

การปรับสภาพบรรยากาศเพื่อการควบคุมแมลงศัตรูผลิตผลเกษตร

Modified Atmospheres for Controlling Stored-product Insect Pests

ใจทิพย์ อุไรชื่น* กรรณิการ์ เพ็งคุ้ม และ ณัฐวัฒน์ แยมยิ้ม

Jaitip Uraicheun, Kannikar Pengkum and Nattawat Yamyim

กลุ่มวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว

สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร

Abstract

Modified atmospheres with carbon dioxide (CO₂) and nitrogen (N₂) have been used as an alternative treatment to methyl bromide for the control of stored product pests. In this study, four treatments were chosen to apply: 99.9% N₂, 10% CO₂ and 90% N₂, 20% CO₂ and 80% N₂, and 30% CO₂ and 70% N₂, which has been developed and situated October, 2010 to September, 2013 at Post-harvest and Processing Research and Development Office, Department of Agriculture and at Siam Water Flame CO., Ltd. The aim of our research was to study the effect of modified atmosphere to survival percentage of stored product insects. Four species tested in the first experiment were *Sitophilus zeamais*, *Tribolium castaneum*, *Rhyzopertha dominica* and *Oryzaephilus surinamensis*, at each developmental stages: egg, larva, pupa and adult. Gas was continuously flushed for 1-6 days. For each treatment, the control efficiency was not different. However, the exposure time, species of insects and developmental stages of insects had the effect on the control efficiency. *Sitophilus zeamais* was the most tolerant to treatments. Egg and adult stages were controlled easier than larval and pupal stages. *Sitophilus zeamais* was re-tested in the second experiment; the control efficiency of each treatment was 57.34-61.04%. When 99.9% N₂ and mixture gas of 20% CO₂ and 80% N₂ were applied with four species of insects in one ton of rice, all insects were completely controlled at 12 days.

Keywords: modified atmospheres, controlling insect pests, stored product insects

*Email: j_uraichuen@hotmail.com

บทคัดย่อ

การทดสอบประสิทธิภาพการรมแมลงศัตรูผลิตผลเกษตรที่สำคัญ ด้วยก๊าซไนโตรเจน และก๊าซผสมระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน ได้ดำเนินการทดสอบระหว่างเดือนตุลาคม 2553 ถึงเดือนกันยายน 2556 ในห้องปฏิบัติการกลุ่มวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร และบริษัทสยาม วอเตอร์ เพลม จำกัด เป็นการปล่อยก๊าซอย่างต่อเนื่อง ให้ผ่านเข้าไปในภาชนะปิดที่มีทางเข้าออกของก๊าซ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทราบถึงผลของการปรับสภาพบรรยากาศ ที่มีต่อการอยู่รอดของแมลงที่เป็นศัตรูผลิตผลเกษตรหลังเก็บเกี่ยว โดยการทดลองแรกได้ทดสอบกับแมลงศัตรู 4 ชนิด ประกอบด้วย ตัวงวงข้าวโพด มอดแป้ง มอดข้าวเปลือก และมอดพินเลื้อย ที่ทุกระยะการเจริญเติบโตคือ ระยะไข่ หนอน ดักแด้ และตัวเต็มวัย พบว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจน 99.9% และการใช้ก๊าซผสมคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน อัตราส่วน 10:90, 20:80 และ 30:70 ให้ผลการควบคุมแมลงไม่แตกต่างกัน แต่ระยะเวลาการรม ชนิดและระยะการเจริญเติบโตของแมลงมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การควบคุม โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาการรม ให้นานขึ้น สามารถควบคุมแมลงได้มากขึ้น ซึ่งตัวงวงข้าวโพดเป็นแมลงที่มีความทนทานต่อก๊าซที่ใช้ทดสอบที่สุด ทั้งนี้ก๊าซที่ใช้ สามารถควบคุมระยะตัวเต็มวัยและระยะไข่ได้ง่ายกว่าระยะหนอนและระยะดักแด้ การทดลองที่สอง ได้ทดสอบกับตัวงวงข้าวโพดอีกครั้งหนึ่ง ผลการควบคุม พบว่า ทุกกรรมวิธีสามารถควบคุมตัวงวงข้าวโพดได้ 57.34-61.04 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาการรมและระยะการเจริญเติบโตของแมลงมีผลต่อการควบคุม ระยะหนอนและระยะดักแด้เป็นระยะที่ควบคุมได้ยากกว่าระยะไข่และระยะตัวเต็มวัย เมื่อทดสอบกับข้าวสารปริมาณ 1 ตันในการทดลองสุดท้ายพบว่า การรมโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน 99.9% เป็นเวลา 12 วัน สามารถควบคุมแมลงทุกชนิดที่ใช้ทดสอบได้หมดอย่างสมบูรณ์

คำนำ

ผลิตผลเกษตรหลังเก็บเกี่ยวมักได้รับความเสียหายในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าแมลงเป็นศัตรูที่สำคัญและทำความเสียหายให้แก่ผลิตผลเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวมากที่สุด แมลงศัตรูผลิตผลเกษตรหลังเก็บเกี่ยวที่สำคัญ ได้แก่ ตัวงวงข้าว, *Sitophilus oryzae* (Linnaeus); ตัวงวงข้าวโพด *S. zeamais* Motschulsky; มอดหัวป้อมหรือมอดข้าวเปลือก, *Rhyzopertha dominica* (Fabricius); มอดแป้ง, *Tribolium castaneum* (Herbst); มอดพินเลื้อย, *Oryzaephilus surinamensis* (Linnaeus); มอดสยาม, *Lophocateres pusillus* Klug; ฝีเสื้อข้าวเปลือก, *Sitotroga cerealella* Olivier และฝีเสื้อข้าวสาร, *Corcyra cephalonica* Stainton (พรทิพย์และคณะ, 2551) แมลงเหล่านี้กัดกินผลิตผลเกษตรโดยตรงทำให้สูญเสียน้ำหนัก และปล่อยมูลออกมาทำให้ผลิตผลสกปรก มีผลต่อการซื้อขายและการส่งออก นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการแปรรูปอาหารที่ใช้ผลิตผลเหล่านี้เป็นวัตถุดิบอีกด้วย วิธีการป้องกันและกำจัดแมลงศัตรูผลิตผลเกษตรที่เหมาะสม ควรเป็นวิธีที่รวดเร็วและมีความแม่นยำในการควบคุมให้ได้ผลดี นั่นคือเปอร์เซ็นต์การตายของแมลงศัตรูสูง ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีทั้งการใช้สารเคมีและการไม่ใช้สารเคมี ในปัจจุบันผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจกับการป้องกันกำจัดแมลงโดยไม่ใช้สารเคมีมากขึ้น วิธีการทางกายภาพจึงมีความสำคัญมากขึ้นเป็นลำดับ ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนหรือตัดแปลงสภาพแวดล้อมของแมลง ทำให้แมลงไม่สามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติ การปรับสภาพบรรยากาศให้แตกต่างจากสภาพบรรยากาศปกติด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของ

คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน หรือ ลดปริมาณออกซิเจนให้เหลือน้อยที่สุด จึงเป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้ควบคุมแมลงได้

การใช้ก๊าซต่าง ๆ ในสภาพการเก็บรักษาปิด เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีศักยภาพในการป้องกันผลผลิตเกษตรจากการเข้าทำลายของแมลงศัตรู เมื่อสินค้าหรือผลผลิตเกษตรอยู่ในสภาพที่อากาศไม่สามารถผ่านเข้า-ออกได้ (airtight storage) การหายใจของผลผลิตเกษตรและแมลงที่เข้าทำลาย ทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนลดลงและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น จากการที่อากาศเปลี่ยนไปนี้มีผลทำให้แมลงไม่สามารถมีชีวิตรอดได้ (Press and Harein, 1967) การปล่อยให้ก๊าซอื่นไหลผ่านเข้าไปแทนที่ก๊าซออกซิเจนตลอดเวลาที่เช่นเดียวกัน ซึ่งต้องใช้เวลาระยะหนึ่งในการทำให้ก๊าซออกซิเจนหมดไปหรือเหลือน้อยที่สุด จนกระทั่งแมลงตาย Press and Harein (1967) ศึกษาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่อากาศปกติอย่างต่อเนื่อง พบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซสูงสุดคือ 200 มิลลิลิตรต่อนาที่ ก๊าซทั้งสองชนิดใช้เวลา 1 วันในการทำให้ก๊าซออกซิเจนลดลงเหลือศูนย์ และที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำกว่า การตายของมอดแป้งก็แตกต่างกันไป การดัดแปลงสภาพบรรยากาศให้เปลี่ยนไปจากปกติ โดยมีปริมาณก๊าซออกซิเจนต่ำ (0.5% หรือต่ำกว่า) และ/หรือ มีปริมาณก๊าซออกซิเจนสูง (40%หรือสูงกว่า) ให้ผลการควบคุมแมลงในผลไม้แห้ง ผลไม้เปลือกแข็ง และผักได้ดี มีประสิทธิภาพสำหรับการนำไปใช้เป็นการทดแทนการรมด้วยเมทิลโบรไมด์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ระยะเวลาในการรม และระยะเวลาเจริญเติบโตของแมลง (Kitinoja and Kader, 1995) ได้มีการศึกษาการเก็บรักษามันเทศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสในสภาพบรรยากาศที่มีก๊าซออกซิเจน 2-4% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 40-60% พบว่าควบคุมด้วงวงมันเทศ (*Cylas formicarius elegantulus*) ได้ภายใน 2-7 วัน (Delate, 1990) ในขณะที่ Soderstrom et al. (1990) พบว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การเก็บรักษา stone fruits โดยใช้สภาพบรรยากาศที่มีก๊าซออกซิเจน 0.5% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 10% เป็นเวลา 2-3 วันสามารถควบคุมตัวเต็มวัยและไข่ของ Codling moth (*Cydia pomonella*) ได้ และใช้เวลา 6-12 วันสำหรับระยะดักแด้โดยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนของสีผลและความแน่นเนื้อของผล การศึกษานี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของก๊าซไนโตรเจนที่มีผลต่อแมลงศัตรูผลผลิตเกษตรที่สำคัญ ที่ทุกระยะการเจริญเติบโต เป็นการปล่อยก๊าซให้ผ่านเข้าไปในภาชนะอย่างต่อเนื่อง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทราบถึงผลของการปรับสภาพบรรยากาศ ที่มีต่อการอยู่รอดของแมลงที่เป็นศัตรูผลผลิตเกษตรหลังเก็บเกี่ยว

วิธีดำเนินการ

การเตรียมตัวอย่างข้าวและเก็บตัวอย่างแมลงก่อนทดสอบ

เตรียมข้าวสำหรับใช้เลี้ยงแมลงและใช้ทดสอบ โดยนำข้าวมาทำความสะอาดให้ปลอดจากแมลงด้วยการแช่ในตู้แช่แข็ง ที่มีอุณหภูมิประมาณ -20°C เป็นเวลา 1 สัปดาห์ก่อนนำมาใช้ และเตรียมตัวอย่างแมลง ด้วยการเก็บตัวอย่างแมลงจากโรงสีในจังหวัดต่าง ๆ นำมาเลี้ยงขยายพันธุ์ในห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $65\pm 5\%$ ให้ได้ปริมาณแมลงแต่ละชนิดที่เพียงพอ ปล่อยตัวเต็มวัย อายุ 2-3 สัปดาห์ จำนวน 300 ตัวลงในอาหาร ซึ่งบรรจุในขวดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร สูง 18 เซนติเมตร ปิดฝาขวดด้วยกระดาษซับ ปล่อยให้ตัวเต็มวัยวางไข่นาน 72 ชั่วโมงจากนั้นร่อนตัวเต็มวัย

นอกจากอาหาร จะได้อาหารที่มีไข่ของแมลง และแมลงที่เกิดขึ้นมาใหม่จะมีความสม่ำเสมอ ทำการเลี้ยงขยายพันธุ์เช่นนี้ทุกสัปดาห์

