าส่วนใหญ่จะพบในเมล็ดขนาดเล็กเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพเหล่านี้ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มการตั้งตรงและการต้านทานการหักล้มของต้นข้าวกลับพบว่ามีความสัมพันธ์ทางลบกับเปอร์เซ็นต์การเติมเมล็ด ด้วยเหตุนี้อาจกล่าวได้ว่า ในการปรับปรุงพันธุ์ให้มีลักษณะการตั้งตรงและต้านทานการหักล้มอาจพบปัญหาลักษณะเมล็ดลีบที่เกิดจากอิทธิพลทางอ้อมผ่านมาจากลักษณะอื่น ๆ เช่นที่พบจากการวิเคราะห์เส้นทางก็เป็นได้

จากการประเมินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558-2560 อาจกล่าวได้ว่า ในการคัดเลือกลักษณะเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหักล้ม อาจพิจารณาจากจำนวนเมล็ดต่อรวง ความยาวรวง ร่วมด้วย และเนื่องจากพันธุ์กรรมที่แสดงลักษณะเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ที่มีขนาดเมล็ดเล็ก หากใช้พันธุ์ดังกล่าวนี้ในการปรับปรุงพันธุ์ หากยีนที่ควบคุมลักษณะที่ส่งเสริมการตั้งตรงหรือเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหักล้ม (ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส ปริมาณลิกนิน ปริมาณซิลิคอน หรือปริมาณโพแทสเซียม) ไม่เชื่อมโยงกับยีนควบคุมขนาดเมล็ดหรือไม่เชื่อมโยง

กับยีนที่ควบคุมการเติมเต็มของเมล็ดแล้ว อาจคัดเลือกเพื่อเพิ่มน้ำหนักเมล็ดหรือเพิ่มขนาดเมล็ด รวมทั้งคัดเลือกเปอร์เซ็นต์การติดเมล็ดพร้อมกันไปด้วยเพื่อลดโอกาสในการจะได้ลักษณะเหล่านี้ไปพร้อมกันกับต้นตั้งตรงหรือต้นที่สามารถต้านทานต่อการหักล้ม สำหรับความสูงต้นแม้จะไม่กระทบผลผลิตโดยตรงแต่คาดว่าจะส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการหักล้ม ทั้งนี้ควรพิจารณาการคัดเลือกเพื่อลดความสูงต้นโดยการลดความยาวปล้องทั้ง 1 และ 2 โดยเฉพาะความยาวปล้องที่ 1 ที่สัมพันธ์โดยตรงต่อการตั้งตรงและลดเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นหลังการโน้มต้น

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์และวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายแบบแยกกลุ่มลักษณะของข้าวไร่ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ปี พ.ศ. 2560 พบว่าสามารถใช้ลักษณะที่เกี่ยวกับปล้องที่ 1 และ 2 ปริมาณลิกนินและซิลิกอนในการทำนายการตั้งตรงของต้นได้ โดยใช้สมการเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ทางลบกับการตั้งตรงของต้น ได้แก่ ความยาวปล้อง และปริมาณลิกนิน และความสัมพันธ์ทางบวกกับการตั้งตรงของต้น ได้แก่ เส้นผ่าศูนย์กลางปล้อง (ยกเว้นปล้องที่ 1) ความหนาของผนังปล้อง และปริมาณซิลิกอน ในการทำนายการตั้งตรงของต้นข้าวได้โดยใช้สมการเชิงเส้น

ขณะที่สามารถทำนายการต้านทานการหักล้มหรือเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นภายหลังการโน้มต้น โดยใช้สมการเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ในทิศทางลบกับการต้านทานการหักล้มของต้น ได้แก่ ความยาวปล้องที่ 1 และ 2 ปริมาณลิกนินและปริมาณโพแทสเซียม และสมการแสดงความสัมพันธ์ในทิศทางบวก ได้แก่ เส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่ 1 และ 2 ขณะที่การทำนายผลผลิต สามารถใช้สมการเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ในทิศทางลบกับเฉพาะกับความยาวปล้องที่ 1

การพบว่าเปอร์เซ็นต์เมล็ดเติมเต็มแสดงผลทางลบแม้จะไม่มีความสำคัญทางสถิติกับผลผลิตในการศึกษาสหสัมพันธ์และการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น อาจหมายถึงการให้ผลผลิตสูงในข้าวไร่ชุดที่นำมาศึกษานั้น ส่วนใหญ่พันธุ์หรือแปลงที่ให้ผลผลิตสูงจะมีสัดส่วนของเมล็ดที่ไม่เติมเต็มสูงด้วยเช่นกัน

จากการนำพันธุ์ PLU-SU-003 และ PLU-SU-005 ที่จัดอยู่ในกลุ่มพันธุ์ที่มีลำต้นตั้งตรงและต้านทานต่อการหักล้มได้ มาผสมกับพันธุ์อื่น ๆ ได้แก่ PLU-SI-001, PLU-SU-002, PLU-SU-004, CM-001, NYP-SU-001 และ CP-001 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพันธุ์ที่มีลักษณะเด่นอื่น ๆ เช่น องค์ประกอบผลผลิตและผลผลิต

หากพิจารณาความเป็นไปได้ในการแสดงออกของยีนจากทิศทางของค่าการแสดงของลูกผสมจากการวิเคราะห์ relative heterosis และขนาดของค่าจากการวิเคราะห์ heterobeltiosis พบว่ามีบางลักษณะที่แสดงออกในทิศทางลดค่าของลักษณะในลูกผสมแต่ไม่ถึงค่า 100 เปอร์เซนต์ใน heterobeltiosis เมื่อเทียบกับพ่อหรือแม่ที่ดีที่สุดแสดงว่าอาจมีการแสดงออกแบบข่มไม่สมบูรณ์หรือข่มบางส่วนโดยมีอัลลีลที่ควบคุมลักษณะลดค่าเหล่านั้นเป็นยีนข่ม ได้แก่ ลักษณะความสูงต้น จำนวนหน่อตอกอ จำนวนรวงตอกอ ความยาวปล้องที่ 2 และเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่ 1 และ 2

สำหรับลักษณะที่แสดงออกใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของพ่อแม่จากการวิเคราะห์ relative heterosis ทั้งในทิศทางบวกและลบ และมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ heterobeltiosis อาจมีความเป็นไปได้ที่ยีนควบคุมลักษณะจะแสดงออกแบบบวก ได้แก่ องค์การโน้มต้นซึ่งแสดงการตั้งตรงของต้นและความยาวรวง

ขณะที่ลักษณะที่เหลืออื่น ๆ อาจมีการแสดงออกของยีนแบบบวกได้ เนื่องจากพบค่า heterosis และ heterobeltiosis ในทิศทางบวกและลบ และการพบเปอร์เซ็นต์สูง-ต่ำ ในทั้งสองทิศทางแสดงให้เห็นว่าหลายๆ ลักษณะอาจมีการแสดงออกของอิทธิพลยีนแบบบวกหลายตำแหน่งยีนที่มีความซับซ้อน (Additive multiplicative interaction) หรืออาจเป็นแบบ Epistasis และ digenic interaction (ความเป็นไปได้ในการทำนายร่วมกันของยีนสองตำแหน่ง) ได้เช่นกัน ได้แก่ ลักษณะองค์การโน้มต้น เปอร์เซนต์การสปริงตัวของลำ

การโน้มต้น ความยาวปล้องที่ 1 ความหนาผนังปล้องที่ 1 และ 2 จำนวนเมล็ดเต็มเต็มต่อกอ จำนวนเมล็ดต่อกอ เปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มเต็ม น้ำหนัก 100 เมล็ด และน้ำหนักเมล็ดต่อรวง

ผลการประเมินลูกผสมโดยใช้การวิเคราะห์ relative heterosis และ heterobeltiosis โดยพิจารณาจากสองลักษณะ ได้แก่ องศาการโน้มต้น และเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นหลังการโน้ม ที่มีทิศทางเป็นบวก พบว่าคู่ผสมที่มีแนวโน้มเพิ่มทั้งสองลักษณะได้แก่ 7 คู่ผสม โดยมีเพียงสองคู่ที่เกิดจากการใช้พันธุ์ที่จัดให้เป็นพันธุ์ต้านทานการหักล้มและมีลักษณะตั้งตรงเป็นพ่อหรือแม่ ได้แก่ NYP-SU-001xPLU-SU-005 และ PLU-SU-005xPLU-SU-002 ซึ่งการมีพบค่า relative heterosis และ heterobeltiosis เป็นบวกแสดงถึงการเพิ่มลักษณะการตั้งตรงและการต้านทานการหักล้มไปทิศทางที่เพิ่มขึ้นเทียบกับค่าของพันธุ์ที่ดีที่สุดแม้จะไม่เทียบเท่า (ไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ heterobeltiosis) ขณะที่อีก 5 คู่ที่เหลือเป็นการผสมของพันธุ์ที่จัดให้อยู่ในกลุ่มมีลักษณะดีอื่น ๆ ได้แก่ PLU-SU-002xPLU-SU-004, PLU-SU-001xPLU-SU-004, NYP-SU-001xPLU-SU-001, NYP-SU-001xPLU-SU-002 และ NYP-SU-001xCP-001 ทั้งนี้มีสองคู่ผสมที่พบค่า heterobeltiosis ของการต้านทานการหักล้ม (ลักษณะเปอร์เซ็นต์สปริงตัวของลำต้นหลังการโน้ม) เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ (NYP-SU-001xPLU-SU-002 และ NYP-SU-001xCP-001) หรือมีการต้านทานการหักล้มดีกว่าพ่อหรือแม่ ขณะที่คู่ผสมที่เหลือมีค่าใดค่าหนึ่งระหว่างลักษณะเปอร์เซ็นต์สปริงตัวของลำต้นหลังการโน้มหรือการตั้งตรงของลำต้นลดลง แต่เมื่อพิจารณาลักษณะที่เกี่ยวกับปล้องของลูกผสมเหล่านี้พบว่า มีเพียงบางลักษณะเท่านั้นที่มีค่าไปในทิศทางที่สัมพันธ์กับการเพิ่มความต้านทานการหักล้มตามที่วิเคราะห์ผลมาก่อนหน้านี้ ทั้งนี้ส่วนใหญ่จะมีความยาวปล้องที่ลดลงและมีผนังปล้องที่หนาขึ้นแม้จะเป็นเพียงบางปล้องก็ตาม

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ ดังนี้

1) พันธุ์ PLU-SU-003 และ PLU-SU-005 สามารถจัดอยู่ในกลุ่มต้นตั้งตรงและต้านทานต่อการหักล้มได้เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์สปริงตัวของลำต้นหลังการโน้มสูง เป็นพันธุ์ที่มีปริมาณเซลลูโลสและซิลิโคนสูง ขณะที่พันธุ์อื่น ๆ ได้แก่ PLU-SI-001, PLU-SU-002, PLU-SU-004, CM-001, NYP-SU-001 และ CP-001 เป็นพันธุ์ที่มีลักษณะเด่นอื่น ๆ เช่น องค์ประกอบผลผลิตและผลผลิต ซึ่งสามารถนำมาใช้เพิ่มการพัฒนาพันธุ์หรือเพิ่มการตั้งตรงและต้านทานการหักล้มของลำต้นได้

2) จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของลักษณะต่าง ๆ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558-2560 อาจกล่าวได้ว่า ในการคัดเลือกลักษณะเพื่อเพิ่มความต้านทานการหักล้ม สามารถพิจารณาจากจำนวนเมล็ดต่อรวง ความยาวรวงร่วมด้วย และเนื่องจากพันธุกรรมที่แสดงลักษณะเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ที่มีขนาดเมล็ดเล็ก หากใช้พันธุ์ดังกล่าวนี้ในการปรับปรุงพันธุ์ หากยีนที่ควบคุมลักษณะที่ส่งเสริมการตั้งตรงหรือเพิ่มความต้านทานการหักล้ม (ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส ปริมาณลิกนิน ปริมาณซิลิโคน หรือปริมาณโพแทสเซียม) ไม่เชื่อมโยงกับยีนควบคุมขนาดเมล็ดหรือไม่เชื่อมโยงกับยีนที่ควบคุมการเติมเต็มของเมล็ดแล้ว อาจคัดเลือกเพื่อเพิ่มน้ำหนักเมล็ดหรือเพิ่มขนาดเมล็ด รวมทั้งคัดเลือกเปอร์เซ็นต์การติดเมล็ดพร้อมกันไปด้วยพร้อมกับการคัดเลือกต้นตั้งตรงหรือต้นที่สามารถต้านทานต่อการหักล้ม สำหรับความสูงต้นที่มาจากพันธุ์ที่นำมาศึกษาในครั้งนี้แม้จะไม่กระทบผลผลิตโดยตรงแต่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการหักล้ม ทั้งนี้ควรพิจารณาการคัดเลือกเพื่อลดความสูงต้นโดยการลดความยาวปล้องที่ 1 และ 2 โดยเฉพาะความยาวปล้องที่ 1 ที่สัมพันธ์โดยตรงต่อการตั้งตรงและลดเปอร์เซ็นต์การสปริงตัวของลำต้นหลังการโน้มต้น

