

## -อิทธิพลของปุ๋ยแมงกานีสต่อปริมาณสารหอม 2-AP และผลผลิตข้าว<sup>1/</sup>

## Effects of manganese fertilization on 2-AP and rice yield <sup>1/</sup>

ผู้ทำสัมมนา

นายธนวัฒน์ บุตรดีขันธุ์<sup>2/</sup>

อาจารย์ที่ปรึกษา

3/

### บทคัดย่อ

ข้าวเป็นพืชอาหารหลักที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและความมั่นคงทางอาหารของประเทศไทย โดยเฉพาะข้าวหอมซึ่งมีคุณลักษณะเด่นด้านกลิ่นหอมจากสาร 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารหอมและผลผลิตข้าวได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย รวมถึงการจัดการธาตุอาหารพืช โดยเฉพาะแมงกานีสซึ่งเป็นจุลธาตุที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง การทำงานของเอนไซม์ และกระบวนการเมตาบอลิซึมที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารตั้งต้นของ 2-AP จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า การใส่ปุ๋ยแมงกานีสในระดับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มปริมาณสาร 2-AP ในเมล็ดข้าวได้ โดยเฉพาะในพันธุ์ KDML105 ซึ่งมีศักยภาพด้านความหอมสูง การทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (CRD) ที่ศึกษาพันธุ์ข้าว 3 พันธุ์คือ BNM4, KDML105 และ KH-CMU ร่วมกับระดับการใส่แมงกานีส 4 ระดับ (0, 150, 200 และ 250 mg kg<sup>-1</sup>) แสดงให้เห็นว่า ระดับแมงกานีส 150–250 mg kg<sup>-1</sup> ส่งผลให้ปริมาณ 2-AP เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในบางพันธุ์ ขณะที่การตอบสนองแตกต่างกันตามลักษณะทางพันธุกรรมของแต่ละพันธุ์ ในด้านผลผลิต การใส่แมงกานีสในระดับ 250 mg kg<sup>-1</sup> ช่วยเพิ่มผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิต ได้แก่ จำนวนรวงต่อต้น เปอร์เซ็นต์เมล็ดดี และน้ำหนัก 100 เมล็ด เมื่อเทียบกับการไม่ใส่แมงกานีส นอกจากนี้ ในดินที่มีแมงกานีสต่ำ การเติมแมงกานีสช่วยเพิ่มผลผลิตเมล็ดอย่างชัดเจน สะท้อนว่าแมงกานีสอาจเป็นปัจจัยจำกัดการผลิตในบางสภาพดิน ดังนั้น การจัดการปุ๋ยแมงกานีสอย่างเหมาะสมโดยพิจารณาร่วมกับพันธุ์ข้าวและสมบัติดิน จึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มทั้งคุณภาพด้านความหอมและศักยภาพผลผลิตของข้าวอย่างยั่งยืน

**คำสำคัญ:** แมงกานีส; 2-acetyl-1-pyrroline; ความหอมของข้าว; ผลผลิตข้าว; จุลธาตุ

<sup>1/</sup>เอกสารประกอบรายวิชา 1201 480 สัมมนา

<sup>2/</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท 4 ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

<sup>3/</sup>อาจารย์ประจำภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

## 1. บทนำ

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นธัญพืชอาหารหลักที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของประชากรโลก โดยเฉพาะในประเทศแถบเอเชีย รวมถึงประเทศไทย ซึ่งข้าวไม่เพียงเป็นแหล่งพลังงานและสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายเท่านั้น แต่ยังมี ความเกี่ยวข้องกับวิถีชีวิต วัฒนธรรม และความเชื่อของคนไทยมาอย่างยาวนาน (อารีย์, 2560) ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ผลิตและผู้ส่งออกข้าวรายสำคัญของโลก อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันสถานการณ์การผลิตและการค้าข้าวโลกมีการเปลี่ยนแปลงไปสู่ระบบตลาดเสรีมากขึ้น ประเทศผู้ส่งออกข้าวรายสำคัญต่างเร่งพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตข้าวทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน ส่งผลให้การแข่งขันในตลาดข้าวโลกทวีความรุนแรง และทำให้ประเทศไทยสูญเสียส่วนแบ่งทางการตลาดบางส่วน (สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า, 2567)

คุณภาพข้าวเป็นเกณฑ์สำคัญในการกำหนดมาตรฐานและมูลค่าทางเศรษฐกิจ โดยพิจารณาทั้งคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมีของเมล็ด คุณภาพทางกายภาพ เช่น ความยาว ความกว้าง ความหนา น้ำหนักเมล็ด และระดับท้องไข มีผลโดยตรงต่อคุณภาพการสีและสัดส่วนต้นข้าว ขณะที่คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณอะไมโลส อุณหภูมิแป้งสุก ความคงตัวของแป้งสุก อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก และปริมาณสารระเหย 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) (บุญหงษ์ และ วุฒิชัย, 2559) ในบรรดาคูณลักษณะทั้งหมด ความหอมเป็นปัจจัยสำคัญที่เพิ่มมูลค่าทางการตลาด โดยเฉพาะในข้าวหอมคุณภาพสูง ความหอมของข้าวมีสาเหตุหลักมาจากสารประกอบระเหยชนิด 2-AP ซึ่งเป็นสารสำคัญที่ทำให้ข้าวหอมมีลักษณะเฉพาะแตกต่างจากข้าวไม่หอม ปริมาณสาร 2-AP ในเมล็ดข้าวได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย ได้แก่ พันธุ์ข้าวซึ่งเกี่ยวข้องกับยีนควบคุมความหอม (*badh2*) รวมถึงสภาพแวดล้อม พื้นที่ปลูก สภาพดิน ภูมิอากาศ และการจัดการด้านการเพาะปลูก ซึ่งล้วนส่งผลต่อการสะสมของสารหอมดังกล่าวในข้าว (กมลวรรณ และคณะ, 2556)

แมงกานีส (Manganese; Mn) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของข้าว โดยมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง การกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ และกระบวนการเมตาบอลิซึมหลายประการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสารชีวโมเลกุลในพืช กระบวนการดังกล่าวมีความเชื่อมโยงกับการสังเคราะห์สารตั้งต้นของ 2-AP ความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสในดินนาที่มีความแปรปรวนตามสมบัติของดิน เช่น ชนิดดิน ค่า pH และการจัดการดิน โดยเฉพาะในดินด่างหรือดินที่มีค่า pH สูง ซึ่งอาจลดความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสและส่งผลต่อกระบวนการทางชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสะสม 2-AP ในเมล็ดข้าว (Yu *et al.*, 2025) การเพิ่มแมงกานีสมีแนวโน้มทำให้ปริมาณ 2-AP ในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น แม้ระดับการตอบสนองจะแตกต่างกันไปตามสภาพดินและสภาพแวดล้อม (รณชัย และคณะ, 2559) ดังนั้นการศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยแมงกานีสต่อปริมาณสาร

