



การประเมินระดับการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพดในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือกด้วยการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

Estimating Infestation Level of *Sitophilus zeamais* (Maize weevil) during Paddy Storage by Carbon Dioxide Concentration Monitoring

ชูเกียรติ โชติกเสถียร¹, วัชรพล ชยประเสริฐ¹, ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์^{1*}

Chukiat Chotikasatian¹, Watcharapol Chayaprasert¹, Siwalak Pathaveerat^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University – Kamphaengsaen Campus, Nakorn Phatom, 73140

*Corresponding author: Tel: +66-34-351-896, Fax: +66-34-351-896, E-mail: fengslp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินความสามารถและข้อจำกัด สำหรับการใช้เทคนิคการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO₂ และอุณหภูมิเมล็ดธัญพืช เพื่อประเมินระดับการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพด (maize weevil) (*Sitophilus zeamais*) ภายใต้การเก็บรักษาข้าวเปลือกในถังพลาสติก PP (polypropylene) และในไซโลเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสี (galvanized steel silo) ระดับการเข้าทำลายของตัวเต็มวัยของด้วงงวงข้าวโพดต่อปริมาณข้าวเปลือก 1 kg (insect per kilogram - IPK) จำนวน 6 ระดับ (IPK = 0, 2, 3, 4, 5 และ 6 insect kg⁻¹) ถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไข สำหรับการทดลองในถังพลาสติก PP ค่าประมาณ IPK (IPK_{est}) ที่แต่ละเงื่อนไขการทดลองถูกคำนวณจากความแตกต่างระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ในไซโลที่มีแมลง (i.e., IPK = 2, 3, 4, 5 และ 6 insect kg⁻¹) และไม่มีแมลง (IPK = 0 insect kg⁻¹) และหารด้วยค่าอัตราการหายใจของตัวเต็มวัยด้วงงวงข้าวโพดหนึ่งตัว ผลการวิเคราะห์ t-test (one sample test) แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการตรวจวัดดังกล่าวสามารถประเมินระดับการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพดได้อย่างถูกต้อง เมื่อระดับการเข้าทำลายของแมลงต่ำกว่า 6 insect kg⁻¹ นอกจากนี้ ตัวอย่างข้าวเปลือกทั้งก่อนและหลังการเข้าทำลายของแมลง ในทุกเงื่อนไขการทดลองถูกสุ่มเพื่อหาลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือก ได้แก่ ปริมาณความชื้นข้าวเปลือก (moisture content), น้ำหนัก 1,000 เมล็ด (1,000 kernel weight) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสีย (% weight loss) การศึกษาครั้งนี้ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างการเสื่อมลงของลักษณะทางกายภาพและระดับการเข้าทำลาย ซึ่งนักวิจัยคาดว่าสาเหตุเนื่องจากการเข้าทำลายของแมลงตลอดระยะเวลา 4 d ของการเก็บรักษาข้าวเปลือก ไม่เพียงพอที่จะทำให้ลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือกเกิดการเสื่อมลง การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองในไซโลเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสีจำนวน 2 ไซโล ไซโลใบที่ 1 มีการจำลองการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพด (IPK = 2) ในขณะที่ไซโลใบที่ 2 ปราศจากการจำลองการเข้าทำลายของแมลง (IPK = 0 insect kg⁻¹) ในการทดลองนี้พบว่าค่า IPK_{est} จากการทดลองทั้ง 3 ซ้ำมีค่าเป็น 4.35, 10.58 และ 17.83 insect kg⁻¹ ซึ่งมีค่าสูงกว่าระดับการเข้าทำลายจริงถึง 2, 5 และ 9 เท่า สาเหตุที่ทำให้ค่า IPK_{est} มีความคลาดเคลื่อนจากระดับการเข้าทำลายจริงมาจากการเข้าทำลายของมด เชื้อรา และการออกของข้าวเปลือกภายในไซโลที่มีการจำลองการเข้าทำลายของแมลง ผลการทดลองที่ 2 แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดหลายประการของการใช้เทคนิคการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO₂ และอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก เพื่อประเมินระดับการเข้าทำลายของแมลงในสภาวะการเก็บรักษาจริง อาทิ สายพันธุ์เดียวและช่วงชีวิตของแมลง, สิ่งมีชีวิตรบกวนประเภทอื่น และระดับความมิดชิดของไซโล และสภาวะอากาศโดยรอบไซโล เพื่อให้ประเมินระดับการเข้าทำลายมีความเที่ยงตรงสูงขึ้น ข้อจำกัดเหล่านี้จำเป็นต้องถูกนำมาพิจารณาในการทำนายระดับการเข้าทำลายของแมลง

คำสำคัญ: ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, อัตราการหายใจ, แมลงศัตรูในโรงเก็บ, ระดับการเข้าทำลายของแมลง

Abstract

This research aimed at evaluating the capability and limitations of the carbon dioxide concentration and paddy temperature monitoring technique for estimating the infestation level of *Sitophilus zeamais* during paddy storage in PP (polypropylene) tanks and galvanized steel silos. Six levels of *S. zeamais* infestation, which were 0, 2, 3, 4, 5 and 6 insect per one kilogram of paddy (IPK), were investigated in the PP tank experiment. The

estimated number of insects per 1 kg of paddy (IPK_{est}) for each trial was calculated from the difference between the rate of change of CO_2 concentration in the infested silo (i.e., $IPK = 2, 3, 4, 5$ and 6 insect kg^{-1}) and the insect-free silo ($IPK = 0 \text{ insect kg}^{-1}$) divided by the respiration rate of one *S. zeamais*. One sample *t*-test analyses showed that the technique could estimate the infestation levels of *S. zeamais* correctly when the infestation level was lower than 6 insect kg^{-1} . In the PP tank experiment, the physical properties of the paddy (i.e., moisture content, 1,000 kernel weight and percentage of weight loss) were determined before and after all replicates. No significant correlation between the deterioration of the physical properties and the infestation levels was found. However, this was to the short storage period (i.e., 4 d). The second experiment was conducted in two galvanized steel silos. The insect infestation level (i.e., the actual IPK) was at 2 insect kg^{-1} in the first silo while no insect was introduced ($IPK = 0 \text{ insect kg}^{-1}$) in the second silo. The IPK_{est} in the first silo from the first, second and third trials were 4.35, 10.58, and 17.83 insects kg^{-1} , respectively, which were approximately 2, 5 and 9 times higher than the actual IPK s. This discrepancy in IPK was caused by unexpected infestations of ants and mold in the first silo. In conclusion, the second experiment highlighted critical limitations of the monitoring technique proposed by this study, including the species and life stages of infesting insects, other type of pest, and air-tightness of and environment around the silo. In order to increase the precision of the IPK estimation, these limitations must be incorporated in the calculation.

Keywords: CO_2 concentration, Respiration rate, Stored product insect, Insect infestation level

1 บทนำ

การสูญเสียผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยวเนื่องมาจากการเข้าทำลายของแมลงศัตรูในโรงเก็บระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืชเป็นปัญหาสำคัญซึ่งนักวิจัยหลายกลุ่ม (Sinha and Sinha, 1992; Tefera et al., 2011; Strelec et al., 2012; Baoua et al., 2015; Keskin and Ozkaya, 2015; Annis, 2016) ได้ทำการศึกษาระดับของการสูญเสียทั้งในเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative) ปัจจุบัน วิธีการจัดการแมลงศัตรูในโรงเก็บคือ การรมยาด้วยสารเคมี (i.e., เมทิลโบรไมด์ (methyl bromide), ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (hydrogen cyanide), ฟอสฟีน (phosphine) etc.) อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีโดยไม่จำเป็นจะส่งผลให้แมลงสร้างความต้านทานต่อสารเคมี (Nayak et al., 2003; Benhalima et al., 2004; Pimentel et al., 2009) Rajendran (2005) และ Neethirajan et al. (2007) ได้กล่าวสรุปถึงเทคนิคที่ใช้สำหรับการประเมินการมีแมลงเข้าทำลายกับเมล็ดธัญพืชได้แก่ วิธีการทางเสียง (acoustic methods), เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (near-infrared spectroscopy (NIR)), รังสีเอกซ์ (X-ray) และ ระบบตรวจสอบอัตโนมัติจากกล้อง (machine vision) เป็นต้น แต่เทคนิคเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดสำหรับการใช้งานเช่น ราคาสูง, ธัญพืชต้องถูกสุ่มตัวอย่างเพื่อมาตรวจวัด, ประสิทธิภาพของเครื่องมือมีความอ่อนไหวต่อปริมาณความชื้นของเมล็ดธัญพืช เป็นต้น Hagstrum and Flinn (2014) ได้แนะนำว่าเมล็ดธัญพืชควรได้รับการรมยา หากตรวจพบการเข้าทำลายของแมลง $1-2 \text{ insect kg}^{-1}$ ในระหว่างการเก็บรักษา หลายงานวิจัยได้แสดงถึงวิธีการประเมินระดับการเข้าทำลายของแมลงในหน่วยของจำนวนตัวเต็มวัยของแมลงต่อน้ำหนักเมล็ดธัญพืช 1 kg ซึ่งใช้เครื่องมือที่