3) จากการนำพันธุ์ PLU-SU-003 และ PLU-SU-005 ที่จัดอยู่ในกลุ่มพันธุ์ที่มีลำต้นตั้งตรงและต้านทานต่อการหักล้มได้ มาผสมกับพันธุ์อื่น ๆ ได้แก่ PLU-SI-001, PLU-SU-002, PLU-SU-004, CM-001, NYP-SU-001 และ CP-001 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพันธุ์ที่มีลักษณะเด่นอื่น ๆ เช่น องค์ประกอบผลผลิตและผลผลิต หากพิจารณาความเป็นไปได้ในการแสดงออกของยีนจากทิศทางของค่าลักษณะต่าง ๆ ที่มีการแสดงออกถูกผสมจากการวิเคราะห์ relative heterosis และขนาดของค่าลักษณะต่าง ๆ จากการวิเคราะห์ heterobeltiosis อาจแบ่งลักษณะต่าง ๆ ออกเป็นสามกลุ่มได้แก่ กลุ่มที่ 1 ลักษณะที่อาจมีการแสดงออกแบบข้ามไม่สมบูรณ์หรือข้ามบางส่วนโดยมีอัลลีลที่ควบคุมลักษณะลดค่าเหล่านั้นเป็นยีนข้าม ได้แก่ ลักษณะความสูงต้น จำนวนหน่อต่อกอ จำนวนรวงต่อกอ ความยาวปล้องที่ 2 และเส้นผ่าศูนย์กลางปล้องที่ 1 และ 2 กลุ่มที่ 2 ลักษณะที่แสดงออกอาจมีความเป็นไปได้ที่ยีนควบคุมลักษณะจะแสดงออกแบบบวก ได้แก่ องศาการโน้มต้นซึ่งแสดงการตั้งตรงของต้นและลักษณะความยาวรวง และกลุ่มที่ 3 ลักษณะที่อาจมีการแสดงออกของยีนแบบบวกของยีนหลายตำแหน่งยีนที่มีความซับซ้อน ได้แก่ ลักษณะองศาหลังการโน้มต้น เปอร์เซ็นต์การสปริงตัวหลังการโน้มต้น ความยาวปล้องที่ 1 ความหนาผนังปล้องที่ 1 และ 2 จำนวนเมล็ดเต็มต่อกอ จำนวนเมล็ดต่อกอ เปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มเต็ม น้ำหนัก 100 เมล็ด และน้ำหนักเมล็ดต่อรวง

4) จากลูกผสมที่สามารถศึกษาได้ มีเจ็ดคู่ผสมที่มีการเพิ่มลักษณะการตั้งตรงและการต้านทานการหักล้มไปทิศทางที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าของพ่อหรือแม่ที่ดีที่สุดแม้จะไม่เทียบเท่า (ไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ heterobeltiosis) ได้แก่ NYP-SU-001xPLU-SU-005, PLU-SU-005xPLU-SU-002, PLU-SU-002xPLU-SU-004, PLU-SU-001xPLU-SU-004, NYP-SU-001xPLU-SU-001, NYP-SU-001xPLU-SU-002 และ NYP-SU-001xCP-001 โดยพบว่าส่วนใหญ่มีความยาวปล้องที่ลดลงและมีผนังปล้องที่หนาขึ้นในบางปล้อง

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ปัญหาจากพันธุกรรมข้าวไร่ที่ค่อนข้างไวแสง ดังนั้นในการสร้างลูกผสมจะจำกัดเพียงหนึ่งฤดูกาลในแต่ละปี เพราะแม้จะมีการชักนำให้ออกดอกนอกฤดูกาลแล้วก็ไม่สำเร็จ ทำให้ความก้าวหน้าในการดำเนินโครงการค่อนข้างน้อยโดยเฉพาะหากเป็นโครงการวิจัยที่มีระยะเวลาสั้นเพียงหนึ่งปี นอกจากนี้การปลูกพืชเพื่อทำการทดสอบในฤดูกาลที่เริ่มเข้าสู่ฤดูแล้งซึ่งหมายถึงการมีพืชปลูกอื่น ๆ ค่อนข้างน้อยเนื่องจากปัญหาการขาดน้ำ ทำให้งานวิจัยได้รับความเสียหายอย่างหนักเนื่องจากศัตรูธรรมชาติ เช่น หนู และกระรอก การแก้ไขนี้อาจดำเนินการได้หากมีโรงเรือนที่ได้มาตรฐานหรือมีความเหมาะสม ซึ่งความเสียหายเนื่องจากศัตรูธรรมชาตินี้ ทำให้ผลการทดลองขาดข้อมูลที่สำคัญหลาย ๆ ลักษณะ โดยเฉพาะผลผลิตที่ได้รับความเสียหายในปลายฤดูปลูก และไม่สามารถเก็บข้อมูลได้

สำหรับข้อเสนอแนะอื่น ๆ เป็นเรื่องของการประมาณความสามารถในการต้านทานการหักล้มของต้นข้าวด้วยวิธีการอื่น ๆ อาจสามารถนำมาใช้เพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เช่น การใช้เทคนิคชีวโมเลกุล และการใช้เครื่องมือทางฟิสิกส์เพื่อช่วยประเมินความสามารถดังกล่าว

บรรณานุกรม

- กรมการข้าว. 2550. พันธุ์กรรมข้าวพื้นเมืองของกลุ่มชาติพันธุ์ ภายใต้โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. 228 หน้า.
- จิรัฐภูมิ เสนาคำ และ พรพนา กวีย์เจริญ. 2539. พันธุ์กรรมข้าว: บทบาทการอนุรักษ์และพัฒนาโดยชุมชน. เครือข่ายเกษตรกรรมทางเลือก. 134 หน้า.
- ฉวีวรรณ วุฒิญาโน. 2543. ข้าวพื้นเมืองไทย. ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร.
- ชัยฤทธิ์ ดำรงเกียรติ. 2555. ข้าวไร่กับการสร้างความมั่นคงทางอาหารบนพื้นที่สูง. เอกสารประกอบการบรรยาย เรื่อง “ข้าวไร่กับการสร้างความมั่นคงทางอาหาร” ในการอภิปรายพิเศษ เรื่อง “ข้าวกับสุขภาวะของคนบนพื้นที่สูง”. การประชุมวิชาการข้าวแห่งชาติ ครั้งที่ 2 วันที่ 21-23 ธันวาคม 2555 ณ โรงแรมสวิสโฮเทล เลอ คองคอร์ด ถนนรัชดาภิเษก กรุงเทพมหานคร. จำนวน 25 หน้า.
- วีรพันธ์ กันแก้ว. 2556. พันธุ์ข้าวไร่และข้าวปลูกในประเทศไทย. ใน เอกสารวิชาการ เรื่อง การถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิต และอนุรักษ์ความหลากหลายของเชื้อพันธุ์ข้าวปลูกและข้าวไร่เพื่อความมั่นคงด้านอาหารแก่เกษตรกรและชุมชน หน้า 1-11. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม, 99 หน้า.
- Acuna, T. L. B., Lafitte, H. R., and Wade, L. J. 2008. Genotype x environment interactions for grain yield of upland rice backcross lines in diverse hydrological environments. *Field Crops Research* 108: 117-125.
- Adhikari, B. N., Joshi, B. P., Shrestha, J., and Bhatta, N. R. 2018. Genetic variability, heritability, genetic advance and correlation among yield and yield components of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agriculture and Natural Resources* 1(1): 149-160.
- Agbo, C. U. and Obi, I. U. 2005. Yield and yield component analysis of twelve upland rice genotype. *Agro-Sci.* 4(1): 29-33.
- Akintunde, A. N. 2012. Path analysis step by step using excel. *Journal of Technical Science and Technology* 1(1): 9-15.
- Akinwale, M. G., Gregorio, G., Nwilene, F., Akinyele, B. O., Ogunbayo, S. A., and Odiyi, A. C. 2011. Heritability and correlation coefficient analysis for yield and its components in rice (*Oryza sativa* L.). *Afr. J. Plant Sci.* 5: 207-212.
- Albrecht, K. A., Martin, M. J., Russel, W. A., Wedin, W. F., and Buxton, D. R. 1986. Chemical and *in vitro* digestible dry matter composition of maize stalks after selection for stalk strength and stalk-rot resistance. *Crop Sci.* 26(5): 1051-1055.
- Ali, A., Khan, A. S., and Asad, M. A. 2002. Drought tolerance in wheat: Genetic variation and heritability for growth and ion relations. *Asian J. Plant Sci.* 1: 420-422.
- Allard, R. W. 1960. Principles of plant breeding. John Willey and Sons Inc., New York.
- Anjaneyulu, M., Reddy, D. R., and Reddy, K. H. P. 2010. Genetic variability, heritability and genetic advance in rice (*Oryza sativa* L.). *Res. Crops.* 11(2): 415-416.
- Aquino, R. C. and Jennings, P. R. 1966. Inheritance and significance of dwarfism in an indica rice variety. *Crop Sci.* 6: 551-554.

- Arite, T., Umehara, M., Ishikawa, S., Hanada, A., Maekawa, M., Yamaguchi, S., and Kyojuka, J. 2009. d14, a strigolactone insensitive mutant of rice, shows an accelerated outgrowth of tillers. *Plant Cell Physiol.* 50: 1416-1424.
- Bangdiwala, S. I. 2018. Regression: simple linear. *Int. J. Inj. Contr. Saf. Promot.* 25(1): 113-115.
- Bell, R. W. and Seng, V. 2004. Rainfed lowland rice-growing soils of Cambodia, Laos, and Northeast Thailand. In: Seng, V., Craswell, E., Fukai, S., and Fischer, K. (eds.). *Water in Agriculture. ACIAR Proceedings No. 116.* Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, Australia. pp. 161-173.
- Berry, P., Sterling, M., Spink, J., Baker, C., Sylvester-Bradley, R., Mooney, S., Tams, A., and Ennos, A. 2004. Understanding and reducing lodging in cereals. *Adv. Agron.* 84: 215-269.
- Berry, P., Spink, J., Gay, A. P., and Craigon, J. A. 2003. A comparison of root and stem lodging risks among winter wheat cultivars. *J. Agric. Sci.* 141: 191-202.
- Bhiah, K. M., Guppy, C., Lockwood, P., and Jessop, R. 2010. Effect of potassium on rice lodging under high nitrogen nutrition. *Proceed. 19th World Congress of Soil Sci., Soil solutions for a changing world*, pp. 136-139.
- Buerstmayr, H., Krenn, N., Stephan, U., Graugruber, H., and Zechner, E. 2007. Agronomic performance and quantity of oat (*Avena sativa* L.) genotypes of worldwide origin produced under central European growing conditions. *Field Crops Res.* 101: 341-351.
- Cenci, C. A., Grando, S. and Ceccarelli, S. 1984. Culm anatomy in barley (*Hordeum vulgare* L.) *Can. J. Bot.* 62: 2023-2027.
- Chabannes, M., Ruel, K., Yoshinaga, A., Chabbert, B., Januneau, A., Joseleau, J. P., and Boudet, A. M. 2001. In situ analysis of lignins in transgenic tobacco reveals a differential impact of individual transformations on the spatial patterns of lignin deposition at the cellular and subcellular levels. *Plant J.* 28(3): 271-282.
- Chen, S., Lin, X. H., Xu, C. G., and Zhang, Q. F. 2000. Improvement of bacterial blight resistance of 'Minghui 63', an elite restorer line of hybrid rice, by molecular marker-assisted selection. *Crop Sci.* 40: 239-244.
- Chen, L., Yang, Y., Cui, C., Lu, S., Lu, Q., Du, Y., Su, R., Chai, Y., Li, H., and Chen, F. 2018. Effects of Vrn-B1 and Ppd-D1 on developmental and agronomic traits in Rht5 dwarf plants of bread wheat. *Field Crop. Res.* 219: 24-32.
- Chen, X., Shi, C., Yin, Y., Wang, Z., Shi, Y., Peng, D., Ni, Y., and Cai, T. 2011a. Relationship between lignin metabolism and lodging resistance in wheat. *Acta Agron. Sin.* 37: 1616-1622.
- Chen, X. G., Shi, Y. H., Wang, C. Y., Yin, Y. P., Ning, T. Y., Shi, C. Y., Li, Y., and Wang, Z. L. 2011b. Effects of nitrogen and PP333 application on the lignin synthesis of stem in relation to lodging resistance of wheat. *Sci. Agric. Sin.* 44: 3529-3536. (in Chinese with English abstract)

- Comstock, R. E. and Robinson, H. F. 1952. Estimation of average dominance of genes in heterosis. Iowa State College Press, Ames, pp: 494-516.
- Cong, B., Liu, J., and Tanksley, S. D. 2002. Natural alleles at a tomato fruit size quantitative trait locus differ by heterochronic regulatory mutations. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99: 13606–13611.
- Crook, M. J. and Ennos, A. R. 1994. Stem and root characteristics associated with lodging resistance in four winter wheat cultivars. *J. Agric. Sci.* 123: 167-174.
- Cui, D., Wei, J., Nie, L., and Chen, F. 2002. Study on the genetic model stem characters in wheat. *J. Henan Agric. Sci.* 9: 4-7.
- Dabi, A. and Gidesa, A. 2016. Evaluation of Improved Upland Rice Varieties for Potential rice producing area Kemashi Zone of Benishangul Gumze of Ethiopia. *Ecology and Evolutionary Biology.* 1(1): 1-6. Doi:10.11648/j.eeb.20160101.11
- Dan, Z., Hu, J., Zhou, W., Yao, G., Zhu, R., Huang, W. and Zhu, Y. 2015. Hierarchical additive effects on heterosis in rice (*Oryza sativa* L.). *Front Plant Sci.* 6: 738 doi: 10.3389/fpls.2015.00738.
- Del Rio, J. C., Rencoret, J., Prinsen, P., Martínez, A. N. T., Ralph, J., and Gutiérrez, A. 2012. A structural characterization of wheat straw lignin as revealed by analytical pyrolysis, 2D-NMR, and reductive cleavage methods. *J. Agric. Food Chem.* 60: 5922-5935.
- Dumlupinar, Z., Kara, R., Dokuyucu, T., and Akkaya, A. 2012. Correlation and path analysis of grain yield and yield components of some Turkish oat genotypes. *Pak. J. Bot.* 44(1): 321-325.
- Dunn, G. J. and Briggs, K. G. 1989. Variation in culm anatomy among barley cultivars differing in lodging resistance. *Can. J. Bot.* 67: 1838-1843.
- Easson, D. L., White, E. M., and Pickles, S. J. 1993. The effects of weather, seed rate and cultivar on lodging and yield in winter wheat. *J. Agric. Sci.* 121(2): 145-156.
- Efissue, A. A., Umunna, B. C., and Orlichukwu, J. A. 2014. Effects of yield components on yield potential of some lowland rice (*Oryza sativa* L.) in coastal region of Southern Nigeria. *J. Plant Breed. Crop Sci.* 6(9): 119-127.
- Fallah, A. 2008. Studies effect of silicon on lodging parameters in rice plant under hydroponics culture in a greenhouse experiment. In *Proceedings of the Silicon in Agriculture Conference, Wild Coast Sun, South Africa, 26-31 October 2008*; pp. 26-31.
- Feng-zhuan, Z., Zheng-xun, J., Guo-hui, M., Wen-nan, S., Hai-ying, L., Mei-lan, X., and Yan, L. 2010. Relationship between lodging resistance and chemical contents in culms and sheaths of japonica rice during grain filling. *Rice Sci.* 17(4): 311-318.
- Flintham, J. E., Borner, A., Worland, A. J., and Gale, M. D. 1997. Optimizing wheat grain yield: effects of Rht (gibberellin-insensitive) dwarfing genes. *J. Agric. Sci.* 128: 11-25.
- Foster, K. W. and Rutger, J. N. 1978. Inheritance of semidwarfism in rice, *Oryza sativa* L. *Genetics* 88: 559–574.

