ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

ปริญญา

วิศวกรรมเกษตร | วิศวกรรมเกษตร

สาขา | **ภาควิชา**

เรื่อง การทำนายอัตราการสูญเสียก๊าซระหว่างการรมยาในไซโลว่างเปล่าโดยวิธีการรวมผล

Prediction of Gas Leakage Rates During Empty Grain Silo Fumigations by the Superposition Method

นามผู้วิจัย นางสาวกัลยา หนูขำ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(อาจารย์วัชรพล ชยประเสริฐ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(รองศาสตราจารย์รังสินี โสธรวิทย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภรต กุญชร ณ อยุธยา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การทำนายอัตราการสูญเสียก๊าซระหว่างการรมยาในไซโลว่างเปล่าโดยวิธีการรวมผล

Prediction of Gas Leakage Rates During Empty Grain Silo Fumigations by the Superposition Method

โดย

นางสาวกัลยา หนูขำ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)
พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กัลยา หนูขำ 2557: การทำนายอัตราการสูญเสียก๊าซระหว่างการรมยาในไซโลว่างเปล่าโดยวิธีการรวมผล ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขาวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วัชรพล ชยประเสริฐ, Ph.D. 90 หน้า

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้คือ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการใช้วิธีการรวมผล (superposition method) ในการอธิบายอัตราการสูญเสียก๊าซในระหว่างการรมยา ผู้วิจัยทดลองรมยาจำลองในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซตัวแทน ในการทดลองที่ 1 ผู้วิจัยพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซถูกอธิบายได้ด้วยสมการ first-order kinetic ซึ่งอัตราการลดลงถูกกำหนดโดย HLT (half-loss time) %error ระหว่าง HLT_c (ค่า HLT ทางทฤษฎี) และ HLT_a (ค่า HLT จากการทดลอง) ของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าอยู่ระหว่าง 4.92 – 21.04% และระหว่าง 5.60 – 31.92% ตามลำดับ ซึ่งส่วนใหญ่ที่มีค่าไม่เกิน 20% ในการทดลองที่ 2 ผู้วิจัยหาค่าสัมประสิทธิ์ลม (C_w) และสัมประสิทธิ์ความลอยตัว (C_s) ของไซโลจำลอง ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกใช้ในการทดลองที่ 3 สัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.08±0.07 – 1.41±0.04 (10^{-3}) และ 1.09±0.07 – 1.34±0.18 (10^{-3}) ตามลำดับ, และสัมประสิทธิ์ความลอยตัวมีค่าอยู่ระหว่าง 1.20±0.11 – 1.52±0.0204 (10^{-3}) และ 1.12±0.03 – 1.31±0.12 (10^{-3}) ตามลำดับ ในการทดลองที่ 3 ค่า R^2 ของการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซของการทดลองทุกซ้ำ กับสมการ first-order kinetic มีค่าไม่น้อยกว่า 0.990 ผลการทดลองในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ให้ค่า HLT_a ระหว่าง 3.21±0.47 – 6.16±0.35 h และ 4.49±0.67 – 18.74±0.24 h ตามลำดับ %error ในการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซด้วยวิธีการรวมผลของไซโลปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.65±0.50 – 15.70±1.10% และ 1.76±1.21 – 10.43±1.36% ตามลำดับ ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 10% เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างค่า HLT_a และ HLT_p (ค่า HLT จากการทำนายด้วยสมการรวมผล) ถูกฟิตเคอร์ฟด้วยสมการเส้นตรง ผลลัพธ์การฟิตเคอร์ฟสำหรับไซโลทั้ง 2 ปริมาตร ให้สมการเส้นตรงซึ่งมีความชันใกล้เคียง 1 ซึ่งแสดงให้เห็น สมการรวมผลสามารถทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาได้เป็นอย่างดี

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kanlaya Nukham 2014: Prediction of Gas Leakage Rates During Empty Grain Silo Fumigations by the Superposition Method. Master of Engineering (Agricultural Engineering), Major Field Agricultural Engineering, Department of Agricultural Engineering. Thesis Advisor: Mr.Watcharapol Chayaprasert, Ph.D. 90 pages.

The objective of this thesis was to evaluate the feasibility of using the superposition method for predicting gas concentration decate rates during silo fumigations. Three fumigation experiments in 0.2285 and 2.160 m^3 model silos were conducted with carbon dioxide as a tracer gas. The result of the first experiment confirmed that fumigant concentration decay followed a first-order kinetic characteristic of which the half-loss time (HLT) is inversely proportional to the air infiltration rate. For the 0.2285 and 2.160 m^3 silos, the differences (i.e., %error) between the theoretically calculated HLT (HLT_c) and the actual HLT (HLT_a) determined from gas concentration readings were 4.92 – 21.04% and 5.60 – 31.92%, respectively. The values of wind (C_w) and stack (C_s) coefficients of both model silos, which were later on used in calculations in the third experiment, were determined in the second experiment. The wind coefficients of the 0.2285 and 2.160 m^3 silos were 1.08±0.07 – 1.41±0.04 (10^{-3}) and 1.09±0.07 – 1.34±0.18 (10^{-3}), respectively, while the stack coefficients were 1.20±0.11 – 1.52±0.0204 (10^{-3}) and 1.12±0.03 – 1.31±0.12 (10^{-3}), respectively. In the third experiment, fitting fumigant concentration decay curves with the first-order kinetic equation yielded coefficients of determination (R^2) of at least 0.990 and the concentration decay curves of the 0.2285 and 2.160 m^3 silos had HLT_a's of 3.21±0.47 – 6.16±0.35 h and 4.49±0.67 – 18.74±0.24 h, respectively. The superposition method yielded HLT predictions (HLT_p) with percent errors (i.e., %error) ranging from 1.65±0.50 to 15.70±1.10% for the smaller silo and from 1.76±1.21 to 10.43±1.36% for the larger one. The majority of %errors of prediction were less than 10%. The HLTa and HLT_p of the third experiment were linearly correlated with slopes close to 1. The results of this thesis illustrated that fumigant concentration decay rates can be satisfactorily predicted by the superposition method.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆ ท่าน โดยเฉพาะ อ.ดร.วัชรพล ชยประเสริฐ ซึ่งเป็นประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ท่านให้คำปรึกษา ความรู้ทั้งในวิทยานิพนธ์และนอกวิทยานิพนธ์ ดูแลเอาใจใส่ติดตามความคืบหน้าอย่างสม่ำเสมอ ช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณ รศ.ดร.รังสินี โสธรวิทย์ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลในวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ รศ.ดร.อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล ที่คอยให้คำแนะนำการวิเคราะห์ข้อมูลในวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณเอนก สุขเจริญ สำหรับความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และคำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่, สาธารณูปโภค และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นอย่างดี ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณคณาจารย์, ข้าราชการ และลูกจ้างของภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ช่วยเหลือในการดำเนินการเพื่อให้วิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ คุณพ่อ, คุณแม่ และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนในการศึกษา และบุคคลที่เกี่ยวข้อง ซึ่งไม่สามารถกล่าวนามในที่นี้ได้หมด ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

กัลยา หนูขำ

พฤษภาคม 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	8
อุปกรณ์	9
วิธีการ	14
ผลและวิจารณ์	37
ผลการทดสอบความดันแบบ P-Q test	37
ผลการทดลองรมยาจำลอง	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	72
สรุป	72
ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	76
ภาคผนวก	80
ภาคผนวก ก การประกอบอุปกรณ์ของระบบควบคุมอุณหภูมิ	81
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	90

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แผนการทดลองรมยาจำลอง ในสภาวะที่อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลองคงที่	21
2	แผนการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ลม	27
3	แผนการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว	32
4	แผนการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล	35
5	การเปรียบเทียบระหว่าง HLT ทางทฤษฎี (i.e., HLT_c) และ HLT จากการทดลอง (i.e., HLT_a) ของผลการทดลองที่ 1	41
6	สรุปผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์ลม C_w ของไซโลจำลอง	47
7	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3	51
8	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3	50
9	สรุปผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว C_s ของไซโลจำลอง	55
10	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3	59
11	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3	58
12	สรุปผลการทดลองและการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซด้วยวิธีการรวมผล ในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3	65
13	สรุปผลการทดลองและการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซด้วยวิธีการรวมผล ในไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3	66

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ไซโลจำลองซึ่งเป็นถังพลาสติก PP ปริมาตร (a) 0.2285 m^3 และ (b) 2.160 m^3	10
2	ข้อต่อท่อลมซึ่งถูกติดตั้งบนไซโลจำลอง	10
3	ตำแหน่งการติดตั้งข้อต่อท่อลมและพัดลมไฟฟ้าในไซโลจำลองปริมาตร (a) 0.2285 และ (b) 2.160 m^3	11
4	(a) แผนผังระบบควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วย (1) พัดลมระบายความร้อน, (2) จอสัมผัสแสดงผล, (3) ชุด PLC, (4) รีเลย์, (5) heater, (6) thermocouple ภายในไซโลจำลอง และ (7) thermocouple ภายนอกไซโลจำลอง (b) ภาพถ่ายระบบควบคุมอุณหภูมิ	13
5	ผังขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ	14
6	(a) แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบความดันแบบ P-Q test เข้ากับไซโลจำลอง ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับไซโลจำลอง (b) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (c) ปริมาตร 2.160 m^3	16
7	(a) แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองรมยาจำลอง ในสภาวะที่อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลองคงที่ ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับไซโลจำลอง (b) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (c) ปริมาตร 2.160 m^3	19
8	(a) แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ลม ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับไซโลจำลอง (b) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (c) ปริมาตร 2.160 m^3	24
9	ภาพถ่ายผ้าร่มพลาสติก PP ซึ่งถูกขึงบริเวณด้านข้างและด้านบนของไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตร	27
10	(a) แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์ในไซโลจำลอง (b) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (c) ปริมาตร 2.160 m^3	30
11	ภาพถ่ายลักษณะการติดตั้ง heater และพัดลม ในไซโลจำลอง (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3	32

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

12 (a) แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับไซโลจำลอง (b) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (c) ปริมาตร 2.160 m^3 34

13 ตัวอย่างการทดสอบหาค่าพื้นที่รอยรั่วด้วยการทดสอบความดันแบบ P-Q test (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 38

14 ตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำ ของการทดลองที่ 1 ที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ จาก (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 40

15 ตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลจำลอง, และผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโล (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ในระหว่างการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ลม 44

16 ตัวอย่างความเร็วลมจากการทดลอง 1 ซ้ำ ของการทดลองที่ 2.1 กับไซโลจำลอง (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ที่ 4 เงื่อนไขความเร็วลม 45

17 ตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำ ของการทดลองที่ 2.1 ของ (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ที่เงื่อนไขความเร็วลมเดียวกับภาพที่ 16 46

18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วลมและค่า HLT ของเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซจากการทดลองทุกซ้ำ ในการทดลองที่ 2.1 ของไซโลจำลองปริมาตร (a) 0.2285 และ (b) 2.160 m^3 48

19 ตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลจำลอง, และผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโล (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ซึ่งผลต่างอุณหภูมิมีค่าคงที่ประมาณ 12°C 52

20 ตัวอย่างผลต่างอุณหภูมิจากการทดลอง 1 ซ้ำ ของการทดลองที่ 2.2 กับไซโลจำลอง (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ที่ 4 เงื่อนไขผลต่างอุณหภูมิ 53

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

21 ตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำ ของการทดลองที่ 2.2 ของ (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ที่เงื่อนไขผลต่างอุณหภูมิเดียวกับภาพที่ 20 54

22 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลอง และอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลของการทดลองทุกซ้ำ ในการทดลองที่ 2.2 ของไซโลจำลองปริมาตร (a) 0.2285 และ (b) 2.160 m^3 56

23 ตัวอย่างผลการวัดความเร็วลมและผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโล (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ในระหว่างการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล 60

24 ตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำที่เงื่อนไขความเร็วลมที่ปะทะกับไซโลคงที่แต่ผลต่างอุณหภูมิแตกต่างกัน ของการทดลองที่ 3 ของ (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 61

25 ตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำที่เงื่อนไขผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลคงที่แต่ความเร็วลมแตกต่างกัน ของการทดลองที่ 3 ของ (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 62

26 ผลการบันทึกค่าอัตราการป้อนอากาศและผลต่างความดันของการทดสอบความดันแบบ P-Q test กับไซโลจำลองปริมาตร (a) 0.2285 และ (b) 2.160 m^3 ก่อนการทดลองรมยาทุกซ้ำ ในการทดลองที่ 3 67

27 (a) แผนภูมิพื้นผิวซึ่งถูกสร้างจากข้อมูลในตารางที่ 12 ซึ่งแสดงผลกระทบของความเร็วลม และผลต่างอุณหภูมิ ที่มีต่อ HLT_a ของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 (b) ผลการทำนาย HLT ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 2 และ 3 (i.e., HLT_p ในตารางที่ 12) 68

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

28 (a) แผนภูมิพื้นผิวซึ่งถูกสร้างจากข้อมูลในตารางที่ 13 ซึ่งแสดงผลกระทบของความเร็วลม และผลต่างอุณหภูมิ ที่มีต่อ HLT_a ของไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 (b) ผลการทำนาย HLT ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 2 และ 3 (i.e., HLT_p ในตารางที่ 13) 69

29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HLT_a และ HLT_p ของการทดลองทุกซ้ำ ในการทดลองที่ 3 ของ (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 71

ภาพผนวกที่

1 รีเลย์ควบคุม heater ในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 82

2 รีเลย์ควบคุม heater ในไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 83

3 (a) จอสัมผัสแสดงผล, (b) tool port บนจอสัมผัสแสดงผล และ (c) com port บนหน้าจอสัมผัสแสดงผล 84

4 (a) control unit และ (b) ลักษณะการเชื่อมต่อปลายสายสัญญาณระหว่าง tool port ของจอสัมผัสแสดงผล (ภาพผนวกที่ 3b) และ com port ของ control unit 85

5 โปรแกรม ladder logic ของระบบควบคุมอุณหภูมิ 85

6 expansion I/O unit 86

7 analog I/O unit 87

8 การติดตั้ง thermocouple เข้ากับ analog I/O unit 87

9 thermocouple ซึ่งมี (a) ส่วนที่เชื่อมต่อเข้ากับ analog I/O unit และ (b) ส่วนที่วัดอุณหภูมิ 88

10 power supply 88

11 พัดลมไฟฟ้า 89

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทำนายอัตราการสูญเสียก๊าซระหว่างการรมยาในไซโลว่างเปล่าโดยวิธีการรวมผล

Prediction of Gas Leakage Rates During Empty Grain Silo Fumigations by the Superposition Method

คำนำ

ในประเทศไทยส่วนใหญ่ประกอบอาชีพการเกษตรตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ในแต่ละปีผลผลิตทางการเกษตรมีจำนวนมากและมีแนวโน้มในการส่งออกผลผลิตทางการเกษตรมากขึ้น การพัฒนากระบวนการการเก็บรักษาเป็นช่องทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของสินค้าทางการเกษตร การเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรมีหลากหลายวิธี เช่น การเก็บในไซโล (silo), โกดัง (warehouse) หรือการตั้งเรียงบิ๊กแบ็ค (big bag) เป็นกอง เป็นต้น ไซโลเป็นทางเลือกหนึ่ง เพื่อการเก็บรักษาวัตถุดิบทางการเกษตรในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานอาหารสัตว์ และโรงสีข้าว เป็นต้น ความเสียหายที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่เกิดจาก การเข้าทำลายของแมลงศัตรูในโรงเก็บ (post-harvest insect pest) ความเสียหายที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนัก, การสูญเสียคุณค่าทางอาหาร หรือการสูญเสียความงอก

วิธีการกำจัดแมลงศัตรูในโรงเก็บที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพคือ การรมยา (fumigation) การรมยา คือ การเก็บวัตถุดิบในโครงสร้างการรมยา (fumigation enclosure) ที่ระดับความเข้มข้นของสารรมระดับหนึ่งในระยะเวลาหนึ่งที่นานพอที่สามารถที่ทำให้แมลงตายได้ ก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นพิษต่อแมลงและนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้แก่ เมทิลโบรไมด์ (methyl bromide) และฟอสฟีน (phosphine) เมทิลโบรไมด์เป็นสารรมที่ได้รับความนิยมใช้มาหลายสิบปี เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดแมลงศัตรูสูง อย่างไรก็ตาม เมทิลโบรไมด์ต้องถูกยกเลิกการใช้ภายใน พ.ศ. 2558 ตามข้อกำหนดของพิธีสารมอนทรีออล (UNEP, 2000) เมทิลโบรไมด์เป็นสารที่ทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน (atmospheric ozone layer) ซัลฟูริลฟลูออไรด์ (sulfuryl fluoride) เป็นสารรมที่ได้รับการผลักดันในต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา และกลุ่มประเทศในยุโรป เพื่อทดแทนเมทิลโบรไมด์ ในประเทศไทยซัลฟูริลฟลูออไรด์เป็นสารรมที่ยังไม่ได้ผ่านการขึ้นทะเบียนกับฝ่ายวัตถุมีพิษ สำนักงานควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร คาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) เป็นสารรมอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในประสิทธิภาพการกำจัดแมลงศัตรูผลผลิตการเกษตร (Jay and Pearman, 1973; White and Jayas, 1993; Bell, 2000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อย่างไรก็ตาม การรมยาด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็ยังไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากขอจำกัดด้านราคาและข้อจำกัดด้านวิธีปฏิบัติคือต้องใช้ความเข้มข้นสูง (มากกว่า 40%) และเวลานาน (ประมาณ 2 สัปดาห์) (Fields and White, 2002) สถานการณ์ในปัจจุบันของประเทศไทย สารรมฟอสฟีน (phosphine) ซึ่งอยู่ในรูปของอลูมิเนียมฟอสไฟด์ (aluminium phosphide) หรือแมกนีเซียมฟอสไฟด์ (magnesium phosphide) เป็นเพียงสารรมชนิดเดียวที่นิยมใช้กับการรมยาเพื่อการเก็บรักษาเมล็ดพืช เช่น ข้าว และข้าวโพด อย่างไรก็ตาม งานวิจัยหลายชิ้นได้ยืนยันถึงความต้านทานของแมลงต่อฟอสฟีนที่เพิ่มมากขึ้น (Bell and Wilson., 1995; Bell, 2000; Rajendran and Gunasekaran, 2002; Benhalima et al., 2004; Anonymous, 2008; Pimentel et al., 2008; บุษรา et al., 2537, 2541) ทำให้จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณการใช้ (dosage) อยู่อย่างต่อเนื่อง ความต้านทานของแมลงต่อฟอสฟีนที่เพิ่มมากขึ้นนี้เกิดจากการรมยาที่ไม่มีประสิทธิภาพทำให้มีแมลงบางส่วนได้รับสารรมนี้เข้าไปแต่ไม่ได้ถูกกำจัด แมลงที่มีชีวิตรอดจะส่งผ่านคุณลักษณะทางพันธุกรรมที่ทำให้แมลงมีความต้านทานต่อฟอสฟีนให้กับแมลงรุ่นต่อๆไป หากปล่อยให้การรมยาอย่างไม่มีประสิทธิภาพเกิดขึ้นต่อไปจะทำให้การเก็บรักษาเมล็ดพืชด้วยการรมยาด้วยฟอสฟีนทำได้ยากขึ้นซึ่งจะทำให้ผู้ประกอบการต้องใช้สารรมชนิดอื่นหรือวิธีการกำจัดแมลงวิธีอื่นที่มีต้นทุนสูงขึ้น ปัญหาเหล่านี้จะส่งผลต่อศักยภาพการแข่งขันของประเทศในตลาดการค้าข้าวและผลิตภัณฑ์ที่ใช้ข้าวโพดเป็นวัตถุดิบ เช่น อาหารสัตว์