การเตรียมตัวอย่างแมลงสำหรับทดสอบ

1. การเตรียมระยะดักแด้ สำหรับด้วงวงข้าวโพด มอดข้าวเปลือก มอดพื้นเลื้อย และมอดหนวดยาว ก่อนการทดสอบ 28 วัน ปล่อยพ่อแม่พันธุ์แมลงแต่ละชนิดแยกจากกันลงไปในถ้วยพลาสติก เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 9 เซนติเมตร จำนวน 200 ตัว ที่มีข้าวสารอยู่ 150 กรัม ปิดด้วยผ้าและฝาพลาสติกที่เจาะรูตรงกลางอีกชั้นหนึ่ง หลังจากนั้น 3 วัน นำแมลงออกให้หมด เติมห่วงข้าวสารให้ได้ปริมาณ 250 กรัม จะได้ข้าวสารที่มีไข่แมลงสำหรับทดสอบระยะดักแด้ แต่สำหรับมอดแป้งใช้รำ 30 กรัม เป็นอาหารและให้วางไข่ หลังจากปล่อยให้วางไข่ 5 วัน นำมอดแป้งออกและเติมห่วงข้าวสาร 220 กรัม เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องรอการทดสอบ
2. การเตรียมระยะหนอน ทำเช่นเดียวกับระยะดักแด้ แต่เตรียมล่วงหน้าก่อนการทดสอบ 21 วัน
3. การเตรียมระยะไข่ ทำเช่นเดียวกับระยะหนอน แต่เตรียมล่วงหน้าก่อนการทดสอบ 3 วัน
4. การเตรียมระยะตัวเต็มวัย เตรียมก่อนการทดสอบ 1 วัน โดยนับตัวเต็มวัยที่มีอายุประมาณ 2 สัปดาห์ จำนวน 100 ตัว ใส่ไปในถ้วยพลาสติกที่บรรจุข้าวสาร 200 กรัม ปิดด้วยผ้าและฝาพลาสติกที่เจาะรู เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องรอการทดสอบ

การทดสอบด้วยก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การทดลองที่ 1 นำถ้วยพลาสติกที่มีแมลงแต่ละชนิดแต่ละระยะการเจริญเติบโต ใส่ในกล่องพลาสติกขนาด 22 x 34 x 24 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มีฝาปิดสนิท ด้านข้างของกล่องพลาสติกได้เจาะช่องสำหรับต่อท่อก๊าซ โดยแต่ละกล่องมี 2 ช่อง เป็นทางเข้าและทางออกของก๊าซ (Figure 1) ระยะเวลาในการปล่อยก๊าซคือ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 วัน ทดสอบกับแมลงศัตรูผลิตผลเกษตร 4 ชนิด ได้แก่ ด้วงวงข้าวโพด มอดแป้ง มอดข้าวเปลือก และมอดหนวดยาว ทุกระยะการเจริญเติบโต คือระยะไข่ หนอน ดักแด้ และตัวเต็มวัย วางแผนการทดลองแบบ 5x6x4x4 factorial in CRD จำนวน 4 ซ้ำ ดังนี้

- ไนโตรเจน 99.9%
- คาร์บอนไดออกไซด์: ไนโตรเจน เท่ากับ 10: 90
- คาร์บอนไดออกไซด์: ไนโตรเจน เท่ากับ 20: 80
- คาร์บอนไดออกไซด์: ไนโตรเจน เท่ากับ 30: 70
- กรรมวิธีควบคุม ไม่ใส่ก๊าซใด ๆ

การทดลองที่ 2 ทำการทดสอบซ้ำอีกครั้งกับด้วงวงข้าวโพด ทุกระยะการเจริญเติบโต โดยดำเนินการและใช้กรรมวิธีเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 วางแผนการทดลองแบบ 5x6x4 factorial in CRD จำนวน 4 ซ้ำ

การทดลองที่ 3 นำกรรมวิธีที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมแมลงได้ดีจากการทดลองก่อนหน้า นี้ คือกรรมวิธีด้วยก๊าซไนโตรเจน 99.9% มาทดสอบกับแมลง 4 ชนิด ได้แก่ ด้วงวงข้าวโพด มอดแป้ง มอดข้าวเปลือก และมอดหนวดยาว ทุกระยะการเจริญเติบโต คือระยะไข่ หนอน ดักแด้ และตัวเต็มวัย ที่ระยะเวลาการรวม 7 และ 12 วัน โดยจำลองสภาพการรวมที่บรรจุข้าวสาร ขนาด 1 ตัน วางแผนการทดลองแบบ 2x4x4 factorial in CRD จำนวน 4 ซ้ำ

การตรวจวัดผล

เมื่อผ่านการทดสอบแมลงทุกชนิดแต่ละระยะการเจริญเติบโต ตามกรรมวิธีและระยะเวลาที่กำหนด นำแมลงมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อรอให้แต่ละระยะการเจริญเติบโตพัฒนาเป็นตัวเต็มวัย แล้วจึงนำมาตรวจนับจำนวนตัวเต็มวัยที่เกิดขึ้นในแต่ละกรรมวิธี โดย

1. ระยะตัวเต็มวัย ตรวจนับจำนวนแมลงที่รอดชีวิตหลังทำการทดสอบ 1 วัน
2. ระยะดักแด้ ตรวจนับจำนวนแมลงที่อาจเกิดขึ้น หลังทำการทดสอบ 14 วัน
3. ระยะหนอน ตรวจนับจำนวนแมลงที่อาจเกิดขึ้น หลังทำการทดสอบ 21 วัน
4. ระยะไข่ ตรวจนับจำนวนแมลงที่อาจเกิดขึ้น หลังทำการทดสอบ 40 วัน

หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปหาค่าประสิทธิภาพการควบคุม (control efficiency percentage)

ตามสูตรที่รายงานโดย Püntener (1981) ดังต่อไปนี้

$$\text{Control efficiency percentage (\%)} = [1 - (\text{Ta}/\text{Ca} \times \text{Cb}/\text{Tb})] \times 100$$

Tb = จำนวนของแมลงก่อนทำการทดลองในแต่ละกรรมวิธี (Treatment)

Ta = จำนวนของแมลงหลังจากทำการทดลองในแต่ละกรรมวิธี (Treatment)

Cb = จำนวนของแมลงก่อนทำการทดลองในกรรมวิธีที่ควบคุม (Control)

Ca = จำนวนของแมลงหลังจากทำการทดลองในกรรมวิธีที่ควบคุม (Control)

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการทดลองที่ 1 และ 2 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม SPSS โดยวิเคราะห์ GLM (General Linear Model) และใช้ Duncan Multiple Range Test (DMRT) วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแต่ละค่า ซึ่งค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อ $P < 0.05$ ส่วนการทดลองที่ 3 เป็นการวิเคราะห์ T-test