- Gendua, P. A., Yamamoto, Y., Miyazaki, A., Yoshida, T., and Wang, Y. L. 2009. Effects of the tillering nodes on the main stem of a chinese large-panicle-type rice cultivar, Yangdao 4, on the growth and yield-related characteristics in relation to crop-ping season. *Plant Prod Sci.* 12(2): 257-266.
- Gomez-Roldan, V., Fermas, S., Brewer, P. B., Puech-Pages, V., Dun, E. A., Pillot, J. P., Letisse, J. P., Matusova, R., Danoun, S., Portais, J. C., Bouwmeester, H., Becard, G., Beveridge, C. A., Rameau, C., and Rochange, S. F. 2008. Strigolactone inhibition of shoot branching. *Nature* 455(7210): 189-194.
- Grafius, J. E. and Brown, H. M. 1954. Lodging resistance in oats. *Agron. J.* 46: 414-418.
- Guo, Y. H., Zhu, S. G., Zhang, B. L., and Du, H. 2003a. Influence of different cultivation conditions on biochemistry components of rice culms. *J Shenyang Agric Univ*, 34(1): 4-7. (in Chinese with English abstract)
- Guo, M., Rupe, M. A., Danilevskaya, O. N., Yang, X. F., Hu, Z. H. 2003b. Genome-wide mRNA profiling reveals heterochronic allelic variation and a new imprinted gene in hybrid maize endosperm. *Plant J.* 36 30-44. 10.1046/j.1365-313X.2003.01852.x
- Gupta, P. C. and O'Toole, J. C. 1986. Upland rice: a global perspective, by International Rice Research Institute. International Rice Research Institute, Manila, Philippines. 360 Pages.
- Hargrove, T. R. and Cabanilla, V. L. 1979. The impact of semi-dwarf varieties on Asian rice-breeding programs. *Biol. Sci.* 29: 731-735.
- Hariyono, D. and Zaini, A. H. 2018. Yield of local varieties of paddy (*Oryza sativa* L.) with different plant spacing in rainy season. *Agronomy* 17: 118-122.
- Harrington, J. F. 1972. Seed storage and longevity. In Kozlowski, T. T., *Seed Biology*, v. 3 pp. 145-245, illus, New York and London.
- Haryanto, T. A. D., Shon, T. K., and Yoshida, T. 1998. Effects of selection for yield components on grain yield in pearl millet (*Pennisetum typhoideum* Rich.). *Plant Prod. Sci.* 1(1): 52-55.
- Hasan, M. M., Rafii, M. Y., Ismail, M. R., Mahmood, M., Rahim, H. A., Alam, Md. A, Ashkani, S., Malek, Md. A., and Latif, M. A. 2015. Review; Agriculture and environmental biotechnology: Marker-assisted backcrossing: a useful method for rice improvement. *Biotechnol. Biotec. Eq.* 29(2): 237-254.
- Hay, R. and Porter, J. 2006. *The physiology of crop yield*. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 314 pp.
- Hernandez-Apaolaza, L. 2014. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plant? A review. *Planta* 240: 447-458.
- Hirano, K., Okuno, A., Hobo, t., Ordonio, R., Shinozaki, Y., Asano, K., et al. 2014. Utilization of stiff culm trait of rice smos1 mutant for increased lodging resistance. *PLoS ONE.* 9: e.96009 10.1371/journal.pone.0096009.

- Hochholdinger, F. and Hoecker, N. 2007. Towards the molecular basis of heterosis. *Trends Plant Sci.* 12 427–432. Doi: 10.1016/j.tplants.2007.08.005.
- Hyles, J., Vautrin, S., Pettolino, F., MacMillan, C., Stachurski, Z., Breen, J., Berges, H., Wicker, T., and Spielmeyer, W. 2017. Repeat-length variation in wheat cellulose synthase-like gene is associated with altered tiller number and stem cell wall composition. *J. Exp. Bot.* 68: 1519-1529.
- Ibrahim, S. M., Ramalingam, A., and Subramaniam, M. 1990. Path analysis of rice grain yield under rainfed lowland conditions. *Int. Rice Res. Notes.* 15(1): 11.
- Idris, M. D., Hossain, M. M., and Choudhury, F. A. 1975. The effect of silicon lodging of rice in presence of added nitrogen. *Plant Soil* 43: 691-695.
- Ikeda-Kawakatsu, K., Yasuno, N., Oikawa, T., Iida, S., Nagota, Y., Maekawa, M., et al. 2009. Expression level of *ABERRANT PANICLE ORGANIZATION 1* determines rice inflorescence form through control of cell proliferation in the meristem. *Plant Physiol.* 150: 736-747.
- IRRI (International Rice Research Institute). 1984. Upland rice in Asia, pp. 45-68. In an overview of upland rice research, Proceedings, Bouaké, Ivory Coast upland rice workshop, 1982, International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.
- IRRI (International Rice Research Institute). 1998. World rice statistics. Los Banos, Laguna, Phillippines.
- IRRI (International Rice Research Institute). 1990. Rice production. Area and yield. World rice statistics 1990. IRRI. Philippines. P 1-7.
- Ishimaru, K. 2003. Identification of a locus increasing rice yield and physiological analysis of its function. *Plant Physiol.* 133: 1083–1090.
- Ishimaru, K., Togawa, E., Ookawa, T., Kashiwagi, T., Madoka, Y., and Hirotsu, N. 2008. New target for rice lodging resistance and its effect in a typhoon. *Planta* 227: 601-609.
- Islam, M. S., Peng, S., Visperas, R. M., Ereful, N., Bhuiya, M. S. Y., and Julfiquar, A. W. 2007. Lodging-related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem. *Field Crops Res.* 101: 240-248.
- Jellum, M. D. 1962. Relationship between lodging resistance and certain culm characters in oats. *Crop Sci.* 2: 263-267.
- Jennings, P. R., Coffman, W. R., and Kauffman, H. E. 1979. Rice improvement. IRRI, Los Baños, The Philippines. 186 pp.
- Jezowski, S., Adamski, T. and Surma, M. 1987. Diallel analysis of characters determining lodging resistance of barley (*Hordeum vulgare* L.) II. A genetic analysis of morphological characters of the stem. *Genet. Pol.* 28: 341-350.
- Jia, B., Zhao, X., Qin, Y., Irfan, M., Kim, T., Wang, B., Wang, S., and Sohn, J. K. 2019. Quantitative trait loci mapping of panicle traits in rice. *Mol. Biol. Res. Commun.* 8(1): 9-15.

- Kaack, K. and Schwarz, K.-U. 2001. Morphological and mechanical properties of *Miscanthus* in relation to harvesting, lodging and growth conditions. *Ind. Crops Prod.* 14: 145-154.
- Kadidaa, B., Sadimantara, G. R., Suaib, Safuan, L. O., and Muhidin. 2017. Genetic diversity of local upland rice (*Oryza sativa* L.) genotypes based on agronomic traits and yield potential in North Buton, Indonesia. *Asian J. Crop Sci.* 9: 109-117.
- Kamisaka, S., Takeda, S., Takahashi, K., and Shibata, K. 1990. Diferulic and ferulic acid in the cell wall of *Avena* coleoptiles-their relationships to mechanical properties of the cell wall. *Physiol. Plant.* 78: 1-7.
- Karim, M. D. H. and Jahan, M. A. 2013. Study of lodging resistance and its associated traits in bread wheat. *ARPN J. Agri. Biol. Sci.* 8(10): 683-687.
- Kashiwagi, T., Hirotsu, N., Modoka, Y., Ookawa, T., and Ishimaru, K. 2007. Improvement of resistance to bending-type lodging in rice. *Jpn. J. Crop Sci.* 76: 1-9.
- Kashiwagi, T. and Ishimaru, K. 2004. Identification and functional analysis of a locus for improvement of lodging resistance in rice. *Plant Physiol.* 134: 676-683.
- Kashiwagi, T., Modoka, Y., Hirotsu, N., and Ishimaru, K. 2006. Locus *prl5* improves lodging resistance of rice by delaying senescence and increasing carbohydrate reaccumulation. *Plant Physiol. Bioch.* 44(2-3): 152-157.
- Kashiwagi, T., Togawa, E., Hirotsu, N., and Ishimaru, K. 2008. Improvement of lodging resistance with QTLs for stem diameter in rice (*Oryza sativa* L.). *Theor. Appl. Genet.* 117: 749-757.
- Kelbert, A. J., Spaner, D., Briggs, K. G. and King, J. R. 2004. Screening for lodging resistance in spring wheat breeding programmers. *Plant Breed.* 123: 349.
- Keller, M., Karutz, C. H., Schmid, J. E., Stamp, P., Winzeler, M., Keller, B. and Messmer, M. M. 1999. Quantitative trait loci for lodging resistance in segregating wheat x spelt population. *Theor. Appl. Genet.* 98: 1171-1182.
- Khush, G. S. 1999. Green revolution: preparing for the 21st century. *Genome* 42: 646-655.
- Kim, S. G., Kim, K. W., Park, E. W., and Choi, D. 2002. Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: A possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. *Phytopathology* 92: 1095-1103.
- Kinoshita, N., Kato, M., Koyasaki, K., Kawashima, T., Nishimura, T., Hirayama, Y., Takamura, I., Sato, T., and Kato, K. 2017. Identification of quantitative trait loci for rice grain quality and yield-related traits in two closely related *Oryza sativa* L. subsp. *japonica* cultivars grown near the northernmost limit for rice paddy cultivation. *Breed. Sci.* 67(3): 191-206.
- Knapp, J., Harm, C., and Volence, J. 1987. Growth regulator effects on wheat culm nonstructural and structural carbohydrates and *lingin1*. *Crop Sci.* 27: 1201-1205.
- Kojima, Y., Ebana, K., Fukuoka, S., Nagamine, T., and Kawase, M. 2005. Development of an RFLP-based rice diversity research set of germplasm. *Breed. Sci.* 55: 431-440.

- Kokubo, A., Kuraishi, S., and Sakurai, N. 1989. Culm strength of barley: correlation among maximum bending stress, cell wall dimensions, and cellulose concentration. *Plant Physiol.* 91: 876-882.
- Kong, E., Liu, D., Guo, X., Yang, W., Sun, J., Li, X., Zhan, K., Cui, D., Lin, J. and Zhang, A. 2013. Anatomical and chemical characteristics associated with lodging resistance in wheat. *Crop J.* 1: 43-49.
- Kuczyńska, A., Surma, M. and Adamski, T. 2007. Method to predict transgressive segregation in barley and other self-pollinated crop. *J. Appl. Genet.* 48(4): 321-328.
- Kumar, A., Tiwari, R. K. S., Parihar, S. S., Pandya, K. S., and Janoria M P. 1999. Janoria: Performance of prototype rice lines from ideotype breeding. *Int. Rice Res. Notes* 24: 18-19.
- Kumar, M., Sharma, P. R., Krakash, N., and Singh, P. K. 2009. Selection criteria for high yielding genotypes in early generations of rice. *SAARC J. Agric.* 7: 37-42.
- Kuroda, E., Ookawa, T., and Ishihara, K. 1989. Analysis on difference of dry matter production between rice cultivars with different plant height in relation to gas diffusion inside stands. *Jpn. J. Crop Sci.* 58: 374-382.
- Lafarge, M., Broad, I. J., and Hammer, G. L. 2002. Tillering in grain sorghum over a wide range of population densities: Identification of a common hierarchy for tiller emergence, leaf are development and fertility: *Ann. Bot.* 90(1): 87-88.
- Lestari, A. P., Suwarno, Trikoesoemaningtyas, Sopandie, D., and Aswidinnoor, H. 2015. Panicle length and weight performance of F3 population from local and introduction hybridization of rice varieties. *HAYATI J. Biosci.* 22(2): 87-92.
- Li, H. J., Zhang, X. J., Li, W. J., Xu, Z. J., and Xu, H. 2009. Lodging resistance in japonica rice varieties with different panicle types. *Chin. J. Rice Sci.* 23(2): 191–196. (in Chinese with English abstract)
- Li, J., Zhang, H., Gong, J., Chang, Y., Huo, Z., Xu, K., and Wei, H. 2011b. Effects of different planting methods on the culm lodging resistance of super rice. *Sci. Agric. Sin.* 44: 2234-2243.
- Li, Q. Q. 1998. Creation, evaluation and utilization of winter wheat germplasm. Shangdon Science and Techonology Press, Jinan. 203-219.
- Li, Y., Fan, C., Xing, Y., Jiang, Y., Luo, L., Sun, L., Shao, D., Xu, C., Li, X., Xiao, J. et al. 2011a. Natural variation in GS5 plays an important role in regulating grain size and yield in rice. *Nat. Genet.* 43: 1266–1269.
- Li, Y., Qian, Q., Zhou, Y., Yan, M., Sun, L., Zhang, M., Fu, Z., Wang, Y., Han, B., and Pang, X. 2003. BRITTLE CULM1, which encodes a COBRA-like protein, affects the mechanical properties of rice plants. *Plant Cell* 15: 2020-2031.
- Li, Y. H. 1979. Morphology and anatomy of Gramineous crop. Shanghai Sci-Tech Press, Shanghai (in Chinese).

