บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 ความเสียหายของข้าวที่เกิดจากการเข้าทำลายของแมลงในระหว่างการเก็บรักษา

แมลงศัตรูข้าวระหว่างการเก็บรักษาในยุ้งฉางหรือโรงเก็บเป็นสาเหตุสำคัญที่สร้างความเสียหายอย่างมากทำให้เมล็ดสูญเสียทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ (Madrid *et al.*, 1990) การที่แมลงทำลายโครงสร้าง และปนเปื้อนชิ้นส่วนและมูลของแมลงในผลิตผลเกษตร ทำให้เมล็ดพืชสูญเสียน้ำหนัก เมล็ดพืชสูญเสียคุณค่าทางอาหาร เมล็ดพืชสูญเสียความงอก ผลิตผลสูญเสียคุณภาพ สูญเสียเงิน และสูญเสียชื่อเสียง แมลงสามารถสร้างความเสียหายทางด้านน้ำหนักโดยการกัดทำลายเมล็ดข้าวทำให้เป็นรู และข้างในเป็นโพรง (พรทิพย์ และคณะ, 2548) ความเสียหายที่เกิดกับเมล็ดพืชชนิดอื่น เช่น เมล็ดข้าวโพดที่เกิดจากการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพดซึ่งเป็นแมลงศัตรูโรงเก็บอีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับด้วงงวงข้าวมากสามารถสร้างความเสียหายทำให้เมล็ดข้าวโพดสูญเสียน้ำหนักได้ถึง 18.3% (Adams, 1976) ระยะเวลาที่แมลงสามารถเข้าทำลาย ได้แก่ ระยะก่อนการเก็บเกี่ยว และระยะหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งในระยะก่อนการเก็บเกี่ยว นอกจากผีเสื้อข้าวเปลือกแล้ว แมลงที่สำคัญที่เข้าทำลายข้าวเปลือก ได้แก่ ด้วงงวงข้าวซึ่งแมลงสามารถบินออกจากโรงเก็บเมล็ดไปวางไข่ที่เมล็ดหรือฝักของพืชต่างๆ ในแปลงปลูกได้ ซึ่งในระยะเก็บเกี่ยว ส่วนใหญ่นิยมเก็บเกี่ยวพืชแล้วทิ้งไว้ในแปลงปลูกเพื่อตากเมล็ดลดความชื้น นวด หรือสีเอาเมล็ดออก ซึ่งระยะที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวและทิ้งผลผลิตไว้ในแปลงหรือลานตาก ก็เป็นช่วงที่ทำให้แมลงลงทำลายได้มาก และระยะหลังการเก็บเกี่ยว แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการปฏิบัติเกี่ยวกับเมล็ดพืชที่จะต้องนำมากะเทาะเปลือกหุ้มเมล็ด ขัดสี คัดแยก ทำความสะอาด ช่วงระยะเวลาปฏิบัติงานเหล่านี้โดยมากจะใช้สถานที่ใกล้กับโรงเก็บหรือสถานที่เดียวกัน ซึ่งเดิมมีแมลงอาศัยอยู่แล้ว ทำให้แมลงเข้าไปทำลายผลผลิตได้ ส่วนที่สองคือการขนส่งที่ต้องใช้ระยะเวลานาน และหากขนส่งโดยวิธีใส่กระสอบป่านหรือการขนส่งในปริมาณมาก ๆ โดยมิได้บรรจุภาชนะใด ๆ แมลงสามารถเข้าทำลายในช่วงระยะเวลานี้ได้ และส่วนที่สามคือการเก็บรักษา เป็นการป้องกันและยับยั้งการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดพืชนั้น ๆ การเก็บรักษาไม่สามารถเพิ่มคุณภาพของเมล็ดพืชได้และในระหว่างการเก็บรักษาสภาพแวดล้อม และปัจจัยต่าง ๆ มีผลต่อเมล็ดพืชทำให้เสื่อมคุณภาพ โดยเฉพาะแมลงซึ่งเข้าทำลายแล้วจะแพร่ระบาดทำความเสียหายเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว (บุษรา, 2547) การเก็บรักษาเมล็ด

ข้าวมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสารในภาชนะบรรจุถุง การเก็บรักษาในรูปแบบของข้าวเปลือก หลังจากการเก็บเกี่ยว นวด ทำความสะอาด และตากเมล็ดข้าวเปลือกจนแห้งสนิทดีแล้ว การเก็บในโรงเก็บหรือยุ้งฉางที่เย็น จะช่วยรักษาความหอมของเมล็ดข้าวได้ และลดการเข้าทำลายของโรคและแมลง การเก็บข้าวในรูปแบบของข้าวเปลือกจะรักษากลิ่นหอมได้นานกว่าการเก็บรักษาข้าวในรูปแบบของข้าวสาร และยังพบอีกว่าเมล็ดข้าวเมื่อเก็บรักษาในรูปแบบข้าวกล้องหรือข้าวที่ไม่ผ่านการขัดขาว มักมีสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของด้วงงวงข้าวมากกว่าข้าวที่ขัดขาวแล้ว ซึ่งด้วงงวงข้าวสามารถทำความเสียหายโดยการผสมพันธุ์ วางไข่และให้กำเนิดรุ่นลูก (F_1) ในข้าวกล้องได้มากกว่าแมลงรุ่นลูกที่พบในข้าวที่ขัดสีแล้ว ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของเมล็ดมากขึ้นเช่นกัน (Lucas and Riudavets, 2000)

นอกจากนี้แมลงยังทำความเสียหายให้กับเมล็ดทางด้านคุณภาพของเมล็ดข้าวแล้ว ยังสามารถสร้างความเสียหายให้แก่เมล็ดพืชชนิดอื่น ๆ เช่น มีรายงานการศึกษาผลการเข้าทำลายของแมลงศัตรูโรงเก็บ 2 ชนิด คือ ด้วงอิฐ (*Trogoderma granarium*) และมอดแป้ง (*Rhyzopertha dominica*) พบว่าการเข้าทำลายของแมลงทำให้ปริมาณกรดอะมิโน (amino acid) ในเมล็ดข้าวสาลี ข้าวโพด และข้าวฟ่าง ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Jood *et al.*, 1995) ยังมีรายงานอีกด้วยว่าการเข้าทำลายของแมลงดังกล่าวมีผลต่อการลดลงของปริมาณคาร์โบไฮเดรตในข้าวสาลี ข้าวโพดและข้าวฟ่าง (Jood *et al.*, 1993) ถึงแม้จะมีการเก็บรักษาเมล็ดพืชในภาชนะบรรจุเพื่อป้องกันการเข้าทำลายของแมลงก็ตาม ซึ่งจากการทดลองของ ภัทรพร (2540) รายงานว่า การเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวสารที่เก็บในภาชนะถุงบรรจุ 4 ชนิด คือ ถุงพลาสติกสาน ถุงโพลิเอทิลีน ถุงไนลอน และถุงอะลูมิเนียมฟอล์ย โดยเก็บในสภาพออกซิเจนต่ำ ซึ่งการเก็บรักษาในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ที่เป็นสุญญากาศ และแบบใส่สารดูดออกซิเจน เฉพาะข้าวสารบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ที่เป็นสุญญากาศจะเก็บที่อุณหภูมิ 15°C เก็บรักษาเป็นเวลานาน 6 เดือน ซึ่งในทุก ๆ เดือน ทำการตรวจสอบคุณภาพ พบการเจริญของแมลงในข้าวสารที่เก็บบรรจุในทุกชนิดภาชนะบรรจุ ยกเว้นการเก็บในสภาพออกซิเจนต่ำ และการเก็บที่อุณหภูมิ 15°C และนอกจากนี้ พูลศรี และคณะ (2532) รายงานด้วยว่า พบกลิ่นสาบเมื่อเก็บรักษาข้าวสารในถุงพลาสติกสาน และถุงโพลิเอทิลีน ทั้งนี้อันเนื่องมาจากการเจริญของแมลงมีส่วนสำคัญทำให้คุณภาพข้าวทางกายภาพ เช่น ระดับความเลื่อมมัน การเกาะตัว ความขาว และความนุ่มของเมล็ดข้าวสารมีคุณภาพลดลงในช่วงการเก็บรักษา และข้าวสารที่เก็บสภาพอัดคาร์บอนไดออกไซด์ สุญญากาศ ถุงพลาสติกผนึก และถุงพลาสติกสานที่มีการรมด้วยก๊าซฟอสฟีนเป็นเวลา 1 วัน เมื่อหุงสุกแล้วมีกลิ่นหอมค่อย ๆ อ่อนลงเมื่อเก็บไว้ แต่ข้าวสารที่รมฟอสฟีนเป็นระยะเวลานานกว่านั้นจะมีกลิ่นสาบเกิดขึ้นเมื่อเก็บเป็นเวลานาน 3-4 เดือน สำหรับข้าวอาบรังสีมีกลิ่นเหม็นเมื่อเก็บไว้ 1 เดือน ลักษณะของกลิ่นจะแตกต่างจากกลิ่นสาบของ