ความสำเร็จของการรมยาไม่ว่าจะเป็นสารรมชนิดใดจะถูกกำหนดด้วยปัจจัยหลักคือ ความเข้มข้นของสารรมระหว่างรม, ระยะเวลาการรม, อุณหภูมิภายในปริมาตรการรม และชนิดของศัตรูผลผลิตการเกษตรที่ต้องการกำจัด (Kenaga, 1961; Su et al., 1989; Bell, 1992; Weller, 1999; Armstrong and Whitehand, 2005) การรมยาที่ไม่มีประสิทธิภาพที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้โดยส่วนใหญ่เกิดจากการรั่วไหลของสารรมออกจากโครงสร้างการรมยา เช่น ไซโล อัตราการรั่วไหลที่สูงเกินไป ทำให้ระดับความเข้มข้นของสารรมภายในโครงสร้างการรมยาอยู่ในระดับต่ำกว่าค่าความเป็นพิษ (lethal concentration) (Reichmuth, 1993; Reed and Pan, 2000; Rajendran and Muralidharan, 2001; Reed, 2001) การที่เราสามารถทำนายอัตราการสูญเสียก๊าซในระหว่างการรมยา จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการรมยาได้ (optimization) ซึ่งจะเป็นการช่วยบรรเทาปัญหาความต้านทานของแมลงต่อฟอสฟีน นอกจากนี้ยังช่วยลดการใช้ปริมาณสารรมซึ่งเป็นการลดต้นทุนได้อย่างมีนัยสำคัญในกรณีที่สารรมมีราคาสูง เช่น ในกรณีของคาร์บอนไดออกไซด์หรือซัลฟูริลฟลูออไรด์ และยังเป็นการช่วยลดต้นทุนทางด้านแรงงาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการใช้วิธีการรวมผล (superposition method) ในการอธิบายอัตราการสูญเสียก๊าซในไซโลจำลอง 2 ปริมาตร คือ 0.2285 และ 2.160 m^3 โดยมีวัตถุประสงค์ย่อยดังต่อไปนี้

1. ใช้ผลการทดลองพิสูจน์ว่าลักษณะการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาเป็นแบบ first-order kinetic (จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง)

2. ทำการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของไซโลจำลองที่จำเป็นต่อการใช้วิธีการรวมผลทำนายอัตราการสูญเสียก๊าซ

3. ใช้ผลการทดลองพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาเป็นฟังก์ชั่น (function) ของสภาวะอากาศโดยรอบไซโลจำลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

การรมยาเป็นวิธีที่นิยมและมีประสิทธิภาพในการกำจัดแมลงที่เข้าทำลายสินค้าทางการเกษตรเกือบทุกประเภท สารรมที่นิยมใช้ในการรมยา ได้แก่ ฟอสฟีน, คาร์บอนไดออกไซด์ และเมทิลโบรไมด์ ปัจจัยสำคัญที่ทำให้การรมยาประสบความสำเร็จคือ ความเข้มข้นของสารรมระหว่างการรม และระยะเวลาการรม (Kenaga, 1961; Bell, 1992) ในระหว่างการรมยาในไซโล หากสารรมรั่วไหลออกจากไซโลที่อัตราสูงผิดปกติจะทำให้ระดับความเข้มข้นก๊าซอยู่ที่ระดับที่ต่ำกว่าค่าความเป็นพิษ และเป็นผลให้การรมยานั้นไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น การใช้ระยะเวลาในการรมที่น้อยเกินไป จะส่งผลให้การรมไม่ประสบความสำเร็จ (Reed, 2001) นักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาผลของคุณภาพการซีล (sealing quality) ที่มีผลต่ออัตราการสูญเสียของสารรมในระหว่างการรม อย่างไรก็ตาม การใช้สารรมในปริมาณมากเกินความจำเป็นนอกจากเป็นการสูญเสียทรัพยากรโดยไม่จำเป็นแล้ว ยังเป็นการเพิ่มความเสี่ยงของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้น ความสามารถในการทำนายอัตราการสูญเสียก๊าซในระหว่างการรมยาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดแมลงของกระบวนการรมยาได้ อัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในโครงสร้างการรมในระหว่างการรมสามารถถูกอธิบายได้โดยใช้สมการ first-order kinetic (จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง) ต่อไปนี้ (Cryer and Barnekow., 2006; Chayaprasert et al., 2007b)

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

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

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

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดยที่ V คือ ปริมาตรของโครงสร้างการรมยา (m^3) และ Q คือ อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรมยา (infiltration rate, m^3/s) จากสมการที่ 2 จะเห็นได้ว่า หากเราสามารถทำนายค่าของอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรมได้ล่วงหน้า เราจะสามารถทำนายค่า HLT ได้ก่อนการรมยาจริง Rajendran and Muralidharan (2001) พบว่าการรมยากองข้าวเปลือกที่ตั้งอยู่ในร่มช่วยลดการสูญเสียก๊าซได้เพราะผลการทบของอุณหภูมิและลมโดยรอบกองข้าวเปลือกที่มีต่ออัตราการรั่วไหลของสารรมลดลง

วิธีการรวมผล (superposition method) เป็นวิธีทำนายอัตราการแลกเปลี่ยนปริมาตรที่นิยมใช้ในงานออกแบบระบบปรับอากาศภายในอาคาร วิธีการดังกล่าวทำนายอัตราการแลกเปลี่ยนปริมาตรรวมระหว่างอากาศภายในอาคารและอากาศนอกอาคาร หากเปรียบเทียบโครงสร้างการรมยาเป็นอาคาร อัตราการแลกเปลี่ยนปริมาตรรวมระหว่างอากาศภายในโครงสร้างการรมยาและอากาศนอกโครงสร้างก็คือ อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรมยา อัตราการแลกเปลี่ยนปริมาตรเป็นฟังก์ชั่นของผลต่างระหว่างอุณหภูมิภายในโครงสร้างกับอุณหภูมิบรรยากาศภายนอก ΔT (K) บวกรวมกับอัตราการแลกเปลี่ยนปริมาตรที่เกิดจากความเร็วลม U (m/s) ที่กระทำต่ออาคาร ดังสมการรวมผลต่อไปนี้ (ASHRAE, 2001)

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

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^2) สังเกตว่า Chayaprasert (2007a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 1 และ 2 ด้วยการวิเคราะห์ทางทฤษฎี เท่านั้น ดังนั้น วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้คือ การพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 1, 2 และ 3 ด้วยการทดลองเชิงปฏิบัติจริง ในทางปฏิบัติ ค่าของผลต่างอุณหภูมิ ΔT ระหว่างภายในและภายนอกไซโล และค่าของความเร็วลม U ที่พัดปะทะไซโล สามารถถูกวัดได้โดยตรงด้วยเครื่องมือวัด แต่พื้นที่รอยรั่วเสมือนเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถถูกวัดค่าได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม เราสามารถหาค่าของพื้นที่รอยรั่วเสมือนโดยวิธีอ้อมคือ การทดสอบความดัน (pressurization test) การทดสอบความดันเป็นวิธีการทดสอบความมิดชิด (air-tightness) ของโครงสร้างการรมยาที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีมาตรฐาน การทดสอบความดันสามารถทำได้ 2 ลักษณะคือ แบบ pressure decay (P-t) test และ แบบ equilibrium pressure-flow (P-Q) test (Banks et al., 1974; Bond, 1984) การทดสอบความดันแบบ P-t test ความดันภายในโครงสร้างการรมยาจะถูกทำให้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สูงขึ้นกว่าสภาวะบรรยากาศที่ระดับความดันค่าหนึ่งด้วยการอัดอากาศหรือทำให้ต่ำลงด้วยการดูดอากาศออก หลังจากหยุดการอัดอากาศ ระดับความดันภายในโครงสร้างการรมจะถูกปล่อยให้ลดลงตามธรรมชาติพร้อมกับทำการจับเวลา ระดับความมิดชิดจะถูกกำหนดโดยระยะเวลาที่ระดับความดันลดลงจากค่าเริ่มต้นค่าหนึ่งถึงครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้นนั้น ระยะเวลานี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่า pressure half-life (PHL) ค่า PHL ที่สูงบ่งบอกว่าโครงสร้างการรมยามีความมิดชิดสูง ในการทดสอบความดันแบบ P-Q test ความดันภายในโครงสร้างการรมยาจะถูกทำให้สูงขึ้นด้วยการใช้พัดลมอัดอากาศซึ่งสามารถปรับความเร็ว (i.e., อัตราการไหลของอากาศผ่านพัดลม) ได้ Navarro (1998) ให้ข้อเสนอแนะว่า การทดสอบความดันแบบ P-Q test ได้รับการยอมรับว่ามีความถูกต้องในการประมาณพื้นที่รอยรั่วบนโครงสร้างรมยา ผลการทดสอบความดันแบบ P-Q test จะแสดงคุณลักษณะการรั่วไหลของก๊าซในโครงสร้าง จากสมการที่ 4 อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านพัดลมอัดอากาศเข้าสู่โครงสร้างการรมคือ อัตราการแลกเปลี่ยนปริมาตร (Q) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับผลต่างระหว่างความดันภายในโครงสร้างปิดกับความดันภายนอก Δp (Pa) ดังสมการต่อไปนี้ (ASHRAE, 2001)

$$Q = b\Delta p^{n} \tag{4}$$

โดยที่ b ($m^3/s\ Pa^n$) และ n (dimensionless pressure exponent) คือ สัมประสิทธิ์การไหลซึ่งกำหนดคุณลักษณะความมิดชิดของโครงสร้างการรม พื้นที่รอยรั่วเสมือน A_L สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (ASHRAE, 2001)

$$A_L = \frac{10{,}000b}{C_D}\sqrt{\frac{\rho}{2}}\Delta p_r^{(n-0.5)} \tag{5}$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศของอากาศ (kg/m^3), C_D คือ สัมประสิทธิ์อัตราการไหล (discharge coefficient) และ Δp_r คือ ผลต่างความดันอ้างอิง ซึ่งการกำหนดค่าใช้งานของตัวแปรสองตัวหลังนี้ขึ้นอยู่กับผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม Sherman and Grimsrud (1980) แนะนำให้ Δp_r = 4 Pa และ C_D= 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทำนายอัตราการรั่วไหลของก๊าซในระหว่างการรมยาจำเป็นต้องใช้การคำนวณในสมการที่ 1–5 เราสามารถใช้ผลการทดสอบความดัน (สมการที่ 4) ร่วมกับสมการที่ 5 คำนวณขนาดของรอยรั่วบนไซโลโดยประมาณ เราสามารถวัดค่าหรือพยากรณ์สภาวะอากาศในระหว่างการรมยา (i.e., อุณหภูมิ และความเร็วลม) ได้ หากเราทราบค่าของสัมประสิทธิ์ความลอยตัวและสัมประสิทธิ์ลม เราสามารถคำนวณอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรมยาได้โดยใช้สมการรวมผล (i.e., สมการที่ 3) หากสมการที่ 1 และ 2 สามารถอธิบายพฤติกรรมการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาได้จริง เราจะสามารถทำนาย HLT (i.e., อัตราการลดลงของก๊าซในระหว่างการรมยา) ได้โดยใช้สมการที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

ในสมการที่ 2 จะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรมยามีค่าคงที่ HLT จะมีค่าคงที่เช่นกัน ดังนั้น การพิสูจน์ว่าลักษณะการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาเป็นแบบ first-order kinetic สามารถทำได้โดยการทดลองรมยาจำลองในลักษณะที่ อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรม (Q ในสมการที่ 2) ถูกควบคุมให้คงที่ จากนั้น แสดงให้เห็นว่าค่าของ HLT ที่ได้จากการฟิตเคอร์ฟ (fit curve) เส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซ (concentration decay curve) ด้วยสมการที่ 1 กับ HLT ที่คำนวณจากสมการที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน

ผู้วิจัยจะทำการทดลองรมยาจำลองในไซโลจำลองเพื่อพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาเป็นฟังก์ชั่นของสภาวะอากาศโดยรอบไซโลจำลอง (i.e., ความเร็วลมที่ปะทะกับโครงสร้าง และผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกโครงสร้าง) ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล อย่างไรก็ตาม จากสมการที่ 3 จะเห็นได้ว่าอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรมยาเป็นฟังก์ชั่นของคุณลักษณะของโครงสร้างการรมยา (i.e., สัมประสิทธิ์ความลอยตัว, สัมประสิทธิ์ลม และพื้นที่รอยรั่วเสมือน) เช่นกัน เราสามารถใช้เครื่องมือวัดบันทึกสภาวะอากาศโดยรอบโครงสร้างการรมยาได้ แต่สัมประสิทธิ์ความลอยตัว, สัมประสิทธิ์ลม และพื้นที่รอยรั่วเสมือน เป็นคุณลักษณะของโครงสร้างการรมยา ซึ่งไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องออกแบบการทดลอง เพื่อหาค่าของคุณลักษณะทั้ง 3 ดังกล่าว ของไซโลจำลองที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อผู้วิจัยทราบค่าของสัมประสิทธิ์ความลอยตัว, สัมประสิทธิ์ลม และพื้นที่รอยรั่วเสมือนของไซโลจำลองแล้ว ผู้วิจัยสามารถทำการทดลองรมยาจำลองในลักษณะที่ สภาวะอากาศโดยรอบไซโลจำลองถูกควบคุมให้คงที่ตลอดระยะเวลาการรมยา หลังจากนั้น การพิสูจน์ว่า อัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล ก็คือ การพิสูจน์ว่าสมการที่ 2 และสมการที่ 3 สามารถให้ผลลัพธ์การคำนวณ HLT ที่สอดคล้องกับผลลัพธ์ HLT ที่ได้จากการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซ ซึ่งถูกบันทึกค่าจากการทดลองรมยาจำลอง ด้วยสมการที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์

1. ไซโลจำลอง

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยทำการทดลองการรมยาในไซโลจำลอง ซึ่งเป็นไซโลจำลองพลาสติก PP (polypropylene) ปริมาตร 0.2285 m^3 (เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.56 m สูง 0.93 m) และปริมาตร 2.160 m^3 (เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.30 m สูง 1.86 m) (ภาพที่ 1) ไซโลจำลองแต่ละไซโลถูกเจาะรูจำนวน 4 รู (ภาพที่ 3) เพื่อติดตั้งข้อต่อท่อลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6 mm (PC04-M5, SMC (Thailand) Ltd., Pathum Thani, Thailand) (ภาพที่ 2) ภาพที่ 3 แสดงตำแหน่งการเจาะรูทั้ง 4 รู รูที่ 1 ถูกเจาะบริเวณด้านล่างของไซโลจำลอง ซึ่งมีระยะสูงจากก้นไซโลจำลอง 10 cm รูที่ 2 เจาะที่ฝั่งตรงข้ามกับรูที่ 1 ที่ระดับความสูงเดียวกัน รูที่ 3 ถูกเจาะบริเวณด้านบน วัดจากขอบบนของไซโลจำลองต่ำลงมา 10 cm รูที่ 4 ถูกเจาะที่ฝั่งตรงข้ามกับรูที่ 3 ที่ระดับความสูงเดียวกัน รูทั้ง 4 ดังกล่าวถูกใช้เป็นช่องทางป้อนอากาศจากภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลอง และเป็นช่องทางให้อากาศและก๊าซตัวแทนสารรม (tracer gas – วิทยานิพนธ์นี้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซตัวแทนสารรม) ภายในไซโลจำลองรั่วไหลออกมาได้ ไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตรถูกเจาะช่องเปิดสี่เหลี่ยมขนาด 20×20 cm^2 ที่ฝาด้านบนของไซโลจำลอง เพื่อใช้เป็นช่องนำอุปกรณ์การทดลองต่างๆ ลงติดตั้งในไซโลจำลอง ช่องเปิดนี้จะถูกซีลด้วยกาวร้อนหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ภายในไซโลจำลองเรียบร้อยแล้ว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

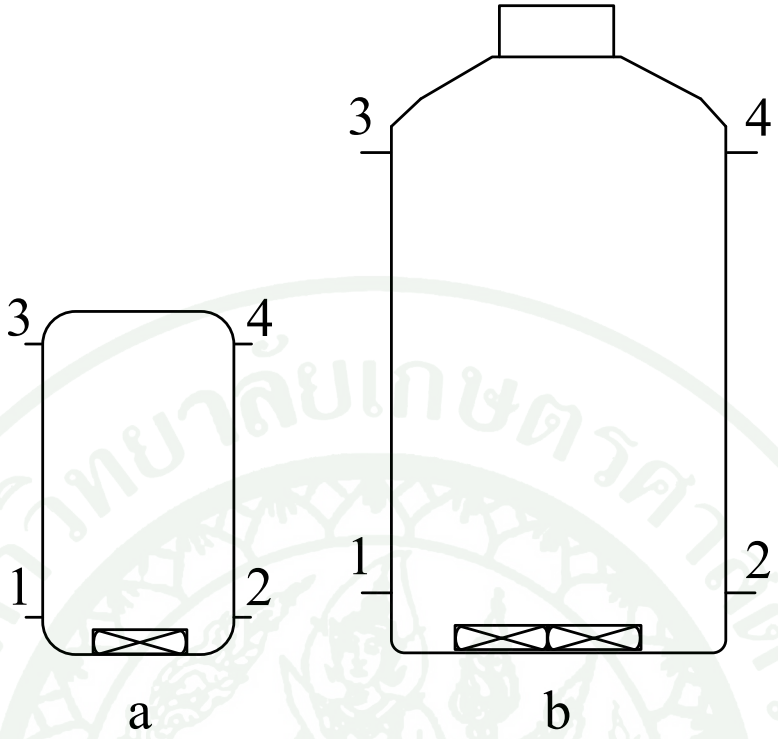


ภาพที่ 1 ไซโลจำลองซึ่งเป็นถังพลาสติก PP ปริมาตร (a) 0.2285 m^3 และ (b) 2.160 m^3



ภาพที่ 2 ข้อต่อท่อลมซึ่งถูกติดตั้งบนไซโลจำลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งข้อต่อท่อลมและพัดลมไฟฟ้าในไซโลจำลองปริมาตร (a) 0.2285 และ (b) 2.160 m^3