- Ling, Q. H. 2007. Theory and technology of precise and quantitative cultivation in rice. China Agriculture Press, Beijing, China, 100-103. (in Chinese)
- Ling, Q. H., Zhang, H. C., Su, Z. F., and Ling, L. 1994. New theories of rice cultivation-Leaf-age Model of rice. Science Press, Beijing, pp. 191-195 (in Chinese).
- Liu, I. J., Yuan, L. M., Wang, Z. Q., Xu, G. W., and Chen, Y. 2002. Preliminary studies on physiological reason and countermeasure of lodging in dry-cultivated rice. Chin. J. Rice Sci. 16: 225-230 (in Chinese with English abstract).
- Lu, K. L., Yin, Y. P., Wang, Z. L., Li, Y., Peng, D. L., Yang, W. B., Cui, Z. Y., Yang, D. Q., and Jiang, W. W. 2014. Effect of nitrogen fertilization timing on lignin synthesis of stem and physiological mechanism of lodging resistance in wheat. Acta Agron. Sin. 38(1): 121-128. (in Chinese with English abstract).
- Ma, G. H., Deng, Q. Y., Wan, Y. Z., and Wang, X. H. 2000. Resistant physiology to lodging and morphological characters of super hybrid rice: I. Differences of Si, K and fiber contents of the plant between 64S/E32 and Shanyou 63. Hunan Agric Univ: Nat Sci, 26(5): 329-331. (in Chinese with English abstract)
- Ma, J., Ma, W. B., Tian, Y. H., Yang, J. D., Zhou, K. D., and Zhu, Q. S. 2004. The culms lodging resistance of heavy panicle type of rice. Acta Agron. Sin. 30(2): 143-148. (in Chinese with English abstract)
- Ma, J. F. and Yamaji, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. Trends Plant Sci. 11: 392-397.
- Ma, Q.-H. 2009. The expression of caffeic acid 3-O-methyltransferase in two wheat genotypes differing in lodging resistance. J. Exp. Bot. 60(9): 2763-2771.
- Mackill, D. J. and Rutger, J. N. 1979. The inheritance of induced-mutant semidwarfing genes in rice. J. Hered. 70: 335-341.
- Mariani, L. and Ferrante, A. 2017. Agronomic management for enhancing plant tolerance to abiotic stresses-drought, salinity, hypoxia, and lodging. Horticulturae 3: 52.
- Martinez-Eixarch, M., Catalá, M., Tomás, N. Pla, E., and Zhu, D. 2015. Tillering and yield formation of a temperate Japonica rice cultivar in a Mediterranean rice agrosystem. Span. J. Agric. Res. 13(4):e0905 Doi:10.5424/sjar/2015134-7085.
- Matsubayashi, M., Ito, R., Nomoto, T., Takase, T., and Yamada, N. 1967. Theory and practice of growing rice. Fuji Publ Co Ltd, Tokyo. 527 pp.
- Milligan, S. B., Gravois, K. A., Bischoff, K. P., and Martin, F. A. 1990. Crop effects on genetic relationships among sugarcane tratis. Crop Sci. 30: 927-931.
- Minakuchi, K., Kameoka, H., Yasuno, N., Umehara, M., Luo, L., Kobayashi, K., et al. 2010. *FINE CULM1 (FC1)* works downstream of strigolactones to inhibit the outgrowth of axillary buds in rice. Plant Cell Physiol. 51: 1127-1135.
- Mohapatra, P. K. and Kariali, E. 2008. Time of emergence determines the pattern of dominance of rice tillers. Aust. J. Crop Sci. 1(2): 53-62.

- Mulder, E. G. 1954. Effect of mineral nutrition on lodging of cereals. *Plant Soil* 5: 246–306.
- Mukherjee, K. K., Kohli, S. P. and Sethi, K. L. 1967. Lodging resistance in wheat. *Indian. J. Agron.* 12: 56-61.
- Mulsanti, I. W., Yamamoto, T., Ueda, T., Samadi, A. F., Kamahora, E., Rumanti, I. A., Thanh, V. C., Adachi, S., Suzuki, S., and Kanekatsu, M. 2018. Finding the superior allele of japonica-type for increasing stem lodging resistance in indica rice varieties using chromosome segment substitution lines. *Rice* 11: 25. Doi:10.1186/s12284-018-0216-3.
- Murai, M., Takamur, I., Sato, S., Tokutome, T., and Sato, Y. 2002. Effects of the dwarfing gene originating from “Dee-geo-woo-gen” on yield and its related traits in rice. *Breed. Sci.* 52: 95-100.
- Nakano, H., Takai, T., and Kondo, M. 2019. Identification of quantitative trait loci for panicle structure and grain filling using a cross between indica- and japonica-type high-yielding rice cultivars. *Plant Prod. Sci.* 22(4): 443-455.
- Nakano, H., Yoshinaga, S., Takai, T., Arai-Sanoh, Y., Kondo, K., Yamamoto, T., et al. 2017. Quantitative trait loci for large sink capacity enhance rice grain yield under free-air CO₂ enrichment conditions. *Sci. Rep.* 7: 1827.
- Neenan, M. and Spencer-Smith, J. 1975. An analysis of the problem of lodging with particular reference to wheat and barley. *J. Agric. Sci.* 85: 495-507.
- Nelson, M. A. 2008. Alberta.ca. Agricultural and rural development. [online] Available: [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/crop1271](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/crop1271) (สืบค้น 25 มิถุนายน 2556)
- Nomura, T., Arakawa, N., Yamamoto, T., Ueda, T., Adachi, S., Yonemaru, J. Abe, A., Takagi, H., Yokoyama, T., and Ookawa, T. 2019. Next generation long-culm rice with superior lodging resistance and high grain yield, Monster Rice 1. *PLoS One* 14(8): e022124.
- Norden, A. J. and Frey, K. J. 1959. Factors associated with lodging resistance in oats. *Agron. J.* 51: 335-338.
- Oehme, F. 1989. Untersuchungen zur Standfestigkeit bei Winterroggen. I. Mitt. Prüfung von Pflanzenmerkmalen zur Bewertung der Standfestigkeit. *Archiv fur Züchtungsforsch.* Berlin 19: 407-414.
- Ogunbayo, S. A., Sie, M., Ojo, D. K., Sanni, K. A., Akinwale, M. G. *et al.*, 2014. Genetic variation and heritability of yield and related traits in promising rice genotypes (*Oryza sativa* L.). *J. Plant Breed. Crop Sci.* 6(11): 153-159.
- Oikawa, T. and Kyojuka, J. 2009. Two-step regulation of LAX PANICLE1 protein accumulation in axillary meristem formation in rice. *Plant Cell* 21: 1095–1108.
- Okuno, A., Hirano, K., Asano, K., Takase, W., Masuda, R., Morinaka, Y., Ueguchi-Tanaka, M., Kitano, H., and Matsuoka, M. 2014. New approach to increasing rice lodging resistance and biomass yield through the use of high gibberellin producing varieties. *PLoS One* 9: e86870.

- Ookawa, T., Hobo, T., Yano, M., Murata, K., Ando, T., Miura, H., Asano, K., Ochiai, Y., Ikeda, M., Nishitani, R., et al. 2010. New approach for rice improvement using a pleiotropic QTL gene for lodging resistance and yield. *Nat. Commun.* 1: 132.
- Ookawa, T., Inoue, K., Matsuoka, M., Ebitani, T., Takarada, T., Yamamoto, T., et al. 2014. Increased lodging resistance in long-culm, low-lignin *gh2* rice for improved feed and bioenergy production. *Sci. Rep.* 4: 6567
- Ookawa, T. and Ishihara, K. 1992. Varietal difference of physical characteristic of the culm related to lodging resistance in paddy rice. *Jpn. J. Crop Sci.* 61: 419–425.
- Ookawa, T. and Ishihara, K. 1993. Varietal difference of the cell wall components affecting the bending stress of the culm relating to the lodging resistance in paddy rice. *Jpn. J. Crop Sci.* 62: 378–384.
- Pan, J. F., Wang, B., Cui, K. H., Huang, J. L., and Nie, L. X. 2016. Effects of nitrogen application on accumulation and translocation of non-structural carbohydrates in internodes and sheaths of rice, *Chin. J. Rice. Sci.* 30: 273-283 (in Chinese, with English abstract).
- Peng, D., Chen, X., Yin, Y., Lu, K., Yang, W., Tang, Y., and Wang, Z. 2014. Lodging resistance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): Lignin accumulation and its related enzymes activities due to the application of paclobutrazol or gibberellin acid. *Field Crop. Res.* 157: 1-7.
- Peng, S. and Khush, G. S. 2003. Four decades of breeding for varietal improvement of irrigated lowland rice in the international rice research institute. *Plant Prod. Sci.* 6: 157-164.
- Peng, S., Yang, J., Garcia, F. V., Laza, R. C., Visperas, R. M., Sanico, A. L., Chavez, A. Q., and Virmani, S. S. 1998. Physiology-based crop management for yield maximization of hybrid rice. In: *Advances in hybrid rice technology. Proc 3rd Int. Symp. on Hybrid Rice, 14-16 November 1996, Hyderabad, India.* Pp: 157-176.
- Poudel, A. P. 2018. Analysis of growth and yield attributing characteristic of direct seeded upland rice genotypes in Western Hills of Nepal. *Acta Sci. Agric.* 2(7): 117-122.
- Prasad, B., Patwary, A. K. and Biswas, P. S. 2001. Genetic variability and selection criteria in fine rice (*Oryza sativa* L.). *Pak. J. Biol. Sci.* 4(10): 1188-1190.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ranawake, A. L. and Amarasinghe, U. G. S. 2014. Relationship of yield and yield related traits of some traditional rice cultivars in Sri Lanka as described by correlation analysis. *J. Sci. Res. Rep.* 3(18): 2395-2403.
- Rani, M. G., Satyanarayana, P. V., Ahmed, M. L., Rani, Y. A., and Rao, V. S. 2015. Gene action of elite rice lines for yield and lodging resistance related traits. *Res. Crops.* 16(4): 689-697.
- Ratna, M., Begum, S., Husna, A., Dey, S. R., and Hossain, M. S. 2015. Correlation and path coefficients analyses in Basmati rice. *Bangladesh J. Agric. Res.* 40(1): 153-161.