ข้าวเก่าทั่วไป ซึ่งคุณภาพการดูดซึมน้ำของเมล็ดจะลดลงในปริมาณเล็กน้อย หลังจากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่การขยายตัวจะลดลงเมื่อเก็บนาน 1 เดือน มีการทดลองเก็บรักษาข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสและข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูปในภาชนะบรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียมฟอยล์ชนิดประกบหลายชั้นด้วย OPP/PE/ALU/PE มีความเหมาะสมต่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ดังกล่าวซึ่งได้รับการยอมรับในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดี โดยมีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 4 เดือนที่อุณหภูมิ 35°C และการเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 25°C และไม่ควรเก็บในที่ร้อนจัดที่อุณหภูมิ 45°C (งามชื่น และคณะ, 2551)

2.2 คุณภาพข้าว

มาตรฐานในการวัดคุณภาพของข้าวจะแตกต่างกันไปตามรสนิยมของผู้บริโภค อันเนื่องมาจากปัจจัยทางเศรษฐกิจ สังคม วัฒนธรรม หรือแม้แต่ปัจจัยทางประวัติศาสตร์ ดังนั้นข้าวที่มีมาตรฐานสูงในที่แห่งหนึ่งอาจจะมีมาตรฐานต่ำในที่อีกแห่งหนึ่ง เช่น ผู้บริโภคข้าวในประเทศตะวันออกไกล (ญี่ปุ่นและเกาหลี) ชอบข้าวที่มีลักษณะนุ่มและค่อนข้างเหนียว ซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะของข้าวจาปอนิกา ส่วนข้าวหอมบาสมาตีเป็นข้าวที่นิยมกันมากในเอเชียใต้ แต่ไม่ได้รับการยอมรับว่าเป็นข้าวที่มีคุณภาพดีในตลาดตะวันออกไกล ข้าวที่มีกลิ่นหอมถือเป็นข้าวที่มีคุณภาพสูงในตะวันออกกลาง (อัมมาร และวิโรจน์, 2533) ถึงแม้ว่าผู้บริโภคจะมีความมั่นใจว่าคุณภาพข้าวที่ตนต้องการเป็นอย่างไร แต่ในการซื้อขายข้าวจะมีการกำหนดมาตรฐานโดยอาศัยคุณภาพการสี คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี

2.1.1 คุณภาพการสี

กัญญา (2547) รายงานว่า คุณภาพการสีของข้าวประเมินได้จากปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (whole grain) และต้นข้าว (head rice) ข้าวที่มีคุณภาพการสีดี เป็นข้าวที่เมื่อผ่านกระบวนการขัดสีแล้วได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวสูง มีปริมาณข้าวหัก (broken rice) น้อย ดังนั้นการประเมินคุณภาพการสีของข้าวจึงขึ้นอยู่กับการแปรสภาพหรือการสีข้าว (rice milling) การสีประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 4 ขั้นตอน ได้แก่

1) การทำความสะอาด (cleaning) เพื่อกำจัดระแง้ ใบข้าว เมล็ดลีบ เมล็ดวัชพืช และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจากข้าวเปลือก

2) การกะเทาะ (shelling หรือ hullling) เป็นการทำให้เปลือกข้าวหลุดออกจากเมล็ด สิ่งที่ได้จากขั้นตอนนี้ คือ แกลบ และข้าวกล้อง

3) การขัดขาว (whitening) เพื่อทำให้รำหลุดจากเมล็ดข้าวกล้อง สิ่งที่ได้จากขั้นตอนนี้ คือ รำ และข้าวสาร

4) การคัดแยก (grading) เพื่อคัดแยกข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหัก ขนาดต่าง ๆ ออกจากกันจากขั้นตอนการสีข้าวดังกล่าว

2.2.2 คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพ (เครือวัลย์, 2536)

การแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าว เช่น ข้าวหัก นำไปแปรรูปเป็นแป้งข้าว และกลุ่มผู้แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ การนำแป้งข้าวไปแปรรูปเป็นเส้นก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ ขนมจีน อาหารว่าง และอาหารหวานต่าง ๆ จนถึงกลุ่มผู้บริโภคซึ่งต้องการผลิตภัณฑ์อาหารจากข้าวที่รสชาติอร่อย มีคุณค่าทางอาหาร และราคายุติธรรม ซึ่งเกณฑ์คุณภาพจากการแปรรูปข้าวนี้ยังคงเป็นลักษณะที่มาจากคุณสมบัติทางกายภาพเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่

1) น้ำหนักเมล็ด กำหนดได้ 2 แบบ คือ น้ำหนักต่อปริมาตร หมายถึงการชั่งน้ำหนักข้าวด้วยปริมาตรคงที่ เช่น กรัมต่อลิตร หรือ กิโลกรัมต่อถัง และแบบที่สองเป็นน้ำหนักต่อจำนวนเมล็ด หมายถึงการชั่งน้ำหนักข้าวด้วยจำนวนเมล็ดที่คงที่ เช่น กรัมต่อ 100 เมล็ด หรือ กรัมต่อ 1,000 เมล็ด น้ำหนักเมล็ดถือเป็นลักษณะหนึ่งในการจำแนกพันธุ์ข้าว เพราะควบคุมลักษณะทางพันธุกรรม เป็นลักษณะที่คงที่มากที่สุด อาจแปรปรวนได้บ้างจากสภาพแวดล้อม เช่น ชนิดของดิน การใส่ปุ๋ย หรือสภาพภูมิอากาศ

2) สีเปลือกของข้าวเปลือก มีหลายสีตั้งแต่สีขาว ฟาง น้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาลเข้ม น้ำตาลทอง ร่องน้ำตาล กระน้ำตาล น้ำตาลแดง ม่วง หรือดำ เป็นต้น สำหรับพันธุ์ข้าวของประเทศไทยมีสีเปลือกส่วนใหญ่เป็นสีขาว หรือสีฟาง และสีน้ำตาล ส่วนสีน้ำตาลแดง สีเขียวแกมเทา และดำมีเป็นส่วนน้อย พันธุ์ข้าวที่มีคุณภาพดีควรมีเปลือกสีอ่อน เพราะเปลือกสีเข้ม เมื่อนำไปขัดสีจะได้เปอร์เซ็นต์แกลบสูง

