

ผลกระทบของปัจจัยในการทดสอบที่มีต่อการทดสอบความดันเพื่อการรมยา  
Effects of testing parameters on the pressurization test for fumigation purposes

วัชรพล ชยประเสริฐ<sup>1</sup> เอนก สุขเจริญ<sup>2</sup> และ ธีรเดช เดชทองจันทร์<sup>1</sup>  
Watcharapol Chayaprasert<sup>1</sup>, Anak Sukcharoen<sup>2</sup> and Teeradach Dachtongjun<sup>1</sup>

Abstract

Fumigation needs to be conducted in air-tight structures in order to prevent excessive gas loss. The pressurization test is typically used to quantify the air-tightness of a structure. Air-tightness is indicated by the pressure half-life (i.e., the time by which the pressure inside a structure decreases by half – PHL). The objective of this study was to evaluate the effects of testing parameters on the pressurization test. An analysis of the mathematical equations that describe pressure decay in closed volumes suggested that the PHL increases when a higher initial pressure is selected or the temperature inside the structure increases. However, the PHL is inversely proportional to the structure's volume. Three experiments were conducted in order to verify these findings. Pressurization tests were conducted in a 8.9 m<sup>3</sup> hopper bottom silo at two levels of air-tightness. The first experiment verified the relationship between the PHL and the initial pressure. In the second experiment, the silo was pressure tested under sunny and cloudy conditions, demonstrating the effect of temperature. In the third experiment, the PHL of a single 60 l plastic container and those of multiple containers jointed by tubings were compared. The results of all three experiments agreed with the theoretical analysis which indicated that the three testing parameters should be taken into account when the pressurization test is conducted.

**Keywords:** Pressurization test, air-tightness, fumigation

บทคัดย่อ

การรมยาที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องทำในโครงสร้างการรมที่มีความมิดชิด (air-tightness) อยู่ในระดับที่ไม่ต่ำจนเกินไปเพื่อชะลอการรั่วไหลของสารรมให้ได้มากที่สุด การทดสอบความดัน (pressurization test) เป็นวิธีที่ใช้ในการทดสอบความมิดชิดของโครงสร้างการรม ค่าที่ใช้วัดระดับความมิดชิดคือระยะเวลาที่ระดับความดันลดลงจากค่าเริ่มต้นค่าหนึ่งถึงครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้นนั้น ซึ่งเรียกว่า pressure half-life (PHL) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการทดสอบต่างๆ ที่มีต่อ PHL คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์สมการคณิตศาสตร์ที่อธิบายถึงความเปลี่ยนแปลงความดันภายในปริมาตรปิดและพบว่า ที่ระดับความมิดชิดเดียวกันการเลือกค่าความดันเริ่มต้นที่สูงขึ้นและการทดสอบความดันที่อุณหภูมิภายในโครงสร้างสูงขึ้นจะทำให้ได้ค่า PHL ที่มากขึ้น แต่ค่า PHL จะแปรผกผันกับปริมาตรของโครงสร้าง หลังจากนั้นคณะผู้วิจัยได้ทำการทดลอง 3 การทดลองเพื่อพิสูจน์ผลการวิเคราะห์สมการทางทฤษฎี ในการทดลองที่ 1 คณะผู้วิจัยทำการทดสอบความดันในไซโลก้นกรวย (hopper bottom silo) ขนาด 8.9 m<sup>3</sup> ที่ระดับความมิดชิด 2 ระดับเพื่อพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันเริ่มต้นกับ PHL ในการทดลองที่ 2 ทำการทดสอบความดันในไซโลเดิมแต่ทำการทดสอบในขณะที่ไซโลถูกและไม่ถูกแสดงแดดส่องกระทบเพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิ ในการทดลองที่ 3 ทำการทดสอบความดันในถังพลาสติกขนาด 60 l โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างถังพลาสติกเปล่า 1 ใบกับถังเปล่า 2 หรือ 3 ใบที่มีปริมาตรเชื่อมต่อกัน ผลการทดลองทั้งหมดเป็นไปตามผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการทดสอบความดันผู้ทดสอบจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยในการทดสอบทั้ง 3 ปัจจัยนี้ด้วย

**คำสำคัญ:** การทดสอบความดัน ความมิดชิด การรมยา

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

<sup>1</sup> Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University – Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

<sup>2</sup> ฝ่ายเครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

<sup>2</sup> National Agricultural Machinery Section, Research and Development Institute at Kamphaengsaen, Kasetsart University – Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