- Rieseberg, L. H., Archer, M. A. and Wayne, R. K. 1999. Transgressive segregation, adaptation and speciation. *Heredity* 83: 364-372.
- Rocquigny, P. M., Entz, M. H., Gentile, R. M., and Duguid, S. D. 2004. Yield physiology of a semi dwarf and tall oat cultivar. *Crop Sci.* 44: 2116-2122.
- Salman, D., Morteza, S., Dariush, Z., Abbas, G. M., Reza, Y., Ehsan, G. D., and Reza, N. A. 2012. Application of nitrogen and silicon rates on morphological and chemical lodging related characteristics in rice (*Oryza sativa* L.) at North of Iran. *J. Agric. Sci.* 4: 12. Doi:10.5539/jas.v4n6p12.
- San-oh, Y., Kondo, M., Ookawa, T. and Hirasawa, T. 2008. Ecophysiological analysis on effect of planting pattern on biomass production and grain yield in rice. *Jpn. Agric. Res. Q.* 42(2): 79-89.
- Sarker, Z. I., Shamsuddin, A. K. M., Rahman, L., and Ara, R. 2007. Gene actions of traits contributing to lodging resistance in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Bangladesh J. Pl. Breed. Genet.* 20(2): 23-30.
- Sasaki, A., Ashikari, M., Ueguchi-Tanaka, M., Itoh, H., Nishimura, A., Swapan, D., Ishiyama, K., Saito, T., Kobayashi, M., Khush, G. S. et al. 2002. Green revolution: a mutant gibberellin-synthesis gene in rice. *Nature* 416: 701-702.
- Schnable, P. S. and Springer, N. M. 2013. Progress toward understanding heterosis in crop plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 64 71–88. Doi:10.1146/annurev-arplant-042110-103827.
- Shahrudin, S., Putech, A., and Juraimi, A. S. 2014. Response of source and sink manipulations on yield of selected rice (*Oryza sativa* L.) varieties. *J. Adv. Agric. Tech.* 1(2): 125-131.
- Seesang, J., Sripicchitt, P., Somchit, P., and Sreewongchai, T. 2013. Genotypic correlation and path coefficient for some agronomic traits of hybrid and inbred rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Asian J. Crop Sci.* 5: 319-324.
- Setter, T. L., Conocono, E. A., Egdane, J. A., and Kropff, M. J. 1995. Possibility of increasing yield potential of rice by reducing panicle height in the canopy. I. Effects of panicles on light interception and canopy photosynthesis. *Aust. J. Plant Physiol.* 22(3): 441-451.
- Setter, T. L., Laureles, E. V., and Mazaredo, A. M. 1997. Lodging reduces yield of rice by selfshading and reductions in canopy photosynthesis. *Field Crops Res.* 49: 95-106.
- Shah, D. U., Reynolds, T. P. S., and Ramage, M. H. 2017. The strength of plants: theory and experimental methods to measure the mechanical properties of stems. *J. Exp. Bot.* Doi:10.17863/CAM.10899.
- Shah, L., Yahya, M., Shah, S. M. A., Nedeem, M., Ali, A., Ali, A., Wang, J., et al. 2019. Improving lodging resistance: using wheat and rice as classical examples. *Int. J. Mol. Sci.* 20: 4211; doi:10.3390/ijms20174211

- Shahidullah, S. M., Hanafi, M. M., Ashrafuzzaman, M., Hakim, M. A., and Karim, M. R. 2011. Plant stature of aromatic rice genotypes in the environment of Bangladesh. *J. Environ. Biol.* 32: 821-829.
- Shahrudin, S., Puteh, A., and Jaraimi, A. S. 2014. Responses of source and sink manipulations on yield of selected rice (*Oryza sativa* L.) varieties. *J. Adv. Agric. Technol.* 1(2): 125–131.
- Shen, H., Fu, C., Xiao, X., Ray, T., Tang, Y., Wang, Z., and Chen, F. 2009. Developmental control of lignification in stems of lowland switchgrass variety Alamo and the effects on saccharification efficiency. *Bioenergy Res.* 2(4)L 233-245.
- Shi, J. Q., Li, R. Y., Zou, J., Long, Y., Meng, J. L. 2011. A dynamic and complex network regulates the heterosis of yield-correlated traits in rapeseed (*Brassica napus* L.). *PLoS ONE* 6:e21645 10.1371/journal.pone.0021645.
- Shomura, A., Izawa, T., Eban, K., Ebitani, T., Kanegae, H., Konishi, S., and Yano, M. 2008. Deletion in a gene associated with grain size increased yields during rice domestication. *Nat. Genet.* 40: 1023–1028.
- Shrestha, S., Asch, F., Dusserre, J., Ramanantsoanirina, A., and Brueck, H. 2012. Climate effects on yield components as affected by genotypic responses to variable environmental conditions in upland rice systems at different altitudes. *Field Crops Res.* 134: 216–228. doi: 10.1016/j.fcr.2012.06.011
- Soni, S. K., Yadav, V. K., Ram, T., and Pratap, N. 2013. Selection criteria, yield relationship with component traits and grouping of tropical japonica, indica lines and derived hybrids of rice (*Oryza sativa* L.). *Soc. Sci. Dev. Agric. Tech.* 8: 630-635.
- Sumanth, V., Suresh, B. G., Ram, B. J., and Srujana, G. 2017. Estimation of genetic variability, heritability and genetic advance for grain yield components in rice (*Oryza sativa* L.). *J. Pharmacognosy Phytochem.* 6(4): 1437-1439.
- Sürek, H. and Beşer, N. 2005. Selection for grain yield and yield components in early generations for temperate rice. *Philippine Crop Sci.* 28(3): 3-15.
- Tadahiko, M. 1997. Physiological nitrogen efficiency in rice: nitrogen utilization, photosynthesis and yield potential. *Plant Soil.* 196: 201-210.
- Takai, T., Ikka, T., Kondo, K., Nonoue, Y., Ono, N., Arai-Sanonh, Y., et al. 2014. Genetic mechanisms underlying yield potential in the rice high-yielding cultivar Takanari, based on reciprocal chromosome segments substitution lines. *BMC Plant Biol.* 14: 295.
- Takeda, T., Oka, M., and Agata, W. 1983. Characteristics of dry matter and grain production of rice cultivars in the Warmer Part of Japan: I. Comparison of dry matter production between old and new types of rice cultivars. *Jpn. J. Crop Sci.* 52: 299-306.
- Takeda, T., Suwa, Y., Suzuki, M., Kitano, H., Ueguchi-Tanaka, M., Ashikari, M., et al. 2003. The *OsTB1* gene negatively regulates lateral branching in rice. *Plant J.* 33: 513-520.

- Tanaka, A. and Park, Y. 1966. Significance of the absorption and distribution of silica of the growth of the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.* 12: 23-28.
- Tang, J. H., Ma, X. Q., Teng, W. T., Yan, J. B., Wu, W. R., Dai, J. R., et al. 2007. Detection of quantitative trait loci and heterotic loci for plant height using an immortalized F2 population in maize. *Chin. Sci. Bull.* 52 477–483. 10.1007/s11434-007-0098-z.
- Tanksley, S. D., Young, N. D., Patterson, A. H., and Bonierbale, M. W. 1989. RFLP mapping in plant breeding: new tools for an old science. *Nat. Biotechnol.* 7: 257-263.
- Tao, Y., Zhu, J., Xu, J., Wang, L., Gu, H., Zhou, R., Yang, Z., Zhou, Y., and Liang, G. 2016. Exploitation of heterosis loci for yield and yield components in rice using chromosome segment substitution lines. *Sci. Rep.* 6: 36802. Doi:10.1038/srep36802.
- Terashima, K., Akita, S., and Sakai, N. 1992. Eco-physiological characteristics related with lodging tolerance of rice in direct sowing cultivation. I. Comparison of the root lodging tolerance among cultivars by the measurement of pushing resistance. *Jpn. J. Crop Sci.* 61: 380-387.
- Tian, B., Liu, Y., Zhang, L., and Li, H. 2017. Stem lodging parameters of the basal three internodes associated with plant population densities and developmental stages in foxtail millet (*Setaria italica*) cultivars differing in resistance to lodging. *Crop Pasture Sci.* 68: 349-357.
- Tinarelli, A. 1988. *Il riso*, 2nd ed. Edagricole. Bologna. 744 pp. [In Italian].
- Tiwari, D. K., Giri, S. P., and Dwivedi, J. L. 2011. Prediction of gene action, heterosis and combining ability to identify superior rice hybrids. *Int. J. Bot.* 7(2): 126-144.
- Todaka, D., Shinozaki, K., Yamaguchi-Shinozaki, K. 2015. Recent advances in the dissection of drought-stress regulatory networks and strategies for development of drought-tolerant transgenic rice plants. *Front. Plant Sci.* 6: 84.
- Torro, I., Breto, P., and Garcia-Yzaguirre, A. 2011. Short communication. Assessing lodging resistance in rice: a comparison of two indirect testing methods. *Span. J. Agric. Res.* 9(4): 1245-1248.
- Tripathi, S. C., Sayre, K. D., Kaul, J. N., and Narang, R. S. 2003. Growth and morphology of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) culms and their association with lodging: effects of genotypes, N levels and ethephon. *Field Crops Res.* 84: 271-290.
- Tuhina-Khatun, M., Hanafi, M. M., Yusop, M. R., Wong, M. Y., Salleh, F. M., and Ferdous, J. 2015. Genetic variation, heritability and diversity analysis of upland rice (*Oryza sativa* L.) genotypes based on quantitative traits. *BioMed Research International*, 2015: 1-7.
- Ullah, M. Z., Bashar, M. K., Bhuiyan, M. S. R., Khalequzzaman, M., and Hasan, M. J. 2011. Interrelationship and cause-effect analysis among morphophysiological traits in biroin rice of Bangladeshi. *Int. J. Plant Breed. Genet.* 5: 246-254.

- Ünan, R., Sezer, I., Şahin, M., and Mur, L. A. 2013. Control of lodging and reduction in plant length in rice (*Oryza sativa* L.) with the treatment of trinexapac-ethyl and sowing density. *Turk. J. Agric. For.* 37, 257-264. DOI: 10.3906/tar-1207-72.
- Upadhyaya, D., Dhakal, R., Khadka, K., Rana, S., Acharya, P., Rana, R., and Chaudhary, P. 2016. Local knowledge on climate-induced traits in rice for improving crop yield, food security and climate resilience. *Int. Agric. Innov. Res. J.* 5: 385-396.
- Utami, D. W., Aswidinnoor, H., Moeljopawiro, S., Hanarida, I., and Reflinur. 2006. Inheritance of blast resistance (*Pyricularia grisea* Sacc.) on interspecific crossing between IR64 and *Oryza rufipogon* Griff. *Hayati* 13: 107-112.
- Vanisree, S., Anjali, K., Raja, Ch. D., Raju, Ch. S. and Sreedhar, M. 2013. Variability, heritability and association analysis in science rice. *Journal of Biological & Scientific Opinion* 1(4): 347-352.
- Verma, V., Worland, A. J., Sayers, E. J., Fish, L., Caligari, P. D. S., and Snape, J. W. 2005. Identification and characterization of quantitative trait loci relate to lodging resistance and associated traits in bread wheat. *Plant Breed.* 124: 234-241.
- Wan, Y. Z. and Ma, G. H. 2003. A probe into the dynamic to lodging resistance of super hybrid rice. *Hunan Agric Univ: Nat Sci*, 29(2): 92-94. (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Y., Dai, X. L., Shi, Y. H., Wang, Z. L., Chen, X. G., and He, M. R. 2012. Effect of nitrogen application rate and plant density on lodging resistance in winter wheat. *Acta Agron. Sin.* 38(1): 121-128 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Wang, X., Yang, L., Li, P., Zhu, J., Kazuhiko, K., and Wang, Y. 2011. Ozone stress increases lodging risk of rice cultivar Liangyoupeijiu: A FACE study. *Shengtai Xuebao/Acta Ecol. Sin.* 31: 6098-6107.
- Wang, X. F., Dang, L. H., Du, H., Guo, Y. H., and Miao, Y. J. 2008. Studies on the composition of lodging resistance in rice. *North Rice* 38: 16-21. (in Chinese with English abstract).
- Waseem, M., Ahmad, R., Randhawa, M. A., Aziz, T., and Mahmood, N. 2016. Influence of silicon application on blast incidence and lodging resistance in rice. *J. Agric. Res.* 54: 435-443.
- Wei, F.Z., Li, J. C., Wang, C. Y., Qu, H.J., and Shen, X. S. 2008. Effect of nitrogenous fertilizer application model on culm lodging resistance in winter wheat. *Acta Agron. Sin.* 34: 1080-1085 (in Chinese with English abstract).
- Weng, F., Zhang, W., Wu, X., Xu, X., Ding, Y., Li, G., Liu, Z., and Wang, S. 2017. Impact of low-temperature, overcast and rainy weather during the reproductive growth stage on lodging resistance of rice. *Sci. Rep.* 7: 46596. Doi:10.1038/srep46596.
- Wu, X. J. 2000. Possible approaches to improve rice heterosis. *Chin. J. Rice Sci.* 14(1): 61-64. (in Chinese with English abstract).

- Xiang, D., Song, Y., Wu, Q., Ma, C., Zhao, J., Wan, Y., and Zhao, G. 2019. Relationship between stem characteristics and lodging resistance of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). *Plant Prod. Sci.* 22: 202-210.
- Xiao, Y. H., Luo, L. H., Yan, X. Y., and Gao, Y. H. 2005. Quantitative trait locus analysis of lodging index in rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Agron. Sin.* 31(3): 348–354. (in Chinese with English abstract)
- Xu, H., Zhao, M., Zhang, Q., Xu, Z. and Xu, O. 2016a. The dense and erect panicle1 (DEP1) gene offering the potential in the breeding of high-yielding rice. *Breed. Sci.* 66(5): 659-667.
- Xu, B. B., You, C. C., Ding, Y. F., and Wang, S. H. 2016b. Effect of source-sink manipulation on translocation of carbohydrate and nitrogen, phosphorus, potassium in vegetative organs of conventional japonica rice after anthesis. *Sci. Agric. Sin.* 49: 643-656 (in Chinese with English abstract).
- Yadav, S. P., Patil, R. R. and Joshi, M. G. 1980. Components of plant height in different height groups of bread wheat. *Indian J. Genet. Plant Breed.* 40: 47-51.
- Yang, H. J., Yang, R. C., Li, Y. Z., Jiang, Z. W., and Li, J. S. 2000. Relationship between culms traits and lodging resistance of rice cultivars. *Fujian J. Agric. Sci.* 15(2): 1–7. (in Chinese with English abstract)
- Yang, S. M., Xie, L., Zhen, S. L., Li, J., and Yuan, J. C. 2009. Effects of nitrogen rate and transplanting density on physical and chemical characteristics and lodging resistance of culms in hybrid rice. *Acta Agron. Sin.* 35(1): 93–103. (in Chinese with English abstract)
- Yang, Z. Y., Sun, Y. J., Xu, H., Qin, J., Jia, X. W., and Ma, J. 2013. Effects of different cultivation methods on accumulation and transformation of assimilation products and lodging resistance of stem-sheaths of no-tillage rice, *Chin. J. Rice Sci.* 27: 511-519 (in Chinese with English abstract).
- Yano, K., Ookawa, T., Aya, K., Ochiai, Y., Hirasawa, T., Ebitani, T., Takarada, T., Yano, M., Yamamoto, T., Fukuoka, S., Wu, J., Ando, T., Ordonio, L., Hirano, K., and Matsuoka, M. 2015. Isolation of a novel lodging resistance QTL gene involved in strigolactone signaling and its pyramiding with a QTL gene involved in another mechanism. *Mol. Plant* 8: 303-314.
- Yao, J., Ma, H., Zhang, P., Ren, L., Yang, X., Yao, G., Zhang, P., and Zhou, M. 2011. Inheritance of stem strength and its correlations with culm morphological traits in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Can. J. Plant Sci.* 91: 1065-1070.
- Yao, J. B., Ma, H. X., Ren, L. J., Yang, X. M., and Zhou, M. P. 2012. Inheritance of morphological traits of the second basal internode in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Aust. J. Crop Sci.* 6(5): 899-903.

