

การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9

## การทดลองเพื่อพิสูจน์สมการการสูญเสียก๊าซในระหว่างการรมยา Validation of fumigant leakage equations by experimentation

กัลยา หนูขำ<sup>1</sup>, วัชรพล ชยประเสริฐ<sup>1</sup> และ อนเนก สุขเจริญ<sup>2</sup>

Kanlaya Nukham<sup>1</sup>, Watcharapol Chayaprasert<sup>1</sup> and Anak Sukcharoen<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

สมการคณิตศาสตร์ที่อธิบายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาถูกพิสูจน์ด้วยการทดลองเชิงปฏิบัติจริง สมการดังกล่าวอยู่ในรูป first-order kinetic และมีค่าคงที่ชื่อว่า ระยะเวลาที่ความเข้มข้นของก๊าซลดลงครึ่งหนึ่ง (half-loss time ; HLT) เป็นตัวแสดงถึงอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซ ทำการทดลองรมยาในไซโลจำลองขนาด 228.5 และ 2,160 l โดยใช้ก๊าซ CO<sub>2</sub> เป็นก๊าซตัวแทนสารรม การรั่วไหลของก๊าซ CO<sub>2</sub> ตลอดระยะเวลาการทดลองถูกจำลองให้คงที่ โดยใช้ปั๊มป้อนอากาศ ทำการทดลองที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ กัน ( $8.33 \times 10^{-6}$ – $83.3 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s) concentration decay curve (เส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้น) ที่ได้จากการทดลองถูกฟิตเคอร์ฟ (fit curve) ด้วยสมการคณิตศาสตร์ข้างต้น เพื่อหาค่า HLT<sub>a</sub> (ค่า HLT จากการทดลอง) ค่า HLT<sub>a</sub> จะถูกเปรียบเทียบกับค่า HLT<sub>c</sub> (ค่า HLT ทางทฤษฎี) ซึ่งถูกคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของถังและอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่ถัง ค่า HLT<sub>a</sub> ของถังขนาด 228.5 และ 2,160 l มีค่าอยู่ระหว่าง 5.02–17.88 h และระหว่าง 4.72–27.45 h ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า HLT<sub>c</sub> ผลการทดลองเกือบทั้งหมดมี % error ไม่เกิน 20% ดังนั้น การสูญเสียก๊าซในระหว่างการรมยาเป็นกระบวนการที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ first-order kinetic และค่า HLT เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรของโครงสร้างการรมยา และเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรมยา ตามทฤษฎีจริง

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

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

<sup>2</sup> ฝ่ายเครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

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

### ABSTRACT

The objective of the present study was to experimentally validate the first-order kinetic equation that describes the characteristics of gas concentration decay during structural fumigation. The decay rate is governed by the constant called half-loss time (HLT). Fumigation experiments were conducted in two mockup silos with volumes of 228.5 and 2,160 l. During each experiment, fresh air was pumped into the silo at a constant rate ( $8.33 \times 10^{-6}$ – $83.3 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s) to simulate leakage. The resulting concentration decay curves were fitted with the previously mentioned equation to determine the actual HLTs. These actual HLTs (i.e., HLT<sub>a</sub>) were compared to their corresponding theoretical values (i.e., HLT<sub>c</sub>). It has been analytically shown elsewhere that the theoretical HLT is proportional to the silo's volume and inverse-proportional to the leakage rate. The fumigations in the 228.5l and 2,160l silos yielded the values of HLT<sub>a</sub> in ranges of 5.02–17.88 h and 4.72–27.45 h, respectively. The actual HLTs differed from their theoretical counterparts no more than 20%. As a result, the analytical equations that describe fumigant leakage characteristics were considered validated based on these results.