### คำนำ

สารรมที่นิยมใช้กับการรมยาเพื่อการเก็บรักษาธัญพืช เช่น ข้าวและข้าวโพด คือ ฟอสฟีน (phosphine) งานวิจัยหลายชิ้นได้ยืนยันถึงความต้านทานต่อฟอสฟีนที่เพิ่มมากขึ้นของแมลงศัตรูพืช (Rajendran and Gunasekaran, 2002; Pimentel et al., 2008) ความต้านทานที่เพิ่มมากขึ้นนี้เกิดจากการรมยาที่ไม่มีประสิทธิภาพซึ่งเป็นผลมาจากการรั่วไหลของสารรมออกจากโครงสร้างการรมที่รวดเร็วเกินไป ดังนั้นการรมยาจำเป็นต้องทำในโครงสร้างการรมที่มีความมิดชิด (air-tightness) อยู่ในระดับที่ไม่ต่ำจนเกินไปเพื่อชะลอการรั่วไหลของสารรมให้ได้มากที่สุด การทดสอบความดัน (pressurization test) เป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความมิดชิดของโครงสร้างการรม (Bond, 1984) โดยในการทดสอบความดันภายในโครงสร้างการรมจะถูกทำให้สูงขึ้นกว่าสภาวะบรรยากาศที่ระดับความดันค่าหนึ่งด้วยการอัดอากาศ หรือทำให้ต่ำลงด้วยการดูดอากาศออก จากนั้นความดันภายในโครงสร้างการรมจะถูกปล่อยให้ลดลงตามธรรมชาติพร้อมกับทำการจับเวลา ระดับ air-tightness จะถูกกำหนดโดยระยะเวลาที่ระดับความดันลดลงจากค่าเริ่มต้นค่าหนึ่งถึงครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้นนั้น ระยะเวลานี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่า pressure half-life (PHL) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ในการทดสอบความดันที่มีต่อ PHL เพื่อผู้ปฏิบัติงานสามารถคาดคะเนความมิดชิดของโครงสร้างการรมได้อย่างแม่นยำมากที่สุด

### อุปกรณ์และวิธีการ

หากกำหนดให้ระดับความดันเริ่มต้นของการทดสอบความดันเป็น  $p_1$  (Pa) และระดับความดันที่ลดลงตามธรรมชาติที่เวลา  $t$  (min) ใดๆ เป็น  $p_2$  (Pa) Graver and Banks (2008) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $p_1$  และ  $p_2$  ดังนี้

$$p_1^{1-n} - p_2^{1-n} = (1-n)b \frac{\rho RT}{28.96V} t \quad (1)$$

โดยที่  $b$  ( $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{Pa}^n$ ) และ  $n$  (dimensionless) คือ ค่าคงที่,  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศซึ่งสมมติว่าคงที่ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $R$  คือ ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ ( $\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$ ),  $T$  คือ อุณหภูมิภายในโครงสร้างการรม (K), ค่าคงที่ 28.96 คือ มวลโมเลกุลของอากาศ ( $\text{g}/\text{mol}$ ), และ  $V$  คือ ปริมาตรของโครงสร้างการรม ( $\text{m}^3$ ) สมการที่ 1 สามารถถูกจัดให้อยู่ในรูปต่อไปนี้