- Ye, Z., Wang, J., Liu, Q., Zhang, M., Zou, K., and Fu, X. 2009. Genetic relationships among panicle characteristics of rice (*Oryza sativa* L.) using unconditional and conditional QTL analyses. *J. Plant Biol.* 52: 259–267
- Yoshinaga, S., Takai, T., Arai-Sanoh, Y., Ishimaru, T., and Kondo, M. 2013. Varietal differences in sink production and grain-filling ability in recently developed high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) varieties in Japan. *Field Crops Res.* 150: 74-82.
- Yu, Z. W. 1995. Crop cultivation, China Agriculture Press, Beijing, China, 42-43.
- Yuan, Y. Y., Li, C. C., Chu, T. M. and Chang, S. K. 1988. Studies on lodging resistance in relation to characters in rice. II. Correlation with culm external structure, mechanical properties and chemical composition. *J. Agr. Ass. China* 142: 9-25.
- Yuping, G. and Feng, S. 2004. Effect of lodging resistance on yield of rice and its relationship with stalk physical characteristics. *J. Jilin Agri. Sci.* 29(4): 6-11. (in Chinese with English abstract).
- Zaw, H., Raghavan, C., Pocsedio, A., Swamy, B. P. M., Lubay, M. L., Singh, R. K., Bonifacio, J., Mauleon, R., Hernandex, J. E., Mendioro, M. S., Gregorio, G. B., and Leung, H. 2019. Exploring genetic architecture of grain yield and quality traits in a 16-way indica by japonica rice MAGIC global population. *Sci. Rep.* 9: 19605 doi:10.1038/s41598-019-55357-7
- Zhang, F., Jin, Z., Ma, G., Shang, W., Liu, H., Xu, M., and Liu, Y. 2010a. Relationship between lodging resistance and chemical contents in culms and sheaths of japonica rice during grain filling. *Rice Sci.* 17(4): 311-318.
- Zhang, F. Z., Jin, Z. X., Ma, G. H., Shang, W. N., Liu, H. Y., Xu, M. L., and Liu, Y. 2010c. Dynamic changes of lodging resistance and chemical component contents in culm and sheath of japonica rice during grain filling. *Chin. J. Rice Sci.* 24: 264-270. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Li, G., Huang, Q., Liu, Z., Ding, C., Tang, S., Chen, L., Wang, S., Ding, Y., and Zhang, W. 2017. Effects of culm carbohydrate partitioning on basal stem strength in a high-yielding rice population. *Crop J.* 5: 478-487.
- Zhang, J., Li, G. H., Song, Y. P., Liu, Z. H., Yang, C. D., Tang, S., Zheng, C. Y., Wang, S. H., and Ding, Y. F. 2014. Lodging resistance characteristics of high-yielding rice populations. *Field Crops Res.* 161: 64-74.
- Zhang, J., Li, G. H., Song, Y. P., Zhang, W. J., Yang, C. D., Wang, S. H., and Ding, Y. F. 2013. Lodging resistance of super-hybrid rice Yliangyou 2 in two ecological regions. *Acta Agron. Sin.* 39: 682-692.
- Zhang, M. C., Liu, Y. Y., Luo, S. G., Peng, X. I., Chen, I. N., Li, Z. Y., and Li, J. 2010b. Effects of integrated nutrient management on lodging resistance of rice in cold area. *Sci. Agric. Sin.* 43: 4536-4542 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, Q. Y., Ouyang, Y. N., Dai, W. M., Yu, S. M., Zhuang, J. Y., Jing, Q. Y., and Cheng, S. H. 2005. Relationship between traits of basal elongation internodes and lodging and QTL mapping in rice. *Acta Agron. Sin.* 31(6): 712–717. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Wu, L., Wu, X., Ding, Y., Li, G., Li, J., Weng, F., Liu, Z., Tang, S., Ding, C., and Wang, S. 2016. Lodging resistance of japonica rice (*Oryza sativa* L.): morphological and anatomical traits due to top-dressing nitrogen application rates. *Rice*. 9: 31. Doi:10.1186/s12284-016-0103-8.
- Zhang, W. J., Wu, L. M., Ding, Y. F., Weng, F., Wu, X. R., Li, G. H., Liu, Z. H., Tang, S., Ding, C. Q., and Wang, S. H. 2015. Top-dressing nitrogen fertilizer rate contributes to reduce culm physical strength through decreasing in structural carbohydrates contents in japonica rice. *J. Integr. Agr.* Doi:10.1016/S2095-3119(15)61166-2.
- Zhang, X. J., Jiang, S. K., Zheng, X., Xu, Z. J., Chen, W. F., Ma, D. R., and Xu, H. 2009b. Correlation between traits of basal elongating internodes and culm mechanical strength and QTL location in rice. *Plant Physiol. Commun.* 45: 223-228. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. J., Li, H. J., Li, W. J., Xu, Z. J., Chen, W. F., Zhang, W. Z., and Wang, J. Y. 2009a. The lodging resistance of erect panicle japonica rice in northern China. *Sci. Agric. Sin.* 42(7): 2305–2313. (in Chinese with English abstract)
- Zheng, M., Chen, J., Shi, Y., Li, Y., Yin, Y., Yang, D., Luo, Y., Pang, D., Xu, X., and Li, W. 2017. Manipulation of lignin metabolism by plant densities and its relationship with lodging resistance in wheat. *Sci. Rep.* 7: 41805.
- Zhong, X., Liang, K., Peng, B., Tian, K., Li, X., Huang, N., Liu, Y., and Pan, J. 2019. Basal internode elongation of rice as affected by light intensity and leaf area. *Crop J.* <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.05.005>.
- Zhou, G., Chen, Y., Yao, W., Zhang, C., Xie, W., Hua, J., Xing, Y., Xiao, J., and Zhang, Q. 2012. Genetic composition of yield heterosis in an elite rice hybrid. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 109(39): 15847–15852.
- Zuber, U., Winzeler, H., Messmer, M., Keller, M., Keller, B., Schmid, J., and Stamp, P. 1999. Morphological traits associated with lodging resistance of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Agron. Crop Sci.* 182: 17-24.
- Zuo, Q., Kuai, J., Zhao, L., Hu, Z., Wu, J., and Zhou, G. 2017. The effect of sowing depth and soil compaction on the growth and yield of rapeseed in rice straw returning field. *Field Crop. Res.* 203: 47-54.

ประวัติและผลงานวิจัยที่สำคัญของนักวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ-สกุล ดร. พรรณธิภา ณ เชียงใหม่

Dr. Pantipa Na Chiangmai

ตำแหน่งทางวิชาการ รองศาสตราจารย์ (ดร.)

วัน เดือน ปีเกิด 2 กันยายน 2519 (September, 2 1976)

เลขที่ประจำตัวประชาชน 3 5012 00192 58 3

สถานที่ทำงาน อาจารย์ คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตำบลสามพระยา อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี 76120

ติดต่อ โทรศัพท์ 032-594037 โทรสาร 032-594037

e-mail address : nachiangmai_p@silpakorn.edu, mchiangmai@gmail.com

ที่อยู่ 65/2 หมู่ 6 ต. ยู่หว้า อ. สันป่าตอง จ. เชียงใหม่ 50120 โทรศัพท์ 053-822695

มือถือ 081-1995360

ประวัติการศึกษา

1. วิทยาศาสตร์ดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตพืช) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Ph. D. (Crop Production Technology) Suranaree University of Technology

2542 – 2547 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

-ได้รับทุนการศึกษาจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

ทุน กาญจนภิเษก (รุ่นที่ 2)

2. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

M. Sc. (Agriculture) Agronomy Department, Chiangmai University,
Thailand

2540 – 2542 ศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาพืชไร่ (การปรับปรุงพันธุ์พืช)

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

-ได้รับทุนการศึกษาจาก สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

(ทุน 2 ปี)

3. วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปี 2540

B. Sc. (Agriculture) Chiangmai University, Thailand

2536 – 2540 ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผลงานตีพิมพ์และนำเสนอผลงานวิจัย 3 ปีย้อนหลัง (พ.ศ. 2560-25562)

Khamtan, S., P. Na Chiangmai, P. Meetum and M. Kanjanamaneesathian. 2017. Fungi

associated with grain discoloration disease of rice (*Oryza sativa*) (var. Jolasid). p. 35-

37. The 8th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference

- (I-SEEC), 15th-17th March, 2017, The A-ONE Royal Cruise Hotel, Pattaya Beach, Thailand.
- Wimalasena, R. A. P. S., S. Khianggam, P. Na Chiangmai and M. Kanjanamaneesathian. 2017. Common household flavor enhancer as a nutrient for culturing *Klebsiella variicola* a potential rice growth promoting bacterium. p. 9-13 The 8th International Science, Social Sciences, Engineering and Energy Conference (I-SEEC), 15th – 17th March, 2017. The A-ONE Royal Cruise Hotel, Pattaya Beach, Chonburi, Thailand.
- Dueanchai, A., T. Techakriengkrai, P. Na Chiangmai, Y. Pootaeng-on, C. Chanthasa, A. Jamphol, P. Pasukamonset, K. Wunjuntuk, M. Kanjanamaneesathian and S. Khianggam. 2017. Comparison of amylose and starch contents between awn seed and awnless seed of upland rice (*Oryza sativa* L. var. Pae Taw Gaw Bi) at Prachuap Khiri Khan Province. pp. 283-287. *In: Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON)*, February 2-3, 2017, Bangkok, Thailand.
- Paengkoum, S., T. Techakriengkrai, Y. Pootaeng-on, S. Khianggam, P. Na Chiangmai and P. Paengkoum. 2017. A study on using of sunflower oil production by products as animal feeds. EAAP Annual Meeting, 2017, Tallinn, Estonia.
- Tongtawon, D., Komkaew, N., Pootang-on, Y., Yamyang, M., Chanthasa, C., Khianggam, S., Kanjanamaneesathian, M., and Na Chiangmai, P. 2017. Effect of low cost organic compost on growth of water spinach (*Ipomoea aquatic* Forsk). *Science and Technology Research Journal Nakorn Ratchasima Rajabhat University*. 2(1): 54-59.
- Yamyang, M., Kaewked, N., Pootang-on, Y., Chanthasa, C., Kanjanamaneesathian, M., Kunkeaw, W. and Na Chiangmai, P. 2017. Changes in Culm Height and Lodging of Upland rice grown in amended soil with organic compost. *Science and Technology Research Journal Nakorn Ratchasima Rajabhat University*. 2(1): 60-66.
- Wimalasena, R. A. P. S., Na Chiangmai, P., Khianggam, S. and Kanjanamaneesathian, M. 2017. Effect of indole acetic acid produced by *Klebsiella variicola* C1DO on simulated drought condition for evaluating grain filling and grain weight of rice (*Oryza sativa* L.). The 7th National and International Graduate Study Conference 2017 “Thailand 4.0 Creative Innovation for Sustainable Development”, pp 1329-1336.
- Khianggam, S. Pootaeng-on, Y., Aranyiga, N., Sunthorn, S. Na Chiangmai, P., Kanjanamaneesathian, M. and Tanasupawat, S. 2017. Isolation of cellulase producing microbes and nitrogen fixing bacteria from bamboo soils. 24 November, 2017. Hotel Supreme and Convention Plaza, Baguio Philippines. Page 116.
- Samuel, G. T. K., Suvarnapaet, P., Kanjanamaneesathian, M., Laosutthipong, C. and Na Chiangmai, P. 2018. Energy Efficient Saving Utilized Stoves in Ratchaburi Region, Thailand. pp: 67-75. In the 9th International Academic Conference of Suan Sunandha Rajabhat University, Bangkok, Thailand “Local & Global Sustainability : Meeting the

challenges & sharing the solutions”, 20 March 2018 at Suan Sunandha Rajabhat University.