หอม 2-AP และผลผลิตข้าวจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาการจัดการธาตุอาหารเพื่อยกระดับคุณภาพ และศักยภาพการผลิตข้าวหอมอย่างยั่งยืน

## 2. ความสำคัญของข้าว

ข้าวเป็นธัญพืชสำคัญที่เป็นแหล่งโภชนาการและพลังงานหลักกว่าหนึ่งในห้าของประชากรโลก โดยเฉพาะในทวีปเอเชีย จากหลักฐานทางพันธุศาสตร์พบว่าข้าวมีต้นกำเนิดจากการเพาะปลูกในแถบลุ่มแม่น้ำของจีนเมื่อประมาณ 8,200–13,500 ปีก่อน ก่อนจะแพร่กระจายไปทั่วเอเชีย และขยายเข้าสู่ทวีปยุโรปผ่านทางเอเชียตะวันตก รวมถึงทวีปอเมริกาผ่านการยึดอาณานิคมในภายหลัง (ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ม.ป.ป.) ประเทศไทยมีผลผลิตข้าวสูงเป็นอันดับ 6 ของโลก คิดเป็น 4.0% ของผลผลิตข้าวทั่วโลก ในรอบปีเพาะปลูก 2568/69 ไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวทั้งสิ้น 57.5 ล้านไร่ ส่วนใหญ่อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คิดเป็นสัดส่วนมากกว่าครึ่งหนึ่งของพื้นที่ปลูกข้าวทั้งหมดของประเทศ (กรมการข้าว, 2568) และมีผลผลิตข้าวเปลือกทั้งประเทศประมาณ 26.99 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2568) ที่ความชื้นร้อยละ 15 แม้ว่าพื้นที่เพาะปลูกโดยรวมจะมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เป็นผลจากการปรับเปลี่ยนรูปแบบการใช้ที่ดินและปัจจัยด้านเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตาม ผลผลิตต่อไร่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากสภาพน้ำและสภาพอากาศเอื้อต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวในหลายพื้นที่ ในช่วงที่ผ่านมา แนวโน้มการผลิตข้าวได้เปลี่ยนจากการมุ่งเน้นเพิ่มผลผลิตเพียงอย่างเดียว ไปสู่การให้ความสำคัญกับคุณภาพของข้าวมากขึ้น โดยเฉพาะลักษณะทางกายภาพ คุณภาพการหุงต้ม และกลิ่นหอม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความต้องการของผู้บริโภค และมูลค่าทางการตลาดของข้าว ในกลุ่มข้าวหอม คุณลักษณะด้านกลิ่นหอมถือเป็นจุดเด่นที่สร้างความแตกต่างและเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ข้าวอย่างมีนัยสำคัญ

## 3. ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของข้าว

ในอดีตพื้นที่เพาะปลูกข้าวส่วนใหญ่มีความอุดมสมบูรณ์ของดินสูง จึงสามารถผลิตข้าวได้โดยไม่ต้องมีการใส่ปุ๋ยเพิ่มเติม อย่างไรก็ตาม การใช้พื้นที่เกษตรอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน โดยเฉพาะในพื้นที่น้ำฝน ประกอบกับการชะล้างพังทลายของดินและการขาดการจัดการธาตุอาหารอย่างเหมาะสม ส่งผลให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินลดลง และธาตุอาหารบางชนิดกลายเป็นปัจจัยจำกัดต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว ดังนั้น การจัดการธาตุอาหารพืชอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะการทดแทนธาตุอาหารที่ถูกนำออกไปพร้อมกับผลผลิต จึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการผลิตข้าวอย่างยั่งยืน จากการศึกษาพบว่า ธาตุอาหารพืชที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของข้าวสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุ โดยธาตุอาหารหลักที่มีบทบาทสำคัญต่อการ

เจริญเติบโตของข้าว ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ซึ่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสถูกระบุว่าเป็นธาตุอาหารที่เป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของข้าวในหลายชนิดดิน โดยไนโตรเจนมีบทบาทต่อการเจริญทางลำต้น ใบ และการสะสมมวลชีวภาพ ขณะที่ฟอสฟอรัสมีความสำคัญต่อการพัฒนาระบบรากและการเจริญเติบโตในระยะเริ่มต้น ส่วนโพแทสเซียมมีบทบาทในการควบคุมสมดุลน้ำ การใช้ธาตุอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ และการเพิ่มความแข็งแรงของต้นข้าว ธาตุอาหารรอง เช่น ซัลเฟอร์ (S) มีบทบาทในการสร้างโปรตีนและเอนไซม์ของพืช และพบว่ามีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวรองจากธาตุอาหารหลัก โดยเฉพาะในสภาพดินที่มีการใช้ประโยชน์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน นอกจากนี้ จุลธาตุ ได้แก่ เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) โบรอน (B) และโมลิบดีนัม (Mo) แม้ข้าวต้องการในปริมาณน้อย แต่มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการทางสรีรวิทยา เช่น การทำงานของเอนไซม์ การสังเคราะห์แสง และการพัฒนาการเจริญเติบโตของต้นข้าว โดยการขาดจุลธาตุบางชนิดอาจส่งผลให้การเจริญเติบโตของข้าวลดลงอย่างชัดเจน แม้จะมีธาตุอาหารหลักเพียงพอก็ตาม จากผลการศึกษาดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวขึ้นอยู่กับความสมดุลของธาตุอาหารพืช ชนิดของดิน และสภาพน้ำ ดังนั้น การจัดการธาตุอาหารพืชให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่จึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตข้าวในระยะยาว (ดวงใจ และคณะ, 2543)

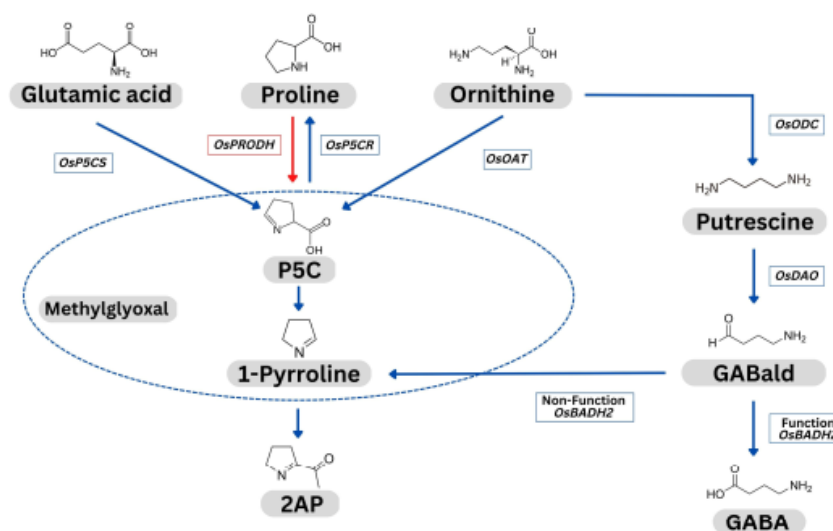
#### 4. สาร 2-AP

สาร 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) คือ สารระเหยง่ายที่เป็นองค์ประกอบหลักในการให้กลิ่นหอมอันเป็นเอกลักษณ์ของข้าวหอมมะลิไทย และเตยหอม โดยมีลักษณะทางเคมีเป็นสารประกอบเฮเทอโรไซคลิกที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ สังเคราะห์ได้จากกรดอะมิโน แอล-โพรลีน (L-proline) ผ่านกระบวนการทางชีวสังเคราะห์ในพืช ซึ่งกลิ่นหอมดังกล่าวเป็นคุณลักษณะสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพ โดยปริมาณของสาร 2-AP ในเมล็ดข้าวจะเป็นตัวกำหนดระดับความหอมที่ผู้บริโภครับรู้ได้ (ศรัณญา, 2551)