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดสอบประสิทธิภาพของก๊าซไนโตรเจนที่ความเข้มข้น 99.9% ก๊าซผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจน ในอัตราส่วน 10: 90, 20: 80 และ 30: 70 กับแมลง 4 ชนิดได้แก่ ดั่งวงงข้าวโพด มอดแป้ง มอดข้าวเปลือก และมอดพินเลื้อย ทั้ง 4 ระยะการเจริญเติบโตคือ ระยะไข่ หนอน ดักแด้ และตัวเต็มวัย ระยะเวลาการปล่อยก๊าซ 1-6 วัน พบว่า ทุกกรรมวิธีที่ใช้ทดสอบไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีประสิทธิภาพในการควบคุมแมลงระหว่าง 76.94-79.12 เปอร์เซ็นต์ (Table 1) แต่ระยะเวลาในการปล่อยก๊าซจะทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมแมลงมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยวันแรกให้ผลการควบคุมแมลง 56.43 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เมื่อปล่อยก๊าซนานขึ้น เมื่อปล่อยก๊าซ 4-6 วัน ได้เปอร์เซ็นต์การควบคุมเท่ากับ 85.85, 87.68 และ 86.00 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ สำหรับชนิดและระยะการเจริญเติบโตของแมลงต่างมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การควบคุมเช่นเดียวกับระยะเวลาการปล่อยก๊าซ โดยดั่งวงงข้าวโพดมีความทนทานที่สุด พบประสิทธิภาพการควบคุมเฉลี่ยเท่ากับ 39.88 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การควบคุมมอดแป้ง มอดข้าวเปลือก และมอดพินเลื้อย เท่ากับ 94.28,

80.54 และ 96.86 ตามลำดับ ระยะตัวเต็มวัยเป็นระยะที่ควบคุมได้ง่ายที่สุด ควบคุมได้ 96.77 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ระยะไข่ และระยะดักแด้ ที่ควบคุมได้ 83.37 และ 69.82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ระยะหนอน เป็นระยะที่มีความทนทานที่สุด สามารถควบคุมได้ 61.59 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการใช้ก๊าซในการควบคุมแมลงแต่ละชนิด พบว่าการใช้ก๊าซทุกกรรมวิธีสามารถควบคุมด้วงวงข้าวโพดระยะตัวเต็มวัยได้อย่างสมบูรณ์ตั้งแต่วันที่ 3 ของการทดสอบ (Table 2) รองลงมาคือระยะไข่ แต่ต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 4-6 วัน ซึ่งยังไม่สามารถควบคุมได้หมด ทุกกรรมวิธีที่ใช้สามารถควบคุมระยะหนอนและระยะดักแด้ได้เล็กน้อย เห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การควบคุมอยู่ระหว่าง 1.08-28.44 สำหรับระยะดักแด้ และ-46.62-21.61 สำหรับระยะไข่ การใช้ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนเพื่อควบคุมมอดแป้ง (Table 3) ได้ผลดีกว่าด้วงวงข้าวโพด สามารถควบคุมมอดแป้งได้ทุกระยะการเจริญเติบโตอย่างสมบูรณ์ ระยะหนอนใช้เวลา 2 วัน ระยะไข่ ดักแด้ และตัวเต็มวัยใช้เวลา 3 วัน ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Press and Harein (1967) ที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่อากาศปกติอย่างต่อเนื่อง ก๊าซทั้งสองชนิดทำให้มอดแป้ง (*Tribolium castaneum*) ตายหมด 100 เปอร์เซ็นต์ภายใน 2 วัน

ทุกกรรมวิธีที่ใช้ทดสอบ สามารถควบคุมระยะตัวเต็มวัยของมอดข้าวเปลือกได้ตั้งแต่วันที่ 3 ของการทดสอบ (Table 4) แต่ต้องใช้เวลา 6 วันจึงควบคุมระยะไข่ได้หมด ทุกกรรมวิธีไม่สามารถควบคุมระยะหนอนและระยะดักแด้ของมอดข้าวเปลือกได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการควบคุมระยะหนอนเท่ากับ 99.93 เปอร์เซ็นต์ และระยะดักแด้เท่ากับ 97.42 เปอร์เซ็นต์เมื่อใช้ก๊าซแต่ละกรรมวิธีเป็นเวลา 6 วัน มอดพันเลื้อยระยะตัวเต็มวัยเป็นระยะที่ควบคุมด้วยก๊าซในทุกกรรมวิธีได้ง่ายที่สุด เช่นเดียวกับแมลงชนิดอื่น เมื่อใช้ก๊าซเป็นเวลา 1-6 วัน มีเปอร์เซ็นต์การควบคุมระหว่าง 99.63-100.00 (Table 5) รองลงมาเป็นระยะดักแด้ที่มีเปอร์เซ็นต์การควบคุมระหว่าง 96.34-100.00 ทุกกรรมวิธีสามารถควบคุมระยะหนอนและระยะไข่ได้ 92.52-99.81 และ 64.55-99.79 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

จากการทดสอบครั้งแรก พบว่าด้วงวงข้าวโพดเป็นแมลงที่ทนทานที่สุดต่อการใช้ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน จึงได้ทดสอบกับด้วงวงข้าวโพดอีกครั้ง เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการควบคุม พบว่า ในภาพรวมทุกกรรมวิธีไม่มีความแตกต่างกัน มีประสิทธิภาพการควบคุมระหว่าง 57.34-61.04 เปอร์เซ็นต์ (Table 6) แต่ระยะเวลาที่ใช้มีความแตกต่างกัน โดยระยะเวลา 6 วันให้ผลการควบคุมดีที่สุดคือ 71.19 เปอร์เซ็นต์ ระยะการเจริญเติบโตมีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมด้วงวงข้าวโพดเช่นกัน ทุกกรรมวิธีสามารถควบคุมระยะไข่และระยะตัวเต็มวัยได้ 92.46 และ 88.64 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่แตกต่างจากการควบคุมระยะหนอนและระยะดักแด้ที่ควบคุมได้ 31.91 และ 23.13 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการควบคุมด้วงวงข้าวโพดแยกตามกรรมวิธี ระยะเวลาการปล่อยก๊าซ รวมถึงระยะการเจริญเติบโตของด้วงวงข้าวโพด พบว่าการใช้ก๊าซทุกกรรมวิธีสามารถควบคุมระยะตัวเต็มวัยและระยะไข่ได้อย่างสมบูรณ์โดยใช้เวลา 2 และ 4 วันตามลำดับ (Table 7) แต่สามารถควบคุมระยะหนอนและระยะดักแด้ได้ 52.08 และ 32.68 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับหลังจากใช้ก๊าซเป็นเวลา 6 วันแล้ว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบครั้งแรก (Table 2) ที่ควบคุมระยะตัวเต็มวัยได้ภายใน 3