มีความแตกต่างกันเช่น หลาวฉ่าข้าว (grain trier), ถ้วยพลาสติก (plastic cup) และโพรบดักจับแมลง (probe trap) (White et al., 1990 refer to Wright and Mills, 1985), Insector[®] system (Jian et al., 2014), และ หลาวฉ่าข้าว (gravity spear) (Wilkin and Felurat-Lessard, 1990)

เทคโนโลยีอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO_2 (carbon dioxide) ในปัจจุบันได้ถูกประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการเน่าเสียของเมล็ดธัญพืชในระหว่างการเก็บรักษา (Ileleji et al., 2006; Maier et al., 2006; Maier et al., 2010) Howe and Oxley (1944) และ Rajendran (2005) ได้กล่าวสรุปว่าการตรวจสอบการเข้าทำลายผลผลิตเกษตรของแมลงศัตรูในโรงเก็บสามารถระบุได้ด้วยการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO_2 Chotikasatian et al. (2017) ได้ทดลองวัดอัตราการหายใจของด้วงวงข้าวโพด (maize weevil) (*Sitophilus zeamais*), มอดหัวป้อม (lesser grain borer) (*Rhyzopertha dominica*) และมอดแป้ง (red flour beetle) (*Tribolium castaneum*) ที่อุณหภูมิ 25, 30 และ $36^\circ C$ ในโถแก้วดูดความชื้น (glass desiccator) และทดลองเพื่อประเมินประชากรแมลงระหว่างเก็บรักษาข้าวเปลือกในถังไฟเบอร์กลาส (fiberglass tank) ความจุ 1.618 m^3 โดยใช้ข้อมูลความเข้มข้นแก๊ส CO_2 และอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก ผลการศึกษาของ Chotikasatian et al. (2017) แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO_2 สำหรับประเมินประชากรแมลงในช่วงเริ่มต้นของการเข้าทำลาย (i.e., 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5 และ $2 \text{ insect ต่อ น้ำหนักข้าวเปลือก } 1 \text{ kg}$) และแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ให้ความถูกต้องได้เทียบเคียงกับการประเมินประชากรด้วยเทคนิคการใช้หลาวฉ่าข้าว, โพรบดักจับแมลง และ Insector[®] system อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าว

ยังเป็นเพียงการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (lab scale) ซึ่งปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้ในระหว่างแต่ละการทดลองเก็บรักษา คือ 800 kg และไซโลจำลองถูกติดตั้งไว้ในร่มภายในอาคารทดลอง ทดลอง ดังนั้น เพื่อขยายผลการศึกษาของ Chotikasatian et al. (2017) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถ และข้อจำกัดของการใช้เทคนิคการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO₂ และอุณหภูมิของเมล็ดธัญพืช ในการประเมินระดับการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพด ระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือกในสภาวะแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับในทางปฏิบัติมากขึ้น

2 อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 การทดลอง ในการทดลองที่ 1 ผู้วิจัยประเมินระดับการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพดด้วยเทคนิคการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO₂ และอุณหภูมิของเมล็ดธัญพืช โดยการจำลองการเก็บรักษาข้าวเปลือกในไซโลจำลองซึ่งเป็นถังพลาสติก PP (polypropylene) ปริมาตร 0.097 m³ การทดลองที่ 2 มีแนวทางการทดลองที่คล้ายกับการทดลองที่ 1 แต่ดำเนินการทดลองในไซโลเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสี (galvanized steel silo) ปริมาตร 10.72 m³

2.1 การเพาะเลี้ยงแมลง

แมลงศัตรูในโรงเก็บที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้คือ ด้วงงวงข้าวโพด ตัวเต็มวัยของด้วงงวงข้าวโพดที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงแมลงถูกนำมาจากสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร ข้าวกล้องหอมมะลิ (brown jasmine rice) ที่ความชื้น 12.5–13.5% ถูกบรรจุลงถุงซิปล็อก (Ziploc® bag) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 ± 2°C อย่างน้อย 1 month เพื่อกำจัดแมลงปะปนในข้าว หลังจาก 1 month ถุงซิปล็อกซึ่งบรรจุข้าวกล้องหอมมะลิถูกย้ายมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 3°C) ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงแมลงของการศึกษานี้เหมือนกับขั้นตอนที่ถูกกล่าวใน Chotikasatian et al. (2017, 2014) ข้าวกล้องหอมมะลิที่ผ่านการกำจัดแมลงแล้วจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1) ใช้สำหรับเพาะเลี้ยงแมลง และ 2) ใช้เป็นอาหารของแมลง ในระหว่างการทดลอง ในการเพาะเลี้ยงด้วงงวงข้าวโพด ตัวเต็มวัยของแมลงจำนวน 500 insect ถูกบรรจุลงในโหลพลาสติกปริมาตร 270 ml พร้อมข้าวกล้องปริมาณ 250 g เป็นเวลา 3 d เพื่อให้วางไข่ หลังจากนั้น ตัวเต็มวัยจะถูกแยกออกจากข้าวกล้อง โหลพลาสติกบรรจุข้าวกล้องที่ถูกแมลงวางไข่ไว้จะถูกนำมาเก็บรักษาไว้ในสภาวะบรรยากาศ (25–35°C) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 month ไข่จะพัฒนาเป็นตัวเต็มวัย ตัวเต็มวัยของแมลงซึ่งเกิดจากการเพาะเลี้ยง และมีอายุไม่เกิน 1 month จะถูกนำไปใช้ในการทดลองทั้งสอง

2.2 การเตรียมข้าวเปลือก

ข้าวเปลือกพันธุ์ กข 41 (Horm Prachin Buri) และ กข 51 (Horm Prachin Buri) ซึ่งถูกสั่งซื้อจากโรงสีในพื้นที่ใกล้เคียง อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ถูกใช้สำหรับการทดลองใน

ถังพลาสติก PP และในไซโลเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสีตามลำดับ เพื่อกำจัดแมลงศัตรูในโรงเก็บซึ่งอาจติดมากับข้าวเปลือก ข้าวเปลือกพันธุ์ กข 41 ถูกรมยาด้วยแก๊สฟอสฟีน (phosphine) ซึ่งได้จากเม็ดยาอลูมิเนียมฟอสไฟด์ (aluminium phosphide tablet) ที่อัตรา 4 tablet m⁻³ เป็นเวลา 14 d ในถังไฟเบอร์กลาส (fiberglass) ปริมาตร 1.618 m³ เนื่องจากลักษณะของไซโลเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสีมีรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กหลายจุด ก่อนเริ่มต้นการรมยากับข้าวเปลือกพันธุ์ กข 51 ไซโลเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสีจะถูกซีล (seal) และความมิดชิด (airtightness) ของไซโลถูกประเมินด้วยการทดสอบความดันตามขั้นตอนใน AS2628-2010 standard (2010) จากผลการทดสอบความดัน ระยะเวลาที่ความดันลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่าความดันเริ่มต้น (pressure half-life: PHL) ของไซโลทั้งสองมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 3–8 s หลังจากนั้น ข้าวเปลือกพันธุ์ กข 51 ถูกขนถ่ายลงในไซโลและถูกรมยาด้วยแก๊ส CO₂ โดยรักษาระดับความเข้มข้นไว้ในช่วง 35–60% ตลอดระยะเวลา 14 d เพื่อกำจัดแมลงศัตรูในโรงเก็บที่ติดมากับข้าวเปลือก หลังจากเสร็จสิ้นการรมยากับข้าวเปลือกทั้งสองสายพันธุ์ ผู้ผลิตระบายอากาศ (manufacturer unknown) ซึ่งมีความเร็วรอบ 2,850 rpm และมีเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 0.16 m จะถูกติดตั้งและเป่าอากาศเข้าสู่ถังไฟเบอร์กลาสและไซโลเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสี เพื่อระบายแก๊สฟอสฟีนและแก๊ส CO₂ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 24 h

