



เทคโนโลยีการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืชในการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยว: บทความปริทัศน์

Grain quality monitoring technologies in post-harvest storage: a review

ชูเกียรติ โชติกเสถียร¹, อธิวัฒน์ บุญมี², วรญา เนืองมัจฉา², วัชรพล ชยประเสริฐ^{3*}

Chukiat Chotikasatian¹, Atiwat Boonmee², Woraya Neungmacha², Watcharapol Chayaprasert^{3*}

¹สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม, 73000

¹Industrial Education, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, 73000

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University - Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140

³ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

³Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University - Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140

*Corresponding author: Tel.: +66-34-351897 ext 7101, E-mail: fengwpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความปริทัศน์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอภาพรวมของความก้าวหน้าและการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจติดตามคุณภาพของเมล็ดธัญพืชในระหว่างการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยว โดยมีเนื้อหาหลักถึงปัจจัยเสี่ยงสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของเมล็ด ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นเมล็ด, แมลงศัตรูในโรงเก็บ และเชื้อรา พร้อมทั้งให้รายละเอียดของระบบตรวจติดตามสมัยใหม่ที่อาศัยโครงข่ายเซนเซอร์เพื่อวัดค่าปัจจัยเหล่านี้แบบเวลาจริง ข้อมูลที่ได้จากระบบดังกล่าวสามารถถูกนำมาใช้ประเมินความเสี่ยง เพื่อช่วยในการตัดสินใจใช้มาตรการแทรกแซงเพื่อควบคุมและ/หรือยับยั้งปัญหาที่สร้างความเสียหายต่อเมล็ดอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียคุณภาพของผลผลิต และยังเป็นประโยชน์ต่อการจัดการเมล็ดธัญพืชอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การเก็บรักษาเมล็ดธัญพืช, การตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช, การจัดการหลังการเก็บเกี่ยว

Abstract

This review article provides an overview of the advances and developments in technologies used for monitoring the quality of cereal grains during post-harvest storage. It discusses the key risk factors that contribute to grain deterioration, including grain temperature and moisture content, storage insects and fungi. Furthermore, it details modern monitoring systems that use sensor networks to measure these factors in real-time. The data obtained from such systems can be used to assess risks, helping inform decisions on effective intervention measures to control and/or prevent problems that damage the grains. This, in turn, helps reduce product-quality losses and is beneficial for the sustainable management of cereal grains.

Keywords: grain storage, grain quality monitoring, postharvest management

1 บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่า ธัญพืชสำหรับการบริโภค (commodity grain) เช่น ข้าว, ข้าวโพด และถั่วต่างๆ นับเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญ ทั้งในมิติของความมั่นคงอาหารและเศรษฐกิจ ในระหว่างการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยว (post-harvest storage) ธัญพืชมักประสบปัญหาคุณภาพลดลงและการสูญเสีย

ทั้งปริมาณและคุณภาพอันเนื่องมาจากปัจจัยเสี่ยงหลายประการ เช่น ความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดที่ไม่เหมาะสม, การเข้าทำลายของแมลงศัตรูในโรงเก็บ (stored-product pest insect) และการเกิดเชื้อรา (mold) (Proctor, 1994; Gwinner et al., 1996) เป็นต้น ซึ่งภายใต้สภาพอากาศเขตร้อนชื้นอย่างประเทศไทย กระบวนการเหล่านี้จะรุนแรงขึ้นหากไม่มีมาตรการควบคุมที่เหมาะสม

Received: August 23, 2025

Revised: September 21, 2025

Accepted: December 01, 2025

Available online: December 22, 2025

● อุณหภูมิ

เมล็ดธัญพืชมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ บรรยากาศที่อุณหภูมิสูงสามารถกระตุ้นกิจกรรมทางชีวภาพภายในเมล็ด เช่น กระบวนการหายใจ ซึ่งส่งผลให้ความชื้นภายในเพิ่มขึ้นและเร่งการเจริญเติบโตของเชื้อรา ในทางกลับกัน ในสภาวะอากาศที่อุณหภูมิต่ำเกินไป อาจเกิดการควบแน่น (condensation) ภายในไซโล ซึ่งนำไปสู่สภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการเน่าเสีย (spoilage)

● ความชื้น

ปริมาณความชื้นในเมล็ดธัญพืชเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเก็บรักษา ระดับความชื้นที่เหมาะสมสำหรับเมล็ดธัญพืชส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 12-15%_{wb} (เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก) อย่างไรก็ตาม ความผันผวนของความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศภายนอกมักเป็นข้อจำกัดในการรักษาสภาพที่เหมาะสม หากเมล็ดธัญพืชถูกเก็บรักษาในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง จะส่งผลให้ความชื้นเมล็ดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสียเช่นเดียวกัน

● แมลงศัตรูในโรงเก็บ

หากไม่มีการบริหารจัดการอย่างเหมาะสม แมลงศัตรูในโรงเก็บ เช่น มอดหัวป้อม (*Rhyzopertha dominica*), ตัวงวงข้าว (*Sitophilus oryzae*) และมอดแป้ง (*Tribolium castaneum*) เป็นต้น สามารถระบาดในธัญพืชได้อย่างรวดเร็ว แมลงเหล่านี้จะกัดกินเมล็ดธัญพืชโดยตรง และการระบาดของแมลงยังเร่งกระบวนการเกิดเชื้อราและการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดอีกด้วย

● เชื้อรา

เชื้อราสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง และเป็นปัจจัยสำคัญของการเกิดการเน่าเสียและเสื่อมคุณภาพของเมล็ดธัญพืช นอกจากนี้ เชื้อรายังเป็นสาเหตุของการปนเปื้อนสารไมโคทอกซิน (mycotoxin) โดยเฉพาะอะฟลาทอกซิน (aflatoxin) ซึ่งเป็นสารพิษก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ เมื่อเมล็ดที่มีการปนเปื้อนถูกนำไปใช้ในห่วงโซ่อาหาร ทั้งในรูปแบบอาหารโดยตรงหรือวัตถุดิบสำหรับผลิตอาหารสัตว์

ปัจจัยความเสี่ยงดังกล่าว เมื่อผนวกเข้ากับแนวโน้มความต้องการผลผลิตธัญพืชในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การพึ่งพาทรัพยากร, วิธีการ และโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการจัดเก็บแบบดั้งเดิม ซึ่งมีจำกัดแรงงานคนและสภาวะอากาศธรรมชาติ ไม่อาจรองรับต่อปริมาณผลผลิตที่เพิ่มขึ้นและความซับซ้อนของกระบวนการในอุตสาหกรรมได้

ตลอดช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา การศึกษาวิจัย เทคโนโลยี และนวัตกรรมด้านการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืช (grain storage) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการสูญเสียและรักษาคุณภาพของเมล็ดให้ยาวนานที่สุด ระบบตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช (grain quality monitoring

system) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อเฝ้าระวังปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพเมล็ด เช่น อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ภายในไซโล (silo) หรือโรงเก็บแนวราบ (flat storage) (Flu-Tech, 2025a) นอกจากนี้ ในระบบขั้นสูง ยังสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ภายในโรงเก็บ (Eye-Grain, 2025a) และการตรวจติดตามความหนาแน่นประชากรแมลงศัตรูในโรงเก็บ (stored-insect population) ด้วย (Neethirajan and Jayas, 2007; Flinn et al., 2009; Jian et al., 2014) นอกจากนี้ เทคโนโลยีระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในกองเมล็ดธัญพืช เช่น ระบบระบายอากาศ (aeration systems) (Navarro and Noyes, 2002) และเครื่องเป่าลมเย็น (grain chillers) (CGrain, 2025) ก็มีบทบาทสำคัญในการรักษาอุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่งการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในกองเมล็ดธัญพืชให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากระบบตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช

ด้วยเหตุนี้ บทความปริทัศน์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอความก้าวหน้าและพัฒนาการในปัจจุบันของเทคโนโลยีด้านการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืชในการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวในภาคอุตสาหกรรมเกษตรสมัยใหม่ เพื่อถ่ายทอดให้ผู้อ่านได้เห็นถึงแนวโน้มของเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม ตลอดจนส่งเสริมการวิจัยและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ให้เกิดประสิทธิภาพในการจัดการอย่างยั่งยืน

2 การตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช (grain quality monitoring)

Brooker et al. (1974) อธิบายกระบวนการหายใจของเมล็ดและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ รวมถึงแมลง ไร และจุลินทรีย์ต่างๆ ภายในกองธัญพืช ดังแสดงในสมการที่ 1 กระบวนการหายใจนี้เป็นการสลายสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต ไขมัน หรือโปรตีนโดยใช้ออกซิเจน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานในรูปแบบของความร้อน