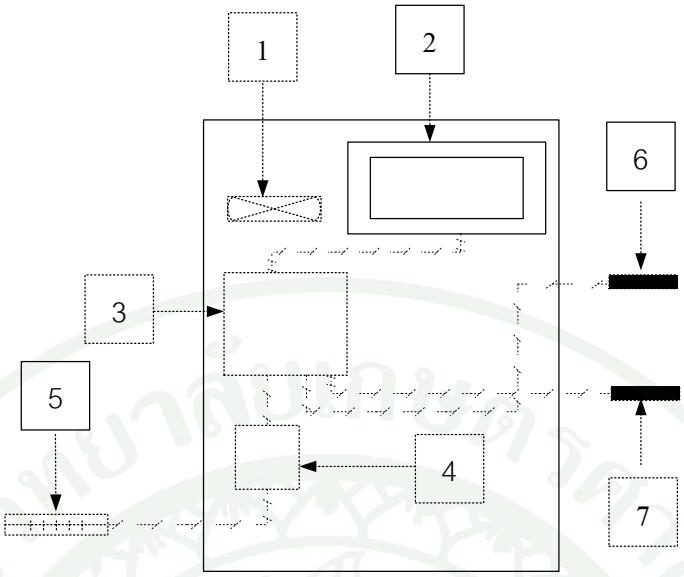
พัดลมไฟฟ้าแบบ centrifugal fan ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 7.5 cm (D09F-12SS1, Nidec Corp., Kyoto, Japan) 1 ตัว ถูกติดตั้งภายในไซโลจำลองปริมาตรเล็ก (i.e., ปริมาตร = 0.2285 m^3) ไซโลจำลองปริมาตรใหญ่ (i.e., ปริมาตร = 2.160 m^3) ถูกติดตั้งพัดลมไฟฟ้าแบบ centrifugal fan ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 7.5 cm (D09F-12SS1, Nidec Corp., Kyoto, Japan) จำนวน 2 ตัว พัดลมไฟฟ้าถูกติดตั้งที่บริเวณจุดกึ่งกลางของก้นไซโลจำลอง ให้การไหลของอากาศมีทิศพุ่งขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลอง ตลอดการทดลองพัดลมไฟฟ้าจะทำงานอยู่ตลอดเวลา เพื่อช่วยให้ก๊าซภายในไซโลจำลองกระจายตัวอย่างทั่วถึง ท่อลม PU (polyurethane) (PUN-6×1, Festo Corp., New York, USA) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6 mm เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 mm ถูกใช้เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เกือบทั้งหมดเข้ากับไซโลจำลอง ในทุกการทดลองของวิทยานิพนธ์นี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

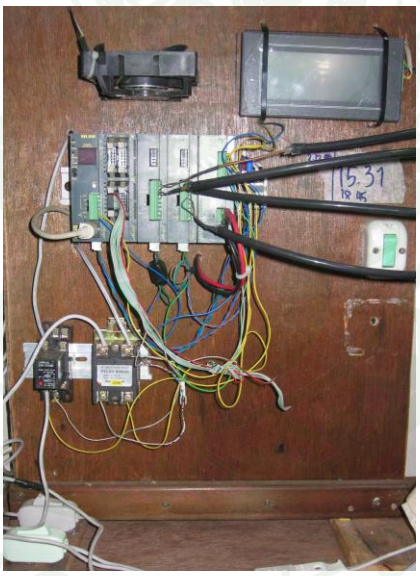
2. ระบบควบคุมอุณหภูมิ

ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลอง (i.e., ΔT ในสมการที่ 3) ถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิ (ภาพที่ 4) ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ ชุด PLC (programmable logic controller) พร้อมจอสัมผัสแสดงผล (touch screen) (GT11, Panasonic Electric Works Co., Ltd., Osaka, Japan), พัดลมระบายความร้อน (manufacturer unknown), thermocouple (TT-T-24, OMEGA, Stamford, CT, USA) และ heater (CCM-1053, manufacturer unknown) ซึ่งรับสัญญาณเปิด-ปิดผ่านรีเลย์ (relay) (MY2NJ, Omron Corp., Kyoto, Japan) ชุด PLC แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนประมวลผล (FP0-SL1, Matsushita Electric Works, Ltd., Osaka, Japan), ส่วนรับส่งสัญญาณเปิด-ปิด (expasion on/off unit) (FP0-32T, Matsushita Electric Works, Ltd., Osaka, Japan) และส่วนรับส่งสัญญาณอนาล็อก (analog I/O unit) (FP0-A21, Panasonic Electric Works Europe AG, Holzkirchen, Germany) รายละเอียดการประกอบอุปกรณ์ของระบบควบคุมอุณหภูมิถูกอธิบายเพิ่มเติมอยู่ในภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



a

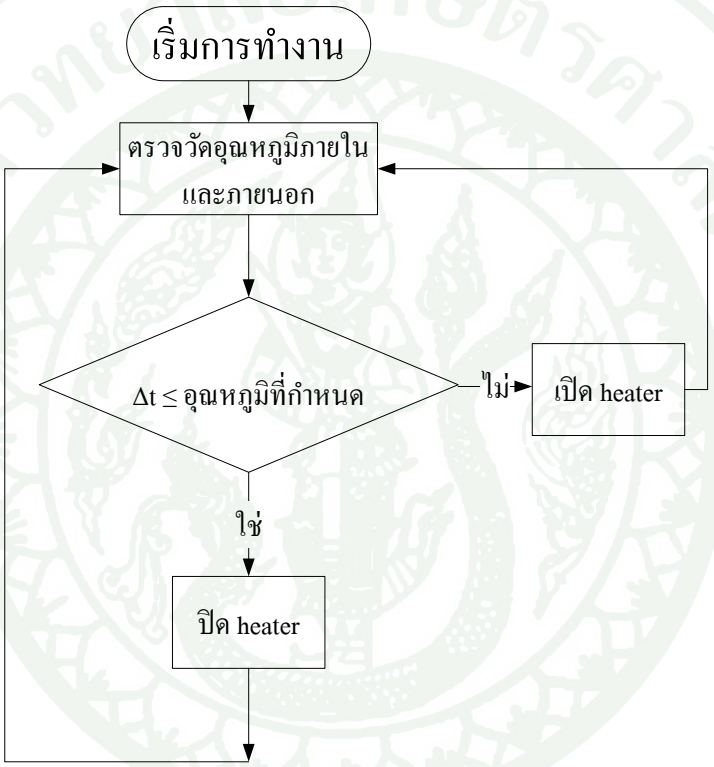


b

ภาพที่ 4 (a) แผนผังระบบควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วย (1) พัดลมระบายความร้อน, (2) จอสัมผัสแสดงผล, (3) ชุด PLC, (4) รีเลย์, (5) heater, (6) thermocouple ภายในไซโลจำลอง และ (7) thermocouple ภายนอกไซโลจำลอง (b) ภาพถ่ายระบบควบคุมอุณหภูมิ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในระหว่างการทดลองรมยาจำลอง ระบบควบคุมอุณหภูมิจะรักษาผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลองให้อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ด้วยการควบคุม heater ในลักษณะเปิด/ปิด (on/off control) ภาพที่ 5 แสดงผังขั้นตอนการทำงานระบบควบคุมอุณหภูมิ ตลอดระยะเวลาการทดลอง ชุด PLC จะคำนวณผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายในไซโลจำลอง หาก ชุด PLC พบว่าผลต่างอุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่กำหนด จะสั่งงานให้ heater ทำงาน และจะตัดการทำงานของ heater เมื่อผลต่างอุณหภูมิมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด



ภาพที่ 5 ผังขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ

วิธีการ

3. วิธีการทดสอบความดันแบบ P-Q test

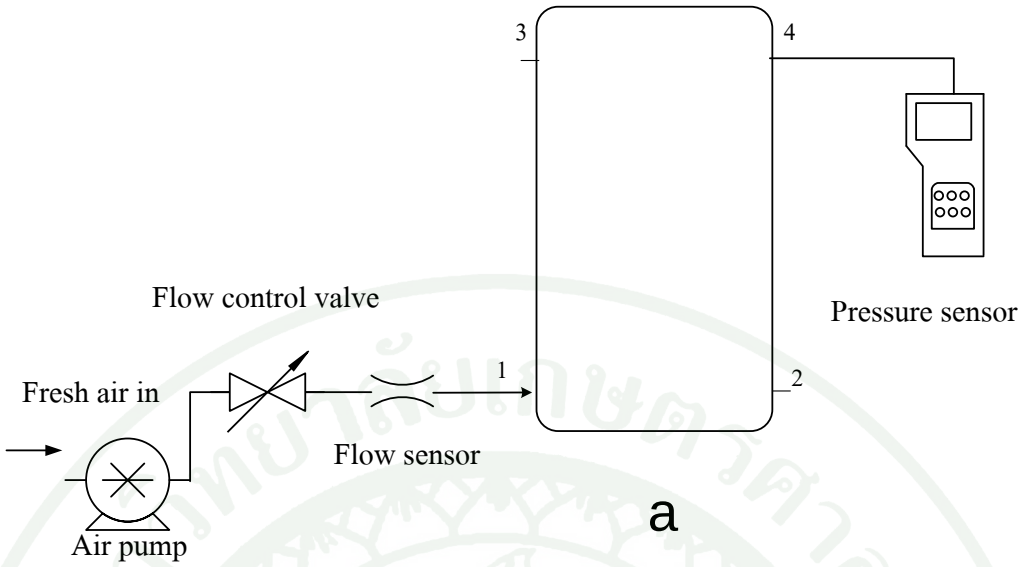
ก่อนการทดลองรมยาจำลอง ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ลม, ค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว และการทดลองเพื่อพิสูจน์สมการรวมผลทุกซ้ำ ผู้วิจัยทำการทดสอบความดันแบบ P-Q test เพื่อวิเคราะห์หาความมิดชิดของไซโลจำลอง ซึ่งถูกจะระบุเป็นค่าของพื้นที่รอยรั่วเสมือน (i.e., A_L

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในสมการที่ 3) การทดสอบความดันแบบ P-Q test จะให้ผลลัพธ์เป็นเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนปริมาตร (Q) กับผลต่างของความดันภายในโครงสร้างปิดกับความดันภายนอก (Δp) ผู้วิจัยสามารถทราบค่าของสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ (i.e., b และ n ในสมการที่ 4) ซึ่งกำหนดคุณลักษณะความมิดชิดของไซโลจำลอง ได้โดยการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งดังกล่าวด้วยสมการที่ 4 จากนั้น พื้นที่รอยรั่วเสมือนจะถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 5 ซึ่งค่าของความหนาแน่นของอากาศ (ρ) ถูกกำหนดให้เท่ากับ 1.2 kg/m^3, ค่าของสัมประสิทธิ์อัตราการไหล (C_D) ถูกกำหนดให้เท่ากับ 1 และผลต่างความดันอ้างอิง (Δp_r) ถูกกำหนดให้เท่ากับ 4 Pa (Sherman and Grimsrud, 1980)

ภาพที่ 6 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบความดันเข้ากับไซโลจำลอง ปั๊มป้อนอากาศไฟฟ้า (manufacturer unknown) ถูกเชื่อมต่อผ่าน flow control valve (วาล์วปรับอัตราการไหล) (AS 1200, SMC (Thailand) Ltd., Pathum Thani, Thailand) และ flow sensor (FD-A100, Keyence Corp., Osaka, Japan) เข้ากับรูที่ 1 บนไซโลจำลอง ด้วยท่อลม PU pressure sensor (Climomaster Model 6531, Kanomax Japan Inc., Osaka, Japan) ถูกเชื่อมต่อเข้ากับรูที่ 4 ด้วยท่อลม PU รูที่ 2 และ 3 ของไซโลจำลองถูกเปิดออกและไม่มีอุปกรณ์ใดเชื่อมต่อไว้ สังเกตว่า รูที่ 2 และ 3 ก็คือ รอยรั่วทั้งหมดบนไซโลจำลอง การทดสอบความดันในไซโลทั้ง 2 ปริมาตร มีการติดตั้งอุปกรณ์ในลักษณะเดียวกัน การทดสอบความดันแบบ P-Q test เริ่มจาก ป้อนอากาศผ่านวาล์วปรับอัตราการไหลที่อัตราการไหลคงที่เข้าสู่ไซโลจำลอง เพื่อให้ความดันภายในไซโลสูงกว่าความดันภายนอก เป็นค่าคงที่อยู่ที่ระดับหนึ่ง อัตราการป้อนอากาศและผลต่างความดันจะถูกบันทึกค่าไว้ เมื่อปรับอัตราการป้อนอากาศ ผลต่างความดันจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ผู้วิจัยได้เลือกบันทึกข้อมูลอัตราการป้อนอากาศ ที่ผลต่างระหว่างความดันภายในไซโลกับความดันภายนอกเท่ากับ 100, 150, 200, 250 และ 300 Pa จากนั้น เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนอากาศกับผลต่างความดันจะถูกฟิตเคอร์ฟด้วยสมการที่ 4 เพื่อหาค่าของสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ b และ n จากนั้น พื้นที่รอยรั่วเสมือนจะถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์





b

ภาพที่ 6 (a) แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบความดันแบบ P-Q test เข้ากับไซโลจำลอง ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับไซโลจำลอง (b) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (c) ปริมาตร 2.160 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



C

ภาพที่ 6 (ต่อ)

4. การทดลองรมยาจำลอง

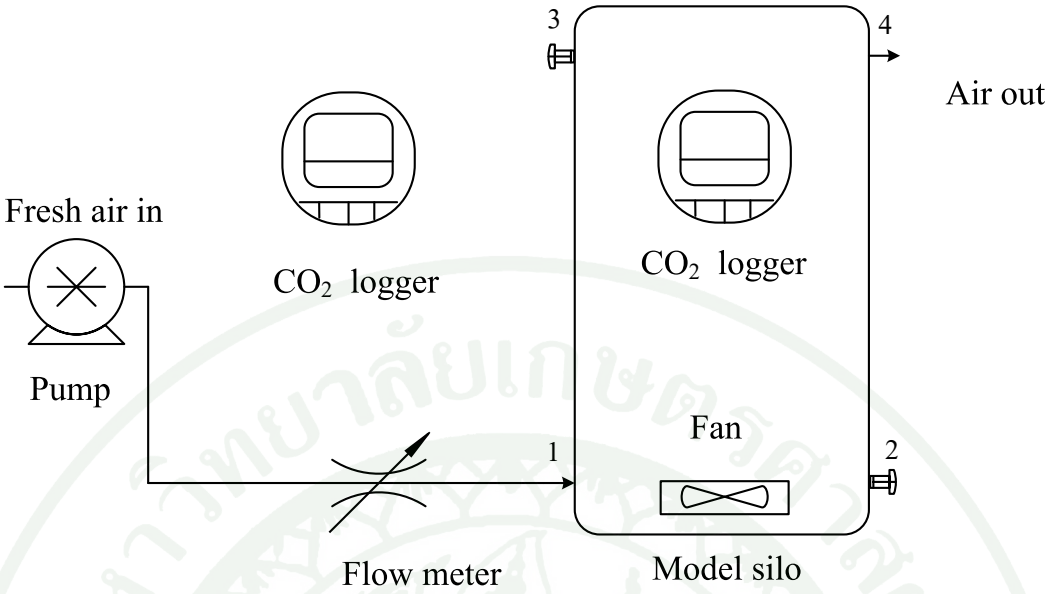
ในทุกการทดลองรมยาจำลอง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นไม่เกิน 10,000 ppm ถูกใช้เป็นก๊าซตัวแทนสารรม โดยผู้วิจัยอนุมานให้สารรมยาใดๆ มีพฤติกรรมเชิงของไหลเหมือนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การทดลองรมยาจำลองถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การพิสูจน์ว่าลักษณะการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาเป็นแบบ first-order kinetic, 2) การหาค่าสัมประสิทธิ์ค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว และค่าสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลอง และ 3) การพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถถูกอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.1 การทดลองที่ 1 การพิสูจน์ว่าลักษณะการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาเป็นแบบ first-order kinetic

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นว่าการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาเป็นแบบ first-order kinetic ซึ่งก็คือ การลดลงของความเข้มข้นก๊าซมีพฤติกรรมเป็นไปตามสมการที่ 1 และความสัมพันธ์ระหว่าง HLT กับอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลองเป็นไปตามสมการที่ 2 ผู้วิจัยทำการทดลองรมยาจำลองกับไซโลจำลอง 2 ปริมาตร ในสภาวะที่อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลองคงที่ อุปกรณ์ต่างๆ ถูกติดตั้งเข้ากับไซโลจำลองดังแสดงในภาพที่ 7 CO_2 data logger (CO210, Extech Instrument Corp., Nashua, New Hampshire, USA) (อุปกรณ์บันทึกความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) จำนวน 1 ตัว ถูกติดตั้งบริเวณกึ่งกลางภายในไซโลจำลอง CO_2 data logger อีก 1 ตัว ถูกติดตั้งอยู่ภายนอกไซโลจำลอง ห่างจากไซโลไม่เกิน 1 m CO_2 data logger จะบันทึกค่าความเข้มข้นทุกๆ 30 s พัดลมไฟฟ้าถูกติดตั้งที่บริเวณจุดกึ่งกลางของก้นไซโลจำลองและถูกติดตั้งให้การไหลของอากาศมีทิศพุ่งขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลอง ปั๊มป้อนอากาศไฟฟ้า (manufacturer unknown) ถูกเชื่อมต่อผ่าน Thorpe tube flow meter (โฟล์วมิเตอร์แบบลูกลอย) พร้อมวาล์วปรับอัตราการไหล (FR2000, Key Instruments Co. Ltd., Trevose, PA, USA) เข้ากับรูที่ 1 บนไซโลจำลอง รูที่ 4 ถูกเปิดไว้ให้อากาศภายในสามารถรั่วไหลออกจากไซโลจำลองได้ รูที่ 2 และ 3 ถูกปิดสนิทตลอดการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



a



b

ภาพที่ 7 (a) แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองรมยาจำลอง ในสภาวะที่อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลองคงที่ ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับไซโลจำลอง (b) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (c) ปริมาตร 2.160 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



c

ภาพที่ 7 (ต่อ)