2.3 แผนการทดลอง

ในการทดลองที่ 1 ข้าวเปลือกที่ผ่านการรมยาจากถังไฟเบอร์กลาสถูกแบ่งบรรจุลงในถังพลาสติก PP จำนวน 6 ถัง Figure 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ภายในถังพลาสติก PP ข้าวเปลือกปริมาณ 50 kg ถูกบรรจุลงในถังพลาสติก PP แต่ละถัง ตัวเต็มวัยของด้วงงวงข้าวโพดจำนวนตามที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขการทดลองจะถูกปล่อยที่ตำแหน่งบนผิวหน้าของข้าวเปลือกให้เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในกองข้าวเปลือก CO₂ data logger (CO210, Extech Instrument Corp., Nashua, New Hampshire, USA) ถูกติดตั้งอยู่บนผิวหน้าของกองข้าวเปลือก และบันทึกค่าความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ทุกๆ 2 min temperature data logger (SSN-22, Yuwen Sensor System Co. Ltd., Shenzhen, China) ถูกฝังที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระดับความสูงของถังพลาสติก PP เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกทุกๆ 2 min ปากถังพลาสติก PP ถูกปิดด้วยแผ่นอะคริลิก (acrylic plate) หนา 3 mm และรอยต่อระหว่างแผ่นอะคริลิกและขอบปากถังถูกซีลด้วยซิลิโคนยาแนว (silicone sealant)

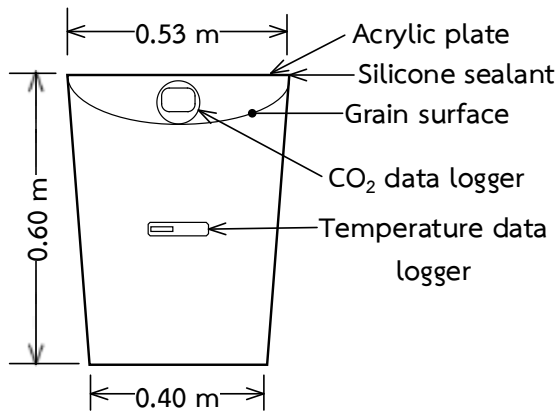


Figure 1 Equipment setup for the first experiment in PP tanks.

เงื่อนไขการทดลองถูกกำหนดให้เป็นระดับการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพดซึ่งแสดงในรูปของอัตราส่วนของจำนวนตัวเต็มวัยของด้วงงวงข้าวโพดต่อปริมาณข้าวเปลือก 1 kg (insect per kilogram - IPK) จำนวน 6 ระดับคือ IPK = 0, 2, 3, 4, 5 และ 6 insect kg⁻¹ ดังนั้น การทดลองที่ 1 ตัวเต็มวัยของด้วงงวงข้าวโพดจำนวน 0, 100, 150, 200, 250 และ 300 ตัว จะถูกปล่อยให้เคลื่อนที่อย่างอิสระในถังที่ 1 ถึง 6 ตามลำดับ ผู้วิจัยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ซึ่งในแต่ละซ้ำ ความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ภายในถังถึงจะถูกบันทึกเป็นระยะเวลา 4 d เมื่อการทดลองแต่ละซ้ำถูกดำเนินการเสร็จสิ้น ข้าวเปลือกและแมลงภายในถังพลาสติก PP จะไม่ถูกใช้ในการทดลองในซ้ำต่อไป เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นการทดลองแต่ละซ้ำ แมลงกำลังปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมใหม่ ความเข้มข้นแก๊ส CO₂ จึงมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน ในการประมวลผลการทดลองในแต่ละซ้ำและแต่ละถัง ข้อมูลในช่วง 24 h แรกของการทดลองจะถูกตัดออก เพื่อลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ที่ไม่แน่นอนในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้น ข้อมูลความเข้มข้นแก๊ส CO₂ หลังจาก 24 h ของแต่ละซ้ำและแต่ละถัง จะถูกนำมาทำ curve fitting ด้วยสมการที่ 1 (Chotikasatian et al., 2017)

$$c = at \quad (1)$$

โดยที่ c คือ ความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ($\mu\text{LCO}_2 (\text{L}_{\text{air}})^{-1}$), a คือ ความชัน (slope) และ t คือ เวลา (h) ค่าความชันที่ได้จากการทำ curve fitting คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ในหน่วย $\mu\text{LCO}_2 (\text{L}_{\text{air}})^{-1} \text{ h}^{-1}$ (ไมโครลิตรคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลิตรอากาศต่อชั่วโมง) ในการทดลองนี้ ข้าวเปลือกในแต่ละถังถูกสมมติให้มีอัตราการหายใจที่เท่ากัน เนื่องจากข้าวเปลือกในแต่ละถังเป็นข้าวเปลือกชุดเดียวกันที่ถูกแบ่งมาจากถังไฟเบอร์กลาส ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ในถังที่มีการจำลองการเข้าทำลาย (i.e., IPK = 2, 3, 4, 5 และ 6 insect kg⁻¹) และถังที่ไม่มีการเข้าทำลายของแมลง (IPK = 0 insect kg⁻¹) จึงถูกกำหนดเป็นอัตราการหายใจ

จากประชากรแมลงทั้งหมดที่อยู่ในถังที่มีการจำลองการเข้าทำลาย เพื่อให้ได้ค่าประมาณอัตราส่วนของจำนวนด้วงงวงข้าวโพดต่อปริมาณข้าวเปลือก 1 kg (IPK_{est}) ของถังที่ 2 ถึง 6 ค่าความชันจากการทำ curve fitting จะถูกใช้เพื่อการคำนวณตามสมการที่ 2 (Chotikasatian et al., 2017)

$$\text{IPK}_{\text{est}} = \frac{a_i V_{\text{void},i} - a_p V_{\text{void},p}}{rm} \quad (2)$$

โดยที่ a_i และ a_p คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ในถังที่มีแมลงและถังที่ไม่มีแมลง (IPK = 0) ($\mu\text{LCO}_2 (\text{L}_{\text{air}})^{-1} \text{ h}^{-1}$) ตามลำดับ, $V_{\text{void},i}$ และ $V_{\text{void},p}$ คือ ปริมาตรช่องว่างอากาศทั้งหมดภายในถังที่มีแมลงและถังที่ไม่มีแมลง (L_{air}) ตามลำดับ, m คือ มวลของข้าวเปลือกภายในถัง (kg) และ r คือ อัตราการหายใจของตัวเต็มวัยของด้วงงวงข้าวโพด ($\mu\text{LCO}_2 \text{ insect}^{-1} \text{ h}^{-1}$) ช่องว่างอากาศทั้งหมดภายในไซโล (V_{void}) ถูกคำนวณจากผลต่างระหว่างปริมาตรไซโลว่างเปล่าและปริมาตรของแข็งที่ถูกบรรจุอยู่ในไซโล ปริมาตรของแข็งดังกล่าวประกอบไปด้วยตัวเต็มวัยด้วงงวงข้าวโพด, CO₂ data logger, temperature data logger และข้าวเปลือก ปริมาตรของแข็งของข้าวเปลือกถูกหาด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ (water displacement) (Anonymous, 2016) ปริมาตรของแข็งของ CO₂ data logger และ temperature data logger ถูกหาโดยการใช้วิธีการวัดอัตราการลดลงของความดัน (pressure decay rate) (Chayaprasert et al., 2014) ปริมาตรของแข็งของแมลงถูกหาโดยการสมมติให้แมลงมีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยมและการวัดความกว้าง, ความยาว และความสูงของแมลงจำนวน 50 ตัว ด้วยเวอร์เนียแคลิเปอร์ (Vernier caliper) (Mitutoyo Corp., Kawasaki, Japan) ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของข้าวเปลือกตลอดระยะเวลา 4 d ซึ่งถูกบันทึกโดย temperature data logger จะถูกนำมาใช้เป็นค่าอุณหภูมิอ้างอิงสำหรับการเลือกค่าอัตราการหายใจของด้วงงวงข้าวโพด (r) จากผลการทดลองของ Chotikasatian et al. (2017) ค่าเฉลี่ย IPK_{est} ของแต่ละระดับการเข้าทำลายจะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วย t -test (one sample test) เทียบกับระดับการเข้าทำลายจริง