โดยทั่วไป เมล็ดธัญพืชที่มีความชื้นต่ำและจัดเก็บในสภาพปลอดภัยจะมีอัตราการหายใจต่ำมาก จนแทบไม่มีผลต่อการเกิดความร้อน แต่จุลินทรีย์จำพวกเชื้อราและแบคทีเรียจะมีอัตราการหายใจที่สูงกว่าอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อความชื้นในกองเมล็ดธัญพืชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีการเน่าเสียเกิดขึ้น ในกรณีที่กองเมล็ดธัญพืชมีความชื้นสูง เชื้อราจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนหลัก โดยมีสัดส่วนการสร้างความร้อนสูงถึง 85–95% ของทั้งหมด นอกจากนี้ ถึงแม้ว่ากองเมล็ดธัญพืชจะมีความชื้นอยู่ช่วงที่ปลอดภัย แมลงที่เข้าทำลายเมล็ดธัญพืชยังสามารถเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนได้ ทั้งความร้อนและน้ำที่เกิดขึ้นจาก

กระบวนการหายใจยังสามารถส่งผลให้ความชื้นและอุณหภูมิของกองเมล็ดธัญพืชเพิ่มสูงขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นปัจจัยที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของแมลงและจุลินทรีย์ และนำไปสู่การเสื่อมคุณภาพของผลผลิตในที่สุด (Jian and Jayas, 2012)

ด้วยเหตุผลที่กล่าวไว้ข้างต้น การตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืชเป็นกิจกรรมที่ไม่สามารถละเลยได้ในกระบวนการเก็บรักษา ในอดีต การตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืชมักดำเนินการโดยใช้แรงงานคนเป็นผู้ตรวจสอบสัมผัสตัวอย่างจากกองเมล็ดธัญพืช และประเมินด้วยสายตา ผิวสัมผัส หรือกลิ่น เป็นต้น ต่อมา จึงได้มีการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์แบบพกพาที่ช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานทำการวัดคุณสมบัติเมล็ดได้สะดวกขึ้น เช่น หลาววัดอุณหภูมิ (temperature probe), เครื่องวัดความชื้นเมล็ด (moisture tester) และเครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ monitor) (Figure 1) ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์เหล่านี้ยังคงมีการใช้งานอยู่ อย่างไรก็ตาม การใช้แรงงานคนยังคงมีข้อด้อยคือ การสิ้นเปลืองเวลา ความผิดพลาดของการจดบันทึกข้อมูล ความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุต่อผู้ปฏิบัติงาน อีกทั้งการบันทึกข้อมูลไม่สามารถทำได้อย่างครอบคลุม และต่อเนื่อง



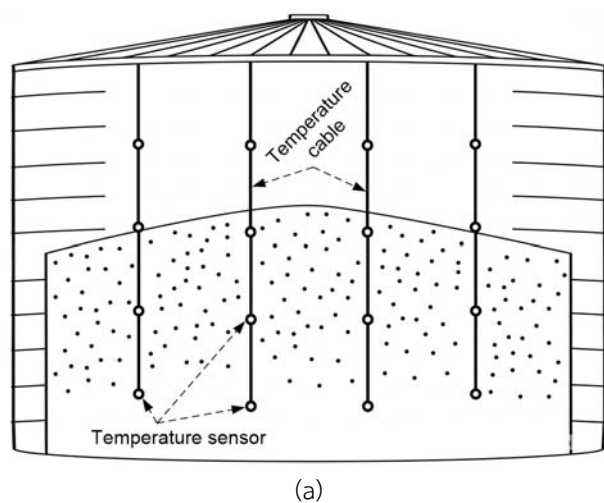
Figure 1 Example of a handheld grain temperature probe (left), moisture tester (upper-right) and carbon dioxide monitor (lower-right).

ในปัจจุบัน สำหรับการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืชปริมาณมากในสถานประกอบการหรือโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จะมีการใช้งานระบบตรวจติดตามที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายเซนเซอร์ (sensor network) ซึ่งจะมีการตรวจติดตามอุณหภูมิ และอาจมีการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมด้วย นอกจากนี้ ระบบยังมีความสามารถในการแสดงผลแบบเวลาจริง (real-time) และบันทึกผลโดยอัตโนมัติ ระบบดังกล่าวมักถูกติดตั้งอย่างถาวรเข้ากับโครงสร้างการเก็บเมล็ดธัญพืช อาทิ ไซโลคอนกรีต, ไซโลเหล็ก หรือโรงเก็บขนาดใหญ่ ผู้ผลิตบางรายยังได้พัฒนาระบบที่มีความสามารถในการสื่อสารไร้สาย และมีเครื่องมือบริหารจัดการระบบผ่าน

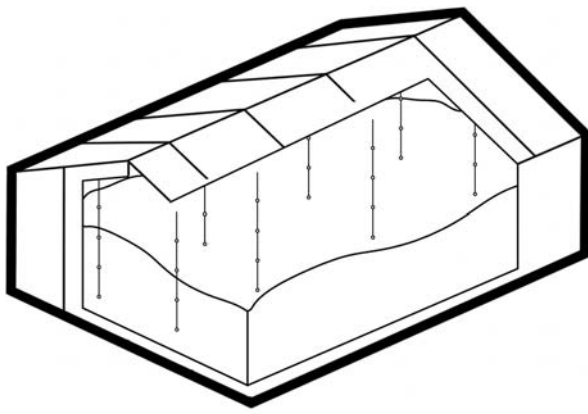
อินเทอร์เน็ต ซึ่งช่วยให้สามารถติดตามคุณภาพของเมล็ดธัญพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา

2.1 การตรวจติดตามอุณหภูมิเมล็ดธัญพืช (grain temperature)

Jian and Jayas (2012) และ Singh and Fielke (2017) อธิบายสรุปภาพรวมการติดตั้งระบบตรวจติดตามอุณหภูมิในไซโลไว้ดังแสดงใน Figure 2a ระบบดังกล่าวมักเป็นระบบพื้นฐานที่มีการติดตั้งโดยทั่วไปในไซโลหรือโรงเก็บ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ เคเบิลวัดอุณหภูมิ (temperature cable) ซึ่งภายในมีเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (temperature sensor) ติดตั้งอยู่เป็นระยะๆ ตลอดความยาวของเคเบิล เคเบิลวัดอุณหภูมิจะถูกติดตั้งเป็นโครงข่ายภายในแต่ละไซโล และมักเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์รวมและรับส่งสัญญาณ (data transmission hub) หรือฮับ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ประมวลผลกลาง ซึ่งระบบส่วนใหญ่มักใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal computer) หน้าที่หลักของคอมพิวเตอร์ดังกล่าวคือ การประมวลผลและแสดงค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ทั้งหมดในไซโล อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็น UI (user interface) สำหรับรับคำสั่งต่างๆ จากผู้ใช้งาน ในบางระบบ อุปกรณ์ประมวลผลกลางยังอาจทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบระบายอากาศ (aeration system) หรือ เครื่องลดอุณหภูมิเมล็ดธัญพืช (grain chiller) ด้วย นอกจากนี้ ระบบตรวจติดตามสมัยใหม่ยังมีแพลตฟอร์มคลาวด์ (cloud platform) และความสามารถทำงานกับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (internet of things – IoT) ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลและควบคุมระบบได้จากทุกที่ทุกเวลา ระบบตรวจติดตามอุณหภูมิที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นยังสามารถติดตั้งในโรงเก็บแนวราบได้เช่นกันดังตัวอย่างใน Figure 2b



(a)



(b)

Figure 2 Typical installations of temperature cables in (a) a grain silo and (b) a flat storage.

เซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ในเคเบิลวัดอุณหภูมิมีหลายประเภท ซึ่งในอดีตเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) และเทอร์มิสเตอร์ (thermistor) เป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ได้รับความนิยมใช้ในระบบตรวจติดตามอุณหภูมิในการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืช เนื่องจากมีราคาถูก ติดตั้งง่าย และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในกองเมล็ดธัญพืชได้รวดเร็วเพียงพอ ด้วยวิวัฒนาการด้านการผลิตชิปวงจรรวม (integrated circuit chip) หรือ ไอซีชิป (IC chip) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (digital temperature sensor) ซึ่งมีลักษณะเป็นไอซีชิป เช่น DS18B20 (Songwang, 1999) หรือ DS18B20 (Yuliang, 2012) เป็นต้น จึงได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืชปริมาณมาก ข้อได้เปรียบของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิทัลคือ มีความแม่นยำที่สูงกว่า, ทนต่อสัญญาณรบกวน (noise) และมีฟอร์มแฟกเตอร์ (form factor) ที่เล็กลง จึงทำให้ผู้ผลิตสามารถออกแบบโครงข่ายเซนเซอร์สื่อสารข้อมูลระหว่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และต้นทุนต่ำลง โดยทั่วไปเซนเซอร์ดิจิทัลให้ความแม่นยำของการวัดอยู่ในช่วงประมาณ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับเทอร์โมคัปเปิล การเชื่อมต่อเซนเซอร์ดิจิทัลหลายตัวเข้าเป็นเคเบิลวัดอุณหภูมิ และการเชื่อมต่อเคเบิลหลายเส้นเข้าเป็นโครงข่ายสามารถทำได้โดยใช้จำนวนสายสัญญาณที่น้อยกว่าโครงข่ายที่ใช้เทอร์โมคัปเปิลหรือเทอร์มิสเตอร์ นอกจากนี้ การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลหรือเทอร์มิสเตอร์จำเป็นต้องมีอุปกรณ์แปลงจากสัญญาณแอนะล็อก (analog) เป็นสัญญาณดิจิทัล ในขณะที่การใช้เซนเซอร์ดิจิทัลไม่มีความจำเป็น จึงทำให้โครงข่ายเซนเซอร์ดิจิทัลโดยรวมมีความซับซ้อนน้อยลงและมีประสิทธิภาพในการสื่อสารรับส่งข้อมูลสูงขึ้น

สัญญาณบ่งชี้หนึ่งของการเกิดการเน่าเสียคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในกองเมล็ดธัญพืช ซึ่งบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างผิดปกตินี้เรียกว่า ฮอตสปอต (hot spot) โดยในบางกรณีอาจเพิ่มสูงถึง 64°C (Sinha and Wallace, 1965) ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ สาเหตุหลักของการเกิดความร้อนสะสมนี้มาจากกิจกรรมทางชีวภาพ ได้แก่ การเข้าทำลายของแมลง และการเกิดเชื้อรา

โดยธรรมชาติแล้ว กองเมล็ดธัญพืชเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี กล่าวคือ กองเมล็ดธัญพืชมีค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ต่ำ (Jian and Jayas, 2012) ดังนั้น เมื่อเกิดความร้อนขึ้นในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ความร้อนนั้นจะถูกกักเก็บและสะสมอยู่เฉพาะที่จนกลายเป็นฮอตสปอต

การตรวจติดตามอุณหภูมิเป็นเครื่องมือหนึ่งในการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช ทำหน้าที่เป็นระบบเตือนภัยล่วงหน้าช่วยในการตรวจหาฮอตสปอตที่กำลังก่อตัวในช่วงเริ่มต้น เพื่อให้สามารถจัดการปัญหาได้ทันเวลาก่อนที่ความเสียหายจะลุกลามเป็นวงกว้าง และยังเป็นหนึ่งในเครื่องมือสำคัญสำหรับประเมินแนวโน้มการเสื่อมสภาพในอนาคต และคาดการณ์ระยะเวลาการเก็บรักษาที่ปลอดภัย (safe storage duration) ของเมล็ดธัญพืชได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำข้อมูลอุณหภูมิมาวิเคราะห์ร่วมกับปัจจัยอื่น เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความหนาแน่นประชากรแมลงภายในไซโลหรือโรงเก็บ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ข้อมูลดังกล่าวเพื่อควบคุมระบบระบายอากาศ (aeration system) หรือระบบควบคุมอุณหภูมิภายในไซโล

เพื่อให้การตรวจติดตามอุณหภูมิครอบคลุมปริมาตรทั้งหมดของกองเมล็ดธัญพืชและตรวจพบความผิดปกติเป็นไปอย่างแม่นยำและรวดเร็ว การกำหนดจำนวนและตำแหน่งของเซนเซอร์และเคเบิลวัดอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณา (Standardization Administration of China, 2024) โดยทั่วไปจุดตรวจวัด (sensing point) ต้องกระจายตัวสม่ำเสมออย่างทั่วถึงภายในกองเมล็ดธัญพืช โดยเซนเซอร์จะถูกติดตั้งเป็นระยะห่างเท่าๆ กันตลอดความยาวของเคเบิล ในอุดมคติ จุดตรวจวัดแต่ละจุดควรอยู่ห่างกันไม่เกิน 0.5 m แต่การติดตั้งเซนเซอร์และเคเบิลวัดอุณหภูมิที่ระยะดังกล่าวเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากข้อจำกัดด้านต้นทุน และความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างไซโลหรือโรงเก็บ (Singh et al., 1983; Jian and Jayas, 2012) โดยทั่วไป ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์วัดอุณหภูมิบนเคเบิลมักอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 m หรือในกรณีที่ต้องตรวจวัดอย่างละเอียดระยะดังกล่าวอาจใกล้ถึง 60 cm (OPISystems, 2025a) จำนวนของเคเบิลวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งภายในไซโลจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโล หรือพื้นที่ของโรงเก็บ Table 1 สรุปตัวอย่างคำแนะนำจำนวนเคเบิลวัดอุณหภูมิที่ควรติดตั้งของผู้ผลิตบางราย (Rolfes @ Boone, 2009; Eltrum Systems, 2025; Flu-Tech, 2025b)

Table 1 Recommended number of temperature cables for different silo diameters.

Silo diameter	Number of cables
< 6 m (small)	1
6-12 m (medium)	3-5
12-20 m (large)	10-12
> 20 m	> 12
Requires specific analysis based on volume and risk	

2.2 การตรวจติดตามความชื้นเมล็ดธัญพืช (grain moisture content)

นอกจากอุณหภูมิแล้ว ความชื้นเมล็ดธัญพืชเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความสามารถในการเก็บรักษา เชื้อรา (fungi) ส่วนใหญ่จะชะลอการเจริญเติบโตลงในสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 70% ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง EMC (equilibrium moisture content - ความชื้นสมดุล) และ ERH (equilibrium relative humidity - ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล) สำหรับเมล็ดธัญพืชส่วนใหญ่ ERH ที่ 70% นี้จะเกิดขึ้นที่ความชื้นเมล็ดประมาณ 13% ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาปกติ (Navarro et al., 2012) จากแผนภาพของ FAO (2011) ดังแสดงใน Figure 3 ซึ่งให้เห็นถึงบริเวณช่วงอุณหภูมิและความชื้นเมล็ดธัญพืชที่เหมาะสมและปลอดภัยสำหรับการเก็บรักษา จะเห็นได้ว่า หากความชื้นและอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมจะก่อให้เกิดความเสียหายได้ทั้ง การเกิดความร้อนจากการเข้าทำลายของแมลง (insect heating), การลดลงของอัตราการงอก (fall in germination) หรือการเกิดความร้อนจากเชื้อรา (fungal heating)

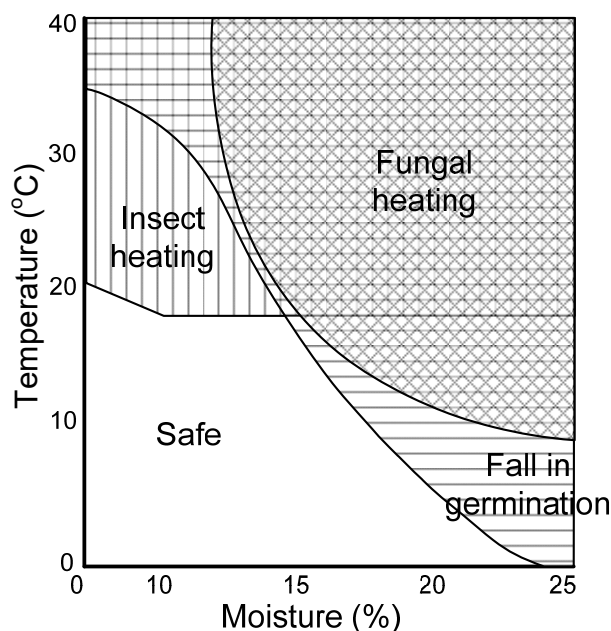


Figure 3 Effects of different temperatures and moisture contents on storability of grain crops. This chart is recreated from the one presented by FAO (2011).