**Key words:** fumigation, half-loss time, superposition, first-order kinetic

e-mail: fengwpc@ku.ac.th

### คำนำ

สาเหตุสำคัญที่ทำให้คุณภาพของวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น ข้าว, มันสำปะหลัง, หรือเมล็ดข้าวโพดลดลงคือ ความเสียหายที่เกิดจากแมลงศัตรูในโรงเก็บ (post-harvest insect pest) วิธีการกำจัดแมลงศัตรูในโรงเก็บที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งคือ การรมยา (fumigation) ในระหว่างการรมยา สารซึ่งอยู่ในรูปของก๊าซเช่น เมทิลโบรไมด์ (methyl bromide) หรือ ฟอสฟีน (phosphine) จะถูกปล่อยเข้าไปในโครงสร้างการรมยา (fumigation enclosure) ก๊าซนี้จะมีคุณสมบัติเป็นพิษต่อแมลง และเมื่อแมลงได้รับก๊าซพิษเป็นเวลานานมากพอ แมลงก็จะไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ ปัจจัยสำคัญที่ทำให้การรมยาประสบความสำเร็จคือ ความเข้มข้นของสารระหว่างกรรม และระยะเวลาการรม (Kenaga, 1961; Bell, 1992) ในระหว่างการรมยาในไซโล หากสารรมรั่วไหลออกจากไซโลที่อัตราสูงผิดปกติจะทำให้ระดับความเข้มข้นอยู่ที่ระดับที่ต่ำกว่าค่าความเป็นพิษ และเป็นผลให้การรมยานั้นไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นความสามารถในการทำนายอัตราการสูญเสียก๊าซในระหว่างการรมยาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดแมลงของกระบวนการรมยาได้ อัตราการลดลงของความเข้มข้นของก๊าซในโครงสร้างการรมในระหว่างการรมสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการ first-order kinetic ต่อไปนี้ (Cryer and Barnekow, 2006)

$$\frac{C_t}{C_i} = \frac{1}{2^{\frac{t}{HLT}}} \quad (1)$$

โดยที่  $C_t$  คือ ความเข้มข้นของก๊าซ ( $g/m^3$ ) ที่เวลา  $t$  (h) ใดๆ,  $C_i$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $g/m^3$ ) และ HLT คือ half-loss time (h) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ความเข้มข้นของก๊าซลดลงครึ่งหนึ่ง ดังนั้นการทำนายอัตราการสูญเสียก๊าซก็คือ ความสามารถในการทำนายค่า HLT ได้อย่างถูกต้อง Chayaprasert (2007) ใช้ computational fluid dynamics (CFD) model ทำนาย HLT ของการรมยาในโครงสร้างตึกขนาด  $40,210 m^3$  แต่โมเดล (model) ดังกล่าวมีความซับซ้อนและใช้เวลาคำนวณมากกว่า 7 d ต่อการจำลองสถานการณ์ (simulation) แต่ครั้งจึงไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม Chayaprasert (2007) ได้ทำการพิสูจน์ทางทฤษฎีโดยใช้สมการการนำพาสปีชีส์ (species transport equation) และแสดงให้เห็นว่า