เนื่องจากระดับการเข้าทำลายของแมลงส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพข้าวเปลือก ผู้วิจัยจึงได้ตรวจวัดลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือกได้แก่ ปริมาณความชื้นข้าวเปลือก (moisture content), น้ำหนัก 1,000 เมล็ด (1,000 kernel weight) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสีย (% weight loss) และพยายามหาความสัมพันธ์ระหว่างการเสื่อมลงของลักษณะทางกายภาพและระดับการเข้าทำลาย ทั้งนี้ หากทราบความสัมพันธ์ดังกล่าว การประเมินการเสื่อมลงของลักษณะทางกายภาพอาจทำได้ด้วยการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ลักษณะทางกายภาพดังกล่าวถูกตรวจวัดทั้งก่อนและหลังการทดลองของแต่ละซ้ำและแต่ละถัง ลักษณะทางกายภาพของแต่ละถังคือ ค่าเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่าง

ผู้วิจัยจะสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกด้วยหลาวฉ่าข้าว (sampling spear) จำนวน 3 ตำแหน่งจากแต่ละถัง ที่ระดับความลึกกึ่งกลางถึงพลาสติก PP หลาวฉ่าข้าวจะถูกแทงลงในแนวตั้งที่ตำแหน่งมุมของรูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีระยะห่างระหว่างมุมประมาณ 0.30 m ตัวอย่างข้าวเปลือกแต่ละตำแหน่งจะถูกหาปริมาณความชื้นข้าวเปลือก, น้ำหนัก 1,000 เมล็ด และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสียสำหรับปริมาณความชื้น ข้าวเปลือกประมาณ 10 g จะถูกชั่งด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.01 g จากนั้น ตัวอย่างข้าวเปลือกจะถูกอบในตู้อบลมร้อน (FD 115 E2, Binder GmbH, Tuttlingen, Germany) ที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 16 h (ASABE, 2012) น้ำหนักน้ำที่สูญเสียไปจากการอบจะถูกคำนวณเป็น % w.b. (percentage of moisture content wet basis) ในเมล็ดพืช นอกจากนี้ ข้าวเปลือกที่ได้จากการสุ่มแต่ละตำแหน่งจะถูกลดปริมาณโดยการแบ่งตัวอย่างให้ได้จำนวน 1,000 เมล็ด และชั่งด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.01 g สำหรับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสีย ข้าวเปลือกที่ได้จากการสุ่มแต่ละตัวอย่างจะถูกลดปริมาณโดยการแบ่งตัวอย่างให้ได้จำนวน 100 เมล็ด ข้าวเปลือกจำนวน 100 เมล็ด ที่ได้จะถูกจำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือ เมล็ดปกติ และเมล็ดถูกทำลาย เมล็ดปกติหมายถึง เมล็ดข้าวเปลือกเต็มเมล็ด, ไม่แตกหัก, ไม่ถูกเจาะทำลายโดยแมลงหรือไม่มีตัวอ่อนแมลงอยู่ภายใน เมล็ดถูกทำลายหมายถึง เมล็ดข้าวเปลือกที่แตกหัก, ถูกเจาะทำลายโดยแมลง หรือมีตัวอ่อนแมลงอยู่ภายใน เมล็ดทั้ง 2 ประเภทจะถูกชั่งน้ำหนัก เปอร์เซ็นต์เมล็ดถูกทำลายจะถูกคำนวณตามกรรมวิธีของ Adams and Schulten (1978)

$$\% \text{weight loss} = \frac{(UN_d) - (DN_u)}{U(N_d + N_u)} 100 \quad (3)$$

โดยที่ D และ U คือ น้ำหนักของเมล็ดปกติและเมล็ดถูกทำลาย (g) ตามลำดับ และ N_d และ N_u คือ จำนวนเมล็ดปกติและเมล็ดถูกทำลาย ตามลำดับ ข้อมูลเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือกก่อนและหลังการทดลองของแต่ละระดับการเข้าทำลายจะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วย t -test (paired sample test) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลระหว่างก่อนและหลังการทดลอง

การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองในไซโลเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสีจำนวน 2 ไซโล ซึ่งถูกติดตั้งอยู่กลางแจ้ง บริเวณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ข้าวเปลือกซึ่งถูกบรรจุลงในทั้ง 2 ไซโล ถูกกำหนดให้มีปริมาณไซโลละ 3.96 ton ผู้วิจัยจำลองการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพดในไซโลใบที่ 1 แต่ไซโลใบที่ 2 ปราศจากการเข้าทำลายของแมลง จำนวนตัวเต็มวัยของด้วงงวงข้าวโพดสำหรับการทดลองนี้มีจำนวนทั้งหมด 7,912 ตัว (2 insect kg^{-1}) สำหรับจำลองการเข้าทำลาย ตัวเต็มวัยของด้วงงวงข้าวโพดในไซโลใบที่ 1 ถูกกำหนดให้อยู่ในพื้นที่จำกัด ตัวเต็มวัยของด้วงงวงข้าวโพด

พร้อมข้าวกล้องจะถูกแบ่งใส่ลงในภาชนะพลาสติกทรงกระบอกความจุ $3.33 \times 10^{-1} \text{ l}$ (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.08 m) จำนวน 9 ใบ ภาชนะพลาสติกมีฐานเป็นแผ่นอะคริลิก (acrylic) หนา 3 mm ฝาและฐานของภาชนะพลาสติกถูกตัดออกเป็นช่องวงกลม (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.06 m) และปิดด้วยตาข่ายลวดไร้สนิม (stainless steel mesh) (mesh size 100) (Figure 2a) ภาชนะพลาสติกทั้ง 9 ใบ จะถูกฝังกลบในไซโลใบที่ 1 ที่ระดับความลึก 0.3 m ใต้ผิวด้านบนของข้าวเปลือก การจัดวางภาชนะพลาสติกบรรจุแมลงมีลักษณะดัง Figure 2b คือ ภาชนะพลาสติก 8 ใบอยู่ในแนวเส้นรอบวงกลมซึ่งมีผ่านศูนย์กลาง 1.04 m และภาชนะพลาสติกอีกหนึ่งใบถูกฝังที่จุดศูนย์กลางของไซโล CO_2 data logger ถูกติดตั้งอยู่บนผิวด้านบนของกองข้าวเปลือกภายในไซโลทั้งสอง (Figure 2c) และบันทึกค่าความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ทุก ๆ 10 min temperature sensor cable (iGrain monitoring system, Crop-Protector KS, Copenhagen, Denmark) ถูกติดตั้งเข้ากับไซโลทั้งสอง เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 0.5 m ใต้ผิวด้านบนของข้าวเปลือก ทุกๆ 10 min ปากด้านบนไซโลถูกปิดด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 6 mm และรอยต่อถูกซีลด้วยอะคริลิกยาแนว ผู้วิจัยดำเนินการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ต่อเนื่องกัน แต่ละซ้ำของการทดลองใช้ระยะเวลา 4 d ก่อนเริ่มการทดลองในซ้ำถัดไป พัดลมระบายอากาศถูกติดตั้งกับไซโลทั้งสอง เพื่อระบายแก๊ส CO_2 ออกจากไซโลเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 2 h ทุกซ้ำการทดลองใช้แมลงชุดเดียวกัน การประมวลผลข้อมูลเพื่อหาค่า IPK_{est} ในแต่ละซ้ำถูกดำเนินการเช่นเดียวกับการประมวลผลในการทดลองที่ 1 อุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ระดับ 0.5 m ถูกใช้เป็นอุณหภูมิอ้างอิงสำหรับการเลือกค่าอัตราการทำลายของด้วงงวงข้าวโพด (r) จากผลการทดลองของ Chotikasatian et al. (2017) ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกภายในไซโลใบที่ 1 และ 2 มีค่า 11.98 ± 0.26 และ $12.18 \pm 0.36\% \text{ w.b.}$ ตามลำดับ (ค่าเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่าง จากวิธีวัดความชื้นตามมาตรฐาน ASABE (2012)) ก่อนการฝังภาชนะพลาสติกบรรจุแมลง ผู้วิจัยบันทึกความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ในไซโลทั้ง 2 เพื่อยืนยันว่าอัตราการหายใจของข้าวเปลือกระหว่างไซโลไม่มีความแตกต่างกัน