วัน ควบคุมระยะไข่ได้โดยใช้เวลา 4 วัน แต่ไม่สามารถควบคุมระยะหนอนและระยะดักแด้ของด้วงวงข้าวโพดได้ถึงแม้ว่าจะใช้เวลา 6 วัน

หลังจากทดสอบประสิทธิภาพของก๊าซทั้งสองชนิดในห้องปฏิบัติการแล้ว จึงได้ขยายขนาดของหน่วยทดลองเป็นปริมาตร 1 ตันในสภาพโรงเก็บ และเนื่องจากกรรมวิธีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการไม่แตกต่างกันทางสถิติ จึงนำก๊าซไนโตรเจน 99.9% เพียงชนิดเดียวมาทดสอบกับแมลง 4 ชนิดคือ ด้วงวงข้าวโพด มอดแป้ง มอดข้าวเปลือก และมอดหนวดยาว ที่ทุกระยะการเจริญเติบโต โดยเพิ่มระยะเวลาการใช้ก๊าซเป็น 7 วัน และ 12 วัน ผลการทดสอบพบว่า ระยะเวลาการรมด้วยก๊าซไนโตรเจน มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมแมลง เมื่อใช้เวลา 7 วันยังไม่สามารถควบคุมแมลงได้หมด (Table 8) แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาเป็น 12 วัน สามารถควบคุมแมลงได้อย่างสมบูรณ์ ชนิดและระยะการเจริญเติบโตต่างมีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมโดยด้วงวงข้าวโพดเป็นแมลงที่มีความทนทานที่สุด แตกต่างทางสถิติจากแมลงอีก 3 ชนิด และระยะหนอนเป็นระยะที่ควบคุมได้ยากที่สุด แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากระยะการเจริญเติบโตอื่นๆ เมื่อรมด้วยก๊าซไนโตรเจน 99.9% เป็นเวลา 7 วัน สามารถควบคุมระยะหนอนของด้วงวงข้าวโพดได้ 60.67% (Table 9) ในขณะที่สามารถควบคุมมอดแป้ง มอดข้าวเปลือก และมอดหนวดยาวได้หมด อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระยะเวลาการรมเป็น 12 วัน สามารถควบคุมแมลงทุกชนิดที่ใช้ทดสอบและทุกระยะการเจริญเติบโตได้อย่างสมบูรณ์

สรุปผลการทดลองและคำแนะนำ

ก๊าซไนโตรเจน 99.9% และก๊าซผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนทุกอัตราส่วนที่ใช้ มีประสิทธิภาพดีในการควบคุมด้วงวงข้าวโพด มอดแป้ง มอดข้าวเปลือก มอดฟันเลื่อย และมอดหนวดยาว แต่เนื่องจากชนิดและระยะการเจริญเติบโตของแมลง และระยะเวลาการรม มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุม ดังนั้นการนำวิธีการนี้ไปใช้ ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ อย่างไรก็ตามก็ควรทำการทดสอบซ้ำโดยการใช้ก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่ง เช่น ก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยไม่จำเป็นต้องผสมก๊าซเพื่อหาระยะเวลาการรมที่สั้นที่สุด ที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมแมลงทุกชนิดทุกระยะการเจริญเติบโต โดยเฉพาะด้วงวงข้าวโพด ซึ่งเป็นแมลงที่มีความทนทานต่อการใช้ก๊าซที่สุด รวมถึงการขยายขนาดของการทดสอบในสภาพโรงเก็บให้ใหญ่ขึ้น เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของก๊าซในการควบคุมแมลงศัตรูผลิตผลเกษตร และสามารถนำวิธีการนี้ไปใช้ได้จริงในทางการค้าต่อไป

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณบริษัท สยาม วอเตอร์ เฟลม จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์อุปกรณ์การติดตั้งระบบการปล่อยก๊าซ รวมถึงได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์จนสามารถใช้ทดสอบได้ตามวัตถุประสงค์ และเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทดสอบในสภาพโรงเก็บ และขอขอบคุณ ดร.วัชรพล ชยประเสริฐ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม ที่กรุณานำเครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มาตรวจวัดระดับความเข้มข้น เพื่อปรับระดับก๊าซตามที่กำหนดได้ตลอดการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

พรทิพย์ วิสารทานนท์ พรรณเพ็ญ ชโยภาส ใจทิพย์ อุไรชื่น รังสิมา เก่งการพานิช กรรณิการ์ เพ็งคุ่ม จิราภรณ์ ทองพันธ์ ดวงสมร สุทธิสุทธิ์ ลักขณา ร่มเย็น ภาวินี หนูชนะภัย และอัจฉรา เพชรโชติ. 2551. แมลงที่พบในผลิตผลเกษตรและการป้องกันกำจัด. กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร. 170 หน้า

Delate, K. et al. 1990. Controlled atmosphere treatments for control of sweetpotato weevil in stored tropical sweetpotatoes. *J. Econ. Entomol.* 83:461-465

Kitinoja, L. and A.A. Kader. 1995. Small-scale postharvest handling practices: a manual for horticultural crops. Univ. Calif. Postharvest Hort. Series No. 8. Third Edition. 231 p. (also available in Spanish and French)

Press, A.F. and P.K. Harein. 1967. Mortality of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) in simulated peanut storages purged with carbon dioxide and nitrogen. *J. Stored Prod. Res.*, Vol. 3, pp. 91-96.

Soderstrom, E.L., Brandl, D.G. and MacKey, B., 1990. Responses of codling moth (Lepidoptera:Tortricidae) life stages to high carbon dioxide or low oxygen atmospheres. *J. Econ. Entomol.* 83: 472-475.