การทดลองเริ่มจาก ใช้ปั๊มป้อนอากาศเข้าสู่ไซโลจำลองที่อัตราคงที่ (i.e., อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรมยาคงที่) ตามที่กำหนดไว้ในแผนการทดลอง (ตารางที่ 1) จากนั้น ผู้วิจัยจะเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าสู่ไซโลจำลองให้ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 8,000 ppm ในการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ไซโลจำลอง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกถ่ายจากถังอัดความดันเข้าสู่ถุงพลาสติก PVC (polyvinyl chloride) (ปริมาตรไม่เกิน 20 l) จากนั้น ถุง PVC จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับไซโลจำลอง และถูกบีบเพื่อถ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในถุงเข้าสู่ไซโล ตลอดการทดลอง อัตราการป้อนอากาศจะถูกควบคุมให้คงที่ ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในไซโลจำลองลดลงอย่างต่อเนื่อง สำหรับไซโลจำลองแต่ละปริมาตร ผู้วิจัยเลือกทำการทดลองที่อัตราการป้อนอากาศคงที่จำนวน 5 ค่า สมการที่ 2 แสดงให้เห็นว่า อัตราการป้อนอากาศ (อัตรารั่วไหล) และ HLT เป็นอัตราส่วนผกผันกัน ดังนั้น ผู้วิจัยสามารถคำนวณค่าของ HLT ทางทฤษฎี (calculated HLT, HLT_c) ที่เป็นผลจากอัตราการป้อนอากาศทั้ง 5 ค่า ได้ดังสรุปอยู่ในตารางที่ 1 ตัวอย่างเช่น ไซโลจำลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริมาตร 0.2285 m^3 ที่อัตราการป้อนอากาศ 8.33×10^{-6} m^3/s จะให้ค่าของ HLT ทางทฤษฎีเท่ากับ $(0.2285\times\ln(2))/(8.33\times10^{-6}\times 3{,}600) = 5.28$ h ที่แต่ละเงื่อนไขอัตราการป้อนอากาศ การทดลองรมยาจำลองจะถูกทำซ้ำ 3 ซ้ำ กำหนดให้ระยะเวลาการรมยา (exposure time) แต่ละซ้ำ เป็นประมาณ 2 เท่า ของ HLT_c ของการทดลองรมยาจำลองนั้นๆ เช่น ที่ HLT_c เท่ากับ 22.0 h การทดลองรมยาจำลองจะใช้ระยะเวลาการรมยาประมาณ 44.0 h

ตารางที่ 1 แผนการทดลองรมยาจำลอง ในสภาวะที่อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลองคงที่

volume (m^3)	infiltration rate (m^3/s)	HLT_c (h)	exposure time (h)
0.2285	8.33×10^{-6}	5.28	11.00
	5.00×10^{-6}	8.80	18.00
	3.33×10^{-6}	13.21	26.00
	2.67×10^{-6}	16.48	33.00
	2.00×10^{-6}	22.00	44.00
2.160	83.30×10^{-6}	5.00	10.00
	50.00×10^{-6}	8.30	16.00
	33.30×10^{-6}	12.50	25.00
	26.70×10^{-6}	15.60	31.00
	20.00×10^{-6}	20.80	42.00

เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองรมยาจำลองแต่ละซ้ำ ความเข้มข้นก๊าซที่บันทึกได้จาก CO_2 data logger ช่วงเริ่มต้น (ประมาณ 1 h หลังจากการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าสู่ไซโลจำลอง) ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยังกระจายตัวได้ไม่ทั่วถึง จะถูกตัดออก จากนั้น ความเข้มข้นก๊าซที่บันทึกได้จาก CO_2 data logger ภายในไซโลจำลองจะถูกหักลบด้วยความเข้มข้นก๊าซที่บันทึกได้จาก CO_2 data logger ภายนอกไซโลจำลองเพื่อให้ได้เส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซ เส้นโค้งนี้จะถูกผ่านกระบวนการ normalization คือ ค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ทุกจุดเวลา (i.e., C_t ในสมการที่ 1) จะถูกหารด้วยค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เริ่มต้น (i.e., C_i ในสมการที่ 1) เส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization แล้วจะถูก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฟิตเตอร์ฟโดยใช้สมการที่ 1 เพื่อคำนวณหาค่า HLT จากการทดลอง ซึ่งถูกกำหนดให้เป็น HLT_a (actual HLT) ค่า HLT_a จะถูกเปรียบเทียบกับค่า HLT_c ดังนั้น ลักษณะการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาจะเป็นแบบ first-order kinetic เมื่อ HLT_a มีค่าใกล้เคียงกับ HLT_c

4.2 การทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว และค่าสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลอง

ค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว และค่าสัมประสิทธิ์ลม ในสมการรวมผล เป็นคุณลักษณะของโครงสร้างการรมยา ซึ่งไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ผู้วิจัยจึงออกแบบการทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อหาค่าของสัมประสิทธิ์ดังกล่าวของไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตร ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ (ภาพที่ 1) ผู้วิจัยทำการทดลองรมยาจำลองที่ 2 สภาวะ สภาวะที่ 1 คือ สภาวะที่ความเร็วลมพัดกระทบภายนอกไซโลจำลองมีค่าคงที่ (i.e., U ในสมการที่ 3 = ค่าคงที่) ในขณะที่ อุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลมีค่าเท่ากัน (i.e., ΔT ในสมการที่ 3 = 0) สภาวะที่ 2 คือ สภาวะที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิภายในกับภายนอกไซโลจำลองมีค่าคงที่ (i.e., ΔT ในสมการที่ 3 = ค่าคงที่) ในขณะที่ไม่มีลมพัดกระทบภายนอกไซโลจำลอง (i.e., U ในสมการที่ 3 = 0) ผู้วิจัยเลือกทำการทดลองที่ค่า HLT_c อยู่ในช่วง 5 – 18 h

4.2.1. การทดลองที่ 2.1 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ลม

สังเกตว่า หากอุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลจำลองมีค่าเท่ากัน สมการที่ 3 สามารถถูกจัดให้อยู่ในรูปสมการที่ 6 จากสมการที่ 6 ผู้วิจัยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ลมได้หากทราบค่าของอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลอง, พื้นที่รอยรั่วเสมือนของไซโลจำลอง และความเร็วลมที่พัดกระทบภายนอกไซโลจำลอง

$$C_w = \left(1{,}000 \frac{Q}{A_L U}\right)^2 \qquad (6)$$

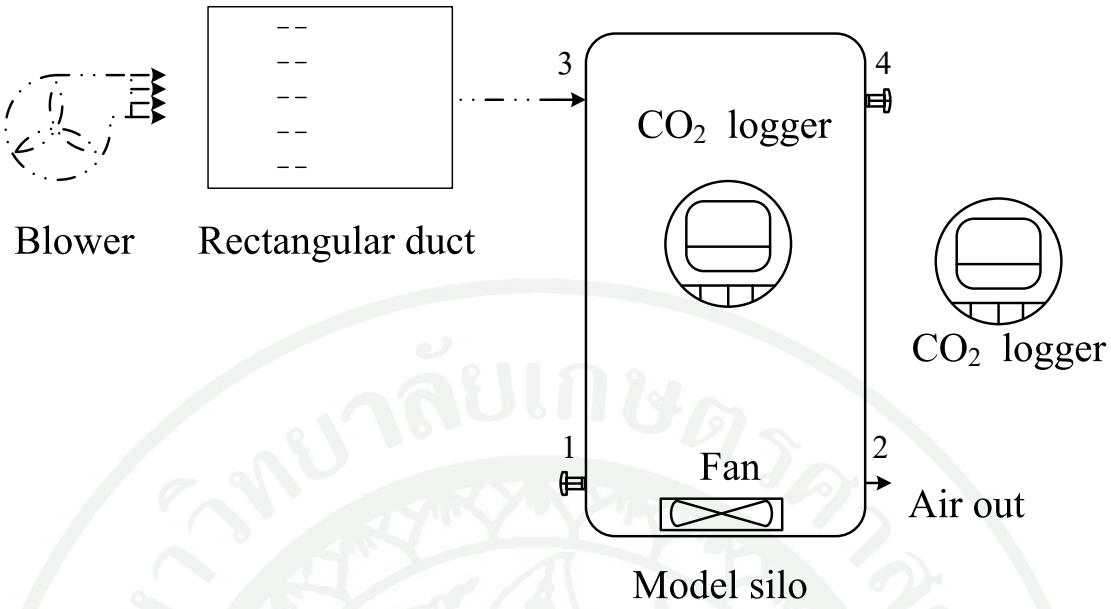
สังเกตว่า สัมประสิทธิ์ลมเป็นคุณลักษณะของไซโลจำลอง ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของรูปร่างของไซโล และรูปร่างและตำแหน่งของรอยรั่วบนไซโล แต่ไม่ขึ้นกับความเร็วลม (ASHRAE,

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2001) ดังนั้นในการทดลองนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ลมที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 6 ควรมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่ว่าลมที่พัดกระทบภายนอกไซโลจำลองจะมีความเร็วเท่าใด

ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ลม ผู้วิจัยติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลองรมยาจำลองดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งจำลองการรมยาในสภาพที่การรั่วไหลของสารรมเกิดจากผลกระทบของลมที่พัดกระทบภายนอกไซโลเพียงปัจจัยเดียว CO_2 data logger จำนวน 1 ตัว ถูกติดตั้งบริเวณกึ่งกลางภายในไซโลจำลองและอีก 1 ตัว ถูกติดตั้งอยู่ในรัศมี 1 m ภายนอกไซโลจำลอง ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกบันทึกทุกๆ 30 s พัดลมไฟฟ้าถูกติดตั้งบริเวณจุดกึ่งกลางของก้นไซโล โดยให้ทิศทางการไหลของอากาศมีทิศพุ่งขึ้น รูที่ 2 ถูกเปิดไว้ให้อากาศภายในสามารถรั่วไหลออก และรูที่ 3 ถูกเปิดไว้ให้อากาศภายนอกสามารถรั่วไหลเข้าสู่ไซโลจำลองได้ตลอดการทดลอง รูที่ 1 และ 4 ถูกปิดสนิท ชุดอุปกรณ์การทดลองถูกติดตั้งภายในที่ร่ม เพื่อรักษาให้อุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน CO_2 data logger จะบันทึกค่าอุณหภูมิไปพร้อมกับค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งผลต่างอุณหภูมิระหว่าง CO_2 data logger ที่อยู่ภายในและภายนอกไซโลจำลองโดยทั่วไปมีค่าไม่เกิน 1.5°C ในทุกซ้ำของการทดลองนี้ (data not shown)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



a



b

ภาพที่ 8 (a) แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ลม ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับไซโลจำลอง (b) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (c) ปริมาตร 2.160 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



C

ภาพที่ 8 (ต่อ)

blower (manufacturer unknown) ซึ่งถูกขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.5 hp และมีเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 12.5 cm ถูกติดตั้งที่ด้านหน้าไซโลจำลองในลักษณะที่ทำให้ลมเคลื่อนที่ผ่านไซโลจำลองในแนวตั้งฉากกับรูที่ 3 ช่องลมด้านขาออกของ blower ตั้งฉากกับหน้าตัดของรูที่ 3 โดยจุดกึ่งกลางของ blower และจุดศูนย์กลางรูที่ 3 อยู่ในแนวเดียวกัน ท่อลมทรงเหลี่ยม (rectangular duct) ขนาดหน้าตัด 25×32 cm^2 ยาวประมาณ 100 cm ซึ่งภายในมีแผ่นบังคับทิศทางลม (guide vane) ถูกติดตั้งระหว่าง blower และไซโลจำลอง เพื่อปรับให้กระแสการไหลของอากาศเป็นแบบราบเรียบ (laminar flow) ก่อนกระทบไซโลจำลอง ทางออกของท่อลมทรงเหลี่ยมอยู่ห่างจากรูที่ 3 เป็นระยะ 30 cm และช่องลมด้านขาออกของ blower อยู่ห่างจากทางเข้าของท่อลมทรงเหลี่ยมเป็นระยะไม่น้อยกว่า 60 cm เพื่อป้องกันการรบกวนของลมธรรมชาติ ผ้าร่มพลาสติก PP ถูกขึงไว้ที่ด้านบนและด้านข้างไซโลจำลองทั้ง 2 ด้าน ตลอดแนวขนานกับทิศทางลมจาก blower (ภาพที่ 9) ระยะตั้งฉากระหว่างแผ่นผ้าร่มกับขอบของไซโลปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าเป็น 1.0 และ 0.2 m ตามลำดับ การปรับความเร็วลมจาก blower สามารถทำได้โดยการปรับขนาดช่องลมด้านขาเข้าของ blower ผู้วิจัยหาค่าสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลอง โดยทำการทดลองรมยาจำลองในไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตร ที่ความเร็วลมจาก blower เฉลี่ยคงที่ 4 ค่า และที่แต่ละความเร็วลม ทำการทดลองรมยา 3 ซ้ำ ความเร็วลมจาก blower ที่พัดกระทบไซโลจำลองถูกรักษาให้คงที่ตลอด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดลองรมยาจำลองแต่ละซ้ำ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ ผู้วิจัยไม่สามารถบันทึกค่าความเร็วลมได้ตลอดระยะเวลาการทดลองแต่ละซ้ำ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการวัดค่าความเร็วลมเฉลี่ยของการทดลองแต่ละซ้ำ ก่อนการทดลองรมยาซ้ำนั้นๆ จุดวัดความเร็วลมที่พัดกระทบไซโลถูกกำหนดให้อยู่ที่ด้านหน้าไซโล ห่างจากรูที่ 3 เป็นระยะ 17.5 cm hot-wire anemometer (Climomaster Model 6531, Kanomax Japan Inc., Osaka, Japan) ถูกติดตั้งที่จุดวัดความเร็วลม ในขณะที่ขนาดช่องลมด้านขาเข้าของ blower ถูกปรับให้คงที่ และ blower เป่าลมกระทบไซโล ค่าความเร็วลมถูกบันทึกทุกๆ 10 s เป็นเวลา 2 h ก่อนหน้านี้ ผู้วิจัยได้ทำการวัดความเร็วลมในลักษณะดังกล่าวเป็นเวลา 40 h และพบว่าความเร็วลมตลอด 40 h มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของความเร็วลมเพียง 2 h จะถูกใช้เป็นค่าความเร็วลมในการวิเคราะห์ผลสำหรับการทดลองรมยาซ้ำนั้นๆ ตารางที่ 2 แสดงค่าโดยประมาณของความเร็วลมจาก blower ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ลม นอกจากนี้ ก่อนการทดลองรมยาแต่ละซ้ำ ผู้วิจัยทดสอบความดันแบบ P-Q test กับไซโลจำลอง เพื่อยืนยันว่าพื้นที่รอยรั่วเสมือนของไซโลจำลองมีขนาดใกล้เคียงกันในทุกซ้ำของการทดลอง เริ่มต้นการทดลองรมยาจำลองแต่ละซ้ำ ด้วยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ไซโลจำลองให้ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ประมาณ 8,000 ppm ซึ่งวิธีการเติมก๊าซได้ถูกอธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 9 ภาพถ่ายผ้าร่มพลาสติก PP ซึ่งถูกขึงบริเวณด้านข้างและด้านบนของไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตร

ตารางที่ 2 แผนการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ลม

volume (m^3)	wind speed (m/s)
0.2285	~1.50, ~2.00, ~2.50 and ~4.00
2.160	~3.80, ~4.80, ~7.00 and ~12.00

หลังเสร็จสิ้นการทดลองแต่ละซ้ำ ค่าความเข้มข้นที่บันทึกได้จาก CO_2 data logger จะถูกประมวลผล ด้วยการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซด้วยสมการที่ 1 เพื่อหาค่า HLT จากการทดลอง หรือ HLT_a กระบวนการประมวลผลข้อมูลความเข้มข้นได้ถูกอธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.1 จากนั้น สัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลองสามารถถูกคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 6 สังเกตว่า อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจะถูกคำนวณจาก HLT_a โดยใช้สมการที่ 2, พื้นที่รอยรั่วเสมือนจะถูกคำนวณโดยใช้ผลการทดสอบความดันแบบ P-Q test (i.e., สมการที่ 4) และสมการที่ 5, และค่าเฉลี่ยของความเร็วลมที่พัดกระทบไซโลจำลองได้ถูกวัดค่าไว้แล้วเป็นเวลา 2 h ก่อนการทดลองรมยา ค่าของสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลองแต่ละปริมาตรจะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถูกกำหนดให้เป็นค่าเฉลี่ยของผลการคำนวณสัมประสิทธิ์ลมที่ได้จากทุกความเร็วลม จากนั้น ค่าของสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณในการทดลองในหัวข้อ 4.3 ต่อไป

4.2.2. การทดลองที่ 2.2 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว

ในลักษณะเดียวกับการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ลม สัมประสิทธิ์ความลอยตัวเป็นคุณลักษณะของไซโลจำลอง และสามารถถูกคำนวณได้จากสมการรวมผล (i.e., สมการที่ 3) โดยพิจารณาให้ลมที่พัดกระทบไซโลมีความเร็วเป็น 0 m/s ดังนั้น ผู้วิจัยสามารถทำการทดลองรมยาจำลองในลักษณะที่ไม่มีลมพัดกระทบไซโล และผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลถูกควบคุมให้คงที่ตลอดเวลา จากนั้น ใช้สมการที่ 7 คำนวณหาค่าของสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโล นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์ความลอยตัวของแต่ละไซโล ที่คำนวณจากสมการที่ 7 ควรมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่ว่าผลต่างอุณหภูมิในการทดลองจะมีค่าเท่าใด

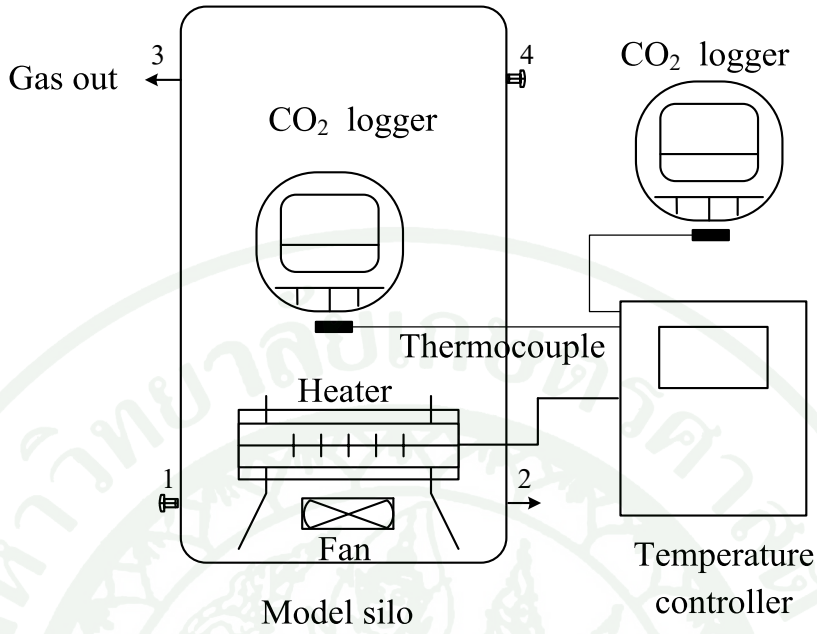
$$C_s = \left(1{,}000 \frac{Q}{A_L \sqrt{\Delta t}} \right)^2 \qquad (7)$$