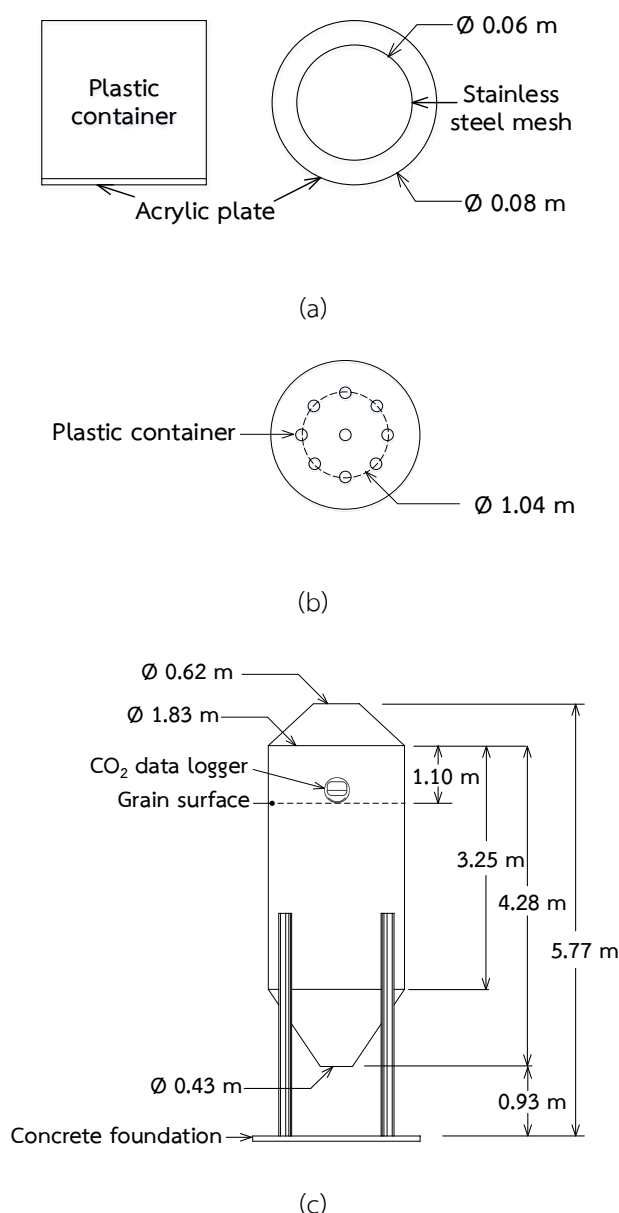


Figure 2 (a) The schematic diagram of one of the plastic container, (b) placement of nine plastic containers in the galvanized steel silo with simulated insect infestation and (c) the silo's dimensions.

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการทดลองในถังพลาสติก PP

Figure 3 แสดงตัวอย่างผลการบันทึกค่าความเข้มข้นแก๊ส CO_2 จากการทดลองที่ 1 ซ้ำที่ 3 ของแต่ละเงื่อนไขของระดับการเข้าทำลาย (i.e., $\text{IPK} = 0, 2, 3, 4, 5$ และ 6 insect kg^{-1}) ความเข้มข้นแก๊ส CO_2 จากการทดลองของทุกซ้ำและทุกเงื่อนไขมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง และค่า R^2 (coefficient of determination) ของการทำ curve fitting มีค่าไม่น้อยกว่า 0.97 ซึ่งผลการทดลองของ (Chotikasatian et al. 2017) มีลักษณะเช่นเดียวกัน ความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ที่เงื่อนไข $\text{IPK} = 2, 3, 4, 5$ และ 6 insect kg^{-1} มีอัตราการ

เปลี่ยนแปลงสูงกว่าที่เงื่อนไข $\text{IPK} = 0 \text{ insect kg}^{-1}$ อย่างเห็นได้ชัด เมื่อจำนวนแมลงเข้าทำลายสูงขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO_2 มีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วย Damcevski et al. (1998) และ Chotikasatian et al. (2017) ได้ทำการทดลองวัดอัตราการผลิตแก๊ส CO_2 ของตัวเต็มวัยของแมลงในระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืช ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ของเมล็ดธัญพืชที่มีการเข้าทำลายของแมลงมีค่าสูงกว่าเมล็ดพืชที่ปราศจากการเข้าทำลายของแมลง ดังนั้นการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO_2 สามารถใช้ในการแจ้งเตือนการมีแมลงเข้าทำลายข้าวเปลือกได้ โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ที่สูงขึ้นจะแสดงถึงแนวโน้มของปริมาณแมลงเข้าทำลายที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

Figure 4 แสดงตัวอย่างเส้นแนวโน้มของอุณหภูมิภายในถังพลาสติก PP อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางภายในถังพลาสติก PP ที่ทุกเงื่อนไขและทุกซ้ำค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองและเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $33.1\text{--}33.5^\circ\text{C}$ Chotikasatian et al. (2017) ทำการทดลองวัดอัตราการหายใจของตัวเต็มวัยของด้วงงวงข้าวโพดที่อุณหภูมิ 25, 30 and 36°C ดังนั้น อัตราการหายใจของด้วงงวงข้าวโพด (r) ที่อุณหภูมิ 36°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ $9.57 \mu\text{L CO}_2 \text{ insect}^{-1} \text{ h}^{-1}$ จึงถูกเลือกใช้ในการคำนวณหาค่า IPK_{est} ตามสมการที่ 2 Table 1 แสดงค่า IPK_{est} ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2 และผลการวิเคราะห์ t -test (one sample test) ค่า IPK_{est} ที่ระดับการเข้าทำลายของแมลงเป็น 5 insect kg^{-1} มีค่าต่ำกว่าระดับการเข้าทำลายจริง แต่ที่ระดับการเข้าทำลายอื่นๆ ค่าการประมาณมีค่าสูงกว่าระดับการเข้าทำลายจริงที่ระดับการเข้าทำลายของแมลงต่ำกว่า 5 insect kg^{-1} ค่า IPK_{est} ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P > 0.05$ เมื่อเปรียบเทียบกับระดับการเข้าทำลายจริง ทั้งนี้ ที่ระดับการเข้าทำลาย 6 insect kg^{-1} ค่า IPK_{est} มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P < 0.05$ เมื่อเปรียบเทียบกับระดับการเข้าทำลายจริง ผลการวิเคราะห์ทางสถิตินี้แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO_2 และอุณหภูมิเมล็ดธัญพืช ภายใต้เงื่อนไขการทดลองของงานวิจัยนี้ สามารถประเมินระดับการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพดได้อย่างถูกต้อง เมื่อระดับการเข้าทำลายของแมลงต่ำกว่า 6 insect kg^{-1}

Table 2, 3 และ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ t -test (paired sample test) กับข้อมูลน้ำหนักข้าวเปลือก 1,000 เมล็ด, เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสีย และความชื้นข้าวเปลือก ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการจำลองการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพดในการทดลองที่ 1 ถึงแม้ว่าเกือบทุกระดับการเข้าทำลาย น้ำหนักข้าวเปลือก 1,000 เมล็ดก่อนการเข้าทำลายมีค่าสูงกว่าหลังการเข้าทำลาย เมื่อถูกวิเคราะห์ทางสถิติ น้ำหนักข้าวเปลือก 1,000 เมล็ดทั้งก่อนและหลังการเข้าทำลายไม่มีความแตกต่างกันทางนัยสำคัญทางสถิติที่ $P > 0.05$ ในทำนองเดียวกัน ที่ทุกระดับการเข้าทำลาย ทั้งเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสียและความชื้นข้าวเปลือก ก่อนและหลัง

การเข้าทำลายไม่มีความแตกต่างกันทางนัยสำคัญทางสถิติที่ $P>0.05$ การศึกษาครั้งนี้ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างการเสื่อมลงของลักษณะทางกายภาพและระดับการเข้าทำลาย ซึ่งนักวิจัยคาดว่าสาเหตุเนื่องจากการเข้าทำลายโดยด้วงวงข้าวโพดตลอดระยะเวลา 4 d ของการเก็บรักษาข้าวเปลือก ไม่เพียงพอที่จะทำให้ลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือกเสื่อมลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงยังไม่สามารถให้ข้อสรุปได้ว่า การประเมินการเสื่อมลงของลักษณะทางกายภาพจะสามารถทำได้ด้วยการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO_2 หรือไม่

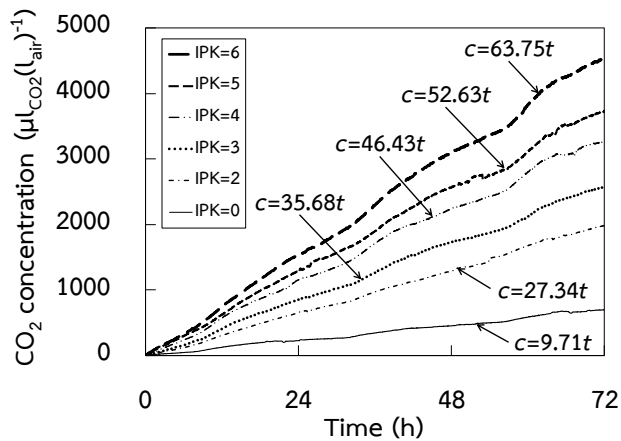


Figure 3 Examples of CO_2 concentration curves collected from all IPK conditions of the third replication of the first experiment.