Table 1 Control efficiency percentage of *Sitophilus zeamais*, *Tribolium castaneum*, *Rhyzopertha dominica* and *Oryzaephilus surinamensis* at different developmental stage after treatment by nitrogen and carbon dioxide, October 2010-September 2013, Department of Agriculture (1st experiment)

Treatment	Number of samples	Control efficiency percentage
N ₂ 99.9%	384	77.48
CO ₂ : N ₂ =10:90	384	76.94
CO ₂ : N ₂ =20:80	384	79.12
CO ₂ : N ₂ =30:70	384	78.02
Exposure time	Number of samples	Control efficiency percentage
1 day	256	56.43d ^{1/}
2 days	256	72.14c
3 days	256	79.24b
4 days	256	85.85a
5 days	256	87.68a
6 days	256	86.00a
Tested insects	Number of samples	Control efficiency percentage
<i>Sitophilus zeamais</i>	384	39.88c
<i>Tribolium castaneum</i>	384	94.28a
<i>Rhyzopertha dominica</i>	384	80.54b
<i>Oryzaephilus surinamensis</i>	384	96.86a
Insect Stages	Number of samples	Control efficiency percentage
Egg	384	83.37b
Larva	384	61.59d
pupa	384	69.82c
Adult	384	96.77a

^{1/} Means followed by same letters in columns are not significantly different by DMRT (P<0.05)

Table 2 Control efficiency percentage of *Sitophilus zeamais* at different developmental stage after treatment by nitrogen and carbon dioxide, October 2010-September 2013, Department of Agriculture^{1/} (1st experiment)

Egg stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	29.32	-7.52	75.84	99.92	99.96	100.00	66.25	
CO ₂ : N ₂	2.33	-22.73	66.57	100.00	99.78	99.34	57.55	
CO ₂ : N ₂	23.68	24.53	91.19	100.00	94.38	100.00	72.30	
CO ₂ : N ₂	15.87	-12.00	93.16	100.00	99.96	99.93	66.16	
Mean	17.80b ^{2/}	-4.43b	81.69a	99.98a	98.53a	99.82a		
C.V. (%)								8.22
Larval stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	21.62	-0.87	-66.52	-16.59	1.31	-12.08	-12.19	
CO ₂ : N ₂	13.45	-0.69	-41.92	-25.60	-21.53	-12.81	-14.85	
CO ₂ : N ₂	25.40	0.62	-27.16	6.81	-4.19	-49.79	-8.05	
CO ₂ : N ₂	25.96	6.46	-50.90	15.56	-19.15	-42.22	-10.72	
Mean	21.61a	1.38ab	-46.62c	-	-10.89abc	-29.22bc		
C.V. (%)								-51.89
Pupal stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	21.42	7.93	13.80	-0.79	29.09	6.50	12.99	
CO ₂ : N ₂	11.80	3.80	33.03	-10.07	26.57	14.42	13.26	
CO ₂ : N ₂	26.65	30.05	11.17	11.09	26.89	9.11	19.16	
CO ₂ : N ₂	13.01	-1.97	7.11	4.08	31.21	27.25	13.45	
Mean	18.22	9.95	16.27	1.08	28.44	14.32		
C.V. (%)								26.11
Adult stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	33.96	95.95	100.00	100.00	100.00	100.00	88.32	
CO ₂ : N ₂	37.27	98.72	100.00	100.00	100.00	100.00	89.33	
CO ₂ : N ₂	53.04	97.99	100.00	100.00	100.00	100.00	91.84	
CO ₂ : N ₂	61.42	97.97	100.00	100.00	100.00	100.00	93.23	
Mean	46.42b	97.66a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a		
C.V. (%)								2.48

^{1/} Means averaged from 4 replications.

^{2/} Means followed by same letters in rows are not significantly different by DMRT P<0.05)

Table 3 Control efficiency percentage of *Tribolium castaneum* at different developmental stage after treatment by nitrogen and carbon dioxide, October 2010-September 2013, Department of Agriculture^{1/} (1st experiment)

Egg stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	52.93	99.98	100.00	100.00	100.00	100.00	92.15	
CO ₂ : N ₂	46.53	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	91.09	
CO ₂ : N ₂	43.01	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	90.50	
CO ₂ : N ₂	76.31	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	91.64	
Mean	48.07b ^{2/}	99.99a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a		
C.V. (%)								2.52
Larval stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	65.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	94.17	
CO ₂ : N ₂	72.63	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	95.44	
CO ₂ : N ₂	57.89	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	92.98	
CO ₂ : N ₂	76.31	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	96.05	
Mean	66.18b	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a		
C.V. (%)								1.60
Pupal stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	57.86	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	92.98	
CO ₂ : N ₂	69.16	99.71	100.00	100.00	100.00	100.00	94.81	
CO ₂ : N ₂	58.12	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	93.02	
CO ₂ : N ₂	56.23	99.43	100.00	100.00	100.00	100.00	92.61	
Mean	60.34b	99.79a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a		
C.V. (%)								1.93
Adult stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	81.50	99.75	100.00	100.00	100.00	100.00	96.88	
CO ₂ : N ₂	88.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	98.13	
CO ₂ : N ₂	91.75	99.50	100.00	100.00	100.00	100.00	98.54	
CO ₂ : N ₂	92.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	98.79	
Mean	88.69b	99.81a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a		
C.V. (%)								0.97

^{1/} Means averaged from 4 replications.

^{2/} Means followed by same letters in rows are not significantly different by DMRT P<0.05)

Table 4 Control efficiency percentage of *Rhyzopertha dominica* at different developmental stage after treatment by nitrogen and carbon dioxide, October 2010-September 2013, Department of Agriculture^{1/} (1st experiment)

Egg stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	76.59	66.54	89.65	100.00	96.33	100.00	88.19	
CO ₂ : N ₂	85.31	41.06	81.24	99.49	99.52	100.00	84.44	
CO ₂ : N ₂	68.34	68.70	88.92	99.80	97.29	100.00	87.18	
CO ₂ : N ₂	69.34	42.31	82.52	99.69	100.00	100.00	82.31	
Mean	74.90ab ^{2/}	54.65b	85.58a	99.75a	98.28a	100.00a		
C.V. (%)								4.09
Larval stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	-2.35	44.40	61.68	96.41	97.49	99.89	66.25	
CO ₂ : N ₂	-69.05	73.61	76.81	97.10	99.54	99.98	63.00	
CO ₂ : N ₂	29.66	63.05	77.26	73.64	99.82	99.96	73.90	
CO ₂ : N ₂	-54.75	65.39	60.54	98.80	99.96	99.89	61.64	
Mean	-24.12c	61.61b	69.07ab	91.49ab	99.20a	99.93a		
C.V. (%)								9.24
Pupal stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	44.27	37.55	26.38	83.94	96.02	96.96	64.19	
CO ₂ : N ₂	34.43	31.80	83.17	90.53	96.03	97.79	72.29	
CO ₂ : N ₂	38.40	49.57	85.93	88.19	96.88	97.19	76.03	
CO ₂ : N ₂	43.81	45.85	68.69	98.10	97.81	97.75	75.34	
Mean	40.23c	41.19c	66.05b	90.19a	96.69a	97.42a		
C.V. (%)								5.20
Adult stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V.(%)
N ₂ 99.9%	82.64	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	97.11b	
CO ₂ : N ₂	92.69	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	98.78a	
CO ₂ : N ₂	94.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.00a	
CO ₂ : N ₂	95.24	99.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.04a	
Mean	91.14b	99.75a	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a		
C.V. (%)								0.45

^{1/} Means averaged from 4 replications.