Flor et al. (2022) สรุปรวมรายชื่อวิธีการประเมินความชื้นเมล็ดธัญพืชไว้ได้มากกว่า 20 วิธี ทั้งนี้ วิธีการประเมินความชื้นที่ได้รับการยอมรับและนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ (Kett US, 2025)

1. วิธีปฐมภูมิ (primary measurement method) ได้แก่ วิธี Karl Fischer และวิธี loss on drying (หรือ oven method) เป็นการวัดปริมาณความชื้นได้โดยตรงจากตัวอย่าง โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการสอบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่าความชื้นเมล็ดมาก่อนล่วงหน้า

2. วิธีทุติยภูมิ (secondary measurement method) ได้แก่ วิธีการวัดทางไฟฟ้า (electrical method), วิธี microwave, วิธี nuclear และวิธี near-infrared (NIR)

Jian and Jayas (2012) ได้ระบุไว้ว่า อุปกรณ์สำหรับวัดความชื้นเมล็ดธัญพืช ณ ตำแหน่งภายในกอง (in situ) เช่น ภายในกองเมล็ดในไซโลหรือโรงเก็บ ยังไม่มีการผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยการตรวจติดตามความชื้นเมล็ดในระหว่างเก็บรักษายังคงต้องอาศัยการชักตัวอย่างออกมาจากไซโลหรือโรงเก็บแล้วจึงประเมินความชื้นจากตัวอย่างดังกล่าวด้วยวิธีปฐมภูมิหรือวิธีทุติยภูมิที่กล่าวถึงข้างต้น อย่างไรก็ตาม ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา อุปกรณ์สำหรับวัดความชื้นเมล็ดธัญพืช ณ จุดเก็บรักษา ก็ได้รับการวิจัยพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (Casada and Armstrong, 2009; Lewis et al., 2018; Rai et al., 2018; Liu et al., 2022; Nunes et al., 2023; Liu et al., 2024; Wang et al., 2024) Chen (2001) และ Uddin et al. (2006) นำเสนอวิธีการทางอ้อมในการประมาณค่าความชื้นเมล็ดธัญพืช ณ ตำแหน่งภายในกอง โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง EMC และ ERH เมล็ดธัญพืชมีคุณสมบัติเป็นวัสดุดูดความชื้น (hygroscopic) ซึ่งใน

สภาวะปิดที่อุณหภูมิคงที่เมล็ดจะดูดซับหรือคายความชื้นสู่อากาศ โดยรอบจนกว่าจะถึงสภาวะสมดุล ความชื้นของเมล็ดและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบ ณ สภาวะสมดุลคือ EMC และ ERH ตามลำดับ สมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง EMC และ ERH เรียกว่า สมการไอโซเทิร์ม (isotherm equation) โดยสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวของเมล็ดธัญพืชแต่ละชนิดสามารถสร้างขึ้นโดยการวัดค่า EMC และ ERH ของเมล็ดในภาชนะปิดที่บรรยากาศภายในถูกควบคุมให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ จากนั้น ค่า EMC และ ERH ณ สภาวะสมดุลจะถูกวิเคราะห์ด้วยการถดถอยที่ไม่ใช่เชิงเส้น (non-linear regression) เพื่อหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างสมการไอโซเทิร์มที่นิยมใช้ได้แก่ modified Henderson equation (สมการที่ 2) หรือ modified Chung-Pfost equation (สมการที่ 3) ทั้งนี้ สมการไอโซเทิร์มอื่นๆ และค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารมาตรฐานของ ASABE (2021)

$$EMC = \left[\frac{\ln(1 - ERH)}{-A(T + B)} \right]^{\frac{1}{C}} \quad (2)$$

$$EMC = -\frac{1}{C} \ln \left[\frac{\ln(ERH)(T + B)}{-A} \right] \quad (3)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิของเมล็ด และ A, B และ C คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะสำหรับเมล็ดธัญพืชแต่ละชนิด

ระบบตรวจติดตามความชื้นเมล็ดธัญพืช โดยใช้เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ณ ตำแหน่งภายในกอง มีการใช้งานเชิงพาณิชย์แล้วในปัจจุบัน (Eye-Grain, 2025b; Gescaser, 2025; Supertech Agroline, 2025) Singh and Fielke (2017) และ Lutz and Coradi (2022) อธิบายลักษณะการติดตั้งเซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ในไซโลโดยทั่วไปไว้ดังแสดงใน Figure 4 ระบบตรวจติดตามความชื้นเมล็ดธัญพืชโดยใช้เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์มักติดตั้งเป็นระบบเสริม เพิ่มจากระบบตรวจติดตามอุณหภูมิ เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ใน Figure 4 มักถูกติดตั้งเพิ่มเติมให้กับโครงข่ายเคเบิลวัดอุณหภูมิใน Figure 2 และระบบตรวจติดตามความชื้นจะใช้ UI ร่วมกับระบบตรวจติดตามอุณหภูมิ โดยทั่วไป เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์แบบดิจิทัล (digital relative humidity sensor) ที่มีลักษณะเป็นไอซีชิปจะถูกติดตั้งอยู่ภายในเคเบิลคล้ายกับเคเบิลวัดอุณหภูมิ เซนเซอร์ดังกล่าวมักมีความสามารถในการวัดได้ทั้งความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในไอซีชิปตัวเดียวกัน ในการใช้งานจริง เคเบิลวัดความชื้นสัมพัทธ์ใน 1 ไซโลอาจมีเพียง 1-2 เส้น และจำนวนเซนเซอร์ต่อเคเบิล อาจมีได้ 1-6 ตำแหน่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้อยกว่าจำนวนเคเบิลและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิมาก (เทียบกับ Table 1) ในช่องว่างด้านบนไซโลหรือไซโลเฮดสเปซ (silo headspace)

เป็นอีกตำแหน่งที่มักมีการติดตั้งเซนเซอร์ความชื้นสัมพัทธ์ โดยจะติดตั้งอยู่ใต้หลังคาไซโล ทั้งนี้ วัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อเฝ้าระวังและป้องกันการเกิดการควบแน่น (condensation) ที่ใต้หลังคาหรือที่ผนังด้านในไซโล

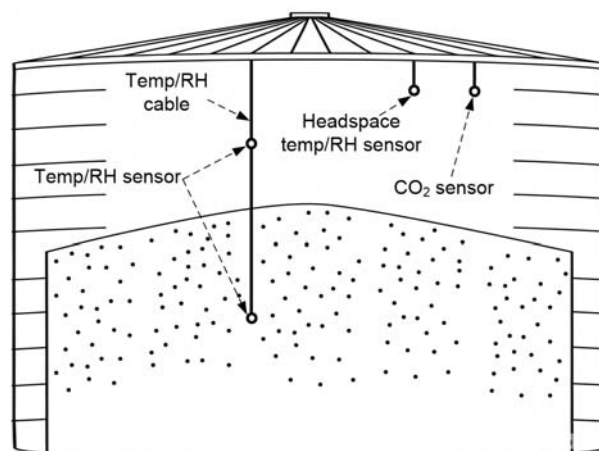


Figure 4 Typical installations of relative humidity sensors in grain silos.

2.3 การตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide concentration)

ข้อจำกัดสำคัญของการใช้เคเบิลวัดอุณหภูมิในการเฝ้าระวังการเกิดฮอตสปอตคือการที่กองเมล็ดธัญพืชเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี การถ่ายเทความร้อนผ่านกองเมล็ดเป็นไปได้ช้า ซึ่งหมายความว่าเมื่อตรวจพบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างผิดปกติ ความเสียหายจากการเน่าเสียมักจะแพร่กระจายเป็นวงกว้างแล้ว เนื่องจากตำแหน่งที่เกิดฮอตสปอตอยู่ห่างจากจุดติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ด้วยเหตุที่ จุลินทรีย์และแมลงศัตรูในโรงเก็บมีอัตราการหายใจที่สูงกว่าเมล็ดธัญพืช ผลการศึกษาหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่า การตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแนวทางที่สามารถใช้ตรวจหาการเน่าเสียและความหนาแน่นประชากรแมลง (insect population density) ในกองเมล็ดธัญพืชได้ (White et al., 1982a, 1982b; Singh et al., 1983; Muir et al., 1985; Sinha et al., 1986a, 1986b, 1986c; Chotikasatian et al., 2017) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในกองเมล็ดธัญพืช สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วกว่าการนำหรือการพาความร้อน การตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเป็นส่วนเสริมที่จะช่วยลดจุดอ่อนของการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดด้วยการใช้เคเบิลวัดอุณหภูมิ เทคโนโลยีการตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนามีข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้กับไซโลหรือโรงเก็บเมล็ดธัญพืชได้อย่างแพร่หลายคือ เซนเซอร์มีราคาสูง แต่ยังคงมีความแม่นยำไม่เพียงพอ (World Grain, 2025) ในปัจจุบัน ความก้าวหน้าในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (microelectronics) ทำให้เซนเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีราคาถูกลงแม่นยำสูงขึ้น และทนทานกว่าเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซนเซอร์

NDIR (non-dispersive infrared carbon dioxide sensor) ซึ่งทำงานบนหลักการของการดูดซับแสงอินฟราเรดของโมเลกุลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั่วไปที่ความยาวคลื่นประมาณ 4.26 μm (CO2METER, 2025) ภายในเซนเซอร์จะมีแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด เมื่อแสงส่องผ่านตัวอย่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มแสงจะลดลงเนื่องจากถูกโมเลกุลก๊าซดูดซับไว้ ซึ่งความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถประเมินได้จากปริมาณการลดลงของความเข้มแสง

ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซส่งผลต่อการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืชให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่นมากกว่าอากาศจึงมีแนวโน้มที่จะลอยตัวสะสมอยู่ในระดับต่ำ อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของก๊าซภายในกองเมล็ดธัญพืชเป็นขึ้นอยู่กับการไหลเวียนของอากาศ รวมถึงสภาวะบรรยากาศภายนอก นอกจากนี้ ต้นทุนความสะดวกต่อการติดตั้ง ใช้งาน และบำรุงรักษา ยังเป็นประเด็นที่ต้องพิจารณา ระบบตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไซโล ณ ปัจจุบัน โดยทั่วไปมักติดตั้งเซนเซอร์วัดความเข้มข้นที่เฮดสเปซ ดังแสดงใน Figure 4 (Lutz and Coradi, 2022) อีกตำแหน่งหนึ่งที่ผู้ผลิตระบบตรวจติดตามเริ่มนำเสนอเป็นทางเลือกในการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเข้มข้นคือ ฟังไวก์ที่ได้ผิวพื้นโรงเก็บแนวราบ (Eye-Grain, 2025c)

2.4 การตรวจติดตามความหนาแน่นประชากรแมลง (insect population density)

ข้อมูลความหนาแน่นประชากรแมลงเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของ IPM (integrated pest management - การจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน) ซึ่งโดยทั่วไปมักอยู่ในหน่วยของจำนวนแมลงต่อน้ำหนักเมล็ดธัญพืช (เช่น แมลงจำนวน 10 ตัว ต่อข้าวสาร 1 kg) หรือจำนวนแมลงที่จับได้ต่อกับดักต่อช่วงเวลา (เช่น แมลงจำนวน 2 ตัว ต่อ กับดัก ต่อ วัน) การตรวจติดตามความหนาแน่นประชากรแมลงจะช่วยให้สามารถคาดการณ์และป้องกันปัญหาได้ล่วงหน้า เลือกใช้วิธีการแก้ไขปัญหได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือในการประเมินประสิทธิภาพการควบคุมจัดการแมลงในระหว่างการเก็บรักษา

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน การตรวจติดตามความหนาแน่นประชากรแมลงในระหว่างการเก็บรักษาด้วยแรงงานคนยังคงเป็นวิธีการปฏิบัติที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ผู้ปฏิบัติงานจะสุ่มชักตัวอย่างจากกองเมล็ดธัญพืชและใช้ตะแกรงร่อนตรวจหาแมลงในตัวอย่างเมล็ดด้วยสายตา การสุ่มตัวอย่างอาจทำได้โดยการใช้ภาชนะตักหรือใช้หลาวแทงลงในกองเมล็ด วิธีการนี้เป็นวิธีที่เรียบง่ายและประหยัด แต่ไม่เหมาะสำหรับการเก็บรักษาในปริมาณมาก การใช้กับดักเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการตรวจติดตามประชากรแมลง ซึ่งสามารถจำแนกได้หลากหลายรูปแบบ เช่น รูปร่างของกับดัก, วิธีการติดตั้ง, กลุ่มของแมลงเป้าหมาย และการใช้งานร่วมกับใช้ฟีโรโมน (pheromone) เป็นต้น

(Insects Limited, 2025; Martin Lishman, 2025; Trécé, 2025) กับดักแบบหลุมดัก (pitfall trap) ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อการตรวจติดตามแมลงภายในกองเมล็ดธัญพืช (White et al., 1990) โดยรูปร่างของกับดักอาจเป็นได้หลายลักษณะดังแสดงตัวอย่างใน Figure 5 กับดักลักษณะนี้มักผลิตจากพลาสติก ซึ่งถูกออกแบบพื้นผิวบางส่วนมีรูพรุน และติดตั้งโดยฝังกับดักไว้ในกองเมล็ดธัญพืช เมื่อแมลงคลานผ่านรูพรุนเข้าไปในกับดัก แมลงจะตกลงสู่ภาชนะรวบรวมด้านล่าง ต่อมา กับดักแบบหลุมดักได้รับการพัฒนาเพิ่มเซนเซอร์แสงอินฟราเรดและวงจรควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ให้มีความสามารถนับและระบุชนิดของแมลงที่ตกลงในกับดัก และสามารถสื่อสารและรายงานผลร่วมกับระบบตรวจติดตามอื่นๆ ได้ (Shuman et al., 1996; Epsky and Shuman, 2001; Bonjour and Phillips, 2003; Toews et al., 2003) ซึ่งในปัจจุบัน มีการผลิตจำหน่ายเชิงพาณิชย์แล้ว (Jian et al., 2012; Jian et al., 2014; OPI Systems, 2025b) กับดักอิเล็กทรอนิกส์เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยให้การตรวจติดตามประชากรแมลงในไซโลหรือโรงเก็บเป็นไปได้อย่างสะดวกรวดเร็วและแม่นยำ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาในการใช้งานระยะยาวคือ 1) การติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่เกิดขบวนการขนถ่ายกองเมล็ดธัญพืช เช่น การโหลดเมล็ดเข้าและถ่ายออกจากไซโล และการปฏิบัติงานอื่นๆ เช่น การรมยาฆ่าแมลง (fumigation) และ 2) ความน่าเชื่อถือ (reliability) และความทนทาน (durability) ของกับดักที่ต้องถูกใช้งานในสภาวะที่อุณหภูมิและความชื้นแปรปรวน มีฝุ่นละอองและสิ่งแปลกปลอมต่างๆ

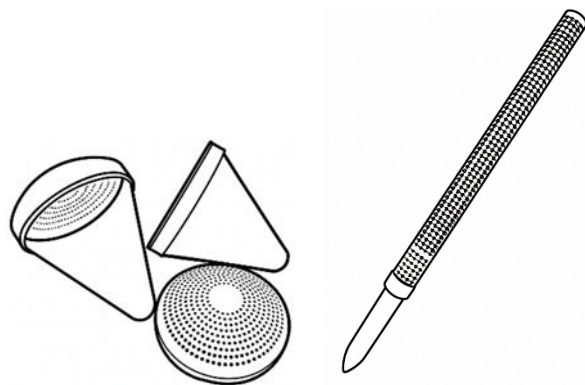


Figure 5 Typical pitfall traps: (left) cone-shaped bottom (recreated from a photo from Martin Lishman (2025)) and (right) perforated tube (recreated from a photo from Control Unlimited (2025)).

เทคนิคการตรวจหาแมลงอื่นๆ ที่มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ การตรวจหาด้วยเสียง (acoustic detection), การตรวจหาด้วยภาพ (machine vision), การใช้รังสีเอกซ์ (X-ray), การใช้ภาพถ่ายความร้อน (thermal imaging), การใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (near infrared spectroscopy - NIRS), การวัดค่าการนำไฟฟ้า และการใช้จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose) เป็นต้น Neethirajan et al. (2007) และ Banga et al. (2018) ได้รวบรวมและวิเคราะห์ข้อดี

และข้อจำกัดของเทคนิคเหล่านี้ไว้โดยละเอียด ทั้งนี้ วิธีการเหล่านี้ยังคงมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ค่าใช้จ่ายสูง, ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง, ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวน หรือการแยกแยะแมลงได้เพียงบางกลุ่ม เป็นต้น กล่าวโดยสรุป วิธีการเหล่านี้ยังคงต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไปเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมเชิงอุตสาหกรรม (industrial settings)

2.5 การใช้งานข้อมูลจากระบบตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช

การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากระบบตรวจติดตามปัจจัยต่างๆ ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของเมล็ดธัญพืช (อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์, ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ความหนาแน่นประชากรแมลง) ที่ถูกกล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้านี้ เป็นเพียงขั้นตอนแรกของการกระบวนการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืชที่มีประสิทธิภาพเท่านั้น ขั้นตอนสำคัญอีกส่วนหนึ่งคือ การตีความ (interpretation) หรือการวิเคราะห์ (analysis) ข้อมูลดังกล่าวอย่างถูกต้อง สะท้อนสภาพแวดล้อมของการเก็บรักษาและคุณภาพเมล็ดตามความเป็นจริง ขั้นตอนลำดับถัดมาคือ การกำหนดแนวทางปฏิบัติที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมหรือปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างทันท่วงที

วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการประเมินระยะเวลาปลอดภัยในการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืช (safe grain storage time) คือ การประเมินจากหลักการของการสูญเสียน้ำหนักแห้งของเมล็ด (dry matter loss - DML) ซึ่งตัวแปรหลักที่ใช้ในการคำนวณคือ อุณหภูมิและความชื้นเมล็ด (Górnicki and Kaleta, 2013) Sadaka et al. (2025) ทำการคำนวณจำนวนวันปลอดภัยในการเก็บรักษาเมล็ดข้าวโพด, ถั่วเหลือง, ข้าวเปลือกและข้าวสาลีไว้ โดยสมมติให้ DML ต้องไม่เกิน 0.5% ดังแสดงตัวอย่างใน Table 2 ผู้ปฏิบัติงานอาจใช้ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นจากระบบตรวจติดตามคุณภาพเมล็ด เพื่อประเมินระยะเวลาปลอดภัยในการเก็บรักษาได้

Table 2 Numbers of safe storage days for rice (partial data from Sadaka et al. (2025)).