ภาพที่ 10 แสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์ ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว ซึ่งจำลองการรมยาในสภาพที่การรั่วไหลของสารรมเกิดจากผลกระทบของผลต่างอุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลจำลองเพียงปัจจัยเดียว ชุดอุปกรณ์การทดลองถูกติดตั้งภายในที่ร่ม การติดตั้ง CO_2 data logger, การติดตั้งพัดลมไฟฟ้า และการเปิด/ปิดรูที่ 1, 2, 3 และ 4 มีลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ลม heater ถูกติดตั้งเหนือพัดลมไฟฟ้าเล็กน้อยดังภาพที่ 11 CO_2 data logger จะบันทึกค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิทุกๆ 30 s เพื่อป้องกันการรบกวนของลมธรรมชาติ ผ้าร่มพลาสติก PP ถูกขึงไว้โดยรอบไซโลจำลองห่างจากขอบของไซโลเป็นระยะ 0.2 – 0.7 m ตลอดระยะเวลาการทดลอง ระบบควบคุมอุณหภูมิซึ่งถูกอธิบายไว้ในหัวข้อ 2 จะรักษาผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลองให้คงที่อยู่ที่ค่าที่กำหนด ผู้วิจัยเลือกทำการทดลองรมยาจำลองที่ผลต่างอุณหภูมิคงที่ 4 ระดับ (ตารางที่ 3) ที่แต่ละผลต่างอุณหภูมิ ทำการทดลองรมยา 3 ซ้ำ และทำการทดสอบความดันแบบ P-Q test กับไซโลจำลองก่อนการทดลองทุกซ้ำ เริ่มต้นการทดลองแต่ละซ้ำที่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 8,000 ppm ก่อนการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ไซโล ระบบควบคุมอุณหภูมิจะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถูกปล่อยให้ทำงานทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 15 min เพื่อปรับให้ผลต่างอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะสมดุลก่อนการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



a



b

ภาพที่ 10 (a) แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์ในไซโลจำลอง (b) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (c) ปริมาตร 2.160 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



C

ภาพที่ 10 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



a b

ภาพที่ 11 ภาพถ่ายลักษณะการติดตั้ง heater และพัดลม ในไซโลจำลอง (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3

ตารางที่ 3 แผนการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว

volume (m^3)	temperature difference (°C)
0.2285	~5.50, ~8.50, ~10.50 and ~12.00
2.160	~7.50, ~11.50, ~14.50 and ~17.00

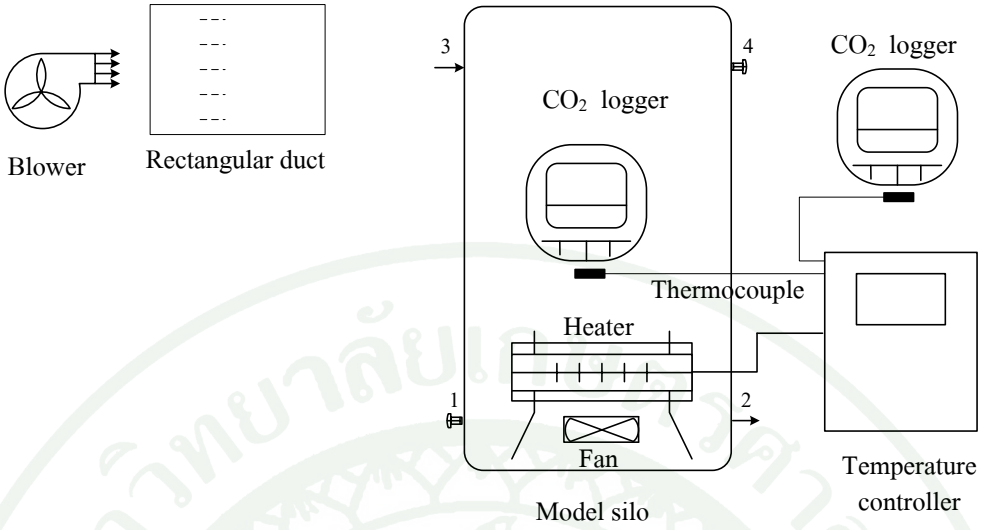
การประมวลผลข้อมูลในการทดลองนี้มีขั้นตอนคล้ายกับในการทดลองหัวข้อ 4.2.1 สัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโลจำลองจะถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 7 อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจะถูกหาจากเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซ ผลการทดสอบความดันจะแสดงถึงค่าของพื้นที่รอยรั่วเสมือน ผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลองที่ใช้ในการคำนวณในสมการที่ 7 เป็นค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองแต่ละซ้ำของผลต่างอุณหภูมิที่บันทึกจาก CO_2 data logger ทั้ง 2 ตัว ค่าของสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโลจำลองแต่ละปริมาตรจะถูกกำหนดให้เป็นค่าเฉลี่ยของผลการคำนวณสัมประสิทธิ์ความลอยตัวที่ได้จากทุกผลต่างอุณหภูมิ จากนั้น ค่าของสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโลจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณในการทดลองในหัวข้อ 4.3 ต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.3 การทดลองที่ 3 การพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล

หลังจากที่ ผู้วิจัยทราบค่าของสัมประสิทธิ์ความลอยตัว และสัมประสิทธิ์ลมของไซโลทั้ง 2 ปริมาตรแล้ว ผู้วิจัยสามารถพิสูจน์สมการรวมผล (i.e., สมการที่ 3) ได้โดยทำการทดลองรมยาจำลองในลักษณะที่ สภาวะอากาศโดยรอบไซโลจำลองถูกควบคุม และแสดงให้เห็นว่าสมการที่ 2 และสมการที่ 3 สามารถให้ผลการทำนายค่า HLT (predicted HLT, HLT_p) ที่สอดคล้องกับผลลัพธ์ HLT ที่ได้จากการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซจากการทดลองรมยา กับสมการที่ 1 (i.e., HLT_a) ในการทดลองนี้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาสัมประสิทธิ์ลมจะถูกติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์ในการทดลองหาสัมประสิทธิ์ความลอยตัว ดังแสดงในภาพที่ 12 ดังนั้น ผู้วิจัยขอไม่กล่าวถึงรายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองนี้ และขอกล่าวถึงขั้นตอนการทำการทดลองเพียงคร่าวๆ ความเร็วลมจาก blower ที่ใช้ในการทดลอง ถูกวัดค่าเป็นเวลา 2 h ก่อนการทดลองรมยาแต่ละซ้ำ และค่าเฉลี่ยที่ได้จะถูกใช้เป็นค่าความเร็วลมในการวิเคราะห์ผลสำหรับการทดลองรมยาซ้ำนั้นๆ ก่อนการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ไซโลให้อยู่ที่ประมาณ 8,000 ppm ระบบควบคุมอุณหภูมิจะถูกปล่อยให้ทำงานทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 15 min ผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลองที่ใช้ในการในสมการที่ 3 เป็นค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองแต่ละซ้ำของผลต่างอุณหภูมิที่บันทึกจาก CO_2 data logger ทั้ง 2 ตัว ไซโลถูกทดสอบความดันแบบ P-Q test ก่อนการทดลองรมยาทุกซ้ำ สำหรับไซโลจำลองแต่ละขนาด ผู้วิจัยเลือกทำการทดลองรมยาจำลองที่ความเร็วลม 3 ระดับ และที่ผลต่างอุณหภูมิ 4 ระดับ (รวม 12 เงื่อนไขการทดลอง) ดังแสดงในตารางที่ 4 ที่แต่ละเงื่อนไขการทดลองรมยาจำลอง ผู้วิจัยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



a



b

ภาพที่ 12 (a) แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับไซโลจำลอง (b) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (c) ปริมาตร 2.160 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



C

ภาพที่ 12 (ต่อ)

ตารางที่ 4 แผนการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล

volume (m^3)	wind speed (m/s)	temperature difference (°C)
0.2285	~2.00, ~2.50 and ~4.50	~5.50, ~7.50, ~9.50 and ~11.00
2.160	~2.30, ~5.50 and ~11.50	~7.50, ~12.00, ~14.50 and ~16.50

ข้อมูลความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ข้อมูลความเร็วลม, ข้อมูลอุณหภูมิ และข้อมูลการทดสอบความดัน จะถูกประมวลผลด้วยวิธีการที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.2.1 และหัวข้อ 4.2.2 สมการรวมผล (i.e., สมการที่ 3) และสมการที่ 2 จะถูกใช้เพื่อคำนวณหา HLT_p ในการคำนวณหา HLT_p ค่าของสัมประสิทธิ์ลม และค่าของสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโลจำลองเป็นค่าที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 และหัวข้อ 4.2.2 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าของผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลอง, ค่าของความเร็วลมที่พัดกระทบไซโล และค่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ของพื้นที่รอยรั่วเสมือนของไซโล ในการคำนวณหา HLT_p เป็นค่าที่วัดได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.3 นี้ การพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล ก็คือ การพิสูจน์ว่า HLT_p มีค่าสอดคล้องกับ HLT_a ซึ่งได้จากการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซจากการทดลองรมยาจำลองด้วยสมการที่ 1

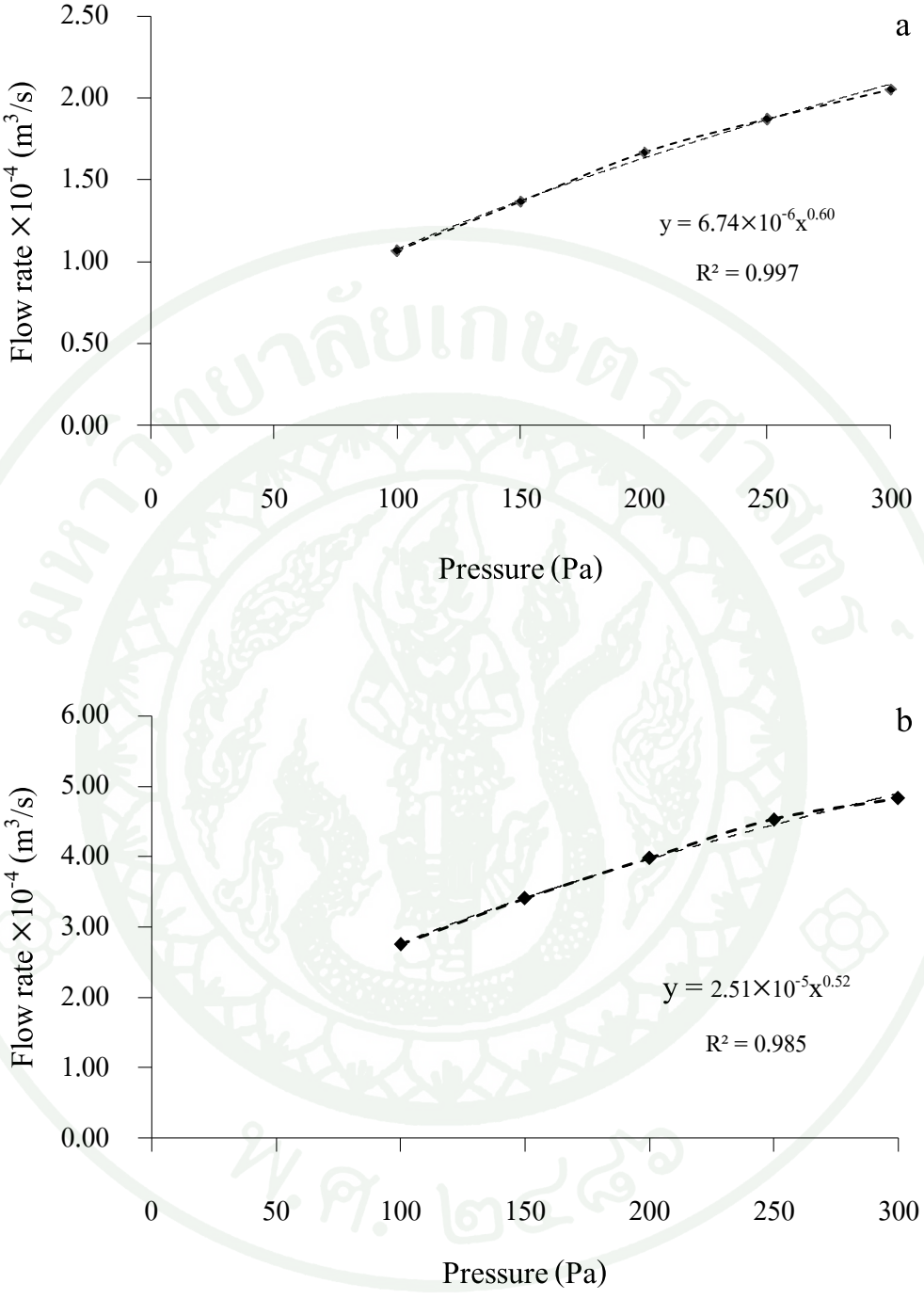
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผลการทดสอบความดันแบบ P-Q test

การทดสอบความดับแบบ P-Q test ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว, ค่าสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลอง และการพิสูจน์วิธีการรวมผลของไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตร ในระหว่างการทดสอบความดันกับไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 ค่าอัตราการป้อนอากาศและค่าผลต่างความดันที่อ่านได้จาก sensor จะมีความเสถียร (i.e., ค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว) กว่าเมื่อทำการทดสอบความดันกับไซโลปริมาตร 2.160 m^3 นอกจากนี้ การทดสอบความดันกับไซโลปริมาตร 0.2285 m^3 ใช้เวลาน้อยกว่าการทดสอบกับไซโลปริมาตร 2.160 m^3 (e.g., 5 min เมื่อเปรียบเทียบกับ 20 min) สังเกตว่า ในการทดสอบความดันกับไซโลทั้ง 2 ปริมาตร ปั๊มป้อนอากาศที่ใช้เป็นปั๊มขนาดเดียวกัน ดังนั้น เพื่อให้การทดสอบความดันเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ทดสอบต้องเลือกใช้อุปกรณ์ป้อนอากาศที่สามารถให้อัตราการไหลและให้ความดันได้เพียงพอกับขนาดและระดับความมิดชิดของโครงสร้างปิด ตัวอย่างผลการทดสอบ P-Q test ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 13 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนอากาศและผลต่างความดันระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลอง ภาพที่ 13a เป็นตัวอย่างผลการทดสอบความดัน P-Q test ในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 ซึ่งเมื่อถูกฟิตเคอร์ฟด้วยสมการที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ b และ n มีค่าเท่ากับ 6.74×10^{-6} และ 6.02×10^{-1} ตามลำดับ (R^2 – coefficient of determination หรือ สัมประสิทธิ์การอธิบาย = 0.997) เมื่อนำค่า b และ n ดังกล่าวแทนลงในสมการที่ 5 ค่าพื้นที่รอยรั่วเสมือน A_L มีค่าเท่ากับ 0.0601 cm^2 ภาพที่ 13b เป็นตัวอย่างผลการทดสอบความดัน P-Q test ในไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 ซึ่งการฟิตเคอร์ฟด้วยสมการที่ 4 ให้ผลลัพธ์ $b = 2.51\times10^{-5}$, $n = 5.21\times10^{-1}$ และ $R^2 = 0.985$ เมื่อแทนค่า b และ n ดังกล่าวลงในสมการที่ 5 ค่า A_L มีค่าเท่ากับ 0.2000 cm^2 ผลการทดสอบ P-Q test ทุกซ้ำกับไซโลจำลอง 0.2285 m^3 แสดงให้เห็นว่าค่า b, n และ A_L มีค่าอยู่ระหว่าง $5.52\times10^{-6} – 9.52\times10^{-6}$, $5.33\times10^{-1} – 6.29\times10^{-1}$ และ 0.0502 – 0.0805 cm^2 ตามลำดับ ($R^2 > 0.990$) ในขณะเดียวกัน ไซโลปริมาตร 2.160 m^3 มีค่า b, n และ A_L อยู่ระหว่าง $2.23\times10^{-5} – 3.10\times10^{-5}$, $4.87\times10^{-1} – 5.47\times10^{-1}$ และ 0.1818 – 0.2324 cm^2 ตามลำดับ ($R^2 > 0.990$) Chayaprasert et al. (2012) ทำการทดสอบ P-Q test กับอาคาร 5 ชั้น ซึ่งมีปริมาตรรวม 9,628 m^3 ที่ช่วงผลต่างความดันภายในและภายนอกอาคาร 10 – 140 Pa ผลการฟิตเคอร์ฟของนักวิจัยกลุ่มนี้ให้ค่า R^2 ระหว่าง 0.819 – 0.995 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสรุปว่าการทดสอบความดันในวิทยานิพนธ์นี้ให้ผลการทดสอบที่เชื่อถือได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 13 ตัวอย่างการทดสอบหาค่าพื้นที่รอยรั่วด้วยการทดสอบความดันแบบ P-Q test (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m3 และ (b) ไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3

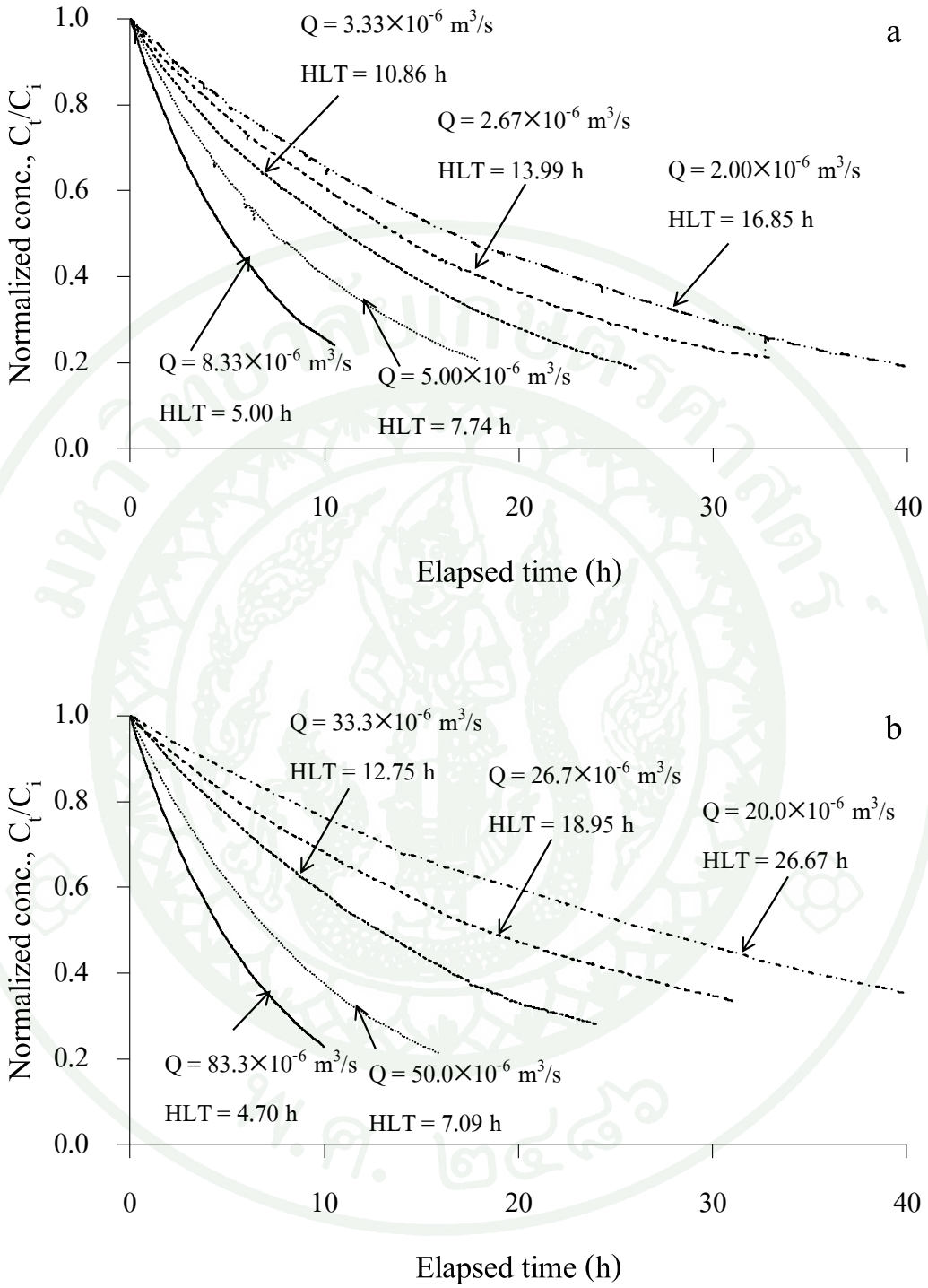
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดลองรมยาจำลอง

1. ผลการทดลองที่ 1 การพิสูจน์ว่าลักษณะการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาเป็นแบบ first-order kinetic

ภาพที่ 14a แสดงตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำ ที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ ในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 ในทำนองเดียวกัน ภาพที่ 14b แสดงตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในไซโลปริมาตร 2.160 m^3 ค่า HLT ของไซโลทั้ง 2 ปริมาตร มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่ออากาศภายนอกรั่วไหลเข้าสู่ไซโลในอัตราที่สูงขึ้น ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไซโลจะลดลงเร็วขึ้น (i.e., HLT มีค่าต่ำลง) ยกตัวอย่างเช่น สำหรับไซโลปริมาตร 0.2285 m^3 เมื่ออัตราการป้อนอากาศเพิ่มขึ้นจาก 2.00×10^{-6} ไปเป็น 8.33×10^{-6} m^3/s ค่า HLT ลดลงจาก 16.85 ไปเป็น 5.00 h ในทำนองเดียวกัน สำหรับไซโลปริมาตร 2.160 m^3 เมื่ออัตราการป้อนอากาศเพิ่มขึ้นจาก 20.0×10^{-6} ไปเป็น 83.3×10^{-6} m^3/s ค่า HLT ลดลงจาก 26.67 ไปเป็น 4.70 h ค่าเฉลี่ยของ HLT ของไซโลทั้ง 2 ปริมาตรที่ได้จากการฟิตเคอร์ฟด้วยสมการที่ 1 กับเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซของทุกซ้ำการทดลอง (i.e., HLT_a) ถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 5 ในการทดลองที่ 1 ค่า R^2 ของการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซของทุกซ้ำการทดลอง มีค่าไม่น้อยกว่า 0.990 Chayaprasert et al (2012) ทำการฟิตเคอร์ฟสมการ first-order kinetic กับเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในการรมยาอาคารขนาด 9,628 m^3 ด้วยสารรมเมทิลโบรไมด์และซัลฟูริลฟลูออไรด์ ซึ่งพบว่า R^2 ของการฟิตเคอร์ฟมีค่าไม่น้อยกว่า 0.910 ธีรเดช และคณะ (2012) ทำการฟิตเคอร์ฟลักษณะเดียวกัน ในการทดลองเปรียบเทียบอัตราการรั่วไหลของก๊าซฟอสฟีนในโครงสร้างลูกบาศก์ว่างเปล่าขนาด 1 m^3 ซึ่งถูกคลุมด้วยแผ่น PVC ที่ความหนาต่างกัน ซึ่งพบว่า R^2 ของการฟิตเคอร์ฟมีค่าไม่น้อยกว่า 0.960 ดังนั้น ผู้วิจัยสามารถสรุปได้ว่า ลักษณะการลดลงของความเข้มข้นก๊าซเป็นแบบ first-order kinetic ค่า HLT_a ของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าอยู่ระหว่าง 5.02 – 18.35 h และระหว่าง 4.72 – 27.45 h ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 14 ตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำ ของการทดลองที่ 1 ที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ จาก (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบระหว่าง HLT ทางทฤษฎี (i.e., HLT_c) และ HLT จากการทดลอง (i.e., HLT_a) ของผลการทดลองที่ 1

volume (m^3)	$Q \times 10^{-6}$ (m^3/s)	HLT_c (h)	HLT_a (h) mean ±SD	%error mean ±SD
0.2285	8.33	5.28	5.02 ±0.08	4.92 ±1.55
	5.00	8.80	7.93 ±0.30	9.55 ±3.14
	3.33	13.21	10.43 ±0.51	21.04 ±3.89
	2.67	16.48	14.92 ±1.57	7.67 ±5.79
	2.00	22.00	18.35 ±0.13	18.35 ±3.50
2.160	83.3	5.0	4.72 ±0.03	5.60 ±0.53
	50.0	8.3	7.33 ±0.19	11.77 ±2.45
	33.3	12.5	13.33 ±0.53	6.69 ±4.16
	26.7	15.6	18.33 ±0.56	17.50 ±3.57
	20.0	20.8	27.45 ±1.31	31.92 ±6.20

ในการศึกษานี้ ไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตร มีปริมาตรต่างกันประมาณ 10 เท่า และอัตราการป้อนอากาศต่างๆ ที่เลือกใช้ในการทดลองกับไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 มีค่าเป็น 10 เท่า ของอัตราการป้อนอากาศที่เลือกใช้กับไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 เช่นกัน เมื่อพิจารณาสมการที่ 2 จะเห็นได้ว่า ถึงแม้ว่าอัตราการป้อนอากาศจะสูงขึ้น ค่า HLT จะไม่เปลี่ยนแปลง หากปริมาตรของไซโลมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนเดียวกับอัตราการป้อนอากาศ จะเห็นได้ว่า ค่า HLT_a ในตารางที่ 5 แสดงแนวโน้มเป็นไปตามสมการที่ 2 ในลักษณะดังกล่าว ยกตัวอย่างเช่น ค่า HLT_a ของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 ที่อัตราการป้อนอากาศ 5.00 m^3/s มีค่าใกล้เคียงกับค่า HLT_a ของไซโลจำลอง 2.160 m^3 ที่อัตราการป้อนอากาศ 50.0 m^3/s (i.e., 7.93 และ 7.33 h ตามลำดับ) %error (เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน) ระหว่าง HLT_c และ HLT_a ถูกคำนวณด้วยสมการที่ 8

$$\%error = \left| \frac{HLT_c - HLT_a}{HLT_c} \right| \times 100 \qquad (8)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

%error ของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าอยู่ระหว่าง 4.92 – 21.04% และระหว่าง 5.60 – 31.92% ตามลำดับ สังเกตว่า %error ของไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนอากาศลดลง ผู้วิจัยคาดว่าค่า %error ที่สูงผิดปกติ (i.e., สูงกว่า 20%) เกิดขึ้นจากสาเหตุหลักคือ ที่อัตราการไหลต่ำๆ สเกล (scale) แสดงค่าอัตราการไหลของ flow meter มีความละเอียดต่ำ ทำให้ผู้วิจัยปรับตั้งอัตราการป้อนอากาศได้ไม่เที่ยงตรง นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังสังเกตเห็นว่า เมื่อปั๊มป้อนอากาศถูกใช้งานเป็นเวลานาน (i.e., เกินกว่า 10 h) ประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มเริ่มไม่คงที่ อย่างไรก็ตาม %error ส่วนใหญ่ที่มีค่าไม่เกิน 20% ซึ่งผู้วิจัยกำหนดให้เป็นระดับความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ดังนั้น ผลการทดลองที่ 1 นี้ แสดงให้เห็นว่าสมการที่ 1 และ 2 สามารถอธิบายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในไซโลจำลองได้เป็นอย่างดี โดยไม่ขึ้นกับปริมาตรของไซโล หรืออัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลอง

2. ผลการทดลองที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความลม และค่าสัมประสิทธิ์ลอยตัวของไซโลจำลอง

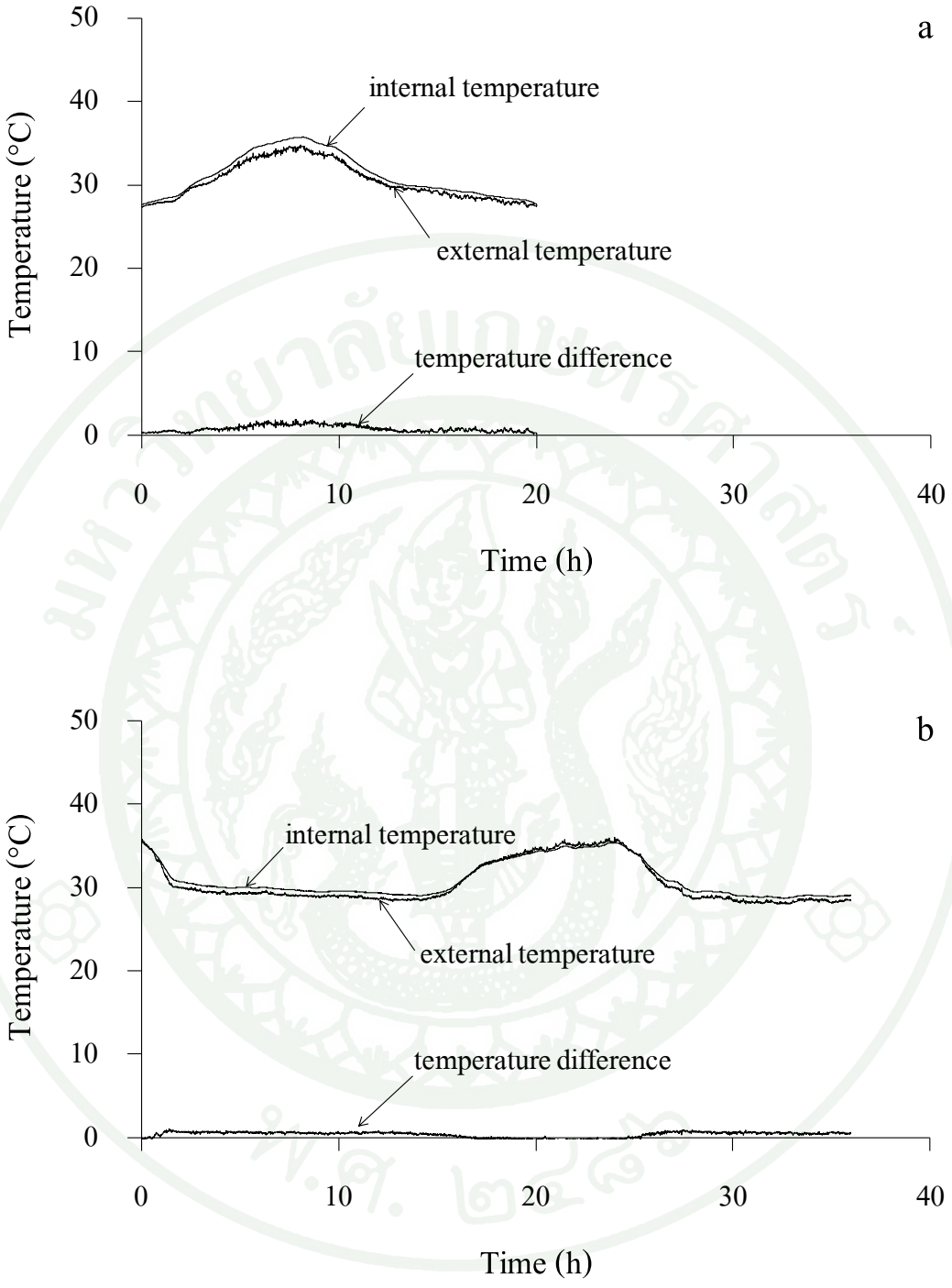
2.1 ผลการทดลองที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ลม C_w

ภาพที่ 15a และ 15b เป็นตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลจำลองขนาด 0.2285 และ 2.160 m^3 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลองมีค่าใกล้เคียง 0°C ตลอดระยะเวลาการทดลอง ถึงแม้ว่าอุณหภูมิภายนอกไซโลจะเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาของวัน นอกจากนี้ โดยทั่วไปผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลมีค่าไม่เกิน 1.5°C ในทุกซ้ำของการทดลองนี้ (dana not shown) ซึ่งเป็นการยืนยันสมมุติฐานที่ว่าในระหว่างการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ลม อุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลไม่แตกต่างกัน ภาพที่ 16 แสดงตัวอย่างความเร็วลมจากการทดลอง 1 ซ้ำ ที่ 4 เงื่อนไขความเร็วลม ซึ่งถูกวัดในการทดลองที่ 2.1 ถึงแม้ว่าผู้วิจัยได้ทำการวัดความเร็วลมเป็นเวลาเพียง 2 h จะเห็นได้ว่าความเร็วลมที่พัดปะทะไซโลจำลองมีค่าเกือบคงที่ตลอดเวลา ดังนั้น สำหรับแต่ละซ้ำการทดลองค่าความเร็วลมในช่วง 2 h จะถูกหาค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้จะถูกใช้เป็นตัวแทนค่าความเร็วลมในการคำนวณสัมประสิทธิ์ลม ภาพที่ 17 แสดงตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำ ที่เงื่อนไขความเร็วลมเดียวกับภาพที่ 16 สำหรับไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตร เมื่อลมที่ปะทะกับไซโลจำลองมีความเร็วสูงขึ้น ความเข้มข้นก๊าซจะลดลงด้วยอัตราที่สูงขึ้นเช่นกัน (e.g., ในภาพที่ 17a เมื่อ U เพิ่มขึ้นจาก 2.07 ไปเป็น 4.03 m/s ส่งผลให้ HLT ลดลงจาก 12.98 ไปเป็น 4.51 h) ตารางที่ 6 สรุปผลการฟิตเคอร์ฟเพื่อคำนวณค่า HLT จากเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ผลการคำนวณพื้นที่รอยรั่ว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

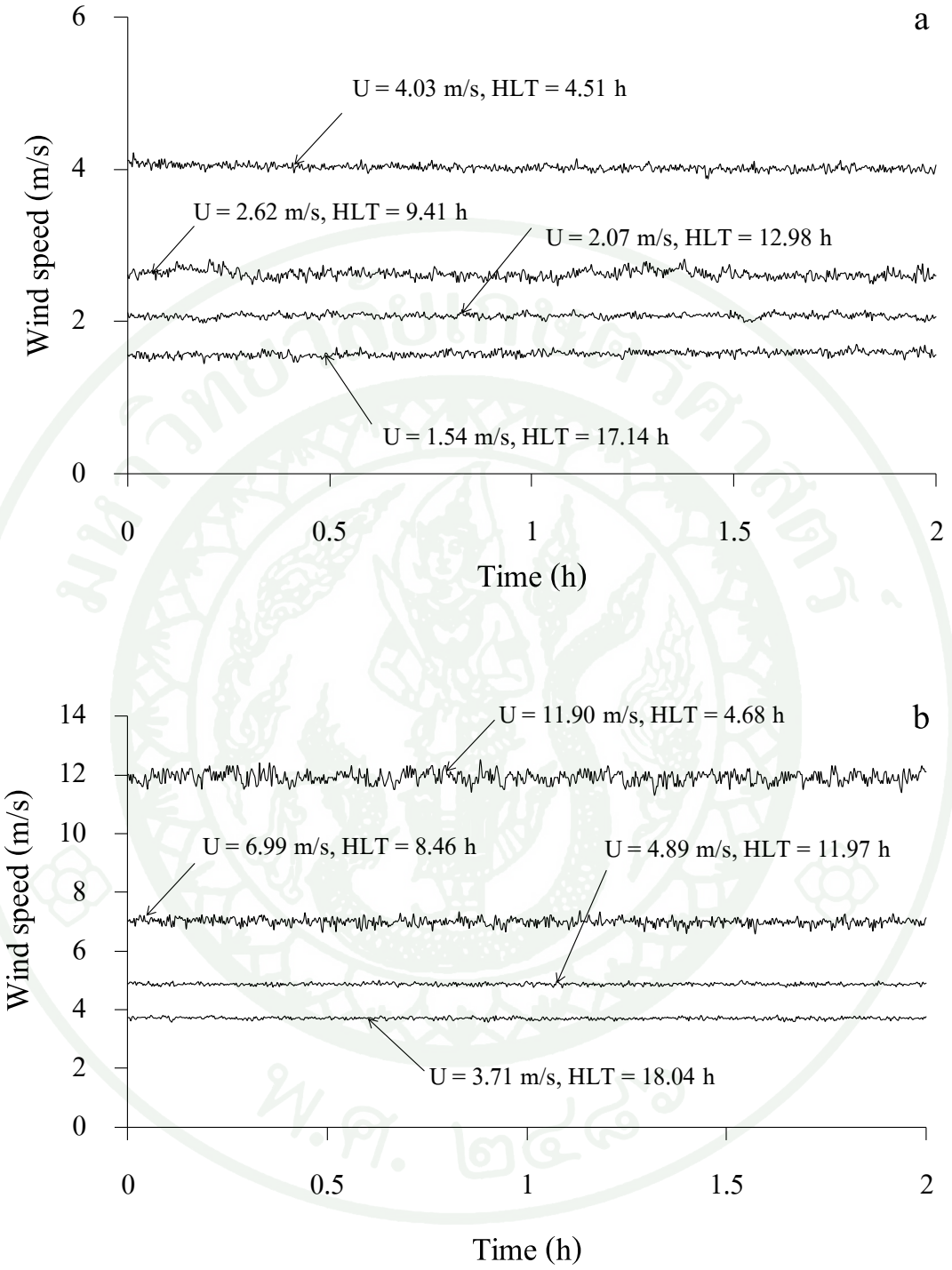
เสมือนจากผลการทดสอบความดันแบบ P-Q test และผลการคำนวณสัมประสิทธิ์ลม ที่ทุกเงื่อนไขการทดลองของการทดลองที่ 2.1 สำหรับไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 เมื่อความเร็วลมลดลงจาก 4.06±0.08 ไปเป็น 1.57±0.03 m/s ค่า HLT จะเพิ่มขึ้นจาก 4.89±0.38 ไปเป็น 17.20±0.74 h ในทำนองเดียวกัน สำหรับไซโลปริมาตร 2.160 m^3 เมื่อความเร็วลมลดลงจาก 12.05±0.17 ไปเป็น 3.82±0.10 m/s ค่า HLT จะเพิ่มขึ้นจาก 4.63±0.05 ไปเป็น 17.48±0.84 h ค่า R^2 ของการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซกับสมการที่ 1 ของทุกซ้ำการทดลอง มีค่าไม่น้อยกว่า 0.990 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อการรั่วไหลของก๊าซออกจากไซโลจำลองเกิดขึ้นจากกลไกของแรงลมเพียงปัจจัยเดียว ลักษณะการลดลงของความเข้มข้นก๊าซยังคงเป็นแบบ first-order kinetic Cryer et al (2007) ใช้ CFD ทำนายผลกระทบของความเร็วลมที่มีต่ออัตราการสูญเสียก๊าซสารรมซัลฟูริลฟลูออไรด์ และเมทิลโบรไมด์ ในระหว่างการรมยาในอาคารขนาด 11,756 – 23,975 m^3 และพบว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซมีพฤติกรรมเป็นแบบ first-order kinetic เช่นกัน อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โครงสร้างการรมยา Q ในตารางที่ 6 ถูกคำนวณจาก HLT ซึ่งได้จากการฟิตเคอร์ฟโดยใช้สมการที่ 2 ขนาดของพื้นที่รอยรั่วเสมือนของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 อยู่ในช่วง 0.0504±0.0005 – 0.0605±0.0049 และ 0.1890±0.0019 – 0.2126±0.0082 cm^2 ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