$$p_2 = (p_1^\alpha - \alpha\beta t)^\frac{1}{\alpha} \quad (2)$$

โดยที่

$$\alpha = (1-n) \text{ และ } \beta = b \frac{\rho RT}{28.96V}$$

จากสมการที่ 1 และ 2 จะเห็นได้ว่าที่ระดับความมิดชิดเดียวกันการเลือกค่าความดันเริ่มต้น  $p_1$  ที่สูงขึ้นและการทดสอบความดันที่อุณหภูมิภายในโครงสร้างสูงขึ้นจะทำให้ได้ค่า PHL (ค่า  $t$  เมื่อ  $p_2 = 0.5p_1$ ) ที่มากขึ้น แต่ค่า PHL จะแปรผกผันกับปริมาตรของโครงสร้าง คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลอง 3 การทดลองเพื่อพิสูจน์ผลการวิเคราะห์นี้ ในการทดลองที่ 1 คณะผู้วิจัยทำการทดสอบความดันในไซโลก้นกรวย (hopper bottom silo) ขนาด  $8.9 \text{ m}^3$  เพื่อพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันเริ่มต้นกับ PHL ซึ่งไซโลนี้มีการติดตั้งบอลวาล์ว (ball valve) ให้สามารถปรับระดับความมิดชิดได้ โดยได้ทำการทดสอบความดันที่ระดับความมิดชิด 2 ระดับ คือ เปิดวาล์วครึ่งหนึ่ง (partially-open) และเปิดวาล์วจนสุด (fully-open) เลือกความดันเริ่มต้นที่ 2000 Pa และทำการทดสอบแบบ 3 ซ้ำ ในการทดลองที่ 2 ทำการทดสอบความดันในไซโลเดิมเพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิ โดยเปิดวาล์วจนสุดแต่ทำการทดสอบในขณะที่ไซโลถูกและไม่ได้ถูกแสดงแดดส่องกระทบโดยตรง เลือกความดันเริ่มต้นที่ 1000 Pa และทำการทดสอบแบบ 6 ซ้ำ ในการทดลองที่ 3 ทำการทดสอบความดันในถังพลาสติกขนาด 60 l เพื่อเปรียบเทียบ PHL ระหว่างถังพลาสติกเปล่า 1 ใบกับถังเปล่า 2 หรือ 3 ใบที่มีปริมาตรเชื่อมต่อกัน โดยช่องเปิดที่อากาศสามารถรั่วไหลออกจากถังในทุกการทดลองมีเพียง 1 ช่องและมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลง เลือกความดันเริ่มต้นที่ 2000 Pa และทำการทดสอบแบบ 3 ซ้ำ ในทุกการทดลองทำการบันทึกความดันทุกๆ 1 s ด้วยเครื่อง Climomaster Model 6531 (Kanomax Japan Inc., Osaka, Japan) ค่าความดันที่บันทึกได้ของการทดสอบแต่ละครั้งจะถูกทำการถดถอย (curve fitting) ด้วยสมการที่ 2 เพื่อคำนวณค่า PHL

ผล

เส้นการลดของความดัน (pressure decay curve) ในการทดลองที่ 1 2 และ 3 แสดงอยู่ใน Figure 1a, 1b และ 1c ตามลำดับ เมื่อทำการถดถอย (curve fitting) เส้นการลดของความดันแต่ละเส้นด้วยสมการที่ 2 ค่า coefficient of determination ( $R^2$ ) ที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่า 0.995 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า PHL ของเส้นการลดของความดันในแต่ละการทดลองแสดงอยู่ใน Table 1 ในการทดลองที่ 1 ค่าเฉลี่ยของ  $\square$  PHL ( $p_1 = 2000$  Pa และ  $p_2 = 1000$  Pa) เมื่อเปิดวาล์วครั้งแรกหนึ่งและเมื่อเปิดวาล์วเต็มที่มีค่าเท่ากับ 2.993 และ 0.833 min ตามลำดับ ในการทดลองที่ 2 ค่าเฉลี่ยของ PHL ( $p_1 = 1000$  Pa และ  $p_2 = 500$  Pa) ที่ได้จากการทดสอบความดันเมื่อไม่มีแสงแดดส่องกระทบไซโลโดยตรงมีค่าเท่ากับ 0.685 min แต่เมื่อมีแสงแดดส่องกระทบไซโลค่าเฉลี่ยของ PHL เพิ่มขึ้นเป็น 1.272 min ในการทดลองที่ 3 ค่าเฉลี่ยของ PHL ( $p_1 = 2000$  Pa และ  $p_2 = 1000$  Pa) เพิ่มขึ้นจาก 0.378 min เป็น 0.789 min เป็น 1.209 min เมื่อปริมาตร (จำนวนถังพลาสติก) เพิ่มขึ้นจาก 60 l เป็น 120 l เป็น 180 l ตามลำดับ