##### 4.1 กระบวนการเกิด 2-AP

กระบวนการสังเคราะห์ 2-AP ในข้าวหอมเกิดขึ้นผ่านเส้นทาง polyamine pathway ซึ่งมีกรดอะมิโนโพรลีน (Proline) และออร์นิทีน (Ornithine) เป็นสารตั้งต้นสำคัญ กระบวนการดังกล่าวเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของโพรลีนไปเป็น 1-pyrroline-5-carboxylate (P5C) และ 1-pyrroline ก่อนนำไปสู่การสร้าง 2-AP (ภาพที่ 1) และ ยีน *OsBADH2* มีบทบาทสำคัญในการควบคุมการเกิดสารหอม โดยในกรณีที่ยีนดังกล่าวทำงานได้ตามปกติ จะเร่งการเปลี่ยน  $\gamma$ -aminobutyraldehyde (GABAld) ไปเป็น  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) ส่งผลให้ไม่เกิดการสะสม

ของสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ 2-AP อย่างไรก็ตาม ในข้าวหอมที่มียีน *OsBADH2* เกิดการกลายพันธุ์ จะทำให้ GABald สะสมและถูกเปลี่ยนเป็น 1-pyrroline ก่อนนำไปสู่การสร้างสาร 2-AP ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของลักษณะกลิ่นหอมของข้าว (Okpala *et al.*, 2019)



ที่มา: Bao *et al.* (2022)

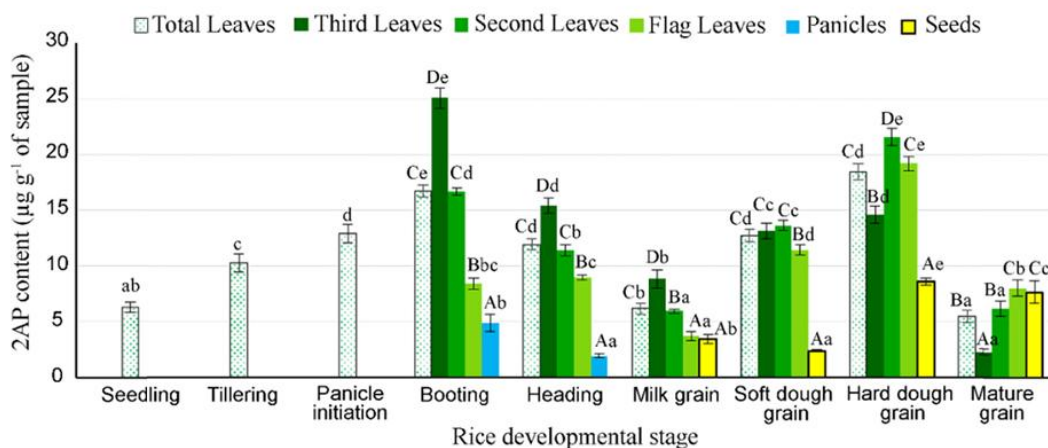
**ภาพที่ 1** กลไกการสังเคราะห์สาร 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) ในข้าวหอมผ่านเส้นทาง polyamine pathway และบทบาทของยีนที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการเกิดสารหอม

## 4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อ 2-AP

### 4.2.1 ระยะเวลาเจริญเติบโต

Nawara *et al.* (2020) ศึกษาผลของธาตุอาหารต่อการสะสมสารหอม 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) ในข้าวหอมมะลิพันธุ์ KDML105 โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 3 ซ้ำ ทำการปลูกในทรายสะอาดและให้สารละลายธาตุร่วมกับปุ๋ยพื้นฐาน NPK สัปดาห์ละ 2 ครั้ง เป็นเวลา 12 สัปดาห์ ในการทดลองคัดเลือกธาตุอาหาร 6 ชนิด ได้แก่ Mg (100 ppm), Cu (1.00 ppm), Cr (3.37 ppm), Se (0.10 ppm), B (1.03 ppm) และ Mn (2.50 ppm) จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณ 2-AP ในใบและเมล็ดข้าวในระยะเวลาเจริญเติบโตต่าง ๆ พบว่า 2-AP ถูกสังเคราะห์และสะสมในใบในระดับสูง โดยเฉพาะช่วงตั้งท้องถึงออกรวง ซึ่งเป็นช่วงที่กิจกรรมทางสรีรวิทยาและการสังเคราะห์สารทุติยภูมิของพืชอยู่ในระดับสูง ใบลำดับที่สามและใบธงทำหน้าที่เป็นแหล่งผลิตและแหล่งสะสม 2-AP ที่สำคัญ ก่อนที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายสารไปยังรวงและเมล็ดในระยะพัฒนาเมล็ดส่งผลให้ของปริมาณ 2-AP ในใบลดลง

เมื่อเข้าสู่ระยะเมล็ดสุกแก่ แสดงให้เห็นถึงกระบวนการ translocation จากแหล่งผลิต (source) ไปยังแหล่งสะสม (sink) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่กำหนดระดับความหอมของเมล็ดข้าวในระยะเก็บเกี่ยว (ภาพที่ 2)

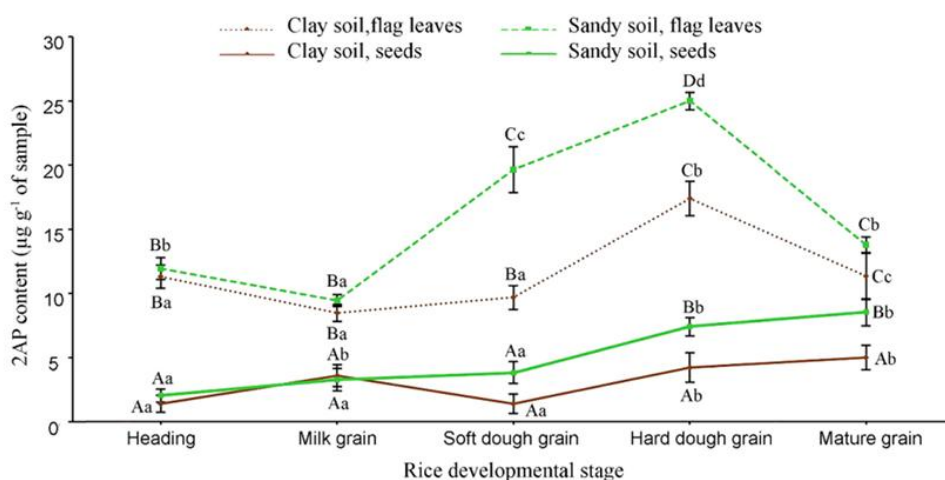


ที่มา: Nawara *et al.* (2020)