$$HLT = \frac{V \ln(2)}{Q \cdot 3600} \quad (2)$$

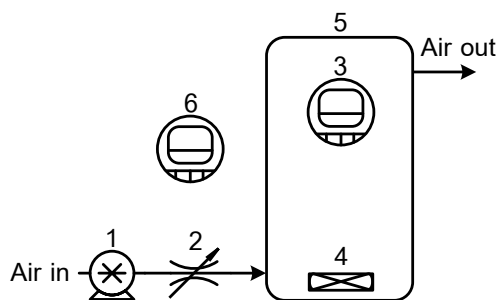
โดยที่  $V$  คือ ปริมาตรของโครงสร้างการรมยา ( $m^3$ ) และ  $Q$  คือ อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรมยา (infiltration rate,  $m^3/s$ ) จากสมการที่ 2 จะเห็นได้ว่า หากเราสามารถทำนายค่าของอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรม,  $Q$ , ได้ล่วงหน้า เราจะสามารถทำนายค่า HLT ได้ก่อนการรมยาจริง วิธีการรวมผล (superposition method) เป็นวิธีสำหรับการทำนายอัตราการแลกเปลี่ยนปริมาตรที่นิยมใช้กันในงานออกแบบระบบปรับอากาศภายในอาคาร วิธีการดังกล่าวกำหนดให้อัตราการแลกเปลี่ยนปริมาตรระหว่างอากาศภายในอาคารและอากาศนอกอาคารเกิดจาก อัตราการแลกเปลี่ยนปริมาตรที่เกิดจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิภายในโครงสร้างกับอุณหภูมิบรรยากาศภายนอก  $\Delta t$  (K) บวกรวมกับอัตราการแลกเปลี่ยนปริมาตรที่เกิดจากความเร็วลม  $U$  (m/s) ที่กระทำต่ออาคาร ดังสมการต่อไปนี้ (ASHRAE, 2001)

$$Q = \frac{A_L}{1,000} \sqrt{C_s \Delta t + C_w U^2} \quad (3)$$

โดยที่  $C_s$  คือ สัมประสิทธิ์ความลอยตัว (stack coefficient,  $(L/s)^2/cm^4-K$ ),  $C_w$  คือ สัมประสิทธิ์ลม (wind coefficient,  $(L/s)^2/cm^4-(m/s)^2$ ) และ  $A_L$  คือ พื้นที่รอยรั่วเสมือน (effective leakage area,  $cm^3$ ) สังเกตว่า Chayaprasert (2007) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 1 และ 2 ด้วยการวิเคราะห์ทางทฤษฎี แต่ยังไม่เคยมีนักวิจัยกลุ่มใดพิสูจน์ความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยการทดลองเชิงปฏิบัติจริงมาก่อน ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการศึกษาคั้งปัจจุบันนี้คือ การพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 1 และ 2 ด้วยการทดลองเชิงปฏิบัติจริง ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญของการทำนายอัตราการสูญเสียก๊าซในระหว่างการรมยาด้วยวิธีรวมผล (สมการที่ 1-3) สำหรับการศึกษาในอนาคต

### อุปกรณ์และวิธีการ

ทำการพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 1 และ 2 ด้วยการทดลองคล้ายกับการรมยาในไซโลจำลองซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 1 อุปกรณ์หลักประกอบด้วยถังไซโลจำลอง, บัมบ้อนอากาศไฟฟ้า (manufacturer unknown), Thorpe tube flow meter (ไฟลัมมิเตอร์แบบลูกลอย) พร้อมวาล์วปรับอัตราการไหล (FR2000, Key Instruments Co. Ltd., Trevose, PA, USA) และ CO<sub>2</sub> data logger (อุปกรณ์บันทึกค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) (CO210, Extech Instrument Corp., Nashua, NH, USA) ถังไซโลจำลองเป็นถังพลาสติก polyethylene (PE) ทรงกระบอก ในการศึกษาคั้งนี้ ทำการทดลองกับถัง 2 ขนาดคือ 228.5 และ 2,160 l โดยแต่ละถังมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.56 m สูง 0.93 m และเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.11 m สูง 1.61 m ตามลำดับและถังพลาสติกมีเสถียรแต่ละขนาดถูกเจาะรูจำนวน 2 รู เพื่อติดตั้งข้อต่อท่อลม (tubing quick connect) รูที่ 1 ถูกเจาะบริเวณด้านล่างของถัง ซึ่งสูงจากกันถึง 10 cm รูที่ 2 ถูกเจาะที่ฝั่งตรงกันข้ามกับรูที่ 1 บริเวณด้านบนของถัง ซึ่งต่ำจากขอบบนของถัง 10 cm โดยการกำหนดการเจาะรูจะกำหนดให้เจาะ เชื่อมต่อบัมบ้อนอากาศและ flow meter เข้ากับถังไซโลที่ตำแหน่งรูที่ 1 โดยใช้ท่อลม polyurethane (PU) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6 mm รูที่ 2 จะถูกเปิดให้ก๊าซไหลผ่านได้ ภายในถัง ที่บริเวณกันถังติดตั้งพัดลมไฟฟ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8.9 cm (manufacturer unknown)