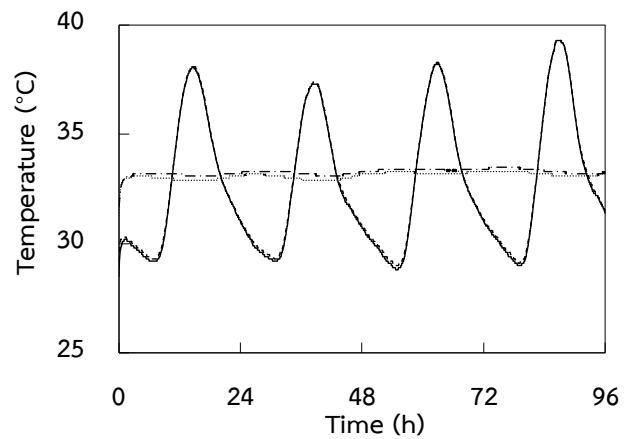


Figure 4 Temperature profiles in the PP tanks with IPK = 0 and IPK = 4 during the third replication in the first experiment. The dotted and solid lines indicate grain mass and head space temperatures, respectively, in the IPK = 0 tank. The dash dotted and dash lines indicate grain mass and head space temperatures, respectively, in the IPK = 4 tank.

Table 1 Results of one sample t -test analyses on the IPK_{est} (average $\pm$ SD, $n = 3$) in the first experiment.

Actual infestation level (insect kg^{-1})	IPK_{est} (insect kg^{-1})	t-test	Sig.
2	2.19 ± 0.33	1.00	0.42
3	3.15 ± 0.50	0.51	0.66
4	4.38 ± 0.30	2.20	0.16
5	4.90 ± 0.79	-0.22	0.85
6	6.73 ± 0.19	6.83	0.02 ^a

^aThe difference between the actual IPK and IPK_{est} is statistically significant ($P<0.05$).

Table 2 Results of paired sample *t*-test analyses on the 1,000 kernel weight (g) (average $\pm$ SD, *n* = 3).

Infestation level (insect kg ⁻¹)	1,000 kernel weight (g)			
	Before introducing insects	4 d after introducing insects	<i>t</i> -test	Sig.
0	26.99 $\pm$ 0.46	26.64 $\pm$ 0.34	0.93	0.45
2	27.13 $\pm$ 0.80	26.83 $\pm$ 0.45	0.87	0.48
3	26.73 $\pm$ 1.33	26.71 $\pm$ 0.47	0.01	0.99
4	26.26 $\pm$ 0.58	27.19 $\pm$ 0.16	-2.29	0.15
5	28.12 $\pm$ 0.41	27.13 $\pm$ 1.00	1.62	0.25
6	27.25 $\pm$ 1.21	26.45 $\pm$ 0.60	1.70	0.23

 Table 3 Results of paired sample *t*-test analyses on the weight loss (%) (average $\pm$ SD, *n* = 3).

Infestation level (insect kg ⁻¹)	Weight loss (%)			
	Before introducing insects	4 d after introducing insects	<i>t</i> -test	Sig.
0	1.87 $\pm$ 2.89	0.50 $\pm$ 0.27	0.91	0.46
2	2.92 $\pm$ 4.72	0.31 $\pm$ 0.18	0.95	0.44
3	0.67 $\pm$ 0.22	0.93 $\pm$ 0.93	-0.41	0.72
4	2.70 $\pm$ 3.88	0.11 $\pm$ 0.09	1.17	0.36
5	1.18 $\pm$ 1.17	0.30 $\pm$ 0.15	1.25	0.34
6	0.47 $\pm$ 0.32	0.79 $\pm$ 0.61	-0.74	0.53

 Table 4 Results of paired sample *t*-test analyses on the moisture content (%_{w.b.}) (average $\pm$ SD, *n* = 3).

Infestation level (insect kg ⁻¹)	Moisture content (% _{w.b.})			
	Before introducing insects	4 d after introducing insects	<i>t</i> -test	Sig.
0	12.18 $\pm$ 0.63	11.98 $\pm$ 0.22	0.43	0.71
2	12.69 $\pm$ 0.80	12.33 $\pm$ 0.53	2.24	0.15
3	12.33 $\pm$ 0.94	11.97 $\pm$ 0.63	2.01	0.18
4	12.78 $\pm$ 0.72	12.34 $\pm$ 0.19	1.45	0.28
5	12.72 $\pm$ 0.54	12.13 $\pm$ 0.75	2.25	0.15
6	12.8 $\pm$ 0.88	12.67 $\pm$ 0.35	0.32	0.78

3.2 ผลการทดลองในไซโลเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสี

Figure 5 แสดงเส้นความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ในไซโลทั้งสองซึ่งปราศจากการเข้าทำลายของด้วงวงข้าวโพด (i.e., ก่อนเริ่มการจำลองการเข้าทำลายของด้วงวงข้าวโพดกับไซโลใบที่ 1) อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ของไซโลใบที่ 1 และ 2 คือ 6.99 และ 8.16 $\mu\text{L}_{\text{CO}_2} (\text{L}_{\text{air}})^{-1} \text{h}^{-1}$ ตามลำดับ ไซโลใบที่ 1 และ 2 มีค่า R² ของการ fitted curve เท่ากับ 0.93 และ 0.97 ตามลำดับ ความแตกต่างของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ระหว่างไซโลใบที่ 1 และ 2 เป็น 15% ผู้วิจัยจึงอนุมานว่าข้าวเปลือกในไซโลทั้งสองมีอัตราการหายใจที่เท่ากัน ถึงแม้ว่าตามแผนการทดลองแต่ละซ้ำ ข้อมูลความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ใน

ไซโลจะต้องถูกบันทึกเป็นระยะเวลา 4 d แต่เนื่องจากเกิดปัญหาในการจ่ายไฟฟ้าไปยัง CO₂ data logger ทำให้การทดลองซ้ำที่ 1 มีข้อมูลความเข้มข้นถูกบันทึกได้ 84 h นอกจากนี้ หลังจาก 84 h สำหรับการทดลองซ้ำที่ 2 และ 36 h สำหรับการทดลองซ้ำที่ 3 ภายในไซโลที่มีการจำลองการเข้าทำลายของแมลงมีความเข้มข้นแก๊ส CO₂ สูงกว่า 9,999 ppm CO₂ data logger จึงไม่สามารถบันทึกค่าความเข้มข้นหลังจากเวลาดังกล่าว เนื่องจากช่วงการบันทึกข้อมูลความเข้มข้นแก๊ส CO₂ มีค่าอยู่ในช่วง 0–9,999 ppm เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า IPK_{est} ตามสมการที่ 2 ผู้วิจัยจำเป็นต้องตัดข้อมูลความเข้มข้นแก๊ส CO₂ จากไซโลที่ไม่ได้มีการจำลองการเข้าทำลายในซ้ำที่ 2 และ 3 หลังจากเวลาดังกล่าวออก เส้นความเข้มข้นแก๊ส CO₂ ในไซโลทั้ง 2 ใน

ระหว่างการทดลองทั้ง 3 ซ้ำ แสดงใน Figure 6 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ในไซโลที่มีการจำลองการเข้าทำลายของแมลงสำหรับซ้ำที่ 1–3 มีค่าเป็น 34.27, 83.67 และ $138.50 \mu\text{L}_{\text{CO}_2} (\text{L}_{\text{air}})^{-1} \text{h}^{-1}$ ตามลำดับ (Figure 6a) ในขณะที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ในไซโลที่ไม่มีการจำลองการเข้าทำลายของแมลงมีค่าเป็น 3.88, 9.74 และ $13.88 \mu\text{L}_{\text{CO}_2} (\text{L}_{\text{air}})^{-1} \text{h}^{-1}$ ตามลำดับ (Figure 6b) อุณหภูมิของอากาศเหนือผิวหน้ากองข้าวเปลือกสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายนอกไซโล (Figure 7) อุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่ง 0.5 m ต่ำจากผิวหน้ากองข้าวเปลือกของไซโลทั้งสองค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $31.4 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ที่ทุกเงื่อนไขและทุกซ้ำ ดังนั้น ค่าอัตราการหายใจของตัวเต็มวัยด้วงงวงข้าวโพดจึงถูกเลือกที่อุณหภูมิ 30°C สำหรับการคำนวณค่า IPK_{est} ตามสมการที่ 2 ค่า IPK_{est} ของการทดลองซ้ำที่ 1–3 มีค่าเป็น 4.35, 10.58 และ $17.83 \text{ insect kg}^{-1}$ ในขณะที่จำนวนตัวเต็มวัยด้วงงวงข้าวโพดที่ถูกใส่ไว้ในไซโลเป็น 2 insect kg^{-1} สังเกตว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ภายในไซโลที่มีการจำลองการเข้าทำลายของแมลงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อผู้วิจัยดำเนินการทดลองจากซ้ำที่ 1 ไปซ้ำที่ 3 หลังจากการดำเนินการทดลองซ้ำที่ 3 เสร็จสิ้น ผู้วิจัยพบว่า ในไซโลที่มีการจำลองการเข้าทำลายของแมลง มีการเข้าทำลายของเชื้อราและมด และมีการงอกของเมล็ดข้าวเปลือก (Figure 8 และ 9) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO_2 และค่า IPK_{est} มีความคลาดเคลื่อนจากระดับการเข้าทำลายจริงจากการที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ในไซโลที่มีและไม่มีจำลองการเข้าทำลายของแมลง มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ผู้วิจัยสามารถสรุปได้ว่าการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO_2 และอุณหภูมิเมล็ดธัญพืชในไซโล สามารถตรวจพบการเข้าทำลายของแมลงได้