Grain temp. (°C)	Grain moisture content (%wet basis)				
	14	15	16	17	18
31.1	40	20	8	5	3
27.2	120	40	10	10	5
25.0	160	40	20	20	10
20.0	<270	80	40	40	20
15.0	>270	160	80	60	40

Maier et al. (2010) ทำการตรวจติดตามความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไซโลเก็บเมล็ดข้าวโพดปริมาณ 254 ton เป็นระยะเวลา 8 เดือน พบว่า 1) ที่ความเข้มข้นในช่วง 400-500 ppm (part per million) ข้าวโพดมีสภาพปกติ, 2) ความเข้มข้น

ในช่วง 500-1,200 ppm บ่งชี้ถึงการเริ่มมีการติดเชื้อราหรือมีแมลงเข้าทำลาย, และ 3) ที่ความเข้มข้น 1,500-4,000 ppm หรือสูงกว่า ข้าวโพดมีการติดเชื้อราหรือมีการระบาดของแมลงที่รุนแรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ช่วงความเข้มข้นต่างๆ ดังกล่าวอาจใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับความเสียหายของเมล็ดในระหว่างการเก็บรักษาได้

ตามแนวคิดของ IPM (Nansen and Meikle, 2011; Kaur and Kaur, 2020) การตัดสินใจใช้มาตรการแทรกแซง (intervention measure) เพื่อควบคุมและ/หรือยับยั้งปัญหาที่สร้างความเสียหายต่อเมล็ดธัญพืชในระหว่างการเก็บรักษา จะพิจารณาจากระดับ EIL (economic injury level - ระดับความเสียหายทางเศรษฐกิจ) ซึ่งตามคำนิยามของ Stern et al. (1959) คือ ความหนาแน่นของประชากรศัตรูพืชที่ต่ำที่สุดที่จะทำให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจ โดยที่ ความเสียหายทางเศรษฐกิจหมายถึง ปริมาณความเสียหายที่สมเหตุสมผลกับค่าใช้จ่ายของมาตรการที่จะใช้ควบคุมศัตรูพืช เนื่องจากประชากรศัตรูพืชที่เพิ่มถึงระดับ EIL จะทำให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจ การใช้มาตรการแทรกแซงใดๆ จึงควรดำเนินการที่ระดับต่ำกว่า EIL เป็นเกณฑ์ ซึ่งเรียกว่า เกณฑ์ ET (economic threshold - เกณฑ์ทางเศรษฐกิจ) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เกณฑ์ AT (action threshold - เกณฑ์ที่ต้องดำเนินการ) พรทิพย์ et al. (2548) ได้ให้ตัวอย่างเกณฑ์ ET สำหรับในกลุ่มประเทศในเขตร้อนชื้นอยู่ที่แมลงมีชีวิตจำนวน 10 ตัว ใน ข้าวสาร 1 kg แต่สำหรับกลุ่มประเทศในทวีปยุโรปและประเทศสหรัฐอเมริกา เกณฑ์ ET อยู่ที่ 0 (ถึงแม้ว่า จะพบแมลงที่มีชีวิตเพียง 1 ตัว ผู้ปฏิบัติงานควรดำเนินการมาตรการแทรกแซง เพื่อควบคุมหรือกำจัดแมลง) งานวิจัยของ Kuzmanov and Dimitrov (2009) เป็นตัวอย่างหนึ่งของการใช้หนาแน่นประชากรแมลงเป็นเกณฑ์ ET เพื่อตัดสินใจใช้การรมยา (fumigation) เป็นมาตรการกำจัดแมลงในระหว่างการเก็บรักษา นักวิจัยกลุ่มนี้ใช้แบบจำลองประชากรแมลง (insect population model) และการเก็บข้อมูลจากการทดลองเก็บรักษาเมล็ดข้าวสาลีปริมาณ 2,500 ton ในไซโลและ 3,500 ton ในโรงเก็บแนวราบ เพื่อกำหนดระดับความหนาแน่นประชากรแมลงที่ทำให้น้ำหนักของเมล็ดที่เสียหายไม่เกิน 0.5 kg ton⁻¹ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ควรทำการรมยาเมื่อความหนาแน่นประชากรแมลงสูงถึง 8.5 ตัว ต่อ ข้าวสาลี 1 kg (เกณฑ์ ET = 8.5 ตัว ต่อ kg) นอกจากการรมยาแล้ว มาตรการแทรกแซงอื่นๆ ที่สามารถพิจารณาเลือกใช้งานได้ อาจรวมถึง การใช้สารเคมี (chemical treatment) ประเภทอื่น, การทำความสะอาด (cleaning and sanitation), การซ่อมบำรุงสถานที่จัดเก็บ (structural integrity and maintenance), การระบายอากาศ (aeration) หรือ การใช้เครื่องลดอุณหภูมิ เป็นต้น

ตัวอย่างการใช้งานข้อมูลอุณหภูมิ, ความชื้นเมล็ด, ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความหนาแน่นประชากรแมลง ที่ถูกกล่าวถึงข้างต้นเป็นเพียงแนวทางเบื้องต้นเท่านั้น ข้อมูลจากระบบตรวจติดตามไม่ควรถูกพิจารณาเพียงปัจจัยใด

ปัจจัยหนึ่ง ณ ช่วงเวลาใดช่วงเวลาหนึ่งแยกจากกัน แต่ควรถูกนำมาวิเคราะห์ในบริบทที่เชื่อมโยงกับปัจจัยและช่วงเวลาอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของเมล็ดธัญพืช เนื่องจากสภาวะภายในกองเมล็ดธัญพืชมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ผู้ปฏิบัติงานจึงควรให้ความสำคัญกับการพิจารณาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกับการพิจารณาค่า ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง หรือเวลาใดเวลาหนึ่งด้วย ยกตัวอย่างเช่น หากพบว่าอุณหภูมิในบางตำแหน่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีอัตราการเพิ่มที่สูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ ตำแหน่งนั้นอาจกำลังมีหอตสปอตเกิดขึ้น ซึ่งเป็นสัญญาณเตือนถึงการก่อตัวของเชื้อราหรือการระบาดของแมลง ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของเมล็ดจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกัน (correlation) ที่ซับซ้อน เช่น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอาจส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศรอบๆ เมล็ดสูงขึ้น ซึ่งเป็นสภาพที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา ซึ่งในขณะเดียวกัน กิจกรรมของจุลินทรีย์ (microorganism) และการหายใจของแมลง รวมทั้งของเมล็ดเอง จะเพิ่มสูงขึ้นทำให้ระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น จะเห็นได้ว่า ด้วยความซับซ้อนของระบบนิเวศในไซโลหรือโรงเก็บ ข้อจำกัดของเครื่องมือและอุปกรณ์ รวมถึงเงื่อนไขกำกับการปฏิบัติงานของสถานประกอบการ การวิเคราะห์ข้อมูลและการตัดสินใจดำเนินการ

มาตรการแทรกแซงต่างๆ ยังคงต้องอาศัยความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของเมล็ดธัญพืชและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเป็นหัวใจสำคัญ

3 สรุป

บทความนี้มุ่งเน้นการนำเสนอความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการตรวจติดตามคุณภาพเมล็ดธัญพืช เพื่อลดการสูญเสียและรักษาคุณภาพของเมล็ดให้ยาวนานที่สุด ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของเมล็ดในระหว่างการเก็บรักษาประกอบด้วย อุณหภูมิ เมล็ด, ความชื้นเมล็ด, ความเสียหายที่เกิดจากเชื้อรา และแมลงศัตรูในโรงเก็บ ระบบตรวจติดตามปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ประกอบด้วยโครงข่ายเซนเซอร์วัด อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ อากาศภายในกอง และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอาจรวมถึงกับดักแมลงที่มีเซนเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ช่วยนับและระบุชนิดแมลง คุณสมบัติและข้อจำกัดสำคัญของระบบถูกสรุปอยู่ใน Table 3 การใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ได้จากระบบดังกล่าว ต้องอาศัยความเข้าใจและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเป็นหัวใจสำคัญ เทคโนโลยีเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ประกอบการในอุตสาหกรรม การเกษตรสมัยใหม่อย่างยิ่งย่น

Table 3 Key attributes and limitations of different grain quality monitoring systems.