^{2/} Means followed by same letters in rows are not significantly different by DMRT P<0.05)

Table 5 Control efficiency percentage of *Oryzaephilus surinamensis* at different developmental stage after treatment by nitrogen and carbon dioxide, October 2010-September 2013, Department of Agriculture^{1/} (1st experiment)

Egg stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V. (%)
N ₂ 99.9%	93.21	85.15	99.85	99.60	93.49	95.98	94.55	
CO ₂ : N ₂	80.00	99.92	95.35	99.94	100.00	85.81	93.50	
CO ₂ : N ₂	28.16	98.46	96.68	99.66	78.99	99.58	83.59	
CO ₂ : N ₂	56.82	100.00	98.93	99.94	100.00	99.68	92.56	
Mean	64.55b ^{2/}	95.88a	97.70a	99.79a	93.12a	95.26a		
C.V. (%)								3.66
Larval stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V. (%)
N ₂ 99.9%	96.31	97.61	99.85	100.00	99.93	100.00	98.95	
CO ₂ : N ₂	91.08	98.64	97.03	86.87	99.45	98.33	95.23	
CO ₂ : N ₂	85.05	96.37	98.49	99.21	100.00	99.68	96.47	
CO ₂ : N ₂	97.65	95.27	98.31	99.21	99.86	99.92	98.37	
Mean	92.52b	96.97ab	98.42ab	96.32ab	99.81a	99.48a		
C.V. (%)								0.85
Pupal stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V. (%)
N ₂ 99.9%	95.86	100.00	100.00	100.00	100.00	98.53	99.07	
CO ₂ : N ₂	96.44	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.41	
CO ₂ : N ₂	97.96	100.00	99.93	99.95	100.00	99.17	99.50	
CO ₂ : N ₂	95.13	100.00	100.00	100.00	99.37	100.00	99.08	
Mean	96.34b	100.00a	99.98a	99.99a	99.84a	99.43a		
C.V. (%)								0.32
Adult stage								
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean	C.V. (%)
N ₂ 99.9%	100.00	100.00	99.25	100.00	100.00	100.00	99.88	
CO ₂ : N ₂	100.00	99.83	99.50	99.74	100.00	100.00	99.85	
CO ₂ : N ₂	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
CO ₂ : N ₂	100.00	100.00	99.75	100.00	100.00	100.00	99.96	
Mean	100.00	99.96	99.63	99.94	100.00	100.00		
C.V. (%)								0.06

^{1/} Means averaged from 4 replications.

^{2/} Means followed by same letters in rows are not significantly different by DMRT P<0.05)

Table 6 Control efficiency percentage of *Sitophilus zeamais* at different developmental stage after treatment by nitrogen and carbon dioxide, October 2010-September 2013, Department of Agriculture (2nd experiment)

Treatment	Number of samples	Control efficiency percentage
N ₂ 99.9%	96	61.04
CO ₂ : N ₂ =10:90	96	60.07
CO ₂ : N ₂ =20:80	96	57.70
CO ₂ : N ₂ =30:70	96	57.34
C.V. (%)	2.4	
Exposure time	Number of samples	Control efficiency percentage
1 day	64	38.76c ^{1/}
2 days	64	57.83b
3 days	64	61.40b
4 days	64	58.37b
5 days	64	66.67ab
6 days	64	71.19a
C.V. (%)	2.57	
Insect Stages	Number of samples	Control efficiency percentage
Egg	96	92.46a
Larva	96	31.91b
Pupa	96	23.13c
Adult	96	88.64a
C.V. (%)	2.4	

^{1/} Means followed by same letters in columns are not significantly different by DMRT (P<0.05)

Table 7 Control efficiency percentage of *Sitophilus zeamais* at different developmental stage after treatment by nitrogen and carbon dioxide, October 2010-September 2013, Department of Agriculture^{1/} (2nd experiment)

Egg stage							
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean
N ₂ 99.9%	81.44	91.64	95.73	100.00	100.00	100.00	94.80
CO ₂ : N ₂	69.49	89.88	94.53	100.00	100.00	100.00	92.32
CO ₂ : N ₂	69.96	88.52	89.46	100.00	100.00	100.00	91.32
CO ₂ : N ₂	67.96	85.41	94.52	100.00	100.00	100.00	91.31
Mean	72.21	88.86 ^{2/}	93.56	100.00	100.00	100.00	
Larval stage							
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean
N ₂ 99.9%	37.75	40.75	16.45	27.13	26.14	42.35	31.76
CO ₂ : N ₂	34.94	26.56	36.07	24.11	37.07	62.24	36.83
CO ₂ : N ₂	31.29	1.44	41.73	21.22	26.92	49.52	28.69
CO ₂ : N ₂	17.34	36.85	33.72	15.77	24.26	54.20	30.36
Mean	30.33	26.40	31.99	22.06	28.60	52.08	
Pupal stage							
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean
N ₂ 99.9%	18.24	23.68	32.83	35.69	34.35	31.57	29.39
CO ₂ : N ₂	17.45	20.06	15.63	12.34	36.77	35.23	22.91
CO ₂ : N ₂	20.87	20.44	26.23	-4.82	40.49	27.07	21.71
CO ₂ : N ₂	25.29	-0.04	5.83	2.47	40.71	36.85	18.52
Mean	20.46	16.03	20.13	11.42	38.08	32.68	
Adult stage							
	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	Mean
N ₂ 99.9%	29.34	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	88.22
CO ₂ : N ₂	29.61	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	88.27
CO ₂ : N ₂	34.29	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	89.05
CO ₂ : N ₂	34.76	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	89.13
Mean	32.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

^{1/} Means averaged from 4 replications.