ภาพที่ 1 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดลอง ประกอบด้วย (1) บัมบ้อนอากาศไฟฟ้า, (2) flow meter พร้อมวาล์วปรับอัตราการไหล, (3) CO<sub>2</sub> data logger ภายในถัง, (4) พัดลมไฟฟ้า, (5) ถังไซโลจำลอง, และ (6) CO<sub>2</sub> data logger ภายนอกถัง เส้นทึบหนาแสดงท่อลมซึ่งเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ

ก๊าซ CO<sub>2</sub> ถูกใช้เป็นก๊าซตัวแทนสารรวม (tracer gas) ตลอดระยะเวลาการทดลอง พัดลมไฟฟ้าขนาด 12 VDC จะทำงานอยู่ตลอดเวลา เพื่อช่วยให้ก๊าซ CO<sub>2</sub> ภายในถังกระจายตัวอย่างทั่วถึงกัน ช่องเปิดที่ใช้สำหรับนำพัดลมและ CO<sub>2</sub> data logger เข้าติดตั้งภายในถังไซโลถูกซีลด้วยกระดาษกาว

การทดลองแต่ละครั้งเริ่มต้นจากการเติมก๊าซ CO<sub>2</sub> เข้าสู่ถังไซโลให้มีความเข้มข้นเริ่มต้น (C<sub>i</sub> ในสมการที่ 1) ไม่เกิน 10,000 ppm (part per million) ก๊าซที่ถูกเติมเข้าสู่ถังเป็นก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นประมาณ 100% ซึ่งได้จากถังก๊าซ CO<sub>2</sub> อัดความดัน (pressurized CO<sub>2</sub> cylinder) การรั่วไหลของก๊าซ CO<sub>2</sub> จะถูกจำลองด้วยปั๊มป้อนอากาศ ตลอดระยะเวลาการทดลอง ปั๊มป้อนอากาศจะทำงานที่ความเร็วคงที่ ทำให้อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ถังไซโล (Q ในสมการที่ 2) คงที่ตลอดเวลา CO<sub>2</sub> data logger ที่ติดตั้งไว้ทั้ง 2 ตัว จะบันทึกค่าความเข้มข้นก๊าซ CO<sub>2</sub> ทุกๆ 30 s การทดลองแต่ละครั้งจะใช้ระยะเวลาการรวม (exposure time) 10–48 h ทำการทดลองที่อัตราการป้อนอากาศของปั๊ม (Q ในสมการที่ 2) เท่ากับ  $8.33 \times 10^{-6}$ ,  $5.00 \times 10^{-6}$ ,  $3.33 \times 10^{-6}$ ,  $2.67 \times 10^{-6}$ , และ  $2.00 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s สำหรับถังขนาด 228.5 l และเท่ากับ  $83.3 \times 10^{-6}$ ,  $50.0 \times 10^{-6}$ ,  $33.3 \times 10^{-6}$ ,  $26.7 \times 10^{-6}$ , และ  $20.0 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s สำหรับถังขนาด 2,160 l ที่แต่ละอัตราการป้อนอากาศ ทำการทดลอง 3 ชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองรวมยาแต่ละครั้ง ค่าความเข้มข้นก๊าซ CO<sub>2</sub> ในถังจะถูกหักกลับด้วยค่าความเข้มข้นก๊าซ CO<sub>2</sub> นอกถัง เพื่อให้ได้ concentration decay curve (เส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซ) concentration decay curve นี้จะถูกผ่านกระบวนการ normalization คือ ค่าความเข้มข้นก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ทุกจุดเวลา (C<sub>i</sub> ในสมการที่ 1) จะถูกหารด้วยค่าความเข้มข้นก๊าซ CO<sub>2</sub> เริ่มต้น (C<sub>i</sub> ในสมการที่ 1) concentration decay curve ที่ถูก normalize แล้วจะถูกฟิตเคอร์ฟ (fit curve) โดยใช้สมการที่ 1 เพื่อคำนวณหาค่า HLT จาก การทดลอง ซึ่งกำหนดให้เป็น HLT<sub>o</sub> ค่า HLT จากการทดลองจะถูกเปรียบเทียบกับค่า HLT ทางทฤษฎี ซึ่งกำหนดให้เป็น HLT<sub>c</sub> สังเกตว่า ผู้วิจัยทราบปริมาตรของถังไซโลจำลอง และทราบอัตราการป้อนอากาศภายนอกเข้าสู่ถัง ทำให้สามารถคำนวณค่า HLT<sub>c</sub> ได้โดยใช้สมการที่ 2 ดังนั้น การศึกษาค้นคว้านี้จะสนับสนุนผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของ Chayaprasert (2007) เมื่อ HLT<sub>o</sub> มีค่าใกล้เคียงกับ HLT<sub>c</sub>