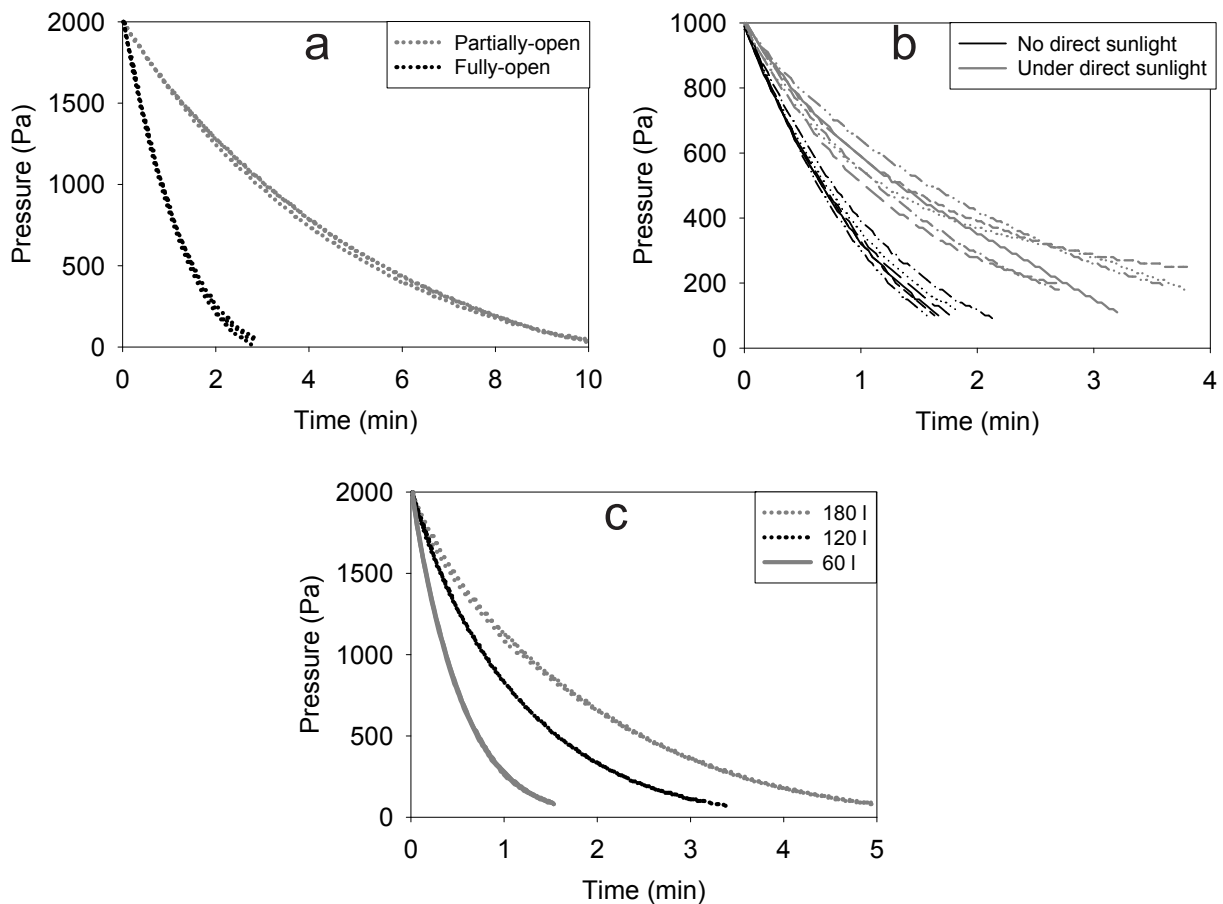


Figure 1 Measured pressure decay curves of (a) Experiment 1, (b) Experiment 2 and (c) Experiment 3.

Table 1 Summary of the means and standard deviations in a unit of minutes of the PHLs in all experiments.

	Experiment 1		Experiment 2		Experiment 3		
	Partially-open	Fully-open	No direct sunlight	Under direct sunlight	60 l	120 l	180 l
Mean	2.993	0.833	0.685	1.272	0.378	0.789	1.209
S.D.	0.098	0.015	0.047	0.193	0.009	0.010	0.025

### วิจารณ์ผล

ค่า coefficient of determination ที่สูงแสดงให้เห็นว่าสมการที่ 2 สามารถอธิบายอัตราการลดลงของความดันได้เป็นอย่างดี ดังนั้นสมการนี้สามารถถูกนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของการทดสอบความดันหรือคาดการณ์ผลที่จะได้จากการทดสอบได้ก่อนการทดสอบจริง เมื่อพิจารณาสมการที่ 2 อย่างละเอียดจะเห็นได้ว่าค่า PHL จะมีค่าลดลงหากผู้ปฏิบัติงานเลือกทำการทดสอบความดันที่ระดับความดันเริ่มต้นที่ต่ำลง ยกตัวอย่างเช่น ค่าเฉลี่ยของ PHL ( $p_1 = 2000$  Pa และ  $p_2 = 1000$  Pa) ของเส้นการลดของความดันเมื่อทำการเปิดวาล์วครั้งแรกหนึ่งใน Figure 1a มีค่าเป็น 2.993 min เมื่อเลือกค่าความดันเริ่มต้นเป็น 2000 Pa แต่เมื่อเลือกค่าความดันเริ่มต้นเป็น 500 Pa ค่าเฉลี่ยของ PHL ( $p_1 = 500$  Pa และ  $p_2 = 250$  Pa) ของเส้นการลดของความดันกลุ่มเดิมนี้อาจมีค่าเป็น 1.878 min จาก Figure 1b จะเห็นได้ว่าเมื่อมีแสงแดดส่องกระทบไซโลความเร็วในการลดลงของความดันภายในไซโลช้ากว่าเมื่อไม่มีแสงแดดส่องอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของตัวแปรอุณหภูมิในสมการที่ 2 คือ ค่า PHL แปรผันตรงกับอุณหภูมิภายในโครงสร้างการรม ในทำนองเดียวกันค่า PHL แปรผกผันกับปริมาตรของโครงสร้างการรม ผลของการทดลองที่ 3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์นี้ ค่าเฉลี่ยของ PHL เมื่อทดสอบกับถังพลาสติก 3 และ 2 ใบเชื่อมต่อกันมีค่าเป็นประมาณ 3 และ 2 เท่าของค่าเฉลี่ยของ PHL เมื่อทดสอบกับถังเพียง 1 ใบ