- Yamyang, M., Duangkaew, P., Puanpunsi, N., Poomjae, S. and Na Chiangmai, P. 2018. Correlation of some agronomic characteristics with lodging of upland rice varieties collected from ethnic minority farmers. The 8th National and International Graduate Study Conference “Thailand 4.0 Creative Innovation for Sustainable Development”, 28-29 June, 2018, Princess Maha Chakri Sirindhorn Anthropology Centre, Bangkok. page 44-52.
- Yamyang, M., Na Chiangmai, P., Meetum, P., Rienghlam, P. and Brooks, S. 2018. Callus induction and regeneration from seeds of some Thai indigenous upland rice (*Oryza sativa* L.) and lowland rice varieties. The 7th International Conference on Integration of Science and Technology for Sustainable Development (7th ICIST), November 26-29 Patra Bali Resort and Villas, Bali, Indonesia. P. 8
- Na Chiangmai, P., Rienghlam, P., Anuphanchai, J., Khianggam, S., Yamyang, M., Meetum, P. and Duangkaew, P. 2018. Alleviation of salt stress on germination of rice (*Oryza sativa* L.) by exogenous supply of indole-3-acetic acid (IAA) Derived from Bacteria. The 7th International Conference on Integration of Science and Technology for Sustainable Development (7th ICIST), November 26-29 Patra Bali Resort and Villas, Bali, Indonesia. P. 98
- Khianggam, S., Meetum, P., Duangkaew, P. and Na Chiangmai, P. 2018. Study on optimization for increase production of indole acetic acid from bacterial Endophyte RD4-1-1. The 7th International Conference on Integration of Science and Technology for Sustainable Development (7th ICIST), November 26-29 Patra Bali Resort and Villas, Bali, Indonesia. P. 105
- Na Chiangmai, P., Yamyang, M., Meetum, P., Brooks, S., Rienghlam, P. and Raksasiri, B.V. 2019. How some native upland rice and cultivated lowland rice varieties responded to callus induction and regeneration medium? Asian Journal of Agriculture and Biology, 7(1): 137-145.
- Na Chiangmai, P., Yamyang, M., Thammachaisophis, S., Phuththa, W. and Brooks, S. 2019. Correlation and path analysis studies of upland rice (*Oryza sativa* L.) collected from Pala-U village, Prachuap Khiri Khan, Thailand. Asian Journal of Agriculture and Biology, 7(2): 214-223.
- พิชญานิน ตั้งวิเศษทรัพย์ ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร พรณธิภา ฦ เชียงใหม่ เสาวภา เขียนงาม
 युका ปู่แดงอ่อน มานะ กาญจนมณีเสถียร ปราโมทย์ แพงคำ ศิวพร แพงคำ อำพร แจ่มผล พรทิพย์
 พสุกมลเศรษฐ์ และกานต์สุดา วันจันทิก. 2560. ผลของการกะเทาะเปลือกต่อคุณภาพของน้ำมัน
 ทานตะวันจากกระบวนการผลิตแบบหีบเย็น. หน้าที่ 961-968. การประชุมทางวิชาการของ
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55.

- เสาวภา สิทธิโชคธรรม ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร พรรณธิดาณ เชียงใหม่ ปราโมทย์ แพงคำ มานะกาญจนมณี เสถียร เสาวภา เขียนงาม ฌานิกา จันทสระ ยูภา ปู่แดงอ่อน อำพร แจ่มผล พรทิพย์ พสุกมลเศรษฐ และ กานต์สุดา วันจันทร์. 2560. ผลของการบำรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์ต่อ ลักษณะทางกายภาพและสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวไร่. หน้า 953-960. การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55.
- มนต์ณัช แยมยิ่ง ธิดารัตน์ พันเต สกฤตน์ เกิดมี ยูภา ปู่แดงอ่อน เสาวภา เขียนงาม พิมพีใจ มีตุ้ม และ พรรณธิดาณ เชียงใหม่. 2561. การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมี ระหว่างการหมักปุ๋ยต้นทุ่นต่า. วารสารแก่นเกษตร (ฉบับพิเศษ) 46 ฉบับพิเศษ 1: 308-314.
- พรรณธิดาณ เชียงใหม่ ณิชสา กิตติชัยชาญ นวียา บุญงาม มรกต สมสกลิต ยูภา ปู่แดงอ่อน และ พิมพีใจ มี ตุ้ม. 2561. อิทธิพลของน้ำปุ๋ยหมักต่อการงอกและลักษณะของรากในข้าวไร่พันธุ์นาสาร. วารสารแก่น เกษตร (ฉบับพิเศษ) 46 ฉบับพิเศษ 1: 481-486.
- ณัฐพล ชันนพคุณ ณัฐดา สว่างงาม ปณิดา ดวงแก้ว พิมพีใจ มีตุ้ม พรรณธิดาณ เชียงใหม่ และเสาวภา เขียน งาม. 2561. การหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มการผลิตกรดอินโดลแอซิดิกจาก *Enterobacter cancerogenus* RD4-1-1. ประชุมวิชาการระดับปริญญาบัณฑิต ด้านวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยีการเกษตร ครั้งที่ 5 (RUCA). วันที่ 22-23 มีนาคม 2561 ณ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา.
- ณัฐดา สว่างงาม ณัฐพล ชันนพคุณ พิมพีใจ มีตุ้ม พรรณธิดาณ เชียงใหม่ และเสาวภา เขียนงาม. 2561. การ คัดเลือกแบคทีเรียเอนโดไฟต์จากเมล็ดข้าวไร่พันธุ์พื้นเมืองที่ผลิตกรดอินโดลแอซิดิกและผลการ ทดสอบการเจริญเติบโตต่อเมล็ดข้าวพันธุ์ กข 31. ประชุมวิชาการระดับปริญญาบัณฑิต ด้าน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร ครั้งที่ 5 (RUCA). วันที่ 22-23 มีนาคม 2561 ณ คณะ เทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา.
- พรรณธิดาณ เชียงใหม่. 2561. การผลิตปุ๋ยหมักเพื่อปรับปรุงดินสำหรับปลูกข้าวไร่ในพื้นที่บ้านป่าละอู จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์. วารสารวิจัยเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่. 10(2): 88-100.
- พรรณธิดาณ เชียงใหม่ วิไลวรรณ สิริโรจนพุดิ และวีรพันธ์ กันแก้ว. 2562. ผลของปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพต่อการ ผลิตทานตะวันที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์. วารสารผลิตภัณฑ์การเกษตร 1(1): 15-27.
- พรรณธิดาณ เชียงใหม่ พิษณุ กองทรัพย์ ฌานิกา จันทสระ วีรพันธ์ กันแก้ว มนต์ณัช แยมยิ่ง พิมพีใจ มีตุ้ม ศิ รินทร์นภา พุ่มแจ้ และ ภูธฤทธิ์ วิทยาพัฒนานุรักษ์ รักษาศิริ. 2562. ลักษณะทางการเกษตรและ องค์ประกอบผลผลิตของข้าวไร่ที่รวบรวมได้จากเกษตรกรกลุ่มน้อยหมู่บ้านป่าละอู อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์. วารสารแก่นเกษตร 47 (ฉบับพิเศษ 1): 631-636.
- พรรณธิดาณ เชียงใหม่ วิไลวรรณ สิริโรจนพุดิ และฐิติมา เวชพงศ์. 2562. ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จาก การปลูกทานตะวันเป็นพืชทางเลือกของเกษตรกรที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์. วารสาร พัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต 7(2): 192-202.
- มนัสนันท์ นพรัตน์ไมตรี ศักดา ประจักษ์บุญเจษฎา กนกพล มั่งชู อานันท์ จันทโรต เกวลี เหมมาลา พรรณธิดาณ เชียงใหม่ และวารางคณา กิจพิพิธ. 2562. ผลการเสริมไบโอคิวาคาเคตเป็นแหล่งโปรตีน และเยื่อใยอาหารต่อการย่อยได้ปรากฏของโภชนะ สมรรถนะการผลิต ลักษณะซาก และคุณภาพเนื้อ ของไก่เนื้อ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 21(2): 21-33.

มนัสนันท์ นพรัตน์ไมตรี วราภรณ์ กิจพิพิธ พรรณธิดา ภู เชียงใหม่ พิริวิทย์ เชื้อวงษ์บุญ และภุชภุณี
 วิทยาพัฒนานุรักษ์ รักษาศิริ. 2562. ผลการเสริมไฟโตไบโอติคส์ในอาหารไก่ไข่ต่อสมรรถภาพการผลิต
 และคุณภาพไข่. วารสารแก่นเกษตร, 47 (ฉบับพิเศษ 1): 1-6.

Brooks, S., Athinuwat, D., and Na Chiangmai, P. 2019. Using osmopriming to enhance upland
 rice emergence, seedling vigor under salinity and water stresses are a problem in
 lowland areas. Science & Technology Asia. (Accepted).

Laosutthipong, C., Seritrakul, P., and Na Chiangmai, P. 2019. Lignin biosynthesis gene (OsPAL
 and Os4CL3) sequencing of native upland rice varieties from Pala U Village, Thailand.
 International Journal of Agricultural Technology 15(6): 947-958.

Chimthai, S., Yaming, M., Na-Chiang Mai, P., and Brooks, Siraprapa. 2019. Genetic studies of
 upland rice (*Oryza sativa* L.) in Thailand by InDel marker. International Conference on
 Biodiversity (IBD2019). May 22-24, 2019 Centara Grand & Bangkok Convention Centre
 at CentralWorld Bangkok, Thailand. Page 320

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ชื่อ - สกุล นายวีรพันธ์ กันแก้ว

Mr. Weerapun Kunkaew

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-5501-00063-15-2

วัน เดือน ปีเกิด 14 พฤศจิกายน 2517 (เพื่อเก็บในฐานะข้อมูลนักวิจัย)

ตำแหน่งทางวิชาการปัจจุบัน นักวิชาการ (ดร.)

สถานที่ทำงาน

มูลนิธิโครงการหลวง

65 หมู่ 1 ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

โทร. 0 5381 1500-2 โทรสาร. 0 5332 4009

อีเมล weerapun@hotmail.com

ที่อยู่ปัจจุบัน

บ้านเลขที่ 256/401 ซอย/ถนน - ตำบล สันผักหวาน

อำเภอ หางดง

จังหวัด เชียงใหม่

โทรศัพท์ 083 3223418

โทรสาร -

ประวัติการศึกษา

Degree/Certificate

Area of concentration Year

Institution

วิทยาศาสตร์ดุสิตบัณฑิต

ปรับปรุงพันธุ์พืช

2550

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ปรับปรุงพันธุ์พืช

2548

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

วิทยาศาสตรบัณฑิต

พืชไร่

2540

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ ระบุสาขาวิชา

ปรับปรุงพันธุ์พืช เทคโนโลยีการผลิตพืช

ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่ (Publications and papers):

- Kunkaew, W., S. Julsrigival, P. Tipparat and S. Pinmanee. 2011. Selection for low Δ^9 -tetrahydrocannabinol content in Thai hemp cultivars. SABRAO Journal of Breeding and Genetics 43(1): 1-14.
- Kunkaew, W., S. Julsrigival, C. Senthong and D. Karladee. 2010. Generation mean analysis of seed yield and pod per plant in azuki bean growing on highland areas. Chiang Mai University Journal of Natural Sciences 9: 125-132.
- Kunkaew, W., S. Julsrigival, C. Senthong and Dumnern Karladee. 2007. Combining ability analysis of yield and yield components in azukibean under highland conditions of northern Thailand. Chiang Mai University Journal of Natural Sciences 6: 121-126.
- Kunkaew, W., S. Julsrigival, C. Senthong and D. Karladee. 2007. Inheritance of seed yield in azuki bean [*Vigna angularis* (Willd.) Ohwi and Ohashi]. Chiang Mai University Journal of Natural Sciences 6: 341-347.
- Kunkaew, W., S. Julsrigival, C. Senthong and D. Karladee. 2006. Estimation of heterosis and combining ability in azukibean under highland growing conditions in Thailand. Chiang Mai University Journal 5: 163-168.
- Smutkupt, S., S. Peyachoknagul, K. Kowitwanich, S. Onto, N. Thanananta, S. Julsrigival, W. Kunkaew and V. Punsupa. 2006. Varietal determination and genetic relationship analysis of highland legumes using SRAP markers. SABRAO Journal of Breeding and Genetics 38(1): 19-27.
- Kunkaew, W., S. Julsrigival, N. Boonkaew, V. Punsupa, and C. K. Feng. 2004. Yield stability of azuki bean grown under highland conditions. Royal Project Journal 8(5):6-9.
- Smutkupt, S., S. Peyachoknagul, K. Kowitwanich, S. Onto, N. Thanananta, S. Julsrigival, W. Kunkaew and V. Punsupa. 2006. Varietal determination and genetic relationship analysis of highland legumes using SRAP markers. SABRAO Journal of Breeding and Genetics 38(1): 19-27.
- พรพรณธิภา ณ เชียงใหม่ พิษณุ กองทรัพย์ ฌานิกา จันทสระ วีรพันธ์ กันแก้ว มนต์ฉันทน์ แยมยิ่ง พิมพ์ใจ มีตุ้ม ศิริรินทร์ภา พุ่มแจ้ และ ภูธฤทธิ วิทยาพัฒนานุรักษ์ รักษาศิริ. 2562. ลักษณะทางการเกษตรและองค์ประกอบผลผลิตของข้าวไร่ที่รวบรวมได้จากเกษตรกรชนกลุ่มน้อยหมู่บ้านป่าละอู อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์. วารสารแก่นเกษตร 47 (ฉบับพิเศษ 1): 631-636.
- พรพรณธิภา ณ เชียงใหม่ วิไลวรรณ สิริโรจนพุดิ และ วีรพันธ์ กันแก้ว. 2562. ผลของปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพต่อการผลิตทานตะวันที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์. วารสารผลิตกรรมการเกษตร 1(1): 15-27.
- อัณศยา สุริยะวงศ์ตระการ วีรพันธ์ กันแก้ว อัญชัญ ชมพูปวง ศิวพร ธรรมดี และ ณัฐา โพธาภรณ์. 2555. การคัดเลือกและผลิตเมล็ดพันธุ์ลูกผสมบรอกโคลีเพื่อผลิตต้นอ่อนที่มีซัลโฟราเฟนสูง. วารสารเกษตร 28(1): 1-10.