ภาพที่ 2 ปริมาณสาร 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) ในใบและรวงของข้าวหอมพันธุ์ KDML 105 ที่ปลูกในสภาพดินทราย ในระยะการเจริญเติบโต 9 ระยะ หมายเหตุ แท่งแสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง ( $n = 3$ ) ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ตัวอักษรพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างทางสถิติในระยะการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน แสดงด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็ก และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างทางสถิติในระยะการเจริญเติบโตเดียวกัน

#### 4.2.2 ดิน

ชนิดดินเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสะสม 2-AP โดยข้าวที่ปลูกในดินทรายมีแนวโน้มสะสม 2-AP สูงกว่าข้าวที่ปลูกในดินเหนียว ทั้งในใบธง รวง และเมล็ด (ภาพที่ 3) ดินทรายมีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ ส่งผลให้พืชเผชิญกับสภาวะเครียดจากน้ำในระดับอ่อนถึงปานกลาง ซึ่งเป็นปัจจัยกระตุ้นการสะสมสารที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อความเครียด เช่น proline และสารตั้งต้นในเส้นทางการสังเคราะห์ 2-AP ส่งผลให้ระดับ 2-AP เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการปลูกในดินเหนียว



ที่มา: Nawara *et al.* (2020)

ภาพที่ 3 ผลของชนิดดินที่แตกต่างกันต่อปริมาณสาร 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) ในใบธง รวง และเมล็ดของข้าวหอมพันธุ์ KDML 105 ในระยะการเจริญเติบโต 5 ระยะ หมายเหตุ แท่งแสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง ( $n = 3$ ) ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างระยะการเจริญเติบโตภายในกลุ่มเดียวกัน ส่วนตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างระหว่างกลุ่มในระยะการเจริญเติบโตเดียวกัน ( $P < 0.05$ )

#### 4.2.3 ธาตุอาหารพืช

ธาตุอาหารพืชมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมกระบวนการเมตาบอลิซึม การทำงานของเอนไซม์ และการสังเคราะห์สารทุติยภูมิในข้าว รวมถึงสารหอม 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) สถานะและความสมดุลของธาตุอาหารในดินส่งผลต่อการสร้างสารตั้งต้น เช่น กรดอะมิโนโพรลีน ตลอดจนกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางการสังเคราะห์ 2-AP ผ่าน polyamine pathway ซึ่งมีอิทธิพลต่อระดับการสะสมของสารหอมในเมล็ดข้าวในระยะเก็บเกี่ยว ธาตุอาหารหลัก โดยเฉพาะไนโตรเจน (N) มีบทบาทโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของพืชและการสังเคราะห์กรดอะมิโน ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของโปรตีนและสารตั้งต้นในการสร้างสารหอม อย่างไรก็ตาม การได้รับไนโตรเจนในปริมาณสูงอาจกระตุ้นการเจริญทางลำต้นและใบมากเกินไป ส่งผลให้การจัดสรรคาร์บอนและไนโตรเจนไปสู่การสังเคราะห์สารทุติยภูมิลดลง ขณะที่ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) มีบทบาทในการพัฒนาระบบราก การถ่ายโอนพลังงาน และการควบคุมสมดุลน้ำของพืช ซึ่งเอื้อต่อการใช้ธาตุอาหารอย่างมีประสิทธิภาพและส่งผลทางอ้อมต่อการสังเคราะห์และการสะสมของสาร 2-AP

สำหรับจุลธาตุ แม็พืชต้องการในปริมาณน้อย แต่มีความจำเป็นต่อการทำงานของเอนไซม์และกระบวนการทางสรีรวิทยาหลายประการ งานวิจัยของ Nawara *et al.* (2020) รายงานว่า การให้ธาตุอาหารบางชนิด ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) โบรอน (B) ทองแดง (Cu) ซีลีเนียม (Se) และแมงกานีส (Mn) ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2-AP ในใบและเมล็ดข้าวหอมพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แตกต่างกันไปตามระยะการเจริญเติบโตของพืช โดยธาตุอาหารแต่ละชนิดถูกกำหนดอัตราการใช้ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและไม่ก่อให้เกิดพิษต่อพืช (ตารางที่ 1)

**ตารางที่ 1** ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่เติมลงในดินปลูก (ดินกระถาง)

ธาตุอาหาร	ความเข้มข้น (ppm)
แมกนีเซียม	100.00
ทองแดง	1.00
โครเมียม	3.37
ซีลีเนียม	0.10
โบรอน	1.03
แมงกานีส	2.50

ที่มา: ดัดแปลงจาก Nawara *et al.* (2020)

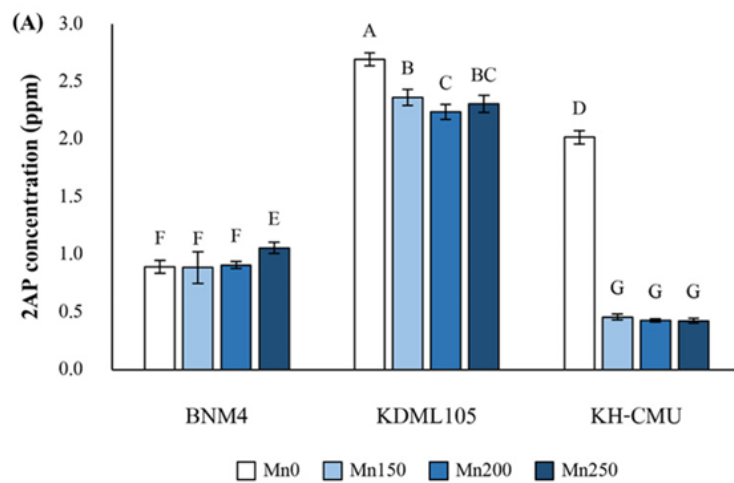
จากการศึกษาดังกล่าว พบว่า แมงกานีสเป็นจุลธาตุที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณสาร 2-AP อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอในทุกระยะการเจริญเติบโต ทั้งในระยะเจริญทางลำต้นและระยะสืบพันธุ์ แมงกานีสเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสง ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน และการป้องกันความเครียดออกซิเดชันของพืช ซึ่งอาจส่งผลต่อการสร้างสารตั้งต้นและการควบคุมกระบวนการสังเคราะห์สาร 2-AP ทางอ้อม ดังนั้น การจัดการธาตุอาหารพืช โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ยแมงกานีสอย่างเหมาะสม จึงมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตข้าวหอมที่มีคุณภาพและระดับความหอมสูง