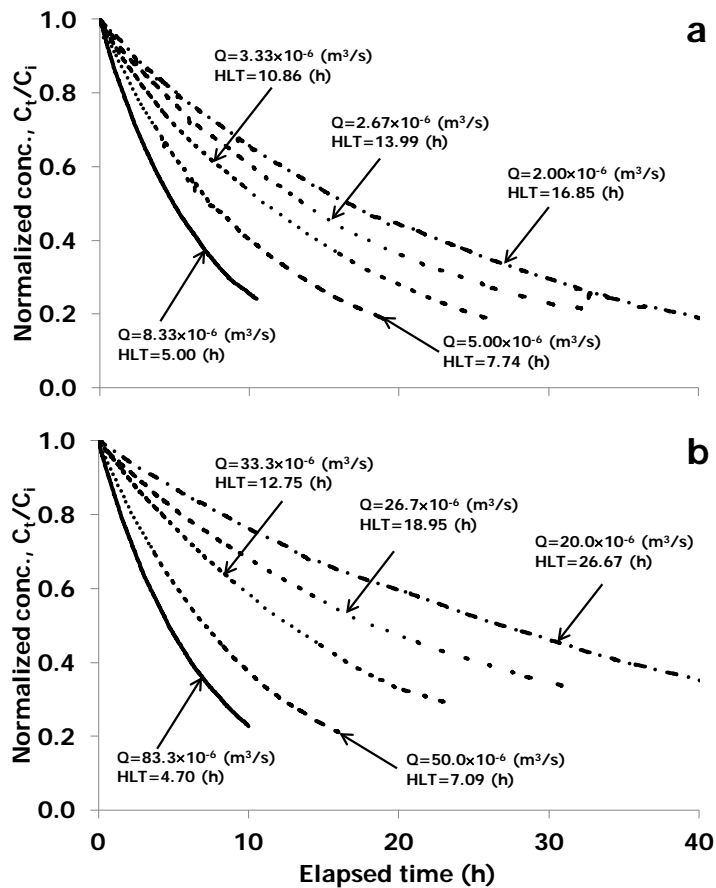
#### ผลและวิจารณ์

ภาพที่ 2a แสดงตัวอย่าง normalized concentration decay curve ซึ่งเป็นผลการทดลอง 1 ชั่วโมงในถังขนาด 228.5 l ที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ ภาพที่ 2b แสดงตัวอย่างผลการทดลองของถังขนาด 2,160 l ในลักษณะเดียวกับภาพที่ 2a ค่า HLT ของทั้ง 2 ถัง เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่ออากาศภายนอกรั่วไหลเข้าสู่ถังไซโลในอัตราที่สูงขึ้น ความเข้มข้นก๊าซ CO<sub>2</sub> ในถังจะลดลงเร็วขึ้น ในถังขนาด 228.5 l เมื่ออัตราการป้อนอากาศเพิ่มขึ้นจาก  $2.00 \times 10^{-6}$  ไปเป็น  $8.33 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s ค่า HLT ลดลงจาก 16.85 ไปเป็น 5.00 h ในถังขนาด 2,160 l เมื่ออัตราการป้อนอากาศเพิ่มขึ้นจาก  $20.0 \times 10^{-6}$  ไปเป็น  $83.3 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s ค่า HLT ลดลงจาก 26.67 ไปเป็น 4.70 h ค่าเฉลี่ยของ HLT ที่ได้จากการฟิตเคอร์ฟ normalized concentration decay curve ของทุกชั่วโมงการทดลองด้วยสมการที่ 1 (i.e., HLT<sub>o</sub>) ถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 1 ในการศึกษาครั้งนี้ ค่า r<sup>2</sup> (coefficient of determination หรือ สัมประสิทธิ์การอธิบาย) ของการฟิตเคอร์ฟ normalized concentration decay curve ของทุกชั่วโมงการทดลอง มีค่าไม่ต่ำกว่า 0.995 ค่า HLT<sub>o</sub> ของถังขนาด 228.5 และ 2,160 l มีค่าอยู่ระหว่าง 5.02–17.88 h และระหว่าง 4.72–27.45 h ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกัน % error (สมการที่ 4) ของผลการทดลองในถังขนาด 228.5 และ 2,160 l มีค่าอยู่ระหว่าง 4.92–21.04% และระหว่าง 5.6–32.0% ตามลำดับ

$$\% \text{ error} = \left| \frac{HLT_c - HLT_a}{HLT_c} \right| \times 100 \quad (4)$$

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองเกือบทั้งหมดมี % error ไม่เกิน 20% สังเกตว่า % error มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนอากาศลดลง คณะผู้วิจัยคาดว่าค่า % error สูงผิดปกติ (i.e., สูงกว่า 20%) เกิดขึ้นจากสาเหตุหลักคือ

- 1) ที่อัตราการไหลต่างๆ สเกล (scale) อ่านค่าอัตราการไหลของ flow meter มีความละเอียดต่ำ ทำให้ปรับตั้งอัตราการป้อนอากาศได้ไม่เที่ยงตรง