3) สีข้าวกล้อง สีของข้าวเปลือก ถูกควบคุมโดยยีน (gene) หลายคู่ สร้างสารสีประเภทแอนโทไซยานิน (anthocyanin) อยู่ในส่วนของเยื่อหุ้มผล (pericarp) มีสีต่าง ๆ กัน เช่น ขาว แดง น้ำตาลเข้ม น้ำตาลเทา และม่วงถึงม่วงเกือบดำ และบางพันธุ์เป็นพันธุ์เฉพาะที่ผู้บริโภคนิยมข้าวเป็นพิเศษ มีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวกล้องสีปกติ คุณภาพข้าวกล้องที่เกี่ยวข้องกับสีนี้จึงขึ้นอยู่กับกลุ่มผู้บริโภค

4) ขนาดและรูปร่าง เป็นลักษณะประจำพันธุ์ เพื่อจำแนกข้าว และใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการซื้อขายข้าวของประเทศไทย โดยวัดขนาดเป็นความยาว วัดรูปร่างจากอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง และการวัดความหนาของเมล็ด

5) ข้าวท้องไข่ หมายถึง จุดขาวขุ่นคล้ายชอล์กที่เกิดขึ้นในเนื้อของเมล็ดข้าวสาร ข้าวท้องไข่นี้เกษตรกรทั่วไปอาจเรียกว่า ข้าวท้องปลาชิว ข้าวท้องขาว หรือข้าวจ๊อกกี้ เป็นต้น จัดเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่บ่งบอกคุณภาพและราคาข้าวเปลือก เนื่องจากเมล็ดข้าวที่เป็นข้าวท้องไข่มาก

เมื่อนำไปขัดสีจะทำเมล็ดหัก จึงมีผลต่อคุณภาพการสีโดยตรง นอกจากนั้นยังเป็นลักษณะที่บ่งบอกถึงคุณภาพในด้านลักษณะปรากฏแก่ผู้บริโภคซึ่งส่วนใหญ่ต้องการเมล็ดข้าวสารที่ใสมากกว่าที่มีจุดขาวภายในเนื้อเมล็ด เมื่อข้าวสารเจ้านั้นมีข้าวท้องไข่มากจะทำให้ขายไม่ได้ราคาดี เป็นเหตุให้เจ้าของโรงสีต้องกำหนดเกณฑ์คุณภาพในการรับซื้อข้าวเจ้าจากเกษตรกร และทำให้เกษตรกรต้องการพันธุ์ข้าวเจ้าที่เป็นท้องไข่น้อยหรือไม่เป็นข้าวท้องไข่ ดังนั้นนักวิชาการและนักปรับปรุงพันธุ์จึงพยายามหาสาเหตุและปรับปรุงพันธุ์ข้าวเจ้า เพื่อไม่ให้มีลักษณะท้องไข่เกิดขึ้นให้แก่เกษตรกร

6) ความเลื่อมมันของเมล็ด ข้าวกล้องที่มีความเลื่อมมันดี เมื่อนำไปสีจะทำให้เมล็ดจะทำให้ข้าวไม่หัก ได้ข้าวเต็มเมล็ดมาก ข้าวหักน้อย ลักษณะความเลื่อมมันของเมล็ดเป็นผลจากการปฏิบัติดูแลรักษาข้าวขณะปลูกเป็นอย่างดี

7) ความขาวของข้าวสาร ความขาวของข้าวสารขึ้นอยู่กับระดับการขัดสี ถ้าขัดเบาๆ จะมีสีคล้ำกว่าเมื่อขัดหนัก ๆ เพราะยังมีส่วนของรำติดอยู่ที่ผิวของเมล็ดข้าว สำหรับข้าวเปลือกที่เก็บไว้นาน ถ้านำไปขัดสีจะได้ข้าวสารสีคล้ำกว่าข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ ๆ ดังนั้นความขาวของข้าวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานของข้าว

8) ความใสของเมล็ด เป็นลักษณะความโปร่งแสง โดยแสงส่องผ่านได้ทั้งเมล็ดข้าว ต่างจากข้าวท้องไข่ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะจุด ในข้าวเจ้าด้วยกันหรือแม้แต่พันธุ์เดียวกันอาจมีความใสหรือความขุ่นต่างกันได้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ปลูก ในขณะที่ข้าวเหนียวทั่วไปจะมีความทึบแสง

9) ปริมาณความชื้น ความชื้นของข้าว ทั้งในข้าวเปลือก และข้าวสาร ใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำคัญเพื่อการซื้อขายข้าว เนื่องจากปริมาณความชื้นสามารถบ่งชี้ถึงน้ำหนักของเนื้อข้าวที่ผู้ซื้อ และผู้ขายเกี่ยวข้องด้วยกันโดยตรงในการกำหนดราคาซื้อ-ขาย และในทางอ้อมนั้น ความชื้นสามารถบ่งชี้ถึงอายุการเก็บรักษาข้าวหรือบ่งบอกถึงความปลอดภัยในการเก็บการรักษาให้ข้าวมีคุณภาพดี นอกจากนี้ความชื้นของข้าวยังมีผลต่อคุณภาพการสีของข้าวเปลือก โดยเป็นปัจจัยสำคัญตั้งแต่การเก็บเกี่ยวข้าวที่แก่ ความชื้นเหมาะสม (22-26%) การตากข้าวเปลือกเพื่อลดความชื้นลงให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา (ความชื้นไม่สูงกว่า 14%) จนถึงเวลาการสีเปลือกที่มีความชื้นเหมาะสมก็จะทำให้ได้ข้าวเต็มเมล็ดสูง และข้าวหักน้อย (Juliano, 1985)

2.2.3 คุณภาพเมล็ดข้าวทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าวคือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำหรือความชื้น ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของข้าวทั้งในเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร โดยคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีสตาร์ช (starch) เป็นหลัก และสตาร์ชนี้ประกอบด้วยอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพ็คทิน (amylopectin) ในสัดส่วนต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของข้าว สำหรับโปรตีนในข้าวยังนับว่าเป็น

แหล่งอาหารโปรตีนหลัก สำหรับผู้ที่บริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก ส่วนไขมันในข้าว จะอยู่กันเป็นกลุ่มไขมันที่มีรูปร่าง (lipid bodies) หรือหยดกลม (spherosomes) โดยอยู่ร่วมกับเม็ดสตาร์ช และโปรตีน (protein) ในชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) และคัพภะ (embryo) จะมีผลในการเสื่อมเสียขณะเก็บรักษา (เครือวัลย์, 2536)

1) คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate)

สตาร์ช (starch) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่พบมากที่สุดในเนื้อเมล็ดข้าว ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ อะไมโลส และอะไมโลเพ็คทิน สตาร์ชที่มีสัดส่วนของอะไมโลส และอะไมโลเพ็คทินที่แตกต่างกันทำให้มีคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์แตกต่างกัน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชจึงมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จากข้าว หรือแป้งข้าว (อรอนงค์, 2550)

อะไมโลส ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสจัดเรียงเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (linear chains) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α–1, 4-glucosidic linkage มีโซ่กิ่งอยู่ประมาณ 3-4 กิ่ง โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลสมีหลายรูปแบบเช่น สายตรง สายพันเป็นเกลียว (helix) เดี่ยวหรือคู่ มีลักษณะเกลียวม้วน หรือเกลียวที่คลายตัว หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง

อะไมโลเพ็คทิน ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่จัดเรียงเป็นพอลิเมอร์ที่มีโซ่กิ่งเป็นแขนงมาก เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α–1, 6-glucosidic linkage โครงร่างโมเลกุลของอะไมโลเพ็คทินมีลักษณะเป็นกิ่งก้านในลักษณะโซ่กิ่งเกลียวคู่ จากสายที่ต่อด้วยน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้น ซึ่งมีคาร์บอนที่หนึ่งเป็นหมู่รีดิวซิง