## 5. อิทธิพลของปุ๋ยแมงกานีสต่อปริมาณสารหอม 2-AP

แมงกานีสเป็นธาตุอาหารที่มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช และกระบวนการสังเคราะห์แสง Inpradit *et al.* (2023) ศึกษาผลของการให้แมงกานีสในอัตราต่าง ๆ ต่อปริมาณสารหอม 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) ในข้าวหอมไทย โดยวางแผนการทดลองแบบ Factorial experiment in a Completely Randomized Design จำนวน 3 ซ้ำ ปัจจัยหลักคือ พันธุ์ข้าวหอม

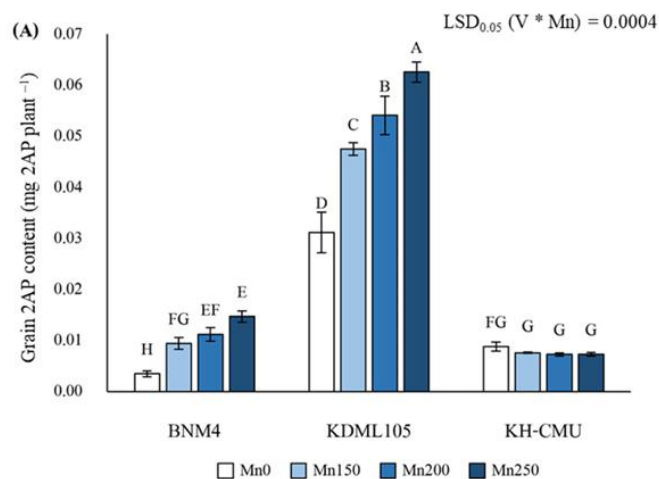
3 พันธุ์ ได้แก่ BNM4, KDML105 และ KH-CMU ปัจจัยรองคือ อัตราการใส่แมงกานีสที่ต่างกัน มี 4 ระดับ ได้แก่  $0 \text{ mg kg}^{-1}$  (Mn0),  $150 \text{ mg kg}^{-1}$  (Mn150),  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  (Mn200) และ  $250 \text{ mg kg}^{-1}$  (Mn250) จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ 2-AP สูงที่สุดถูกพบในพันธุ์ KDML105 เมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองพันธุ์ ในพันธุ์ BNM4 ความเข้มข้นของ 2-AP เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเมื่อมีการใส่ Mn250 ในขณะที่พันธุ์ KH-CMU มีค่าต่ำที่สุดหลังการใส่ Mn ทุกระดับ เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใส่ Mn (ภาพที่ 4) แสดงถึงพันธุ์ข้าวและอัตราการใส่แมงกานีส ส่งผลต่อความเข้มข้นของ 2-AP ในเมล็ดข้าว (ภาพที่ 5) นอกจากนี้ยังพบว่าการใส่ปุ๋ยแมงกานีสมีผลต่อปริมาณสารหอม 2-AP ในเมล็ดข้าวแตกต่างกันตามพันธุ์ โดยพันธุ์ KDML105 ให้ปริมาณ 2-AP สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใส่แมงกานีส (Mn0) การเพิ่มระดับแมงกานีสตั้งแต่ Mn150 ถึง Mn250 ทำให้ปริมาณ 2-AP เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในพันธุ์ BNM4 และ KDML105 ขณะที่พันธุ์ KH-CMU ไม่พบความแตกต่างของปริมาณ 2-AP เมื่อใส่แมงกานีส สะท้อนให้เห็นว่าอิทธิพลของปุ๋ยแมงกานีสต่อการสร้างสารหอม 2-AP ขึ้นอยู่กับลักษณะของแต่ละพันธุ์ข้าว

Nawara *et al.* (2020) ได้ศึกษาผลของการให้ธาตุอาหารต่อการสะสม 2-AP วางแผนการทดลองแบบ CRD จำนวน 3 ซ้ำ โดยมีปัจจัยคือการให้ธาตุอาหารแร่เดี่ยว 7 ระดับ ได้แก่ Control (NPK), Mg, Cu, Cr, Se, B และ Mn ปลูกข้าวในวัสดุปลูกทรายร่วมกับสารละลายธาตุอาหารพื้นฐาน (NPK) และให้ธาตุอาหารเสริมสัปดาห์ละ 2 ครั้ง เป็นเวลา 12 สัปดาห์ พบว่า การให้ธาตุอาหารแร่มีผลต่อปริมาณสาร 2-AP ในเมล็ดข้าวพันธุ์ KDML 105 ระยะสุกแก่ (mature grain stage) อย่างมีนัยสำคัญ การให้โบรอน (B) ส่งผลให้เมล็ดข้าวมีปริมาณ 2-AP สูงที่สุด รองลงมาคือซีลีเนียม (Se) และแมงกานีส (Mn) ตามลำดับ ขณะที่ชุดควบคุม (Control) และบางธาตุอาหาร เช่น Mg, Cu และ Cr ให้ค่าปริมาณ 2-AP ต่ำกว่า ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ธาตุอาหารบางชนิด โดยเฉพาะ B, Se และ Mn มีบทบาทสำคัญต่อการกระตุ้นการสะสมสารหอม 2-AP ในเมล็ดข้าวช่วงระยะสุกแก่ (ภาพที่ 6)



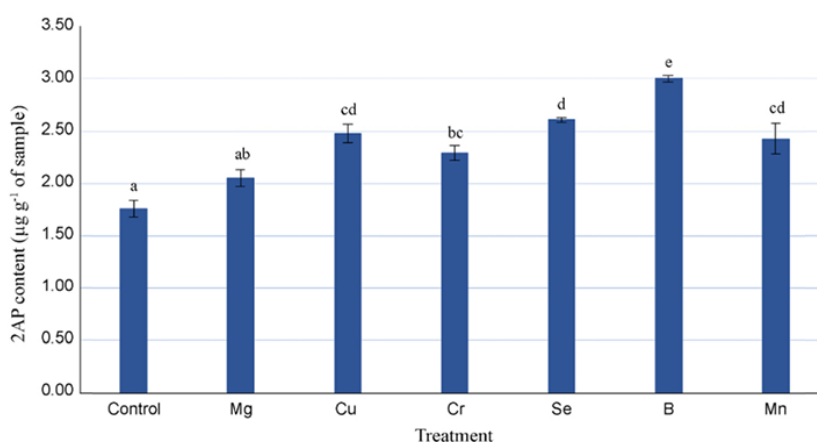
ที่มา: Inpradit *et al.* (2023)