การทดสอบด้วยความดันมีความสำคัญต่อผลสำเร็จของการรมยาตามจะเห็นได้จากข้อแนะนำจากแหล่งต่างๆ Bond (1984) ให้คำแนะนำว่าไซโลซึ่งมีความจุ 300 ถึง 10,000 ตันควรมีค่า PHL จาก 500 ถึง 250 Pa ไม่ต่ำกว่า 5 min จึงจะเหมาะสมต่อการใช้รมยาด้วยฟอสฟีน มาตรฐานของประเทศออสเตรเลีย (Anonymous, 2010) ยังแนะนำให้ใช้ค่า PHL เดียวกันนี้สำหรับไซโลเพื่อการรมยาด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ Australia Quarantine and Inspection Service กำหนดให้ตู้ขนส่งสินค้า (shipping container) จะต้องมีความ PHL ซึ่งวัดจาก 200 ถึง 100 Pa มีค่าไม่ต่ำกว่า 10 s จึงจะเหมาะสมต่อการรมยาด้วยเมทิลโบรไมด์ (Anonymous, 2008) จะเห็นได้ว่าคำแนะนำเกี่ยวกับค่า PHL ที่เหมาะสมเหล่านี้ยังไม่มีผลสอดคล้องตรงกัน นอกจากนี้ปัจจัยต่างๆ ในการทดสอบความดันยังมีผลกระทบต่อค่า PHL ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อกำหนดค่า PHL ที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการทดสอบความดันเพื่อการรมยาของประเทศไทย

### สรุป

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการทดสอบความดันกับโครงสร้างการรมใด ๆ ค่า PHL ที่ได้จะได้รับผลกระทบจากการเลือกใช้ระดับความดันเริ่มต้น อุณหภูมิภายในโครงสร้าง และปริมาตรของโครงสร้าง ซึ่งทำให้ปัจจัยเหล่านี้จะมีอิทธิพลต่อความเที่ยงตรงในการคาดการณ์อัตราการรั่วไหลของสารรมจากผลการทดสอบความดัน ดังนั้นในการทดสอบความดันผู้ทดสอบจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยในการทดสอบทั้ง 3 ปัจจัยนี้ด้วย

### คำขอบคุณ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำงานและนำเสนอผลงานวิจัยนี้

### เอกสารอ้างอิง

- Anonymous. 2008. AQIS Methyl Bromide Standard - Treatments and Fumigants - Version 1.3. Australian Quarantine and Inspection Service.
- Anonymous. 2010. Sealed grain-storage silos - sealing requirements for insect control. Standards Australia, Sydney.
- Bond, E.J., 1984. Manual of fumigation for insect control, FAO Plant Production and Protection Papers - 54, Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Graver, J.v.S. and H.J. Banks. 2008. Freight containers - are they sufficiently gastight for quarantine & pre-shipment fumigation with methyl bromide in the 21<sup>st</sup> century? In: G. Daolin, S. Navarro, Y. Jian, T. Cheng, J. Zuxun, L. Yue, L. Yang and W. Haipeng. (eds.). *Proceedings of the Eighth International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products*, 21-26 September 2008, Chengdu, China, Sichuan Publishing Group, Sichuan Publishing House of Science & Technology, Chengdu, China. pp. 441-445.
- Pimentel, M.A.G., L.R.D.A. Faroni, R.N.C. Guedes, A.H. Sousa and M.R. Tótola. 2009. Phosphine resistance in Brazilian populations of *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products Research* 45: 71-74.
- Rajendran, S. and N. Gunasekaran. 2002. The response of phosphine-resistant lesser grain borer *Rhyzopertha dominica* and rice weevil *Sitophilus oryzae* in mixed-age cultures to varying concentrations of phosphine. *Pest Management Science* 58: 277-281.