2) โปรตีน (protein)

โปรตีนในข้าวมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ซึ่งพบในส่วนต่างๆ ของเมล็ด โดยมีมากในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด และเนื้อเมล็ดด้านนอกจะมีโปรตีนมากกว่าใจกลางเมล็ด โดยทั่วไปข้าวมีโปรตีนอยู่ประมาณ 5 - 14% โมเลกุลของโปรตีนที่รวมตัวกันเป็นรูปร่างโปรตีน (protein bodies) ซึ่งมีกลูเทลิน (glutelin) เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ภายในนั้นจะมี 3 รูปแบบ คือผลึก (crystalline) แบบรูปร่างกลมขนาดเล็ก และรูปร่างกลมขนาดใหญ่ โปรตีนที่อยู่ส่วนนอกของเมล็ดมีส่วนทำให้ระยะการเวลาหุงต้มเมล็ดข้าวให้สุกนานขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากโปรตีนจะเป็นตัว ขัดขวางการซึมของน้ำเข้าไปภายในเมล็ดข้าว ซึ่งส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกที่มีลักษณะนุ่ม เหนียว หรือร่วน นอกจากนี้ข้าวที่มีโปรตีนสูงยังทำให้เมล็ดแกร่งขึ้นทำให้ขัดสีออกได้ยาก (งามชื่น, 2547ก)

3) ไขมัน (fat)

ข้าวมีปริมาณไขมันประมาณ 3% และมีอยู่ในส่วนด้านนอกของเมล็ดมากกว่าในใจกลางเมล็ด ดังนั้นการขัดสีข้าวให้ขาว ทำให้ข้าวสารจึงมีไขมันอยู่เพียง 0.3-0.5% (Hoseney, 1986) ประเภทไขมันในข้าวส่วนใหญ่ คือ ไตรกลีเซอไรด์ รองลงมา คือ ฟอสฟอลิพิด (phospholipid),

ไกลโคลิพิด (glycolipids) และเทอร์พินอย (terpenoids) ทั้งไขมันภายนอกและภายในเม็ดสตาร์ช เป็นไขมันประเภทสารประกอบโมโนแอซิล (monoacyl) ซึ่งกลุ่มของโมโนแอซิลจะเป็นกรดไขมันอิ่มตัว และกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่า สำหรับไขมันภายในเม็ดสตาร์ชยังมีไลโซเลซิทิน (lysolecithin) และกรดไขมันอีกด้วย (Henry and Kettlewell, 1996)

4) สารหอม 2-acetyl-1-pyrroline (2AP)

กลิ่นหอมข้าวทั่วไปอาจมีสารระเหยหลายชนิด ซึ่งพบว่าข้าวหอมมีสาร 2-acetyl-1-pyrroline มากกว่าข้าวทั่วไป สารนี้ในข้าวหอม 1 กรัม อาจมีสารนี้ ประมาณ 0.04 ไมโครกรัม และในข้าวกล้องอาจมีปริมาณ 0.1-0.2 ไมโครกรัมต่อกรัม (งามชื่น, 2547ก) สารหอมนี้สามารถพบในพันธุ์ข้าวหอม และไม่หอมบางพันธุ์ แต่ในพันธุ์ข้าวหอมจะพบในปริมาณมากกว่าพันธุ์ข้าวไม่หอม ในข้าวดอกมะลิ 105 พบว่าปริมาณ 2-acetyl-1-pyrroline ใกล้เคียงกับพันธุ์ข้าวหอมอื่น ๆ เช่น พันธุ์ Milagrosa พันธุ์ IR841-76-1 และพันธุ์ Basmati 370 (Buttery *et al.*, 1983) ข้าวบางพันธุ์มีสารหอมบางชนิดที่ผู้บริโภคบางกลุ่มชอบ แต่บางกลุ่มก็ไม่ชอบซึ่งเป็นกลิ่นที่มีอยู่ประจำพันธุ์ ส่วนกลิ่นเหม็นอาจเกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันไม่อิ่มตัว กรดอะมิโนที่มีสารซัลเฟอร์ในโมเลกุล สารประเภท แอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ อะซิแทลดีไฮด์ซึ่งเป็นกลิ่นที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ (Juliano, 1985)

2.3 ชีวประวัติของด้วงงวงข้าว

ด้วงงวงข้าว (rice weevil) เป็นแมลงจำพวกด้วงปีกแข็ง มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Sitophilus oryzae* Linnaeus จัดอยู่วงศ์ Curculionidae อันดับ Coleoptera ตัวเต็มวัย มีขนาด 2-3 มิลลิเมตร มีสีดำหรือสีน้ำตาลเกือบดำ ส่วนหัวมีปาก ตา และหนวด ปากของด้วงงวงมีลักษณะเรียวยาวยื่นไปข้างหน้ามีลักษณะคล้ายงวง เรียกว่า rostrum หนวดแบบข้อศอก ส่วนอก (pronotum) ประกอบด้วยหลุมกลมตื้น มีปีก 2 คู่ ปีกคู่หน้าแข็งและมีจุดค่อนข้างกลมสีเหลืองที่ปีกข้างละ 2 จุด ปีกคู่หลังบางและอ่อน เพศผู้และเพศเมียมีลักษณะคล้ายกัน การแยกเพศจะดูที่อวัยวะสืบพันธุ์และให้ดูที่งวงก็สามารถบอกได้ว่าเป็นเพศผู้หรือเพศเมีย โดยตัวผู้มีส่วนของ rostum สั้นและขรุขระกว่าตัวเมีย เมื่อผสมพันธุ์ตัวเมียสามารถวางไข่ได้ถึง 150 ฟอง โดยเจาะรูที่เมล็ดพืชเพื่อวางไข่ จากนั้นปิดปากรูด้วยสารเหนียวที่มีลักษณะคล้ายเยลลี่ (gelatinous secretion) (Arbogast, 1991) บริเวณที่แมลงปิดปากรูด้วยสารเหนียวสามารถตรวจสอบได้จากการย้อมสี (staining techniques) ซึ่งจะสังเกตเห็นส่วนของ egg plug ปรากฏอยู่ แมลงวางไข่ครั้งละ 1 ฟองและย้ายไปวางที่จุดอื่นในเมล็ดเดียวกัน แต่ส่วนใหญ่จะวางไข่ 1-4 ฟองต่อเมล็ดแล้วแต่ว่าเมล็ดจะแตกมากหรือน้อย ตัวเต็มวัยเริ่มวางไข่เมื่ออายุได้ประมาณ 10 วัน (Burkholder, 1984) ไข่ของด้วงงวงมีขนาดเล็กมากไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า

มีขนาด 0.65±0.04 × 0.27±0.02 มิลลิเมตร มีสีขาวรูปร่างรีและนิ่ม ระยะไข่ใช้เวลา 3-5 วัน แต่ส่วนใหญ่จะฟักเป็นตัวในระยะเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิ 27°C ความชื้นสัมพัทธ์ 70% (Arbogast, 1991) หนอนมีสีขาว อ้วน ไม่มีขา และเมื่อโตเต็มที่จะมีความยาวขึ้น Sharifi and Mills (1971) พบว่าหนอนของด้วงงวงข้าว 2 ตัว อาจอยู่ในเมล็ดเดียวกันแต่จะมีเพียงตัวเดียวที่สามารถเจริญเติบโตจนเป็นตัวเต็มวัยได้ ในเมล็ดข้าวเปลือกที่แตกก็เช่นเดียวกันแมลงอาจวางไข่ได้หลายฟอง หนอนลอกคราบประมาณ 4 ครั้ง จึงโตเต็มที่ หนอนกัดกินอาหารภายในเมล็ดจนเกือบหมดเหลือเพียงเยื่อบาง ๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ด ระยะหนอนใช้เวลา 25-30 วัน จึงเปลี่ยนเป็นดักแด้ ซึ่งมีสีขาวในระยะแรกและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในระยะต่อมา ระยะดักแด้ใช้เวลา 5-7 วัน จึงออกมาเป็นตัวเต็มวัย ซึ่งอาจคงอยู่ในเมล็ดอีกหลายวันถึงจะกัดกินเปลือกของเมล็ดข้าวออกมาสู่โลกภายนอก ทั้งนี้ความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นของเมล็ดมีผลต่อจำนวนครั้งในการลอกคราบของด้วงงวงข้าวก่อนแมลงจะเข้าสู่ระยะดักแด้ (Pittendrigh *et al.*, 1997)