ภาพที่ 4 ผลของระดับแมงกานีสที่ต่างกันต่อความเข้มข้นของสาร 2-AP (ppm) ในเมล็ดข้าวของพันธุ์ข้าวหอม แถบค่าความคลาดเคลื่อนแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง ( $n = 3$ ) โดยค่าเฉลี่ยที่มีอักษรเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )



ที่มา: Inpradit *et al.* (2023)

ภาพที่ 5 ผลของระดับแมงกานีสที่ต่างกันต่อปริมาณสาร 2-AP ในเมล็ดข้าวต่อหน่วยตัวอย่าง แถบค่าความคลาดเคลื่อนแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง ( $n = 3$ ) โดยค่าเฉลี่ยที่มีอักษรเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )



ที่มา: Nawara *et al.* (2020)

ภาพที่ 6 ปริมาณสาร 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) ในเมล็ดข้าวพันธุ์ KDML 105 ระยะสุกแก่ (mature grain stage) ภายหลังจากให้ธาตุอาหารแร่ต่างชนิด ได้แก่ Mg, Cu, Cr, Se, B และ Mn เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (Control) แถบค่าความคลาดเคลื่อนแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง ( $n = 3$ ) โดยความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $P < 0.05$ ) แสดงด้วยอักษรตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน

## 6. อิทธิพลของปุ๋ยแมงกานีสต่อผลผลิตข้าว

การใส่แมงกานีสมีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตและองค์ประกอบผลผลิตของข้าว เนื่องจากแมงกานีสเป็นจุลธาตุที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง การทำงานของเอนไซม์ และการสะสมคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นพื้นฐานของการสร้างผลผลิตเมล็ดจากการศึกษาของ Inpradit *et al.* (2023) ซึ่งวางแผนการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (CRD) โดยใช้ข้าวหอม 3 พันธุ์ ได้แก่ BNM4, KDML105 และ KH-CMU ร่วมกับอัตราการใส่แมงกานีส 4 ระดับ (Mn0, Mn150, Mn200 และ Mn250 mg kg<sup>-1</sup>) พบว่า ระดับแมงกานีสมีผลแตกต่างกันต่อผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตหลายลักษณะ ผลของระดับแมงกานีสส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มระดับแมงกานีสตั้งแต่ 150–250 mg kg<sup>-1</sup> ส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (Mn0) โดยระดับ Mn250 ให้ผลผลิตสูงสุดในทุกพันธุ์ข้าว (ภาพที่ 7) ในด้านการองค์ประกอบผลผลิต ระดับ Mn150 ให้ค่าความสูงต้นมากที่สุด ขณะที่ระดับ Mn250 ให้ค่าความสูงต้นต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาองค์ประกอบผลผลิต พบว่า จำนวนรวงต่อต้นมีค่าสูงที่สุดที่ระดับ Mn200 และ Mn250 และต่ำที่สุดที่ระดับ Mn0 ขณะที่เปอร์เซ็นต์เมล็ดดี มีค่าสูงที่สุดที่ระดับ Mn250 และต่ำที่สุดที่ระดับ Mn0 เช่นเดียวกับน้ำหนัก 100 เมล็ด ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในระดับ Mn200 และ Mn250 และต่ำที่สุดในระดับ Mn0 แสดงให้เห็นว่า การใส่แมงกานีสในระดับปานกลางถึงสูงช่วย

ส่งเสริมองค์ประกอบผลผลิตได้ดีกว่าการไม่ใส่แมงกานีสเมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างพันธุ์ พบว่า พันธุ์ BNM4 มีค่าความสูงต้นและน้ำหนัก 100 เมล็ดที่สูงที่สุด ขณะที่พันธุ์ KH-CMU มีความสูงต้นต่ำที่สุด ด้านจำนวนรวงต่อต้นและจำนวนเมล็ดต่อรวง พันธุ์ KDML105 มีค่าสูงที่สุด ส่วนพันธุ์ BNM4 มีค่าต่ำที่สุด สำหรับเปอร์เซ็นต์เมล็ดดี พบว่า พันธุ์ BNM4 และ KH-CMU มีค่าสูงกว่าพันธุ์ KDML105 (ตารางที่ 2)

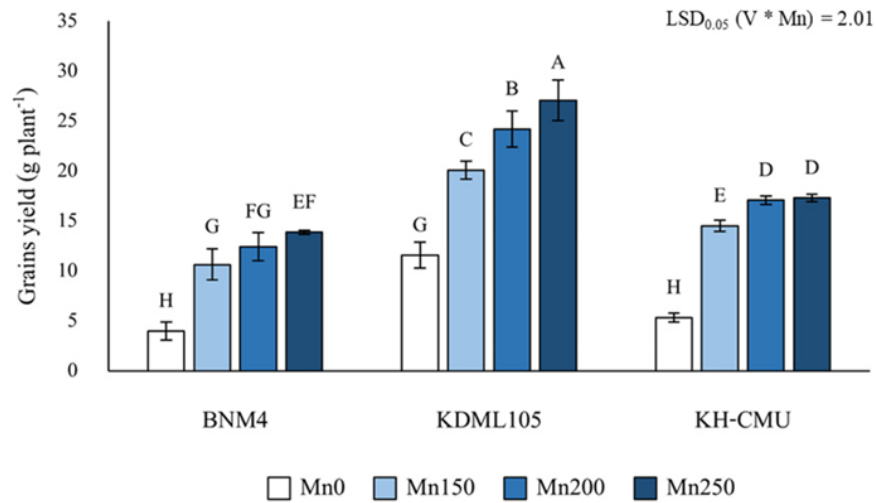
จากการศึกษาของ Yu *et al.* (2025) ซึ่งวางแผนการทดลองแบบปลูกในกระถาง (pot experiment) โดยใช้ข้าว 2 สายพันธุ์ คือ ZA7 และ ZZ35 แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ 1 ใช้ดินจำนวน 5 ชุดที่มีระดับแมงกานีสแตกต่างกัน S1–S5 (3.17, 51.3, 76.9, 96.2 และ 400 mg/kg) และการทดลองที่ 2 ใช้ดินที่มีแมงกานีสต่ำ (S1) แล้วเติมแมงกานีสในรูป  $MnSO_4$  จำนวน 6 ระดับ ได้แก่ Mn0, Mn50, Mn100, Mn200, Mn400 และ Mn800 mg kg<sup>-1</sup> โดยมีการใส่ปุ๋ยพื้นฐานเท่ากันทุกชุดทดลอง ผลการศึกษาพบว่า ระดับแมงกานีสในดินมีผลแตกต่างกันต่อผลผลิตเมล็ดอย่างชัดเจน (ภาพที่ 8) โดยดินที่มีแมงกานีสต่ำที่สุด (S1) ให้ผลผลิตเมล็ดต่ำที่สุดประมาณ 5.92 กรัมต่อกระถาง ขณะที่ดินที่มีระดับแมงกานีสสูงที่สุดให้ผลผลิตเมล็ดสูงที่สุดประมาณ 15 กรัมต่อกระถาง ส่วนดินที่มีระดับแมงกานีสปานกลางให้ผลผลิตรองลงมาตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อระดับแมงกานีสในดินเพิ่มขึ้น ผลผลิตเมล็ดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในการทดลองที่เติมแมงกานีสเสริม พบว่า ระดับการใส่แมงกานีสมีผลแตกต่างกันต่อผลผลิตเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญ (ภาพที่ 9) โดยระดับ Mn0 ให้ผลผลิตต่ำที่สุด ขณะที่ระดับ Mn50 ให้ผลผลิตสูงที่สุด และระดับ Mn100, Mn200, Mn400 และ Mn800 ให้ผลผลิตรองลงมาตามลำดับ แต่ยังคงสูงกว่าระดับ Mn0 อย่าง เมื่อเทียบกับการไม่ใส่แมงกานีส แสดงให้เห็นว่า การจัดการแมงกานีสในระดับที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อการเพิ่มผลผลิตเมล็ด