^{2/} Means followed by same letters in rows are not significantly different by DMRT P<0.05)

Table 8 Control efficiency percentage of *Sitophilus zeamais*, *Tribolium castaneum*, *Rhyzopertha dominica* and *Cryptolestes* sp. at different developmental stage after treatment by nitrogen 99.9% in one ton of rice, October 2010-September 2013, Department of Agriculture

Exposure time	Number of samples	Control efficiency percentage
7 day	64	96.99b ^{1/}
12 days	64	100.00a
Tested insects	Number of samples	Control efficiency percentage
<i>Sitophilus zeamais</i>	32	93.98b
<i>Tribolium castaneum</i>	32	99.98a
<i>Rhyzopertha dominica</i>	32	100.00a
<i>Cryptolestes</i> sp.	32	100.00a
Insect Stages	Number of samples	Control efficiency percentage
Egg		100.00a
Larva		95.07b
pupa		98.90a
Adult		100.00a

^{1/} Means followed by same letters in columns are not significantly different by DMRT (P<0.05)

Table 9 Control efficiency percentage of each insect at different developmental stage after treatment by nitrogen 99.9% in one ton of rice, October 2010-September 2013, Department of Agriculture (3rd experiment)

Exposure time		7 days			
Insects		<i>Sitophilus</i>	<i>Tribolium</i>	<i>Rhyzopertha</i>	<i>Cryptolestes</i>
		<i>zeamais</i>	<i>castaneum</i>	<i>dominica</i>	sp.
N2 99.9%	Egg	100.00	100.00	100.00	100.00
	Larva	60.67	100.00	100.00	100.00
	Pupa	91.16	100.00	100.00	100.00
	Adult	100.00	100.00	100.00	100.00
Exposure time		12 days			
N2 99.9%	Egg	100.00	100.00	100.00	100.00
	Larva	100.00	100.00	100.00	100.00
	Pupa	100.00	100.00	100.00	100.00
	Adult	100.00	100.00	100.00	100.00

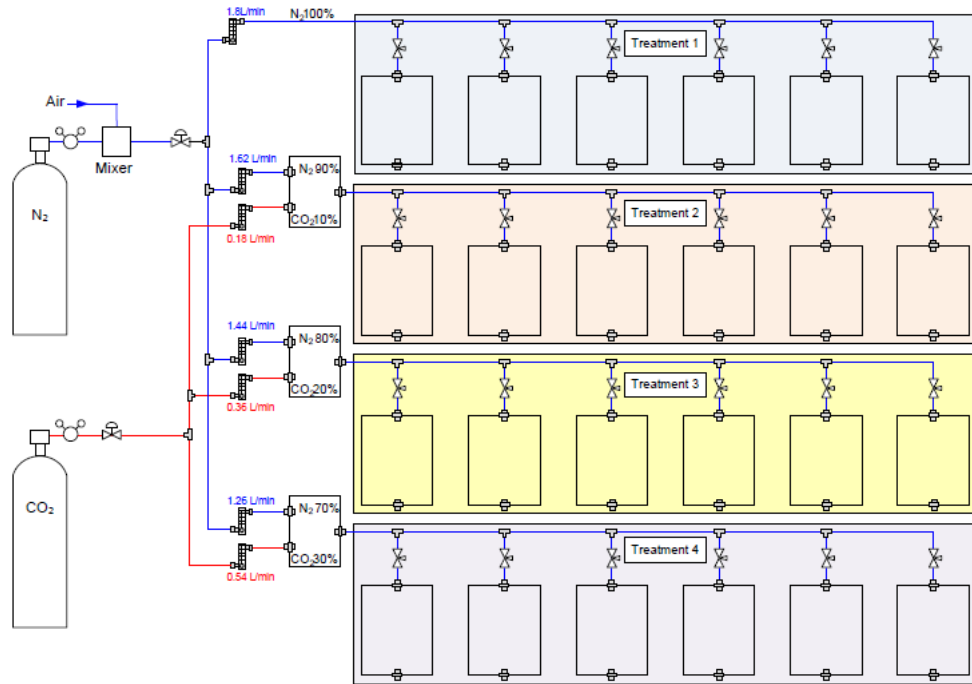


Figure 1. Gas fumigation system in laboratory

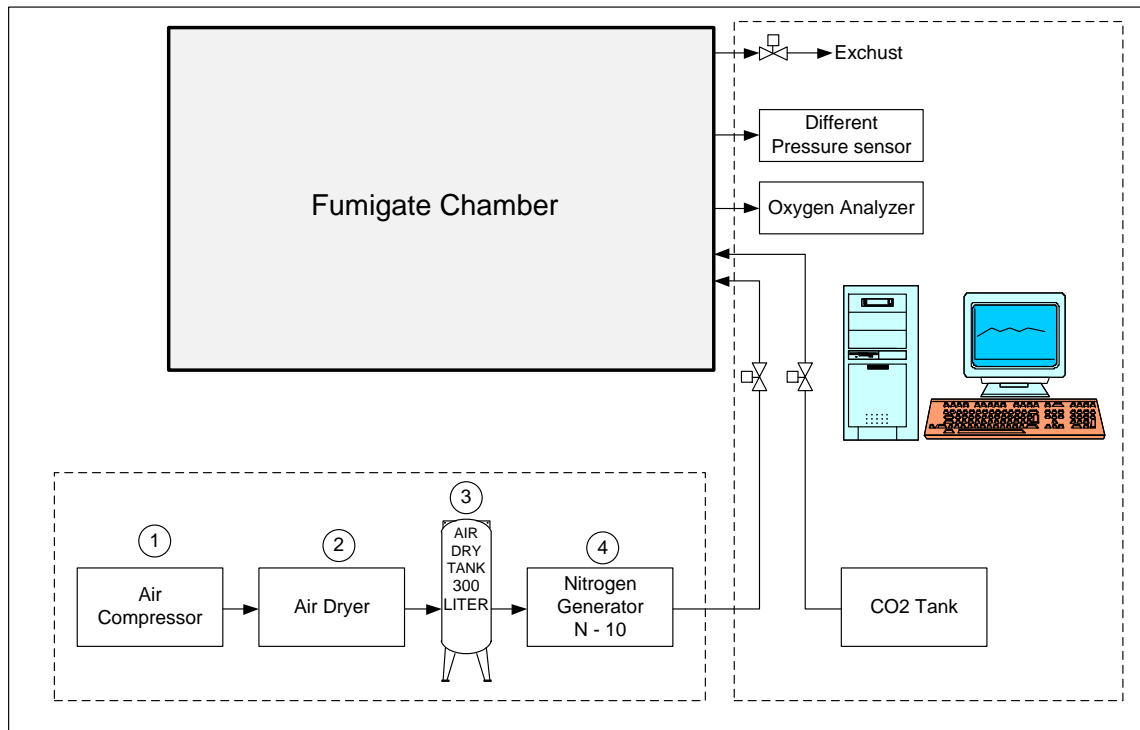


Figure 2. Gas fumigation system in warehouse