2.3.1 การแพร่กระจายของแมลง

ด้วงงวงข้าวแพร่กระจายทั่วไป ในสหรัฐอเมริกา แคนาดา และประเทศไทย แพร่ระบาดในทั่วทุกภาค แต่พบมากในทางภาคใต้ของประเทศ แมลงจะแพร่ระบาดหลังจากเก็บเกี่ยวข้าวนาปีแล้วประมาณ 5 เดือน โดยพบว่าเริ่มแพร่ระบาดตั้งแต่ปลายเดือนเมษายนเป็นต้นไป และจะแพร่ระบาดมากประมาณเดือนพฤษภาคม (กุสุมา และคณะ, 2548)

2.3.2 พืชอาหารและศัตรูธรรมชาติ

พืชอาหารของด้วงงวงข้าว ได้แก่ เมล็ดธัญพืชทุกชนิด คือ ข้าว ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวโอ๊ต เดือย ข้าวสาลี และเมล็ดพืชชนิดอื่น ๆ ด้วงงวงข้าวไม่เข้าทำลายแป้งเพราะตัวหนอนไม่เจริญเติบโตในแป้งได้ ศัตรูธรรมชาติที่สำคัญ ได้แก่ *Anisopteromalus calandrae, Theocolax elegans, Cerocephala dinoderi, Lariophagus distinguendus* และ *Holepyris sylvanidis* (พรทิพย์ และคณะ, 2548) ด้วงงวงข้าวจัดเป็นแมลงศัตรูสำคัญของเมล็ดธัญพืช เข้าทำลายร่วมกับ *Rhyzopertha dominica* และ *Prostephanus truncatus* ซึ่งเป็นแมลงศัตรูสำคัญของเมล็ดพืชอีกหลายชนิด ด้วงงวงข้าวสามารถเข้าทำลาย พาสต้าแห้ง รวมทั้ง ถั่วลูกไก่ ถั่วพุ่ม และถั่วลันเตา (Rees, 2004) ทั้งตัวหนอนและตัวเต็มวัยเข้าทำลายข้าวขาวและข้าวกล้อง โดยตัวหนอนสามารถกัดกินอยู่ภายในเมล็ด ส่วนตัวเต็มวัยจะกัดกินอยู่ภายนอกเมล็ด (Arbogast, 1991; Beckett *et al.*, 1994) และยังพบว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการขัดสี สามารถป้องกันการเข้าทำลาย และทำให้ตัวหนอนของด้วงงวงข้าวอ่อนแอต่อการเข้าทำลายของศัตรูธรรมชาติ อย่างไรก็ตามสารอาหารบางอย่างในเมล็ดข้าวอาจสูญเสียไปหลังจากผ่านกระบวนการขัดสี ซึ่งช่วยลดอัตราการเจริญเติบโตของตัวหนอนให้ช้าลง (Lucas and Riudavets, 2000) ซึ่งในโรงเก็บเมล็ดข้าวที่มีการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวนั้นอาจมีสาเหตุอัน

เนื่องจากแมลงใช้สารระเหยอินทรีย์ในการกำหนดตำแหน่งของคู่ แหล่งที่อยู่ และแหล่งอาหาร จากการทดลองของ โปรดปราน และแซร์โจ้ (2553) รายงานว่า สารระเหยอินทรีย์จากข้าวเปลือกหอมมะลิมีหลายกลุ่ม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารเคมีในกลุ่มอัลดีไฮด์ พบว่าหนวดของแมลงมีการตอบสนองอย่างสม่ำเสมอต่อเฮกซานัล การค้นพบครั้งนี้อาจนำไปสู่การพัฒนาวิธีการควบคุมด้วงงวงข้าวซึ่งเป็นทางเลือกใหม่และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2.3.3 สารอาหารต่อการเจริญเติบโตของด้วงงวงข้าวและพฤติกรรมแมลง

องค์ประกอบของเมล็ดข้าวมีผลมาจากพันธุ์ สภาวะการปลูก การเก็บเกี่ยว และกระบวนการแปรรูปจากข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้องและข้าวสาร องค์ประกอบทางเคมีหรือสารอาหารหลักที่มีในข้าว คือ โปรตีน ไขมัน เส้นใยอาหาร เถ้า และคาร์โบไฮเดรตเป็นหลัก (ตาราง 2.1) นอกจากนี้พบว่าอาหารมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโต และการอยู่รอดของแมลงทุกช่วงอายุ โดยมีผลต่อปริมาณการวางไข่ การอยู่รอด และอัตราเร็วของการเจริญเติบโตเป็นตัวเต็มวัย เป็นต้น ถึงแม้ว่าแมลงจะเป็นชนิดเดียวกัน แต่ได้รับสารอาหารต่างกัน ก็อาจส่งผลต่างกันได้ (เสาวภา, 2536) ข้าวทุกพันธุ์มีสารอาหารและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ลักษณะองค์ประกอบทางเคมี มีผลต่อการทำให้แมลงแสดงพฤติกรรมการวางไข่ และการตอบสนองต่อการคัดเลือกเมล็ดที่แตกต่างกัน เช่น แมลงตัวเมียด้วงงวงข้าววางไข่บนเมล็ดที่มีขนาดกว้างได้เร็วกว่าเมล็ดที่แคบ (Campbell, 2002)

พฤติกรรมของด้วงงวงข้าวได้มีการศึกษาไว้อย่างมากมาย ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น การศึกษาผลของขนาดเมล็ดข้าวสาลีที่มีต่อการวางไข่ของด้วงงวงข้าวพบว่า แมลงตัวเต็มวัยเพศเมียมักเลือกวางไข่บนเมล็ดที่มีน้ำหนักมากกว่า 20 มิลลิกรัม และมักเลือกวางไข่ตรงบริเวณรอยย่นบนเมล็ด โดยพิจารณาจากขนาดและสารอาหารที่ได้จากเมล็ด ขนาดของแมลงในรุ่นลูกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นอยู่กับขนาดของเมล็ดด้วย (Campbell, 2002) การศึกษาผลกระทบของชนิดเมล็ดพืช 4 ชนิด เช่น ข้าวบาร์เล่ย์ ข้าวโพด ข้าว และข้าวสาลี ที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณประชากรในรุ่นลูกของด้วงงวงข้าว 4 สายพันธุ์ (LS-2, Minnesota, Savannah และ Tanzania-90) ซึ่งพบว่าจำนวนประชากรในรุ่นลูกจะมีมากที่สุดในเมล็ดข้าวบาร์เล่ย์ และน้อยที่สุดในเมล็ดข้าวโพด (Baker, 1988) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณฟีนอลิค (phenolic) ที่พบในข้าวฟ่าง ซึ่งพบว่าสามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดความต้านทานของเมล็ดพืชต่อการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าว (Ramputha *et al.*, 1999)

ตาราง 2.1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือกและส่วนที่ได้จากการขัดสีที่ความชื้น 14%