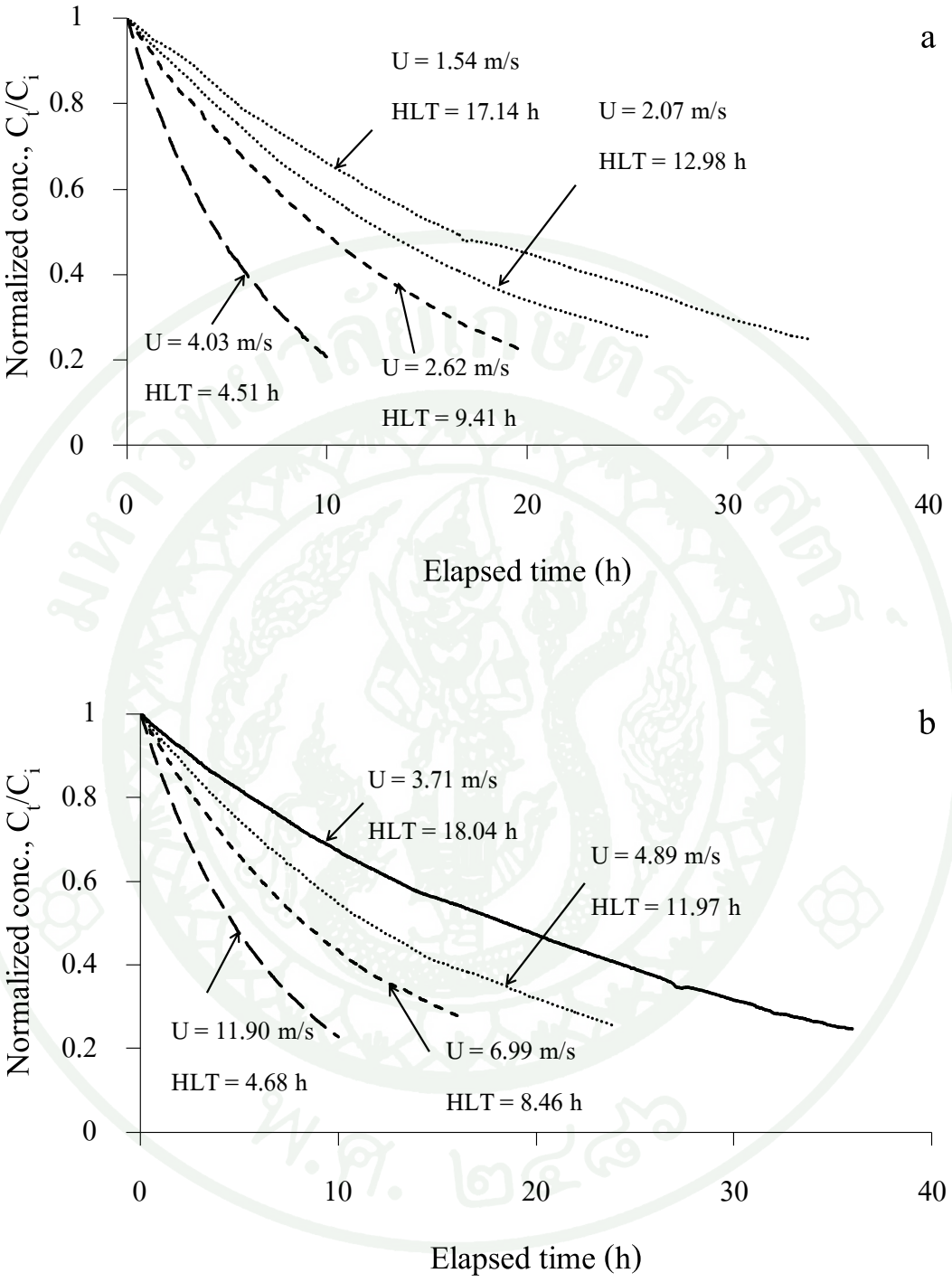
ภาพที่ 15 ตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลจำลอง, และผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโล (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ในระหว่างการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ลม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 16 ตัวอย่างความเร็วลมจากการทดลอง 1 ซ้ำ ของการทดลองที่ 2.1 กับไซโลจำลอง (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ที่ 4 เงื่อนไขความเร็วลม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 17 ตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำ ของการทดลองที่ 2.1 ของ (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ที่เงื่อนไขความเร็วลมเดียวกับภาพที่ 16

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 6 สรุปผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์ลม C_w ของไซโลจำลอง

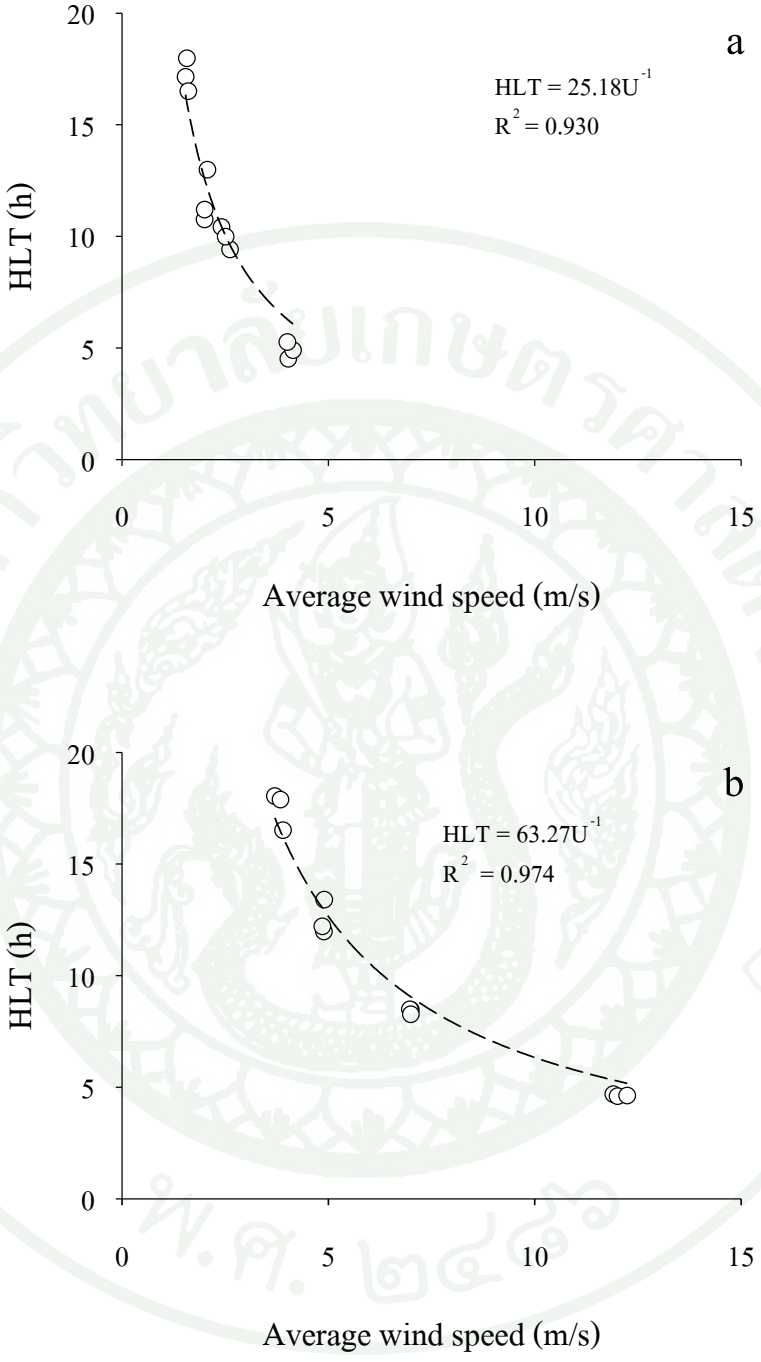
Volume (m^3)	U±SD (m/s)	HLT±SD (m/s)	Q±SD ($\times 10^{-6}$) (m^3/s)	A_L±SD (cm^2)	C_w±SD ($\times 10^{-3}$)
0.2285	1.57±0.03	17.20±0.74	2.61±0.11	0.0504±0.0005	1.08±0.07
	2.02±0.04	11.64±1.18	3.88±0.38	0.0535±0.0035	1.29±0.23
	2.51±0.11	9.93±0.50	4.52±0.23	0.0526±0.0049	1.17±0.04
	4.06±0.08	4.89±0.38	9.22±0.71	0.0605±0.0049	1.41±0.04
2.160	3.82±0.10	17.48±0.84	23.38±1.18	0.1890±0.0019	1.09±0.07
	4.88±0.02	12.52±0.77	33.29±1.98	0.1906±0.0057	1.28±0.14
	6.99±0.01	8.40±0.12	49.52±0.72	0.1945±0.0131	1.34±0.18
	12.05±0.17	4.63±0.05	89.83±0.89	0.2126±0.0082	1.23±0.11

Chayaprasert et al. (2012) บันทึกค่าความเข้มข้นก๊าซของสารรมซัลฟูริลฟลูออไรด์และเมทิลโบรไมด์ ในระหว่างการรมยาในอาคารขนาด 9,628 m^3 จำนวน 6 ซ้ำ และยังบันทึกค่าอุณหภูมิภายในและภายนอกอาคาร และความเร็วลมที่พัดปะทะกับอาคาร นักวิจัยกลุ่มนี้ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างค่า HLT ของเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นสารรม และผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร แต่พบว่าค่า HLT มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลาของการรมยาเดียวกัน ดังสมการที่ 9 ($R^2 = 0.922$)

$$HLT = \frac{constant}{U} \quad (9)$$

ในกรณีที่อุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลจำลองมีค่าเท่ากัน สมการที่ 3 สามารถถูกแทนค่าลงในสมการที่ 2 และจากนั้น สมการที่ 2 สามารถถูกจัดรูปให้เป็นสมการที่ 9 ได้ ภาพที่ 18a และ 18b ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วลมและค่า HLT ของเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซจากการทดลองทุกซ้ำ ในการทดลองที่ 2.1 ของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ตามลำดับ เมื่อผู้วิจัยทำการฟิตเคอร์ฟความสัมพันธ์ดังกล่าวสมการที่ 9 พบว่าค่า R^2 ของการฟิตเคอร์ฟมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.930 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของความเร็วลมที่มีต่ออัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในการทดลองที่ 2.1 สอดคล้องกับผลการทดลองของ Chayaprasert et al. (2012)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วลมและค่า HLT ของเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซจากการทดลองทุกซ้ำ ในการทดลองที่ 2.1 ของไซโลจำลองปริมาตร (a) 0.2285 และ (b) 2.160 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 6 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.08±0.07 – 1.41±0.04 ($\times 10^{-3}$) $(cm^3/s)^2/cm^4$-$(m/s)^2$) และ 1.09±0.07 – 1.34±0.18 ($\times 10^{-3}$) $(cm^3/s)^2/cm^4$-$(m/s)^2$) ตามลำดับ ในทางอุดมคติ หากการซีลไซโลในทุกการทดลองมีคุณภาพเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์ลมของไซโลต้องไม่เปลี่ยนแปลงถึงแม้ว่าความเร็วลมจะเปลี่ยนไป ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ลมจากการทดลองที่เงื่อนไขความเร็วลมต่างๆ จึงถูกนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) เพื่อตรวจสอบว่าค่าสัมประสิทธิ์ลมของการทดลองที่แต่ละความเร็วลมมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ตารางที่ 7 และ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ตามลำดับ ค่าวิกฤติ (critical value) ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวในตารางที่ 7 และ 8 สามารถหาได้จากการเปิดตารางการแจกแจงแบบ F (Devore, 2000) ซึ่งมีค่าเป็น

$$F_{0.05(3,8)} = 4.07$$

จากตารางที่ 7 และ 8 ค่า F ของผลการวิเคราะห์สำหรับไซโลจำลองขนาด 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าเป็น 3.981 และ 1.944 ตามลำดับ ซึ่งค่า F ทั้ง 2 นี้ มีค่าน้อยกว่า $F_{0.05(3,8)}$ ผู้วิจัยจึงสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ลมทุกค่าในการทดลองที่ 2.1 มีค่าไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (i.e., P = 0.05) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงคำนวณค่าเฉลี่ยรวม (total average) ของสัมประสิทธิ์ลมจากผลการทดลองที่ทุกความเร็วลม และกำหนดให้ค่าเฉลี่ยรวมดังกล่าวเป็นค่าสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลอง เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลด้วยสมการที่ 3 ต่อไป ค่าเฉลี่ยรวมของสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าเท่ากับ 0.00124±0.00014 $(cm^3/s)^2/cm^4$-$(m/s)^2$) และ 0.00124±0.00011 $(cm^3/s)^2/cm^4$-$(m/s)^2$) ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลอง ปริมาตร 0.2285 m^3

	Sum of Squares	df	Mean Square	F
Between Groups	1.84×10^{-7}	3	6.13×10^{-8}	3.981
Within Groups	1.23×10^{-7}	8	1.54×10^{-8}	
Total	3.07×10^{-7}	11		

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าสัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลอง ปริมาตร 2.160 m^3

	Sum of Squares	df	Mean Square	F
Between Groups	1.01×10^{-7}	3	3.37×10^{-8}	1.944
Within Groups	1.39×10^{-7}	8	1.73×10^{-8}	
Total	2.40×10^{-7}	11		

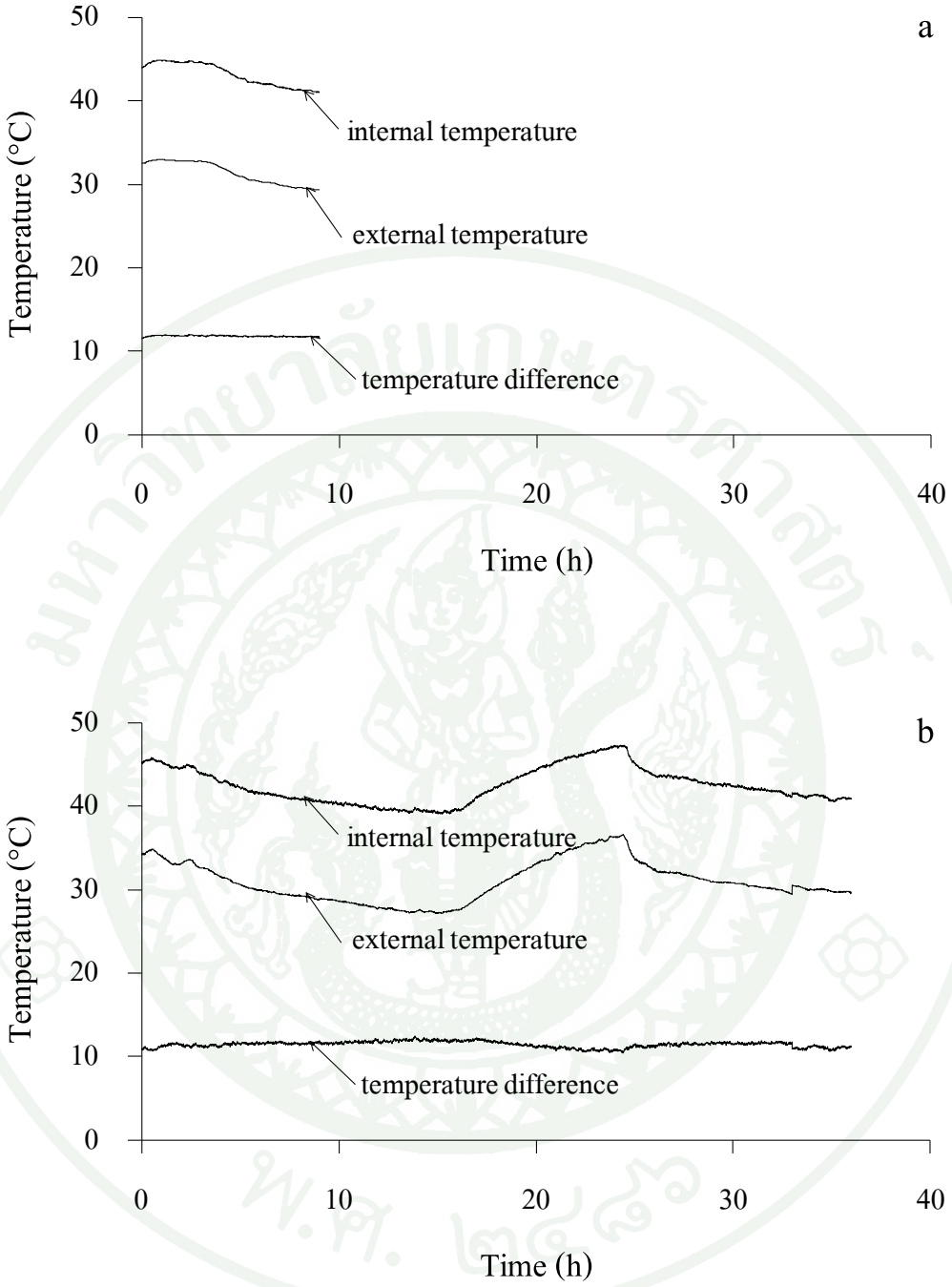
2.2 ผลการทดลองที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว Cs

ภาพที่ 19a และ 19b แสดงตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลจำลองขนาด 0.2285 และ 2.160 m^3 ตามลำดับ ที่เงื่อนไขการทดลองผลต่างอุณหภูมิคงที่ประมาณ 12°C ในทุกซ้ำของการทดลอง อุณหภูมิบรรยากาศภายนอกไซโลมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 25 – 40°C ตามช่วงเวลาของวัน ถึงแม้ว่าอุณหภูมิภายนอกไซโลจำลองจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ระบบควบคุมอุณหภูมิยังคงสามารถรักษาให้อุณหภูมิภายในไซโลสูงกว่าภายนอก โดยที่ผลต่างอุณหภูมิเกือบคงที่ได้ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ภาพที่ 20 แสดงตัวอย่างผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลอง ซึ่งถูกวัดในการทดลองที่ 2.2 จากการทดลอง 1 ซ้ำ ที่ 4 เงื่อนไขผลต่างอุณหภูมิ ผลต่างอุณหภูมิถูกบันทึกค่าทุกๆ 30 s ตลอดระยะเวลาการทดลอง จะเห็นได้ว่า ผลต่างอุณหภูมิมีค่าเกือบคงที่ตลอดเวลา ดังนั้น สำหรับแต่ละซ้ำการทดลอง ค่าเฉลี่ยของผลต่างอุณหภูมิจึงถูกใช้เป็นค่าตัวแทนในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว ภาพที่ 21 แสดงตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำ ที่เงื่อนไขผลต่างอุณหภูมิเดียวกับภาพที่ 20 ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