- 2) เมื่อปั๊มป้อนอากาศถูกใช้งานเป็นเวลานาน (i.e., เกินกว่า 10 h) ประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มไม่คงที่



ภาพที่ 2 ตัวอย่าง normalized concentration decay curve ที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ จาก (a) ถึงขนาด 228.5 l และ (b) ถึงขนาด 2,160 l

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบระหว่าง HLT ทางทฤษฎี (i.e.,  $HLT_a$ ) และ HLT จากการทดลอง (i.e.,  $HLT_c$ )

การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9

| volumn (l) | $Q \times 10^{-6}$ (m <sup>3</sup> /s) | HLT <sub>c</sub> (h) | HLT <sub>a</sub> (h)<br>mean $\pm$ SD | % error |
|------------|--|----------------------|---------------------------------------|---------|
| 228.5      | 8.33                                   | 5.28                 | 5.02 $\pm$ 0.08                       | 4.92    |
|            | 5.00                                   | 8.80                 | 7.93 $\pm$ 0.30                       | 9.89    |
|            | 3.33                                   | 13.21                | 10.43 $\pm$ 0.51                      | 21.04   |
|            | 2.67                                   | 16.48                | 14.92 $\pm$ 1.57                      | 9.47    |
|            | 2.00                                   | 22.00                | 18.35 $\pm$ 0.13                      | 18.35   |
| 2,160      | 83.3                                   | 5.0                  | 4.72 $\pm$ 0.03                       | 5.6     |
|            | 50.0                                   | 8.3                  | 7.33 $\pm$ 0.19                       | 11.7    |
|            | 33.3                                   | 12.5                 | 13.33 $\pm$ 0.53                      | 6.64    |
|            | 26.7                                   | 15.6                 | 18.33 $\pm$ 0.56                      | 17.5    |
|            | 20.0                                   | 20.8                 | 27.45 $\pm$ 1.31                      | 32.0    |