งานวิจัยครั้งนี้เป็นความพยายามบุกเบิกการใช้การตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO_2 และอุณหภูมิของเมล็ดธัญพืช เพื่อประเมินระดับการเข้าทำลายของแมลงศัตรูในโรงเก็บ ในเชิงปริมาณ (quantitatively) ผลการศึกษาครั้งนี้ให้ข้อสรุปว่า การใช้การตรวจวัดดังกล่าวสามารถประเมินระดับการเข้าทำลายของแมลงได้อย่างเที่ยงตรง หากถูกนำมาใช้ภายใต้เงื่อนไขบางประการได้แก่ ไซโลปิดสนิท, การเข้าทำลายของแมลงมีเพียงช่วงชีวิตตัวเต็มวัยเพียงอย่างเดียวและสายพันธุ์เดียว, อุณหภูมิข้าวเปลือกคงที่ และข้าวเปลือกปราศจากการเข้าทำลายของเชื้อรา เป็นต้น ทั้งนี้ เงื่อนไขต่างๆ เหล่านี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายนักในทางปฏิบัติ ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดหลายประการที่สามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ในสถานะการเก็บรักษาจริงดังต่อไปนี้

- การเข้าทำลายของแมลงศัตรูในโรงเก็บไม่ได้มีเพียงแค่สายพันธุ์เดียวและยังมีหลากหลายช่วงชีวิต

- สิ่งมีชีวิตรบกวน (pest) ประเภทอื่นนอกเหนือจากแมลง เช่น เชื้อรา เป็นต้น

- ระดับความมิดชิดของไซโลและสภาวะอากาศโดยรอบไซโลมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ถึงแม้ว่าการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO_2 และอุณหภูมิของเมล็ดธัญพืชจะสามารถตรวจพบการเข้าทำลายของแมลงได้ ข้อจำกัดต่างๆ ข้างต้นทำให้ผู้วิจัยยังไม่สามารถสรุปได้ว่า ในทางปฏิบัติ เทคนิคการตรวจวัดดังกล่าวจะสามารถประเมินระดับการเข้าทำลายของแมลง (i.e., insect kg^{-1}) ได้อย่างน่าเชื่อถือหรือไม่ ในขณะเดียวกัน นักวิจัยพบว่าการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพดเป็นระยะเวลา 4 d ไม่เพียงพอที่จะทำให้ลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือกเสื่อมลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยคาดว่า หากผลกระทบของข้อจำกัดข้างต้นถูกนำมาพิจารณาในการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO_2 (สมการที่ 2) การทำนายระดับการเข้าทำลายของแมลงจะมีความถูกต้องยิ่งขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมต่อไป

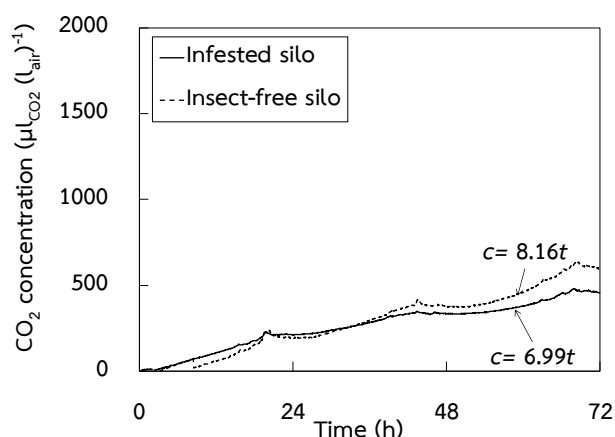
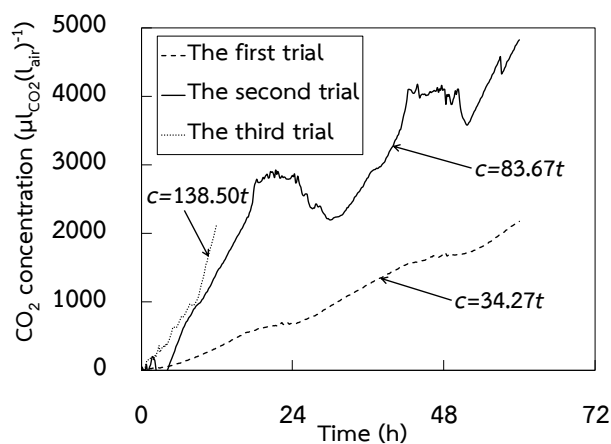
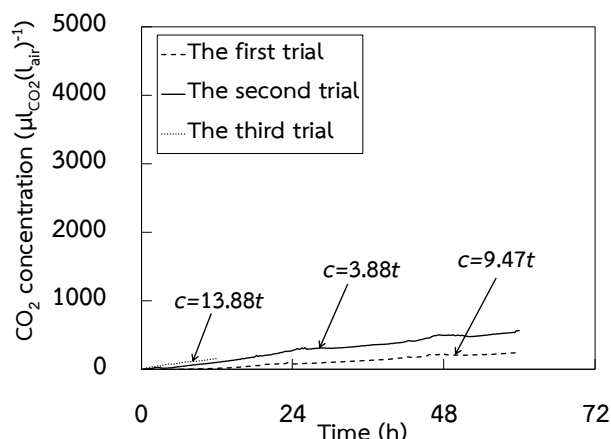


Figure 5 CO_2 concentration curves in both silos before introducing insects.



(a)



(b)

Figure 6 CO₂ concentration curves in the (a) artificially infested and (b) insect-free silos from all three trials.

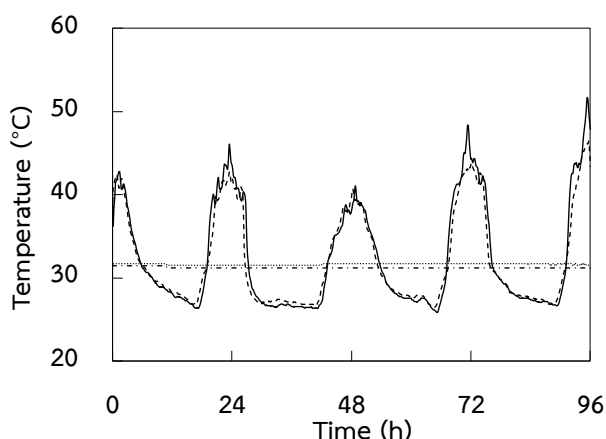


Figure 7 Grain temperature profiles during the second experiment. The dash dotted and thick lines indicate temperatures in the artificially infested silo's grain mass and head space, respectively. The dotted and thick dash lines indicate temperatures in the insect-free silo's grain mass and head space, respectively.



Figure 8 Unexpected mold at the top of grain surface in the silo with simulated insect infestation.



Figure 9 Unexpected mold, germinating paddy and ant infestation at the side wall of the artificially infested silo.