ส่วนของข้าว	โปรตีน (กรัม)	ไขมัน (กรัม)	เส้นใย (กรัม)	เถ้า (กรัม)	คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	เส้นใยอาหาร (กรัม)	พลังงาน	
							กิโลจูล	กิโลแคลอรี
ข้าวเปลือก	5.8-7.7	1.5-2.3	7.2-10.4	2.9-5.2	64-73	16.4-19.2	1,580	378
ข้าวกล้อง	7.1-8.3	1.6-2.8	0.6-1.0	1.0-1.5	73-87	2.9-3.9	1,520-1,610	363-385
ข้าวสาร	6.3-7.1	0.3-0.5	0.2-0.5	0.3-0.8	77-89	0.7-2.3	1.460-1.560	349-373
รำข้าว	11.3-14.9	15.0-19.7	7.0-11.4	6.6-9.9	34-62	24-29	670-1,990	399-476
แกลบ	2.0-2.8	0.3-.0.8	34.5-45.9	13.2-21.0	22-34	66-74	1,110-1,390	265-322

ที่มา: Juliano (1993)

2.3.4 การตรวจสอบการเข้าทำลายของแมลงศัตรูโรงเก็บ

การสังเกตด้วยตาเปล่า (visual inspection) โดยดูจากร่องรอยการเข้าทำลายของแมลงแบบต่าง ๆ เช่น ด้วงถั่วเขียวมักมีพฤติกรรมการวางไข่บนผิวเมล็ดถั่วเขียวสามารถสังเกตเห็นไข่สีเหลืองกองเมล็ดข้าวที่มีใยของผีเสื้อข้าวสารปกคลุมอยู่ แมลงที่อาศัยอยู่ภายในเมล็ดหลายชนิด เช่น ด้วงงวงข้าว ผีเสื้อข้าวเปลือก มอดหัวป้อม มักเจาะรูที่ผิวเมล็ดจากภายในเพื่อออกมาสู่ภายนอก เป็นต้น (Rajendran, 2005) (ตาราง 2.2) การเข้าทำลายของแมลงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เชื้อราอื่น ๆ เจริญเติบโตในโรงเก็บอันเนื่องมาจากความร้อนและความชื้นที่เกิดจากการกิน และการหายใจของตัวแมลง ทำให้เกิดสารพิษในอาหาร

การสุ่มตัวอย่าง (sampling) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ตรวจสอบการเข้าทำลายของแมลงซึ่งเป็นที่นิยมในกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนาและประเทศที่พัฒนาแล้ววิธีนี้ไม่สามารถตรวจสอบหาไข่ หนอน และดักแด้ ที่ซ่อนอยู่ภายในเมล็ดได้ การสุ่มตัวอย่างมักทำกับกระสอบบรรจุเมล็ด และไซโลขนาดใหญ่เพื่อตรวจดูการเข้าทำลายของแมลงที่ยังมีชีวิต ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการสุ่มตัวอย่างมีปัจจัยอยู่

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

หลายอย่าง เช่น จำนวนครั้งและตำแหน่งของการสุ่ม หรือ จำนวนแมลงที่สุ่มและการกระจายตัวของแมลงในตำแหน่งที่สุ่ม การนำแมลงออกจากการสุ่มตัวอย่าง เป็นต้น (Hagstrum, 1991)

ตาราง 2.2 วิธีการตรวจสอบการเข้าทำลายของแมลงในรูปแบบต่าง ๆ

Test method	Applicability	Comments
Physical methods:		
Visual inspection	Whole grains, milled products	Qualitative; only high-level infestation detected
Sampling	Whole grains, milled products	Hidden infestation not detected
Acoustic	Whole grains	Active stages are detected
Imaging techniques:		
X-ray method	Whole grains	Prohibitive capital cost
Chemical methods:		
Carbon dioxide analysis	Whole grains	Simple, time consuming; indicates current level of infestation; not suitable for grains having >15% moisture
Flotation method	Whole grains	Variable results noted
Fragment count	Whole grains, milled products	Highly variable results noted; shows infestation from unknown past to till date
Staining techniques:		
Egg—plugs	Whole grains	Specific for *Sitophilus* spp.

ที่มา: Rajendran (2005)

การใช้หลักการความหนาแน่นของเมล็ดในสารละลายเกลือเพื่อตรวจสอบการเข้าทำลายของแมลงที่อาศัยอยู่ภายในเมล็ด เช่น ตัวหนอนของด้วงงวงข้าว และด้วงงวงข้าวโพด และด้วงถั่วเขียวที่อาศัยอยู่ภายในเมล็ดพืช วิธีการนี้อาศัยหลักความแตกต่างของความหนาแน่นเมล็ดที่ไม่เท่ากัน โดยการแช่เมล็ดตัวอย่างลงในสารละลายเกลือ ซึ่งเมล็ดที่มีตัวหนอนอาศัยอยู่ภายในเมล็ดจะลอยขึ้นมา (flotation method) ขณะที่เมล็ดที่ไม่มีตัวหนอนเข้าทำลายจะจมอยู่ใต้สารละลายเกลือ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 21 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน 218267
เลขเรียกหนังสือ

เนื่องจากตัวหนอนกัดกินเนื้อเมล็ดทำให้เมล็ดมีความหนาแน่นน้อยกว่าเมล็ดที่ไม่มีตัวหนอนเข้าทำลาย (International Organisation for Standardization, 1987)

การตรวจนับชิ้นส่วนของแมลง (fragment count) เมื่อนำมาแช่ในสารละลายเพื่อตรวจดูการเข้าทำลายของแมลง ซึ่งอาจพบชิ้นส่วนต่างๆ ของแมลง เช่น ปีก ส่วนหัว หรือ กราม และส่วนอื่น ๆ วิธีนี้อาศัยหลักการเดียวกับวิธี flotation method โดยเมื่อนำตัวอย่างไปแช่ในอิมัลชั่น (emulsions) เมล็ดตัวอย่างจะถูกย่อยสลาย ขณะที่ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแมลงที่เข้าทำลายก็จะลอยปรากฏขึ้นมา

การย้อมสีด้วยน้ำยาย้อม (staining techniques) เพื่อตรวจสอบการเข้าทำลายของแมลงที่อาศัยหรือหลบซ่อนในเมล็ดพืชต่าง ๆ นิยมใช้ในการตรวจสอบหา egg plug และร่องรอยที่แมลงเข้าทำลายผลิตผลชนิดต่าง ๆ ส่วนของ egg plug จะติดสีน้ำยาย้อม เช่น การย้อมสีด้วยน้ำยาย้อมสี acid fuchsin ใช้กับ egg plug ของด้วงงวงข้าว และด้วงงวงข้าวโพด ซึ่งจะติดสีแดงเชอรี่

การตรวจสอบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide analysis) ที่เกิดจากแมลงเข้าทำลายผลผลิต เนื่องจากแมลงเมื่อเข้าทำลายผลผลิตจะมีขบวนการเมตาบอลิซึมที่มีการหายใจเอาก๊าซออกซิเจนเข้าสู่ร่างกายแล้วปล่อยก๊าซคาร์บอนไดไซด์ออกมา จึงวัดเอาก๊าซที่แมลงปล่อยออกมาเพื่อตรวจสอบการเข้าทำลายของแมลง

การตรวจวัดเสียงของแมลง (acoustic method) เป็นวิธีการตรวจสอบที่สามารถให้คำตอบได้ทันทีว่ามีแมลงหรือมีกิจกรรมของแมลงในตัวอย่างที่ตรวจสอบหรือไม่ เป็นการตรวจสอบแมลงเสียงของแมลงที่อาศัยอยู่ภายในเมล็ด ซึ่งจากการทดลองของบุญตา (2549) รายงานว่าเสียงที่ตรวจพบในด้วงถั่วเขียวเกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของแมลง เช่น การกินอาหารหรือการเคลื่อนที่ของแมลง