ตารางที่ 2 องค์ประกอบผลผลิตของข้าว 3 สายพันธุ์ ที่ปลูกในดินที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 4 ระดับ (0, 150, 200, 250, mg kg<sup>-1</sup>)

	ความสูงต้น (เซนติเมตร)	จำนวน รวง/ต้น	จำนวน เมล็ด/รวง	เปอร์เซ็นต์ เมล็ดดี	น้ำหนัก 100 เมล็ด
ความเข้มข้นของแมงกานีส (mg kg <sup>-1</sup> )					
Mn0	78.78 D	3.73 C	86.29 A	77.87 D	2.77 C
Mn150	97.09 A	6.68 B	90.94 A	85.00 C	3.03 B
Mn200	96.07 B	7.68 A	87.43 A	87.78 B	3.11 A
Mn250	94.89 C	7.84 A	87.08 A	90.61 A	3.17 A
พันธุ์ข้าว					
BNM4	104.25 A	4.73 C	71.52 C	87.81 A	3.32 A
KDML105	93.17 B	8.97 A	106.08 A	79.96 B	2.70 C
KH-CMU	77.70 C	5.70 B	86.26 B	88.18 A	3.04 B
F-test					
Varieties (V)	***	***	***	***	***
LSD <sub>0.05</sub> (V)	0.71	0.28	4.37	1.95	0.09
Mn concentration (Mn)	***	***	ns	***	***
LSD <sub>0.05</sub> (Mn)	0.82	0.32	5.05	2.25	0.07
V * Mn	***	ns	ns	ns	**

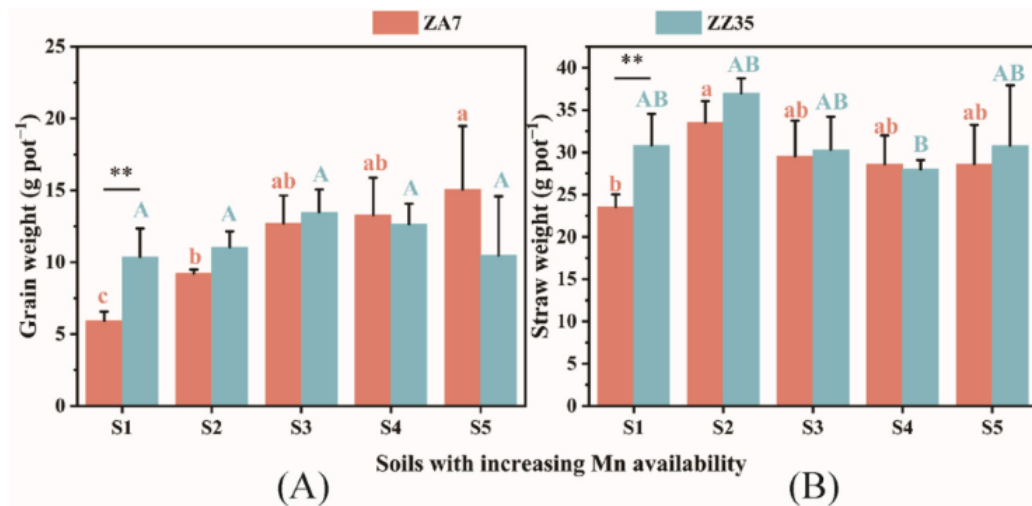
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ ) เครื่องหมาย \*\* และ \*\*\* แสดงถึงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.01$  และ  $p < 0.001$  ตามลำดับ ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Inpradit *et al.* (2023)



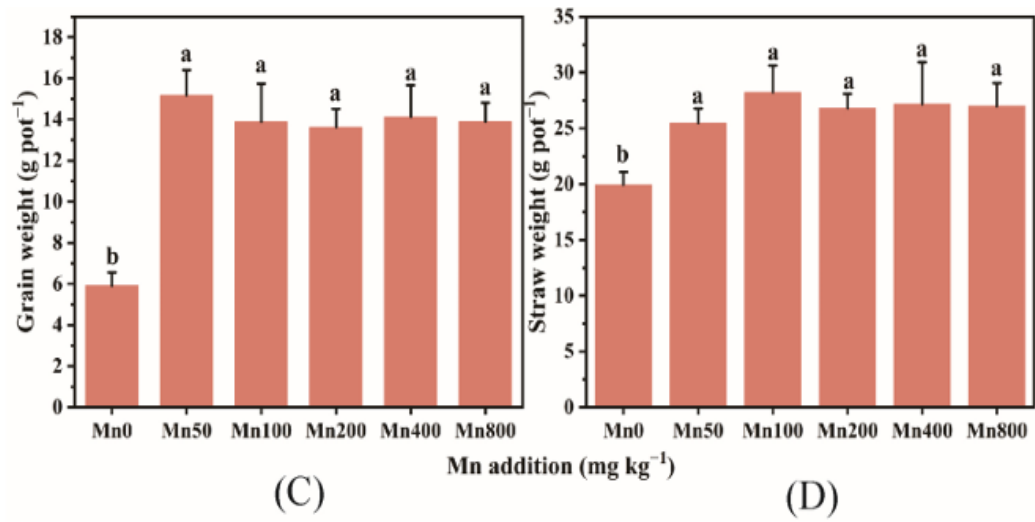
ที่มา: Inpradit *et al.* (2023)

ภาพที่ 5 ผลของระดับความเข้มข้นของแมงกานีส (Mn) ที่แตกต่างกัน ต่อผลผลิตเมล็ดของข้าวหอมไทยแต่ละพันธุ์



ที่มา: Yu *et al.* (2025)

ภาพที่ 8 การทดลองปลูกในกระถางครั้งที่ 1: ผลผลิตเมล็ด (A) และผลผลิตฟาง (B) ของข้าวสายพันธุ์ ZA7 และ ZZ35 ในดินที่แตกต่างกัน 5 ชนิด



ที่มา: Yu *et al.* (2025)