Monitoring systems	Attributes	Limitations
Grain temperature	- Temperature monitoring is a foundation of grain quality monitoring systems typically installed in silos or storage facilities - Temperature data are used for assessing deterioration trends and predict safe storage periods - Hotspots can be detected by temperature increases within grain mass - Grain aerantilation and/or temperature control systems can be controlled based on temperature data - Digital temperature sensors are highly accurate ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), noise-resistant, and cost-effective	- Grain mass is a poor conductor of heat, thus by the time an abnormality is detected, the damage is often already extensive - Installing sensors at appropriate intervals (no more than 0.5 meter) is difficult in practice due to cost constraints and structural load-bearing capacity
Grain moisture content	- Indirect techniques can be used to approximate grain moisture content within grain mass, using the relationship between equilibrium humidity (EMC) and equilibrium relative humidity (ERH) - Relative humidity monitoring systems are often installed as an add-on to temperature monitoring systems	- In situ measurement of grain moisture content is not yet available commercially - The number of relative humidity sensors used for moisture monitoring is much less than that for temperature monitoring
Carbon dioxide concentration	- Movement of gas molecules occurs faster than heat conduction or moisture migration, thus carbon dioxide monitoring can detect spoilage earlier than temperature or moisture content monitoring - It can also potentially be used for assessing insect population density	- Early technologies are limited by high cost and insufficient accuracy - Carbon dioxide distribution within grain mass can be affected by several factors, such as the differences in grain and ambient temperatures and operation of aeration system
Insect population density	- Electronic traps enable convenient, fast, and accurate monitoring of insect populations in silos or storage facilities - Insect population density monitoring is an essential index for assessing the effectiveness of insect control measures	- Electronic traps must be installed in locations that do not obstruct grain handling and fumigation - Reliability and durability of traps are still a concern when used in harsh industrial environments

4 เอกสารอ้างอิง

- พรทิพย์ วิสารทานนท์, กุสุมา นวลวัฒน์, บุชรา จันทรแก้วมณี, ใจทิพย์ อุไรชื่น, รังสิมา เก่งการพานิช, กรรณิการ์ เพ็งคุ้ม, จิราภรณ์ ทองพันธ์, ดวงสมร สุทธิสุทธิ, ลักษณะ ร่มเย็น, ภาวินี หุชนะภัย. 2548. แผลงที่พบในผลิตผลเกษตรและการป้องกันกำจัด. กรุงเทพมหานคร: กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กรมวิชาการเกษตร.
- ASABE. 2021. Standard ASAE D245.7 JUN2021: Moisture relationships of plant-based agricultural products. St. Joseph, MI: ASABE.
- Banga, K.S., Kotwaliwale, N., Mohapatra, D., Giri, S.K. 2018. Techniques for insect detection in stored food grains: an overview. Food Control. 94, 167-176.
- Bonjour, E.L., Phillips, T.W. 2003. Comparing insect captures in the "StorMax Insector" and other probe traps. In: Credland, P.F., Armitage, D.M., Bell, C.H., Cogan, P.M., Highley, E. (Eds). Proceedings of the Eighth International Working Conference on Stored Product Protection, 238-240. CAB International, Wallingford, United Kingdom. 22-26 July 2002, York, UK.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W. 1974. Drying Cereal Grains, Westport, Connecticut, AVI Publishing Company Inc.
- Casada, M.E., Armstrong, P.R. 2009. Wheat moisture measurement with a fringing field capacitive sensor. Transactions of the ASABE. 52(5), 1785-1791.
- CGrain. 2025. เครื่องเป่าลมเย็น สำหรับข้าว-ธัญพืช. CGrain Technology Co., Ltd. Available at: <https://cgrain.com/pcat/grain-chillers-th/>. Accessed on 7 July 2025.
- Chen, C. 2001. Moisture measurement of grain using humidity sensors. Transactions of the ASAE. 44(5), 1241.
- Chotikasatian, C., Chayaprasert, W., Pathaveerat, S. 2017. A study on the feasibility of quantifying the population density of stored product insects in air-tight grain storage using CO₂ concentration measurements. Journal of Stored Products Research. 73, 21-29.
- CO2METER. 2025. How does an NDIR CO₂ sensor work? CO2METER Inc. Available at: <https://www.co2meter.com/en-th/blogs/news/how-does-an-ndir-co2-sensor-work>. Accessed on 4 August 2025.
- Control Unlimited. 2025. Grain monitoring: grain insect probe trap. Control Unlimited Pty Ltd. Available at: <https://www.grainaeration.com.au/products/controllers-1/grain-insect-trap>. Accessed on 7 August 2025.
- Eltrum Systems. 2025. Grain temperature monitoring and control. Musninkai, Lithuania. Available at: <https://eltrum.com/presentation/eltrum-systems-en.pdf>. Accessed on 22 July 2025.
- Epsky, N.D., Shuman, D. 2001. Laboratory evaluation of an improved electronic grain probe insect counter. Journal of Stored Products Research. 37(2), 187-197.
- Eye-Grain. 2025a. CO₂ Sniffer for spoilage detection. Eye-Grain ApS. Available at: <https://crop-protector.com/products/product/co2-sniffer-spoilage-detection/>. Accessed on 7 July 2025.
- Eye-Grain. 2025b. Moisture sensor cables for grain silos. Eye-Grain ApS. Available at: <https://crop-protector.com/products/product/moisture-sensor-cable/>. Accessed on 31 July 2025.
- Eye-Grain. 2025c. All-in-one floor sensor (AIO). Eye-Grain ApS. Available at: <https://crop-protector.com/products/product/aio-floor-sensor/>. Accessed on 7 July 2025.
- FAO. 2011. Chapter 16 Grain crop drying, handling and storage. In, Rural structures in the tropics: design and development. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Flinn, P.W., Opit, G.P., Throne, J.E. 2009. Predicting stored grain insect population densities using an electronic probe trap. Journal of Economic Entomology. 102(4), 1696-1704.
- Flor, O., Palacios, H., Suárez, F., Salazar, K., Reyes, L., González, M., Jiménez, K. 2022. New sensing technologies for grain moisture. Agriculture. 386.
- Flu-Tech. 2025a. การเก็บรักษาเมล็ดพืชในถังไซโล. Flu-Tech Co., Ltd. Available at: <https://flutech.co.th/maintain-quality-of-grain-in-storage-silos/>. Accessed on 7 July 2025.
- Flu-Tech. 2025b. EST grain silo temperature & level monitoring system. Flu-Tech Co., Ltd. Available at: <https://flutech.co.th/wp-content/uploads/2022/07/EST110-Multi-point-temperature-sensor.pdf>. Accessed on 22 July 2025.
- Gescaser. 2025. Obtain maximum market value of your grain by preserving it under perfect temperature and moisture conditions. Gescaser SA. Available at:

- <https://www.gescaser.com/for-silos/>. Accessed on 1 August 2025.
- Górnicki, K., Kaleta, A. 2013. Criteria of determination of safe grain storage time – a review. In: Grundas, S.T., Stepniowski, A. (Eds.), *Advances in Agrophysical Research*. Rijeka, Croatia: IntechOpen Ltd.
- Gwinner, J., Harnisch, R., Muck, O. 1996. *Manual of the prevention of post-harvest grain losses*. Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Insects Limited. 2025. Pest products. Insects Limited Inc. Available at: <https://www.insectslimited.com/store>. Accessed on 14 August 2025.
- Jian, F., Chelladurai, V., Jayas, D.S., White, N.D.G. 2012. Insector[®] system to monitor insect activity and density during grain storage and fumigation. In: Navarro, S., Banks, H.J., Jayas, D.S., Bell, C.H., Noyes, R.T., Ferizli, A.G., Emekci, M., Isikber, A.A., Alagusundaram, K. (Eds.). *Proceedings of the Ninth International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products*, 396-402. ARBER Professional Congress Services, Turkey, Antalya, Turkey.
- Jian, F., Jayas, D.S. 2012. Temperature monitoring. In: Hagstrum, D.W., Phillips, T.W., Cuperus, G. (Eds.), *Stored Product Protection*. 271-282. Manhattan, Kansas: Kansas State University.
- Jian, F., Jayas, D.S., White, N.D.G. 2014. How many kilograms of grain per sample unit is big enough? Part I – Comparison of insect detection and density estimation between manual probe sampling and Insector[®] system. *Journal of Stored Products Research*. 56, 60-66.
- Kaur, M., Kaur, T. 2020. Integrated pest management: a paradigm for modern age. In: Kontogiannatos, D., Kourti, A., Mendes, K.F. (Eds.), *Pests, Weeds and Diseases in Agricultural Crop and Animal Husbandry Production*. Rijeka, Croatia: IntechOpen Ltd.
- Kett US. 2025. Learn the six methods for determining moisture: the advantages, deficiencies and who uses each method. Kett US. Available at: https://blog.kett.com/hs-fs/hub/173270/file-2496654055-pdf/docs/kett_six_different_moisture_methods_ebook.pdf. Accessed on 28 July 2025.
- Kuzmanov, D., Dimitrov, N. 2009. Forecasting the necessity of grain fumigation during storage. *Czech Journal of Food Sciences*. 27(3), 210-215.
- Lewis, M.A., Trabelsi, S., Nelson, S.O. 2018. Real-time monitoring of moisture within an eighth-scale grain bin during drying, 2018 ASABE Annual International Meeting: ASABE Paper No. 1801664, St. Joseph, MI, ASABE, pp. 1.
- Liu, J., Qiu, S., Wei, Z. 2022. Real-time measurement of moisture content of paddy rice based on microstrip microwave sensor assisted by machine learning strategies, *Chemosensors*, pp. 376.
- Liu, L., Song, C., Zhu, K., Liu, P. 2024. A design method for an SVM-based humidity sensor for grain storage, *Sensors*, pp. 2854.
- Lutz, É., Coradi, P.C. 2022. Applications of new technologies for monitoring and predicting grains quality stored: Sensors, Internet of Things, and Artificial Intelligence. *Measurement*. 188, 110609.
- Maier, D.E., Channaiah, L.H., Martinez-Kanwas, A., Lawrence, J.S., Chaves, E.V., Coradi, P.C., Fromme, G.A. 2010. Monitoring carbon dioxide concentration for early detection of spoilage in stored grain. In: Carvalho, M.O., Fields, P.G., Adler, C.S., Arthur, F.H., Athanassiou, C.G., Campbell, J.F., Fleurat-Lessard, F., Flinn, P.W., Hodges, R.J., Isikber, A.A., Navarro, S., Noyes, R.T., Riudavets, J., Sinha, K.K., Thorpe, G.R., Timlick, B.H., Trematerra, P., White, N.D.G. (Eds.). *Proceedings of the Tenth International Working Conference on Stored Product Protection*, 505–509. Julius Kühn-Institut, Berlin, Germany, Estoril, Portugal.
- Martin Lishman. 2025. Insect traps. Martin Lishman Ltd. Available at: <https://martinlishman.com/insect-traps/>. Accessed on 14 August 2025.
- Muir, W.E., Waterer, D., Sinha, R.N. 1985. Carbon Dioxide as an Early Indicator of Stored Cereal and Oilseed Spoilage. *Transactions of the ASAE*. 28(5), 1673-1675.
- Nansen, C., Meikle, W.G. 2011. The economic injury level and action threshold in stored-product systems. *Stewart Postharvest Review*. 7(3), 1-8.
- Navarro, S., Noyes, R. 2002. *The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management*, Boca Raton, FL, CRC Press LLC, pp. 647.
- Navarro, S., Noyes, R.T., Casada, M., Arthur, F.H. 2012. Grain aeration. In: Hagstrum, D.W., Phillips, T.W.,

- Cuperus, G. (Eds.), *Stored Product Protection* (pp. 121-134). Manhattan, Kansas: Kansas State University.
- Neethirajan, S., Jayas, D.S. 2007. Sensors for grain storage, 2007 ASAE Annual Meeting: ASABE Paper No. 076179, St. Joseph, MI, ASABE.
- Neethirajan, S., Karunakaran, C., Jayas, D.S., White, N.D.G. 2007. Detection techniques for stored-product insects in grain. *Food Control*. 18, 157–162.
- Nunes, C.F., Coradi, P.C., Jaques, L.B.A., Teodoro, L.P.R., Teodoro, P.E. 2023. Sensor-cable-probe and sampler for early detection and prediction of dry matter loss and real-time corn grain quality in transport and storage. *Scientific Reports*. 13(1), 5686.
- OPISystems. 2025a. Maximizing grain storage: the importance of using grain bin temperature cables. OPISystems Inc. Available at: <https://opisystems.com/maximizing-grain-storage-the-importance-of-using-grain-bin-temperature-cables/>. Accessed on 22 July 2025.
- OPISystems. 2025b. OPI INTEGRIS Pro. OPISystems Inc. Available at: <https://opisystems.com/integriss-pro/>. Accessed on 14 August 2025.
- Proctor, D.L. 1994. Grain Storage Techniques: Evolution and Trends in Developing Countries. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: <https://www.fao.org/4/t1838e/t1838e00.htm>. Accessed on 9 July 2025.
- Rai, A.K., Dass, B., Tiwari, V.K. 2018. Design of a probe type in situ electronic grain moisture measurement system. *Bioscience Biotechnology Research Communications*. 11(2), 246-250.
- Rolfes @ Boone. 2009. Cables, leadwire & conduit installation. Boone Cable Works & Electronics, Inc. Available at: https://rolfesatboone.com/wp-content/uploads/2023/01/temperature_cable_manual.pdf. Accessed on 3 July 2024.
- Sadaka, S., Atungulu, G., Olatunde, G. 2025. Safe grain storage period. Research and Extension, University of Arkansas System. Available at: <https://www.uaex.uada.edu/publications/pdf/FSA1058.pdf>. Accessed on 19 August 2025.
- Shuman, D., A. Coffelt, J., K. Weaver, D. 1996. A Computer-based electronic fall-through probe insect counter for monitoring infestation in stored products. *Transactions of the ASAE*. 39(5), 1773-1780.
- Singh, C.B., Fielke, J.M. 2017. Recent developments in stored grain sensors, monitoring and management technology. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 20(3), 32-55.
- Singh, D., Muir, W.E., Sinha, R.N. 1983. Finite element modelling of carbon dioxide diffusion in stored wheat. *Canadian Agricultural Engineering*. 25(1), 149-152.
- Sinha, R.N., Wallace, H.A.H. 1965. Ecology of a fungus-induced hot spot in stored grain. *Canadian Journal of Plant Science*. 45(1), 48-59.
- Sinha, R.N., Waterer, D., Muir, W.E. 1986a. Carbon dioxide concentrations associated with insect infestations of stored grain 1. natural infestation of corn barley and wheat in farm granaries. *Sciences des Aliments*. 6(1), 91-98.
- Sinha, R.N., Waterer, D., Muir, W.E. 1986b. Carbon dioxide concentrations associated with insect infestations of stored grain 2. infestation in wheat filled jars. *Sciences des Aliments*. 6(1), 99-106.
- Sinha, R.N., Waterer, D., Muir, W.E. 1986c. Carbon dioxide concentrations associated with insect infestations of stored grain 3. infestation in bagged wheat. *Sciences des Aliments*. 6(1), 107-118.
- Songwang, L. 1999. Grain temperature measurement cable. Patent Number CN2349566Y
- Standardization Administration of China. 2024. GB/T 26882.1-2024 Grain and oil storage—Monitoring and control system of stored-grain condition—Part 1: General rule. Standardization Administration of China. Available at: <https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=28045D84D9999055E06397BE0A0A7C5C>. Accessed on 22 July 2025.
- Stern, V.M., Smith, R.F., Bosch, R.v.d., Hagen, K.S. 1959. The integrated control concept. *Hilgardia*. 29(11), 81-101.
- Supertech Agroline. 2025. Moisture multi-sensor cable SLM3000. Supertech Agroline ApS. Available at: <https://www.agrolog.io/moisture-cable>. Accessed on 31 July 2025.
- Toews, M.D., Phillips, T.W., Shuman, D. 2003. Electronic and manual monitoring of *Cryptolestes ferrugineus*

- (Coleoptera: Laemophloeidae) in stored wheat. *Journal of Stored Products Research*. 39(5), 541-554.
- Trécé. 2025. Storgard® early-warning insect monitoring systems. Trécé Inc. Available at: <https://www.trece.com/products/storgard-early-warning-insect-monitoring/>. Accessed on 14 August 2025.
- Uddin, M.S., Armstrong, P.R., Zhang, N. 2006. Accuracy of grain moisture content prediction using temperature and relative humidity sensors. *Applied Engineering in Agriculture*. 22(2), 267-273.
- Wang, Z., Chen, Z., Zhang, Y., Geng, C., Song, W., Sun, Z., Guo, B., Yu, Z., Chen, L. 2024. GrainSense: a wireless grain moisture sensing system based on Wi-Fi signals. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 8(3), Article 136.
- White, N.D.G., Arbogast, R.T., Fields, P.G., Hillmann, R.C., Loschiavo, S.R., Subramanyam, B., Throne, J.E., Wright, V.F. 1990. The development and use of pitfall and probe traps for capturing insects in stored grain. *Journal of the Kansas Entomological Society*. 63(4), 506-525.
- White, N.D.G., Sinha, R.N., Muir, W.E. 1982a. Intergranular carbon dioxide as an indicator of deterioration in stored rapeseed. *Canadian Agricultural Engineering*. 24, 43-50.
- White, N.D.G., Sinha, R.N., Muir, W.E. 1982b. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. *Canadian Agricultural Engineering*. 24(1), 35-42.
- World Grain. 2025. Early spoilage detection. Sosland Publishing Co. Available at: <https://www.world-grain.com/articles/10162-early-spoilage-detection>. Accessed on 6 August 2025.
- Yuliang, B. 2012. Temperature measurement cable assembly for grain condition monitoring and control system. Patent Number CN102589749A