การตรวจสอบแมลงโดยวิธี X-ray method สามารถตรวจสอบแมลงที่อาศัยอยู่ภายในเมล็ด อาศัยหลักการการฉายรังสีไปบนเมล็ด แมลงและเมล็ดพืชจะมีการดูดกลืนรังสีไม่เท่ากัน ทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างแมลงกับเมล็ดปรากฏในฟิล์มภาพ วิธีการนี้สามารถตรวจจับได้ทั้งแมลงที่ยังมีชีวิตและแมลงที่ตายแล้ว แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาไข่ และตัวหนอนในระยะแรกได้ (Tollner, 1993)

การตรวจสอบคุณสมบัติการเรืองแสง (fluorescence method) เพื่อตรวจสอบการทำลายของแมลงที่อยู่ภายในเมล็ด ซึ่งจากการทดลองของ Abels and Ludescher (2003) รายงานว่าเมื่อให้คลื่นแสง UV ที่ความยาวคลื่น 365 nm กับเมล็ดพืชตัวอย่าง ซึ่งสามารถตรวจพบการเรืองแสงของแมลงระยะตัวอ่อนที่อาศัยอยู่ภายในเมล็ดได้ โดยไม่ต้องย้อมสี ได้แก่ *Tribolium castaneum*, *Tribolium confusum*, *Oryzaephilus surinamensis* และ *Corcyra cephalonica*

2.4 การป้องกันกำจัดแมลงศัตรูเมล็ดพืชในโรงเก็บโดยวิธีการใช้สารเคมี

ในการป้องกันกำจัดด้วงงวงข้าว ได้มีการศึกษาวิจัยนำวิธีการหลาย ๆ วิธีมาใช้กำจัดด้วงงวงข้าว อาทิ การทดลองใช้สาร cyfluthrin ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม pyrethroid ในการควบคุมด้วงงวงข้าวที่พบในโรงเก็บเมล็ดข้าวสาลี ที่ความเข้มข้น 0.5-4.0 ppm อุณหภูมิ 20-35°C เป็นเวลา 8 เดือน โดยตรวจนับจำนวนแมลงทุก 2 เดือน ซึ่งอุณหภูมิไม่มีผลต่อการตอบสนองของแมลงเมื่อได้รับสาร cyfluthrin และพบว่ามีเปอร์เซ็นต์รอดชีวิตเท่ากับ 12.2-70.5% หลังจากการทดลองเป็นเวลา 8 เดือน (Arthur, 1999) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิ ในการใช้ carbonyl sulfide ซึ่งเป็นสารรมที่ใช้ควบคุมด้วงงวงข้าว พบว่าเมื่อปรับอุณหภูมิให้เท่ากับ 25°C สารรมจะมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้เวลาประมาณ 3 วันในการควบคุมด้วงงวงข้าวได้ 99.9% (Weller and Morton, 2001)

เมทิลโบรไมด์ เป็นสารรมอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการกำจัดไส้เดือนฝอย แมลงศัตรูโรงเก็บ เชื้อจุลินทรีย์ และวัชพืช (Fields and White, 2002) สารรมชนิดนี้มีข้อได้เปรียบกว่าสารรมชนิดอื่น ๆ คือ สามารถกำจัดแมลงได้ทุกชนิดและทุกระยะการเจริญเติบโต มีความสามารถในการแพร่กระจายและแทรกซึมเข้าไปในกองผลิตผลเกษตรได้ดี ซึ่งมีอัตราการใช้ 2 ปอนด์ต่อเนื้อที่ 1,000 ลูกบาศก์ฟุต (ประมาณ 30 ลูกบาศก์เมตร) ระยะเวลาในการรม 24 ชั่วโมง เมทิลโบรไมด์เป็นสารไร้สี ไร้กลิ่น และไม่ไวไฟที่อุณหภูมิปกติ ข้อเสียของเมทิลโบรไมด์ คือ หากเกิดการรั่วไหลก็จะไม่มีโอกาสทราบได้ เนื่องจากเป็นสารที่ไร้สี กลิ่น (พรทิพย์ และคณะ, 2548) สถานการณ์ในปัจจุบันประเทศผู้พัฒนาแล้วได้มีการประกาศให้ยกเลิกการใช้สารรมเมทิลโบรไมด์ ในปี ค.ศ. 2005 เนื่องจากพบว่าสารรมชนิดนี้ทำลายชั้นบรรยากาศของโลก และสารประกอบจากเมทิลโบรไมด์ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศทำให้ก๊าซโอโซนสูญเสียอะตอมกลายเป็นก๊าซออกซิเจน (Fields and White, 2002) มีรายงานการทดลองที่พบว่าสามารถใช้สาร sulfuryl fluoride เพื่อทดแทนการใช้สารรมเมทิลโบไมด์ในการควบคุม *T. confusum* และ *Ephestia kuehniella* ที่พบในแป้งข้าวจ้าว และเมื่อเปรียบเทียบการลดลงของประชากรแมลงหลังการใช้สารทั้งสองชนิด ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้ให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ (Small, 2007)

ปัจจุบันได้มีการนำก๊าซฟอสฟีน ซึ่งเป็นสารรมชนิดหนึ่งที่ใช้กำจัดแมลงศัตรูในโรงเก็บ พบว่าเมื่อนำมาทดลองใช้กับด้วงงวงข้าวทำให้เกิดการต้านทานต่อสารรมชนิดนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้วงงวงข้าวที่พบในประเทศจีนพบว่าต้องใช้ฟอสฟีนรมเป็นเวลา 11 และ 7 วัน ที่ระดับความเข้มข้น 200 และ 700 ppm ตามลำดับ เพื่อให้ได้อัตราการตายในระยะตัวเต็มวัย 100% (Nayak *et al.*, 2003) ซึ่งการใช้สารรมฟอสฟีนในการป้องกันกำจัดแมลงทำให้เกิดความต้านทานในแมลงอีกหลายชนิด เช่น แมลงที่พบในประเทศบราซิล พบว่าประชากรแมลงที่มีอัตราการหายใจต่ำจะมีระดับความ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ต้านทานสูงต่อสารรมฟอสฟีน ทั้งนี้อัตราการหายใจอาจเกี่ยวข้องกับลักษณะทางสรีรวิทยาที่ทำให้เกิดความต้านทานในกลุ่มแมลงเพื่อลดการดูดซับสารรมนี้เข้าสู่ร่างกาย (Pimentel *et al.*, 2008) การถ่ายทอดพันธุกรรมเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการต้านทานต่อสารรมฟอสฟีนซึ่งจากการทดลองของ Athie and Mills (2005) รายงานว่า ความต้านทานต่อสารรมฟอสฟีนที่พบในด้วงงวงข้าว และมอดฟันเลื่อยเกิดจากยีนที่ควบคุมลักษณะพันธุกรรมที่ทำให้เกิดลักษณะฟีโนไทป์ 2 แบบ คือ พันธุ์แท้ (homozygous) และพันธุ์ทาง (heterozygotes) ในประชากรแมลง ซึ่งพบว่าแมลงที่แสดงลักษณะพันธุ์แท้จะมีความทนทานต่อสารรมฟอสฟีนได้ดีกว่าแมลงที่แสดงลักษณะพันธุ์ทาง นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการรมสารฟอสฟีนเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดความต้านทานในแมลง (Cao *et al.*, 2004) สารรมฟอสฟีนนอกจากจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้แล้ว ยังทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้ และเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้ ก๊าซฟอสฟีนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางระบบประสาท ฟอสฟีนที่ผลิตเป็นการค้าอยู่ในรูปของสารประกอบฟอสไฟด์ 2 ชนิด คือ อลูมิเนียมฟอสไฟด์ และแมกนีเซียมฟอสไฟด์ มีหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบเม็ด (tablet และ pellet) แบบถุง แบบแผ่น และแบบแผ่นพับต่อกันเป็นสาย ในด้านงานกักกันพืชใช้เพื่อการกำจัดศัตรูพืชที่ติดมากับพืชที่นำเข้ามา และนำมาใช้ในการรมดิน (soil fumigation) เพื่อกำจัดไส้เดือนฝอย แมลง เมล็ดวัชพืช และโรคพืชบางชนิดก่อนการเพาะปลูกพืช มีอัตราการใช้ 2-3 เม็ดต่อเมล็ดพืช 1 ตัน หรือ 1-2 เม็ดต่อเนื้อที่ 1 ลูกบาศก์เมตร ในเวลา 7 วัน