ค่า  $r^2$  ของการฟิตเคอร์ฟที่เข้าใกล้ 1 และ % error ที่ไม่เกิน 20% แสดงให้เห็นว่าสมการที่ 1 และ 2 สามารถอธิบายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซ CO<sub>2</sub> ในถังไซโลจำลองได้เป็นอย่างดี โดยไม่ขึ้นกับขนาดของถัง หรืออัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ถัง สังเกตเพิ่มเติมว่า ในการศึกษาที่ถังไซโลจำลองทั้ง 2 ขนาด มีขนาดต่างกันประมาณ 10 เท่า และอัตราการป้อนอากาศต่างๆ ที่เลือกใช้ในการทดลองกับถังใหญ่มีค่าเป็น 10 เท่า ของอัตราการป้อนอากาศที่เลือกใช้กับถังเล็ก เช่นกัน เมื่อพิจารณาสมการที่ 2 จะเห็นได้ว่า ถึงแม้ว่าอัตราการป้อนอากาศจะสูงขึ้น ค่า HLT จะไม่เปลี่ยนแปลง หากปริมาตรของถังไซโลมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนเดียวกับอัตราการป้อนอากาศ จะเห็นได้ว่า ค่า HLT<sub>a</sub> ในตารางที่ 1 แสดงแนวโน้มเป็นไปตามสมการที่ 2 ในลักษณะดังกล่าว ยกตัวอย่างเช่น ค่า HLT<sub>a</sub> ของถังขนาด 228.5 l ที่อัตราการป้อนอากาศ 5.0 m<sup>3</sup>/s มีค่าใกล้เคียงกับค่า HLT<sub>a</sub> ของถัง 2,160 l ที่อัตราการป้อนอากาศ 50.0  $\times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s (i.e., 7.93 และ 7.33 h ตามลำดับ) จากการศึกษาที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น คณะผู้วิจัยสามารถสรุปได้ว่า

- 1) การสูญเสียก๊าซในระหว่างการรมยาเป็นกระบวนการที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ first-order kinetic (i.e., สมการที่ 1)
- 2) ค่า HLT เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรของโครงสร้างการรมยา และเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรมยา ตามสมการที่ 2

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์งบประมาณในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณภาคีวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์งบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย และขอขอบคุณฝ่ายเครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่ทำการวิจัยครั้งนี้

Comment [u1]: ค่าในตาราง ที่ความเร็วลม 2.0 และ 20.0 ผลการทดลองยังไม่สอดคล้องกับผลการทดลองโดยรวม  
Ans ได้ตอบอยู่ด้านบนโดยมีสาเหตุหลัก 2 ข้อ

**เอกสารอ้างอิง**

- ASHRAE, 2001. ASHRAE Handbook - Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA.
- Bell, C.H., 1992. Time, concentration and temperature relationships for phosphine toxicity in tests on diapausing larvae of *Ephestia elutella* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae). Pesticide Science 35, 255-264.
- Chayaprasert, W., 2007. Development of CFD models and an automatic monitoring and decision support system for precision structural fumigation. Ph.D. Thesis. West Lafayette, IN: Purdue University, Department of Agricultural and Biological Engineering.
- Cryer, S.A., Bamekow, D.E., 2006. Estimating outside air concentrations surrounding fumigated grain mills. Biosystems Engineering 94, 557-572.
- Kenaga, E.E., 1961. Time, temperature and dosage relationships of several insecticidal fumigants. Journal of Economic Entomology 54, 537-542.