4 สรุป

เทคนิคการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO₂ และอุณหภูมิข้าวเปลือกถูกประเมินความสามารถและข้อจำกัดของการใช้งานเพื่อประเมินระดับการเข้าทำลายของแมลงในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือกในสภาวะการเก็บรักษาที่ใกล้เคียงกับในทางปฏิบัติมาก งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 การทดลอง การทดลองที่ 1 เป็นการประเมินระดับการเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพดภายใต้การเก็บรักษาข้าวเปลือกในถังพลาสติก PP และหาความสัมพันธ์ของการเสื่อมลงของลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือกและระดับการเข้าทำลายของแมลง นักวิจัยพบว่าเทคนิคการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO₂ และอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก สามารถประเมินระดับการเข้าทำลายของแมลงได้อย่างถูกต้อง เมื่อระดับการเข้าทำลายของแมลงต่ำกว่า 6 insect kg⁻¹ ทั้งนี้ การเข้าทำลายของด้วงงวงข้าวโพดเป็นระยะเวลา 4 d ไม่เพียงพอที่จะทำให้ลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือกเสื่อมลงอย่างมีนัยสำคัญ

การทดลองที่ 2 ถูกดำเนินการคล้ายกับการทดลองที่ 1 แต่การประเมินระดับการเข้าทำลายของแมลงถูกดำเนินการในไซโลเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสี ผลการทดลองที่ 2 แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดหลายประการของการใช้เทคนิคการตรวจวัดความเข้มข้นแก๊ส CO₂ และอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก เพื่อประเมิน

ระดับการเข้าทำลายของแมลงในสภาวะการเก็บรักษาจริง อาทิ สายพันธุ์เดียวและช่วงชีวิตของแมลง, สิ่งมีชีวิตรบกวนประเภทอื่น และระดับความมิดชิดของไซโลและสภาวะอากาศโดยรอบไซโล เพื่อให้ประเมินระดับการเข้าทำลายมีความเที่ยงตรงสูงขึ้น ข้อจำกัดเหล่านี้จำเป็นต้องถูกนำมาพิจารณาในการทำนายระดับการเข้าทำลายของแมลง

5 กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สัญญาเลขที่ PHD/0056/2554) และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (รหัสโครงการ ว-ท (ด) 21.58)

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร และฝ่ายเครื่องจักรกลเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่, สาธารณูปโภค, อุปกรณ์การทดลอง และความอนุเคราะห์อื่นๆ

ขอขอบคุณ ดร. ดวงสมร สุทธิสุทธิ์ สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร, กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ สำหรับการจัดหาแมลงศัตรูในโรงเก็บที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้ และนายสมนึก ฉิมเรือง สำหรับความช่วยเหลือในการเพาะเลี้ยงแมลง

6 เอกสารอ้างอิง

Adams, J.M., Schulten, G.G.M., 1978. Losses caused by insects, mites and micro-organisms. In: Harris, K.L., Lindblad, C.J. (Eds.), *Post-Harvest Grain Loss Assessment Methods* (pp. 83–95). St-Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists.

Annis, P.C., 2016. Stored Grain: Invertebrate Pests. In: Wrigley, C.W., Corke, H., Seetharaman, K., Faubion, J. (Eds.), *Encyclopedia of Food Grains* (pp. 110–116). Oxford: Academic Press.

Anonymous, 2016. Lab1-Density determinations and various methods to measure volume. Available at: http://www.webassign.net/labsgraceperiod/ucscgenchem1/lab_1/manual.html. Accessed on 26 June 2016.

AS2628-2010 standard, 2010. AS2628-2010: Sealed grain-storage silos - sealing requirements for insect control. Standards Australia®, Sydney, Australia.

ASABE, 2012. ASAE S352.2: Moisture measurement—unground grain and seeds. American Society of Agricultural and Biological Engineers. ASABE, St. Joseph, Michigan, USA.

Baoua, I.B., Amadou, L., Abdourahmane, M., Bakoye, O., Baributsa, D., Murdock, L.L., 2015. Grain storage and insect pests of stored grain in rural Niger. *Journal of Stored Products Research* 64, 8–12.

Benhalima, H., Chaudhry, M.Q., Mills, K.A., Price, N.R., 2004. Phosphine resistance in stored-product insects collected from various grain storage facilities in Morocco. *Journal of Stored Products Research* 40, 241–249.

Chayaprasert, W., Chantalak, A., Sukcharoen, A., 2014. Porosity measurement of granular materials by comparisons of air pressure decay rates. *Transactions of the ASABE* 57, 1431–1440.

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.

Chotikasatian, C., Chayaprasert, W., Suthisut, D., Pathaveerat, S., Sukcharoen, A., 2014. Evaluation of the respiration rates of *Sitophilus zeamais*, *Rhyzopertha dominica* and *Tribolium castaneum* at three constant temperatures with and without a food source. In: Arthur, F.H., Kengkanpanich, R., Chayaprasert, W., Suthisut, D. (Eds.), *The 11th International Working Conference on Stored Product Protection*, 24–28 November 2014, Chiang Mai, Thailand, pp. 136–142.

Damcevski, K.A., Annis, P.C., Waterford, C.J., 1998. Effect of grain on apparent respiration of adult stored-product Coleoptera in an air-tight system: implications for fumigant testing. *Journal of Stored Products Research* 34, 331–339.

Hagstrum, D.W., Flinn, P.W., 2014. Modern stored-product insect pest management. *Journal of Plant Protection Research* 54, 205–210.

Howe, R.W., Oxley, T.A., 1944. The use of carbon dioxide as a measure of infestation of grain by insects. *Bulletin of Entomological Research* 30, 11–22.

Ileleji, K.E., Maier, D.E., Bhat, C., Woloshuk, C.P., 2006. Detection of a developing hot spot in stored corn with a CO₂ sensor. *Applied Engineering in Agriculture* 22, 275–289.

- 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.
- Keskin, S., Ozkaya, H., 2015. Effect of storage and insect infestation on the technological properties of wheat. *Journal of Food Engineering* 13, 134–139.
- 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*, 27 June–2 July 2010, Estoril, Portugal, Julius Kühn-Institut, Berlin, Germany, pp. 505–509.
- Maier, D.E., Hulasare, R., Qian, B., Armstrong, P., 2006. Monitoring carbon dioxide levels for early detection of spoilage and pests in stored grain. In: Lorini, I., Bacaltchuk, B., Beckel, H., Deckers, D., Sundfeld, E., Santos, J.P.d., Biagi, J.D., Celaro, J.C., Faroni, L.R.D.A., Bortolini, L.d.O.F., Sartori, M.R., Elias, M.C., Guedes, R.N.C., Fonseca, R.G.d., Scussel, V.M. (Eds.), *Proceedings of the Ninth International Working Conference on Stored-Product Protection*, 15–18 October 2006, Campinas, São Paulo, Brazil, Brazilian Post-harvest Association - ABRAPOS, Passo Fundo, RS, Brazil, pp. 1174–1181.
- Nayak, M.K., Collins, P.J., Pavic, H., 2003. Developments in phosphine resistance in China and possible implications for Australia. In: Wright, E.J., Webb, M.C., Highley, E. (Eds.), *Proceedings of the Australian Post harvest Technical Conference*, 25–27 June 2003, Canberra.
- 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.
- Pimentel, M.A.G., Faroni, L.R.D.A., Guedes, R.N.C., Sousa, A.H., Tótola, M.R., 2009. Phosphine resistance in Brazilian populations of *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products Research* 45, 71–74.
- Rajendran, S., 2005. Detection of insect infestation in stored foods. In: Taylor, S. (Ed.), *Advances in Food and Nutrition Research* (pp. 163–232). Waltham, Massachusetts: Academic Press.
- Sinha, K.K., Sinha, A.K., 1992. Impact of stored grain pests on seed deterioration and aflatoxin contamination in maize. *Journal of Stored Products Research* 28, 211–219.
- Strelec, I., Kučko, L., Roknić, D., Mrša, V., Ugarčić-Hardi, Ž., 2012. Spectrofluorimetric, spectrophotometric and chemometric analysis of wheat grains infested by *Sitophilus granarius*. *Journal of Stored Products Research* 50, 42–48.
- Tefera, T., Mugo, S., Likhayo, P., 2011. Effects of insect population density and storage time on grain damage and weight loss in maize due to the maize weevil *Sitophilus zeamais* and the larger grain borer *Prostephanus truncatus*. *African Journal of Agricultural Research* 6, 2249–2254.
- 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, 506–525.
- Wilkin, D.R., Felurat-Lessard, F., 1990. The detection of insects in grain using conventional sampling spears. In: Felurat-Lessard, F., Ducom, P. (Eds.), *Proceedings of the Fifth International Working Conference on Stored-Product Protection*, 9–14 September 1990, Bordeaux, France, Imprimerie du Médoc, Bordeaux, France, pp. 1445–1453.
- Wright, V.F., Mills, R.B., 1985. Estimating stored-product insects by various sampling techniques in bins infested with populations of known and unknown densities. NC-151 Progress Report, Objective C, Procedure 2.