2.5 ก๊าซโอโซน

โอโซนเป็นก๊าซธรรมชาติชนิดหนึ่งที่นำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมแมลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแมลงศัตรูในโรงเก็บ ก๊าซโอโซนประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจน 3 อะตอม รวมกันเป็น 1 โมเลกุลของโอโซน (O_3) ตามปกติออกซิเจนจะประกอบกันในลักษณะ 2 อะตอม เป็น 1 โมเลกุล (O_2) ซึ่งมีคุณสมบัติต่างกันมากคือ ออกซิเจนสามารถคงสภาพอยู่ได้หลายสภาวะหรือกล่าวได้ว่ามีความเสถียร (stable) นั่นเอง แต่ก๊าซโอโซนไม่คงตัวหรือไม่เสถียร (unstable) เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความร้อน ความดันและการสัมผัสกับสารที่มีพลังงานต่ำกว่าจึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (oxidation) อย่างรวดเร็ว ซึ่งก๊าซโอโซนมีปฏิกิริยาสูงถึง 2.07 Volt (oxidation potential) ก๊าซโอโซนมีคุณสมบัติหลายอย่าง เช่น ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพดีกว่า และเร็วกว่าคลอรีน 3,125 เท่า อีกทั้งยังไม่ เหลือสารเคมีตกค้าง ก๊าซโอโซนมีคุณสมบัติในการดับกลิ่น สามารถสลายโครงสร้างของสารเคมี ยาฆ่าแมลง สีและสารพิษต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าก๊าซโอโซนสามารถทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรีย ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของไบโอฟิล์มและแหล่งสะสมตะกรัน (โอโซนนิค อินเตอร์เนชั่นแนล, 2551) ปัจจุบันมีการนำก๊าซโอโซนไปใช้กันอย่าง

กว้างขวาง เช่น การฆ่าเชื้อด้วยก๊าซโอโซนในการผลิตน้ำดื่ม ใช้ฆ่าเชื้อในเครื่องมือทางการแพทย์ ใช้กำจัดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์และสารฆ่าแมลง เป็นต้น (Zhanggui *et al.*, 2003)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ก๊าซโอโซนกับผลผลิตทางการเกษตร เช่น การใช้ก๊าซโอโซนในการควบคุมโรคหลังการเก็บเกี่ยวของเงาะ ทุเรียน และมะม่วง พบว่าการรมด้วยก๊าซโอโซนระดับความเข้มข้นและระยะเวลาที่เหมาะสมสามารถช่วยลดปริมาณเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ที่ผิวผลได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการจุ่มในน้ำเปล่า (ดวงธิดา และคณะ, 2549) ยืดอายุการเก็บรักษาผลลิ้นจี่พันธุ์จักรพรรดิ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C พบว่าผลลิ้นจี่ที่ผ่านการรมด้วยก๊าซโอโซนเป็นระยะเวลา 30-60 นาที มีการเน่าเสียน้อยกว่า โดยก๊าซโอโซนไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพลิ้นจี่ (อรุโณทัย , 2546) ในผลลำไยที่ผ่านการรมด้วยก๊าซโอโซนอัตรา 200 ppm แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C พบว่าการรมก๊าซโอโซน สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ได้ (อังคณา, 2549)

นอกจากก๊าซโอโซนจะใช้ในการควบคุมโรคหลังการเก็บเกี่ยวและช่วยยืดอายุการรักษาของผลผลิตแล้ว ยังสามารถนำมาควบคุมแมลงศัตรูโรงเก็บ โดยเมื่อผ่านก๊าซโอโซนที่ระดับความเข้มข้น 50 ppm เป็นเวลานาน 3 วัน พบว่าทำให้แมลง 3 ชนิดตายได้ ได้แก่ *Tribolium castaneum*, *Sitophilus zeamais* และ *Plodia interpunctella* มีการตาย 92-100% และลดอัตราการปนเปื้อนของเชื้อรา *Aspergillus parasiticus* ได้ถึง 63% (Kells *et al.*, 2001) การรมด้วยก๊าซโอโซนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดอะมิโน กรดไขมันและองค์ประกอบอื่น ๆ ของถั่วเหลือง ข้าวสาลี และข้าวโพด (Mendez *et al.*, 2003) ก๊าซโอโซนสามารถนำมาใช้กับแมลงศัตรูโรงเก็บบางชนิด เช่น *T. castaneum, R. dominica* และ *O. surinamensis* ที่ต้านทานต่อสารรมฟอสฟีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Sousa *et al.*, 2008) มีการนำก๊าซโอโซนมาใช้ร่วมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสภาพสุญญากาศในการกำจัดแมลงศัตรูสองชนิด คือ *P. interpunctella* และ *T. confusum* พบว่าแมลงทั้งสองชนิดในระยะไข่เป็นระยะที่ทนทานที่สุด (Leesch *et al.*, 2003) นอกจากนี้ยังมีการทดลองหาประสิทธิภาพของก๊าซโอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (1-10 ppm) และความเข้มข้นสูง (50-400 ppm) เป็นเวลานาน 2, 3 และ 5 ชั่วโมง เพื่อศึกษาการแทรกซึมและความเป็นพิษของก๊าซโอโซนต่อการเจริญเติบโตในแต่ละระยะของ *Ephestia kuhniella* ซึ่งเป็นแมลงศัตรูสำคัญที่เข้าทำลายเมล็ดพืช โดยเฉพาะเมล็ดข้าวโพด พบว่าเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซนสูงขึ้น อัตราการตายของแมลงก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งระยะไข่เป็นระยะที่ทนทานที่สุดอาจต้องใช้ระดับความเข้มข้นสูงสุด (400 ppm) และใช้เวลานานมากกว่า 5 ชั่วโมง เพื่อทำให้แมลงระยะไข่ตายอย่างสมบูรณ์ (Isikber *et al.*, 2006) ก๊าซโอโซนสามารถนำมาใช้ควบคุมมอดยาสูบ (*Lasioderma serricorne*) ซึ่งเป็นแมลงศัตรูสำคัญที่ทำลายใบยาสูบแห้งขณะเก็บรักษา ซึ่งจากการทดลองของภูษณิศา (2553) รายงานว่า ระยะดักแด้เป็นระยะทนทานต่อก๊าซโอโซนมากที่สุด เมื่อให้ก๊าซโอโซน

ที่ระดับความเข้มข้น 60 ppm ระยะเวลา 2 ชั่วโมง แก่แมลงโดยตรง พบว่าระยะดักแด้มีเปอร์เซ็นต์การตายน้อยที่สุดคือ 20.73±2.98% รองลงมาได้แก่ ระยะหนอน ตัวเต็มวัย และไข่ คือ 36.54±1.46, 58.80±2.34 และ 84.97±2.33% ตามลำดับ