ภาพที่ 9 การทดลองครั้งที่ 2: ผลผลิตเมล็ด (C) และผลผลิตฟาง (D) ของข้าวสายพันธุ์ ZA7 ในดิน S1 ที่มีการเติมแมงกานีส (Mn) จากภายนอกในระดับต่าง ๆ

## 7. สรุป

การจัดการปุ๋ยแมงกานีสมีผลต่อทั้งปริมาณสารหอม 2-AP และผลผลิตของข้าว โดยระดับการใส่แมงกานีส และความแตกต่างของพันธุ์ข้าวมีอิทธิพลต่อการตอบสนองของพืชอย่างชัดเจน การใส่แมงกานีสในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูง ประมาณ 150–250 mg kg<sup>-1</sup> ส่งผลให้ปริมาณ 2-AP ในเมล็ดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในพันธุ์ที่มีศักยภาพด้านความหอมสูง เช่น KDML105 ขณะที่บางพันธุ์มีการตอบสนองต่อแมงกานีสในระดับต่ำหรือไม่แตกต่างจากการไม่ใส่ แสดงให้เห็นว่าการสะสมสารหอมขึ้นอยู่กับลักษณะทางพันธุกรรมของแต่ละพันธุ์ร่วมด้วย ในด้านผลผลิตการใส่แมงกานีสช่วยเพิ่มองค์ประกอบผลผลิตหลายประการ ได้แก่ จำนวนรวงต่อต้น เปอร์เซ็นต์เมล็ดดี และน้ำหนักเมล็ด โดยระดับประมาณ 200-250 mg kg<sup>-1</sup> ให้ค่าผลผลิตและ องค์ประกอบผลผลิตสูงกว่าระดับอื่น ขณะที่การไม่ใส่แมงกานีสให้ค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ ในดินที่มีแมงกานีสต่ำ ผลผลิตเมล็ดมีแนวโน้มต่ำอย่างชัดเจน แต่เมื่อมีการเติมแมงกานีสเสริม ผลผลิตเพิ่มขึ้น สะท้อนให้เห็นว่าแมงกานีสเป็นปัจจัยจำกัดการผลิตในบางสภาพดิน ทั้งนี้ แมงกานีสยังมีบทบาทในกระบวนการสังเคราะห์แสง การทำงานของเอนไซม์ และกระบวนการเมตาบอลิซึมที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสารตั้งต้นของ 2-AP ดังนั้น การจัดการปุ๋ยแมงกานีสในระดับที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มทั้งปริมาณสารหอม 2-AP และศักยภาพผลผลิตของข้าวหอมในระบบการผลิตอย่างยั่งยืน

## 8. เอกสารอ้างอิง

- กรมการข้าว. 2568. รายงานสถานการณ์ข้าว. กรมการข้าว. สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2569 จาก [https://files.ricethailand.go.th/files/2/documents/page\\_doc/files-rice-1759908876287](https://files.ricethailand.go.th/files/2/documents/page_doc/files-rice-1759908876287)
- กมลวรรณ เรียบร้อย, ศรีสวัสดิ์ ชันทอง, อธิยุทธ ตูจันทา, และ สุริพร เกตุงาม. 2013. ยีนความหอม และลักษณะพื้นฐานทางอนุพันธุศาสตร์ของข้าวหอม. *Thai Journal of Genetics*, 6(2), 93–114.
- ดวงใจ สุริยาอรุณโรจน์, ประเสริฐ ไซวัฒน์, S. Fukai และ P. Blamey. 2543. การศึกษาธาตุอาหารพืชที่เป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของข้าวในดินเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทยภายใต้สภาพที่มีน้ำจำกัดและเพียงพอ. *วารสารวิชาการเกษตร*, 18(3), 246–258.
- บุญหงษ์ จงคิด และ วุฒิชัย แดงทอง. 2559. ประสิทธิภาพการสีของพันธุ์ข้าวหอมธรรมศาสตร์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 24(3), 419–422.
- ธณชัย ช่างศรี, กฤษณา สุตทสาร, ปรีชาติ คงสุวรรณ, พัทธภรณ์ รักชุม, ดวงใจ สุริยาอรุณโรจน์, ธานี ชื่นบาน และ วราภรณ์ วงศ์บุญ. 2559. ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพข้าวหอมมะลิไทย. *วารสารวิชาการข้าว*, 7(1), 20–33.
- ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ม.ป.ป. ข้าว คือ ชีวิต. สืบค้นเมื่อ 27 February 2026 จาก <https://dna.kps.ku.ac.th/index.php/rsc-news/new-rsc-rgd/news/205-for-life>
- ศรัณญา ชัยจำรัส. 2551. *ชีวสังเคราะห์สารหอม 2-acetyl-1-pyrroline ในเตยหอม (Pandanus amaryllifolius Roxb.) และข้าวขาวดอกมะลิ 105 (Oryza sativa L.) โดยกระบวนการเมแทบอลิซึมของกรดอะมิโน* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า. 2567. การศึกษาเรื่อง สถานการณ์การค้าข้าวและโอกาสการพัฒนาสินค้าข้าวไทย. กระทรวงพาณิชย์.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2568. รายงานจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2569 จาก <https://oae.go.th/uploads/files/2025/11/06/867b47d154905e53.pdf>
- อารีย์ เชื้อเมืองพาน. 2560. ข้าวธัญพืชอาหารไม่ใช่พืชเศรษฐกิจ. *วารสารแม่โจ้ปริทัศน์*, 43–47.
- Bao, G., Huang, S., Ashraf, U., Qiao, J., Zheng, A., Zhou, Q., Li, L., & Wan, X. 2022. Insights of improved aroma under additional nitrogen application at bootingstage in fragrant rice. *Genes*, 13(11), 2092. <https://doi.org/10.3390/genes13112092>
- Inpradit, W., Jamjod, S., Prom-u-thai, C., & Pusadee, T. 2023. Genotypic variation in Thai fragrant rice in response to manganese application and its effects on 2-acetyl-1-pyrroline content, productivity and gene expression. *Agronomy*, 13, 788. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030788>

- Nawara, W., Bennett, C., Norkaew, O., Sookwong, P., Moolkam, S., Naruebal, S., & Mahatheeranont, S. 2020. Variation of the impact aroma compound, 2-acetyl-1-pyrroline content in Thai fragrant rice plants and its enhanced accumulation by soil nutritional elements. *Journal of Agricultural Science*, 12(6), 36–45. <https://doi.org/10.5539/jas.v12n6p36>
- Okpala, N. E., Mo, Z., Duan, M., & Tang, X. 2019. The genetics and biosynthesis of 2-acetyl-1-pyrroline in fragrant rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.12.012>
- Yu, X., Zhou, Q., Huang, X.-Y., Chen, M., Zhou, J., Zhou, T., Hu, P., Pan, X., Cheng, M., Luo, Y., Christie, P., & Wu, L. 2025. Elucidating the effects of manganese on the growth and cadmium accumulation of *OsNRAMP5* mutant rice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 291, 117863.