- วีรพันธ์ กันแก้ว สุทัศน์ จุลศรีไกวัด ประภัสสร ทิพย์รัตน์ ปิยมาศ สุรียา และ สรिता ปิ่นมณี. 2554. การใช้วิธีการคัดเลือกรวมเพื่อพัฒนาพันธุ์เฮมพ์ THC ต่ำ. Proceedings of 17th National Genetic Conference. 7-9 April 2011. ChiangMai, Thailand.
- วีรพันธ์ กันแก้ว สุทัศน์ จุลศรีไกวัด สุรัตน์ นักร้อง พิชัย สุรพรไพบูลย์ พรรณธิภา ณ เชียงใหม่ วิมล ปันสุภา และสุมินทร์ สมุทคุปดี. 2554. การคัดเลือกถั่วแดงหลวงสายพันธุ์ดี. แก่นเกษตร 39 ฉบับพิเศษ 3:335-341.
- วีรพันธ์ กันแก้ว สุทัศน์ จุลศรีไกวัด จักรี เส้นทอง และดำเนิน กาละดี. 2553. การแสดงออกของยีนควบคุมขนาดเมล็ดถั่วอะซูกิภายใต้การเพาะปลูกบนพื้นที่สูง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 41(1):67-74.
- วีรพันธ์ กันแก้ว สุทัศน์ จุลศรีไกวัด ประภัสสร ทิพย์รัตน์ วิมล และประดิษฐ์ อุ่นถิ่น. 2553. อัตราพันธุกรรมของปริมาณสาร delta-9-tetrahydrocannabinol ในเฮมพ์ (*Cannabis indica* L.) ปลูกบนพื้นที่สูงของประเทศไทย. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 41(1):75-80.
- วีรพันธ์ กันแก้ว สุทัศน์ จุลศรีไกวัด ประภัสสร ทิพย์รัตน์ ปิยมาศ สุรียา สรिता ปิ่นมณี และ วิมล ปันสุภา. 2553. ความก้าวหน้าของการปรับปรุงพันธุ์เพื่อลดปริมาณสาร Δ 9-tetrahydrocannabinol ของเฮมพ์. วารสารโครงการหลวง 14(2):2-8.
- วีรพันธ์ กันแก้ว สุทัศน์ จุลศรีไกวัด ประภัสสร ทิพย์รัตน์ อติเรก ปัญญาธิอ วิมล ปันสุภา มนตรี ศรีหะวงษ์ และประดิษฐ์ อุ่นถิ่น. 2552. การจำแนกประเภทเฮมพ์ (*Cannabis sativa* L.) ในประเทศไทยโดยใช้ลักษณะปริมาณสาร THC และ CBD. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 40(3):307-314.
- วีรพันธ์ กันแก้ว ประภัสสร ทิพย์รัตน์ สุทัศน์ จุลศรีไกวัด อติเรก ปัญญาธิอ วิมล ปันสุภา มนตรี ศรีหะวงษ์ และประดิษฐ์ อุ่นถิ่น. 2551. ปริมาณ delta-9-tetrahydrocannabinol ของพันธุ์เฮมพ์ปลูกบนพื้นที่สูงของประเทศไทย. ในรายงานประชุมวิชาการ ผลงานวิจัยของมูลนิธิโครงการหลวง ประจำปี 2551 หน้า 67-74.
- วีรพันธ์ กันแก้ว สุทัศน์ จุลศรีไกวัด จักรี เส้นทอง และดำเนิน กาละดี. 2551. การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยประชากรของถั่วอะซูกิโดยวิธีเมทริกซ์แอลจีบรา (Generation Mean Analysis in Azuki Bean Using Matrix Algebra Method). Thai Journal of Genetics Vol. 1 No. 2 : 128-145.
- วีรพันธ์ กันแก้ว สุทัศน์ จุลศรีไกวัด จักรี เส้นทอง และดำเนิน กาละดี. 2551. การถ่ายทอดลักษณะและการตอบสนองต่อการคัดเลือกของผลผลิตในถั่วอะซูกิ. วารสารเกษตร 23 (ฉบับพิเศษ): 123-128.
- สุทัศน์ จุลศรีไกวัด สุมินทร์ สมุทคุปดี วีระชัย ศรีวัฒนพงศ์ วีรพันธ์ กันแก้ว และวิมล ปันสุภา. 2550. ถั่วอะซูกิพันธุ์ปางตะ. วารสารโครงการหลวง 11(2):3-9.
- อนรรฆพล บุญช่วย สุทัศน์ จุลศรีไกวัด จักรี เส้นทอง ดำเนิน กาละดี และ วีรพันธ์ กันแก้ว. 2549. การถ่ายทอดลักษณะทนต่อสภาพน้ำขังของข้าวบาร์เลย์. หน้า 173-179. ในสัมมนาวิชาการบัณฑิตศึกษา เกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 4. 25-26 ธันวาคม 2549. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุมินทร์ สมุทคุปดี สุทัศน์ จุลศรีไกวัด วีรพันธ์ กันแก้ว และ วิมล ปันสุภา. 2548. การวิจัยการกลายพันธุ์เพื่องานปรับปรุงพันธุ์ถั่วที่สูง. หน้า 55-62. ในผลงานวิจัยของมูลนิธิโครงการหลวงประจำปี 2548. มูลนิธิโครงการหลวง.
- วีรพันธ์ กันแก้ว สุทัศน์ จุลศรีไกวัด ณรงค์ บุญแก้ว และ Chen Keng Feng. 2547. ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตกับระดับความสูงของพื้นที่ปลูกของถั่วอะซูกิ. หน้า 99-108. ในผลงานวิจัยของมูลนิธิโครงการหลวงประจำปี 2547. มูลนิธิโครงการหลวง.

- สุทัศน์ จุลศรีไคววัล สุมินทร์ สมุทรคุปต์ วีรพันธ์ กันแก้ว และวิมล ปันสุภา. 2547. ปรับปรุงพันธุ์ถั่วอะซูกิให้ต้านทานต่อด้วงถั่ว. 8(1): 25-26.
- สุมินทร์ สมุทรคุปต์ สุทัศน์ จุลศรีไคววัล วีรพันธ์ กันแก้ว และ วิมล ปันสุภา. 2547. งานวิจัยและพัฒนาถั่วที่สูง. หน้า 87-98. ในผลงานวิจัยของมูลนิธิโครงการหลวงประจำปี 2547. มูลนิธิโครงการหลวง.
- Feng, C. K. ณรงค์ บุญแก้ว วีรพันธ์ กันแก้ว และวิมล ปันสุภา. 2546. ผลการทดสอบถั่วอะซูกิพันธุ์จากประเทศไต้หวัน. วารสารโครงการหลวง 7(4): 19-21.
- สุมินทร์ สมุทรคุปต์ สุรินทร์ ปิยะโชคณากุล กฤษณา โกวิทวณิช สุทัศน์ จุลศรีไคววัล วีรพันธ์ กันแก้ว และ วิมล ปันสุภา. 2546. การตรวจสอบสายพันธุ์ถั่วที่สูงโดยใช้เครื่องหมายดีเอ็นเอ (เทคนิค SRAP). วารสารโครงการหลวง 7(6): 20-26.
- สุทัศน์ จุลศรีไคววัล สุมินทร์ สมุทรคุปต์ วีรพันธ์ กันแก้ว และวิมล ปันสุภา. 2545.โครงการปรับปรุงพันธุ์ถั่วอะซูกิให้ต้านทานด้วงถั่ว.วารสารโครงการหลวง 6(6): 3-4.
- สุมินทร์ สมุทรคุปต์ สุทัศน์ จุลศรีไคววัล วีระชัย ศรีวัฒนวงศ์ วีรพันธ์ กันแก้ว และวิมล ปันสุภา. 2545. ถั่วอะซูกิในระบบการปลูกพืชหมุนเวียนบนที่สูง. หน้า 84-95. ในผลงานวิจัยของมูลนิธิโครงการหลวงประจำปี 2545. มูลนิธิโครงการหลวง.
- สุมินทร์ สมุทรคุปต์ สุทัศน์ จุลศรีไคววัล วีรพันธ์ กันแก้ว และ วิมล ปันสุภา. ความสำเร็จของงานปรับปรุงพันธุ์พืชตระกูลถั่วบนที่สูง. 2544. หน้า 499-515. ในผลงานวิจัยของมูลนิธิโครงการหลวงประจำปี 2544. มูลนิธิโครงการหลวง.
- อาคม กาญจนประโชติ สุรัตน์ นักร้อง สมจิต ใจดี ณรงค์ บุญแก้ว วสัน มาลา วีรพันธ์ กันแก้ว วินัยต์ แผลทอง และ ประกิตต์ โกะสูงเนิน. 2544. การวิจัยการปลูกถั่วอะซูกิในพื้นที่นาดำบนที่สูงหลังการเก็บเกี่ยวข้าว. หน้า 516-547. ในผลงานวิจัยของมูลนิธิโครงการหลวงประจำปี 2544. มูลนิธิโครงการหลวง.
- สุมินทร์ สมุทรคุปต์ สุทัศน์ จุลศรีไคววัล วีรพันธ์ กันแก้ว และ วิมล ปันสุภา. 2543. ลักษณะเมล็ดถั่วอะซูกิพันธุ์ Erimo ที่ผลิตได้บนที่สูงในจังหวัดเชียงใหม่. หน้า 385-399. ในผลงานวิจัยของมูลนิธิโครงการหลวงประจำปี 2543. มูลนิธิโครงการหลวง.

โครงการวิจัย

1. หัวหน้าโครงการวิจัยเรื่อง “ปรับปรุงพันธุ์ข้าวไร่” ปี 2551-2556
2. หัวหน้าโครงการวิจัยเรื่อง “ปรับปรุงพันธุ์ถั่วแดงหลวง” ปี 2551-2556

ชื่อ - สกุล (ภาษาไทย) นางสาวปณิดา ดวงแก้ว
(ภาษาอังกฤษ) Miss Panida Duangkaew

วัน เดือน ปีเกิด 22 สิงหาคม 2527

หมายเลขประจำตัวประชาชน 1 7204 00030 67 7

ตำแหน่งทางวิชาการปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ (ดร.)

สถานที่ทำงาน

คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตำบลสามพระยา อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี 76120

ติดต่อ โทรศัพท์ 032-594038 โทรสาร 032-594037 มือถือ 089-4599698

e-mail address : duangkaew_p@silpakorn.edu

ที่อยู่ปัจจุบัน

บ้านเลขที่ 358 ถนนเพชรเกษม ซอย 62/4 แขวงบางแคเหนือ เขตบางแค กทม. 10160

ประวัติการศึกษา

-วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ชีววิทยา) เกียรตินิยมอันดับ 1 มหาวิทยาลัยมหิดล (2549)

-ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ชีวเคมี) มหาวิทยาลัยมหิดล (2555) (โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก)

วิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา

- ระดับปริญญาเอก

การศึกษาลักษณะการทำงานของเอนไซม์ CYP6P7 จากยุงก้นปล่อง *Anopheles minimus* ในการ
ย่อยสลายสารฆ่าแมลง

ปีที่ดำเนินการ 2550-2555

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ(แตกต่างจากวุฒิการศึกษา ตอบได้มากกว่า 1 ข้อ) โพรตริบรูแซนงวิชา
และแนวเรื่องย่อยด้วย (ถ้ามี)

สาขาเกษตรศาสตร์และชีววิทยา

ผลงานตีพิมพ์และนำเสนอผลงานวิจัย 5 ปีย้อนหลัง (พ.ศ. 2558-25562)

ผลงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ปณิดา ดวงแก้ว นวลอนงค์ จิระกาญจนากิจ พรพิมล รงคันพรัตน์. (2561). “การยับยั้งการทำงานของระบบ
เอนไซม์กำจัดสารพิษของลูกน้ำยุงลาย *Aedes aegypti* โดยสารสกัดจากพืชและสารจำเพาะ
บางชนิด.”, สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร. 40 หน้า.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในรูปแบบ

บทความวิจัยในวารสารทางวิชาการ

Duangkaew P, Pouyfung P, Jirakanjanakit N, Rongnoparut P. (2018). “Combined larvicidal efficacy of Rhinacanthin-C, Luteolin, Quercetin, and binary mixtures of *Rhinacanthus nasutus*, *Andrographis paniculata* and *Vernonia cinerea* extracts against *Aedes aegypti* mosquito.” *International Journal of Agricultural Technology*. 14(3): 271-286. (TCI กลุ่ม 1)

Rongnoparut P, **Duangkaew P**, Prasopthum A, Pouyfung P. (2016). “Structure-function relationships of phytochemicals in control of mosquito vectors.” **Current Organic Chemistry**. 20: 2469-2473. (SCOPUS)

บทความวิจัยในการประชุมวิชาการ (Proceedings)

Yamyang, M., **Duangkaew, P.**, Puanpunsi, N., Poomjae, S. and Na Chiangmai, P. (2018). “Correlation of some agronomic characteristics with lodging of upland rice varieties collected from ethnic minority farmers.” The 8th National and International Graduate Study Conference “Thailand 4.0 Creative Innovation for Sustainable Development”, 44-52. Princess Maha Chakri Sirindhon Anthropology Centre, Bangkok. 28-29 June, 2018.

Gebremeskal, Y., **Duangkaew, P.**, Laosutthipong, C., and Jirakanjanakit, N. (2017). “Study of larvicidal efficacy and insecticide synergistic effect of *Piper longum* extracts against *Aedes aegypti* mosquitoes” in Proceeding of an international conference on The 7th National and International Graduate Study Conference, 103–116. Bangkok, Thailand, July 20-21, 2017.