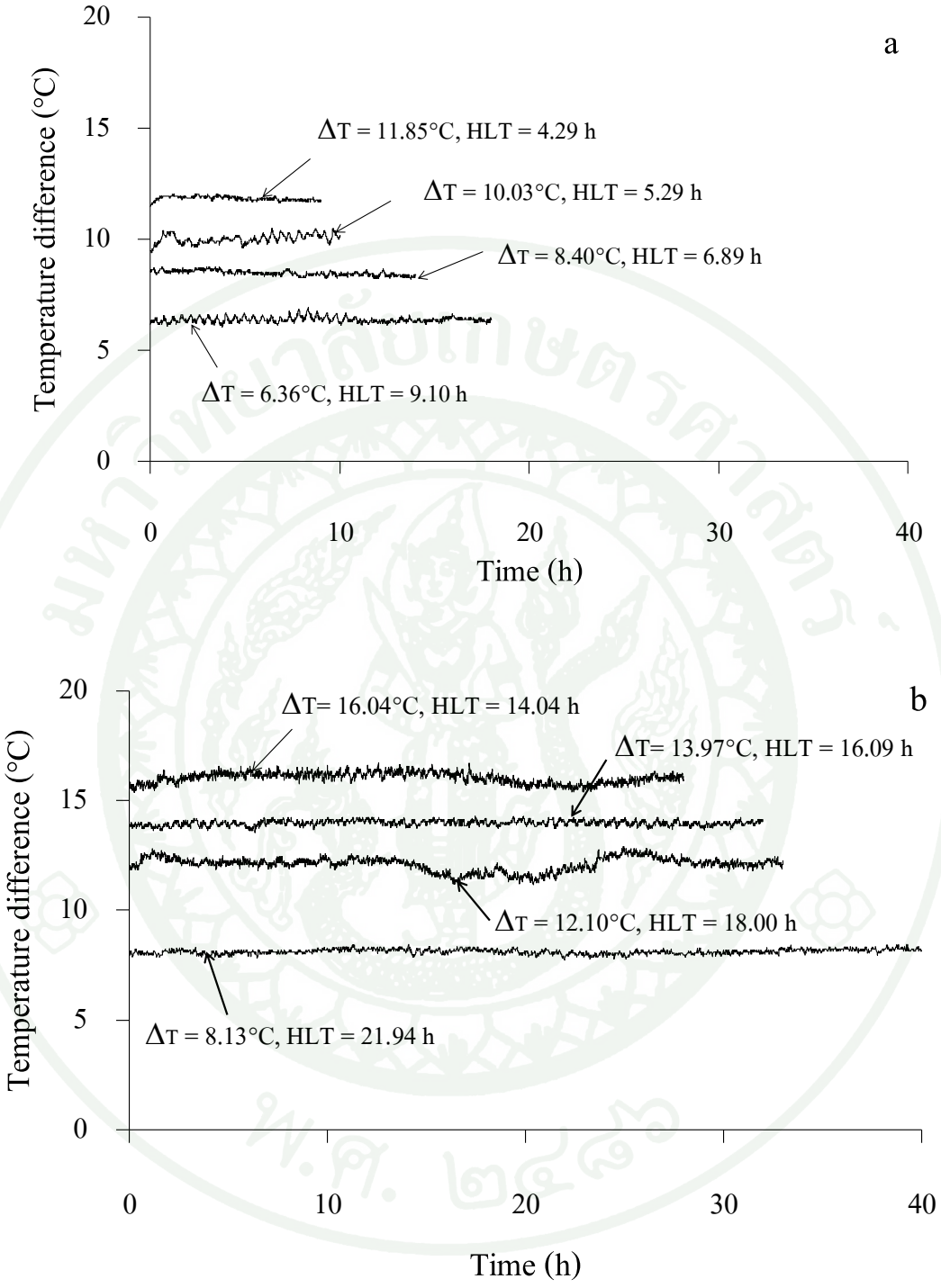
สัมประสิทธิ์ความลอยตัวอยู่ในช่วง 9 – 45 h สำหรับไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตร เมื่อผลต่างอุณหภูมิมากขึ้น ความเข้มข้นก๊าซจะลดลงด้วยอัตราที่สูงขึ้นเช่นกัน (e.g., ในภาพที่ 20a เมื่อ ΔT เพิ่มขึ้นจาก 6.36 ไปเป็น 11.85°C ค่า HLT ลดลงจาก 9.10 ไปเป็น 4.29 h) ผลการฟิตเคอร์ฟเพื่อคำนวณค่า HLT จากเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ผลการคำนวณพื้นที่รอยรั่วเสมือนจากผลการทดสอบความดันแบบ P-Q test และผลการคำนวณสัมประสิทธิ์ความลอยตัว ที่ทุกเงื่อนไขการทดลองของการทดลองที่ 2.2 ถูกสรุปในตารางที่ 9 ค่า HLT ที่ได้จากการทดลองของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 อยู่ระหว่าง 4 – 9 h เนื่องจาก ในการทดลองกับไซโลจำลองขนาด 0.2285 m^3 เมื่อผู้วิจัยปรับตั้งให้ผลต่างอุณหภูมิต่ำกว่า 5°C ระบบควบคุมอุณหภูมิจะไม่สามารถควบคุมให้ผลต่างอุณหภูมิคงที่ได้ ผู้วิจัยจึงไม่สามารถทำการทดลองที่ค่า HLT สูงกว่า 9 h ได้ เมื่อผลต่างอุณหภูมิของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 ลดลงจาก 11.90±0.09 ไปเป็น 5.64±0.96°C ค่า HLT จะเพิ่มขึ้นจาก 4.66±0.32 ไปเป็น 9.16±0.18 h ในทำนองเดียวกัน เมื่อผลต่างอุณหภูมิของไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 ลดลงจาก 16.83±0.72 ไปเป็น 7.76±0.32°C ค่า HLT จะเพิ่มขึ้นจาก 13.23±0.71 ไปเป็น 22.69±0.68 h ค่า R^2 ของการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซกับสมการที่ 1 ของทุกซ้ำการทดลอง มีค่าไม่น้อยกว่า 0.990 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อการรั่วไหลของก๊าซออกจากไซโลจำลองเกิดขึ้นจากกลไกของผลต่างอุณหภูมิเพียงปัจจัยเดียว ลักษณะการลดลงของความเข้มข้นก๊าซยังคงเป็นแบบ first-order kinetic ขนาดของพื้นที่รอยรั่วเสมือนของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ในการทดลองที่ 2.2 อยู่ในช่วง 0.0603±0.0001 – 0.0709±0.0032 และ 0.1905±0.0075 – 0.2210±0.0137 cm^2 ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



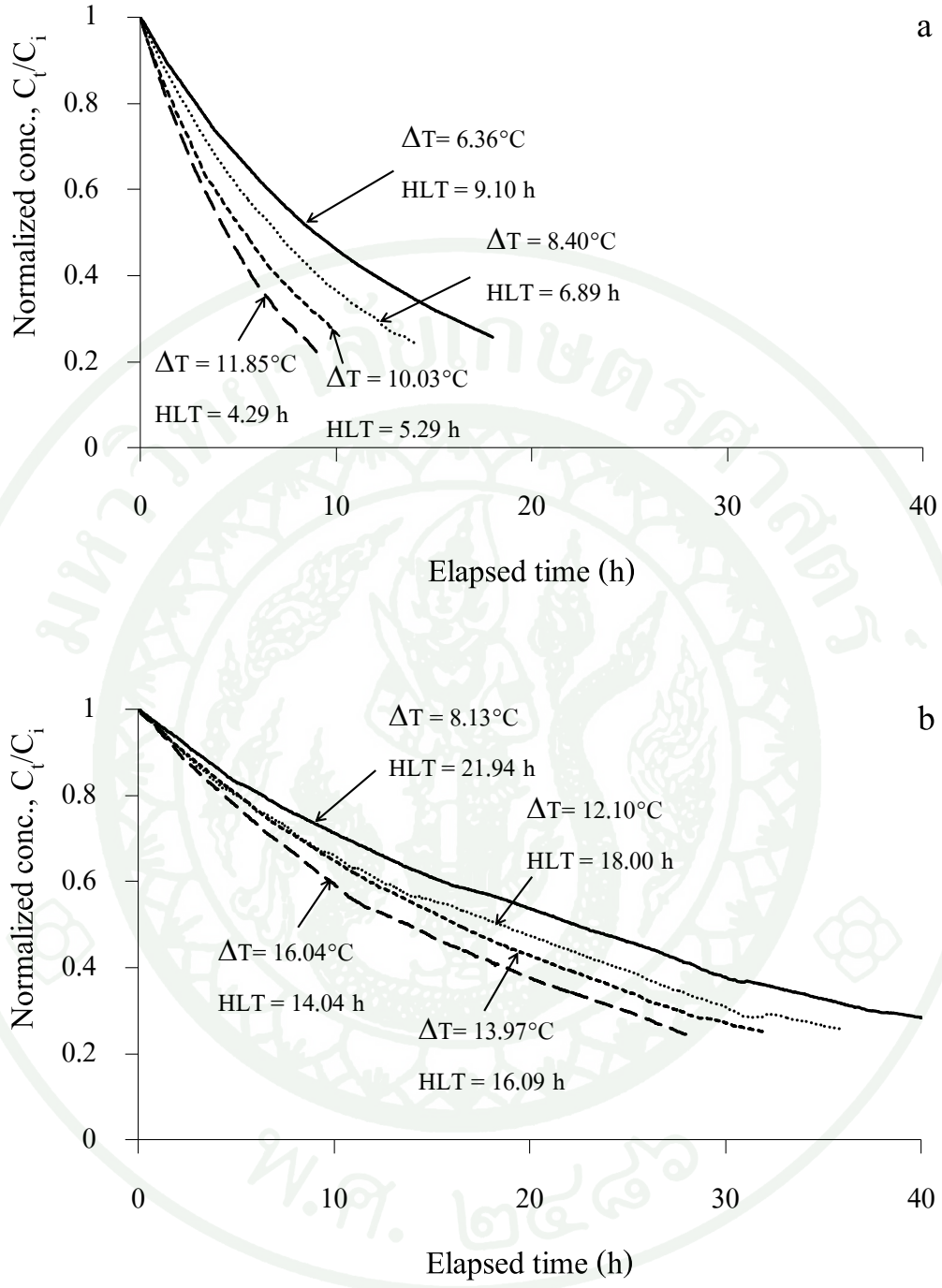
ภาพที่ 19 ตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิภายในและภายนอกไซโลจำลอง, และผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโล (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ซึ่งผลต่างอุณหภูมิมีค่าคงที่ประมาณ 12°C

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 20 ตัวอย่างผลต่างอุณหภูมิจากการทดลอง 1 ซ้ำ ของการทดลองที่ 2.2 กับไซโลจำลอง (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ที่ 4 เงื่อนไขผลต่างอุณหภูมิ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 21 ตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำ ของการทดลองที่ 2.2 ของ (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ที่เงื่อนไขผลต่างอุณหภูมิเดียวกับภาพที่ 20

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 สรุปผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว C_s ของไซโลจำลอง

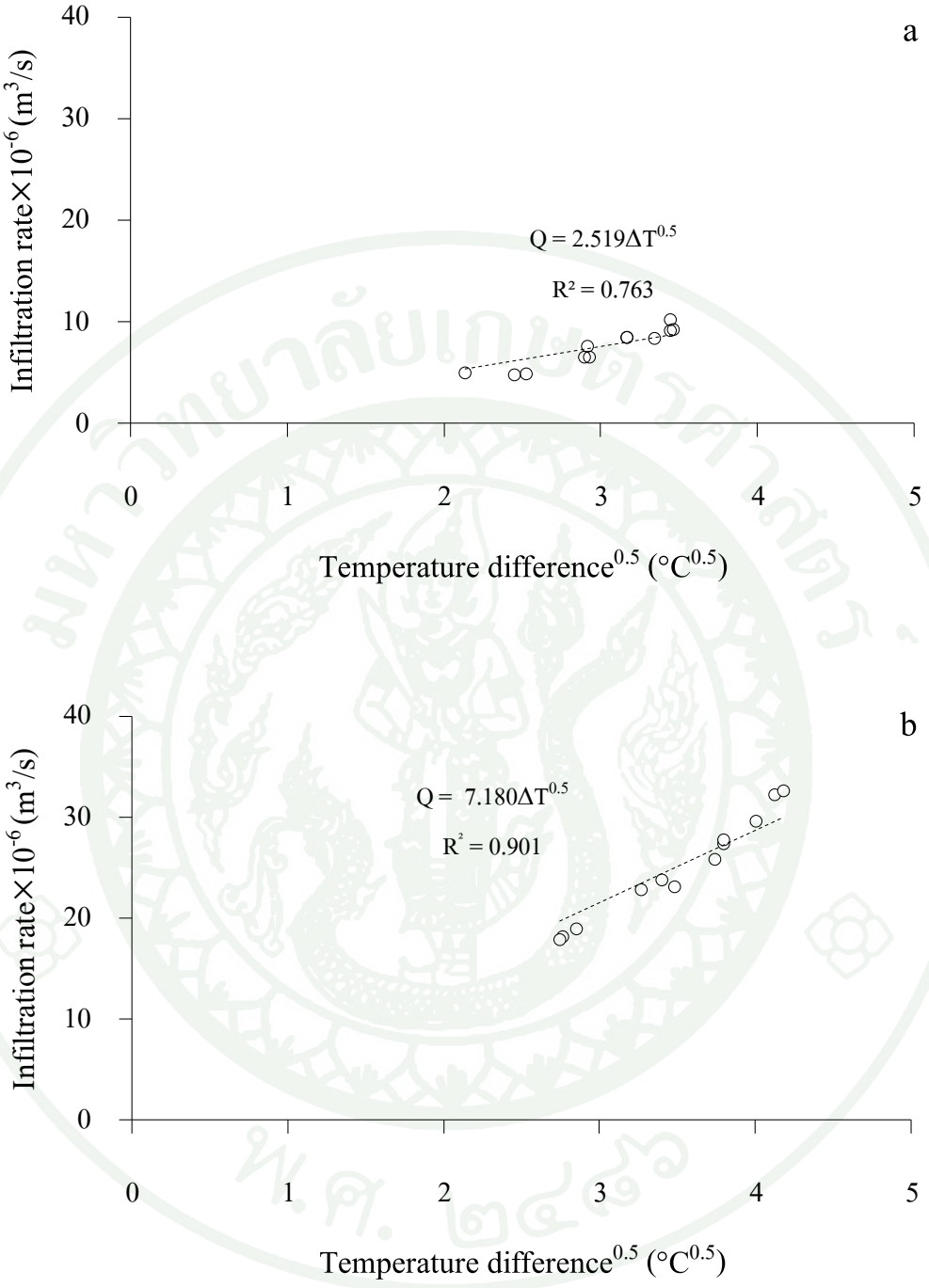
volume (m^3)	ΔT±SD (°C)	HLT±SD (m/s)	Q±SD ($\times10^{-6}$) (m^3/s)	A_L±SD (cm^2)	C_s±SD ($\times10^{-3}$)
0.2285	5.64±0.96	9.16±0.18	4.90±0.10	0.0603±0.0001	1.20±0.25
	8.49±0.08	6.55±0.59	6.89±0.66	0.0682±0.0034	1.20±0.11
	10.41±0.67	5.31±0.03	8.45±0.05	0.0705±0.0005	1.38±0.11
	11.90±0.09	4.66±0.32	9.53±0.63	0.0709±0.0032	1.52±0.02
2.160	7.76±0.32	22.69±0.68	18.34±0.55	0.1963±0.0026	1.12±0.03
	11.43±0.73	17.90±0.37	23.24±0.48	0.1905±0.0075	1.31±0.12
	14.25±0.24	14.25±0.24	27.01±1.02	0.2023±0.0075	1.26±0.16
	16.83±0.72	13.23±0.71	31.50±1.64	0.2210±0.0137	1.21±0.08

ในกรณีที่ไม่มีลมพัดปะทะไซโลจำลอง สมการที่ 3 สามารถถูกจัดให้อยู่ในรูปสมการที่ 10 ซึ่งอธิบายว่า ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างภายในและภายนอกไซโล และอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลมีลักษณะเป็นเส้นตรง

$$Q = \text{constant}\sqrt{\Delta T} \qquad (10)$$

แผนภูมิผลการบันทึกค่าระหว่างตัวแปรทั้ง 2 ของการทดลองทุกซ้ำ ในการทดลองที่ 2.2 ของไซโลปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 22a และ 22b ตามลำดับ ค่าคงที่ของการฟิตเคอร์ฟด้วยสมการที่ 10 สำหรับไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าเป็น 2.519 และ 7.180 ตามลำดับ ค่า R^2 ของการฟิตเคอร์ฟทั้ง 2 มีค่าเท่ากับ 0.763 และ 0.901 ตามลำดับ ซึ่งยังคงแสดงให้เห็นว่าระหว่างตัวแปรทั้ง 2 ดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ตามสมการที่ 10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลอง และอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลของการทดลองทุกซ้ำในการทดลองที่ 2.2 ของไซโลจำลองปริมาตร (a) 0.2285 และ (b) 2.160 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากตารางที่ 9 ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ซึ่งถูกคำนวณด้วยสมการที่ 7 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.20±0.11 – 1.52±0.0204 ($\times 10^{-3}$) และ 1.12±0.03 – 1.31±0.12 ($\times 10^{-3}$) ตามลำดับ สัมประสิทธิ์ความลอยตัวเป็นคุณสมบัติของโครงสร้าง (i.e., ไซโลจำลอง) เช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์ลม ซึ่งในทางอุดมคติ ถึงแม้ว่าผลต่างอุณหภูมิจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป หากการซีลไซโลในทุกการทดลองมีคุณภาพเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโลจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความลอยตัวจากการทดลองที่ทุกเงื่อนไขผลต่างอุณหภูมิ จึงถูกวิเคราะห์ด้วยความแปรปรวนทางเดียว เพื่อตรวจสอบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของการทดลองที่แต่ละผลต่างอุณหภูมิมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 10 และ 11 ค่า F ของผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวสำหรับไซโลปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าเท่ากับ 3.124 และ 0.755 ตามลำดับ ค่า $F_{0.05(3,8)}$ ซึ่งได้จากจากการเปิดตารางมีค่าเท่ากับ 4.07 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า F ของผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตร ผู้วิจัยจึงสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัวทุกค่าไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (i.e., P = 0.05) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยรวมของค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของการทดลองทุกซ้ำจึงถูกใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณ ในการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล (i.e., การทดลองที่ 3) ต่อไป ค่าเฉลี่ยรวมของค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าเท่ากับ 0.00133±0.00016 และ 0.00123±0.00008 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัวที่ได้จากการทดลองที่ 2.2 นี้จะถูกนำไปใช้ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์ลมจากการทดลองที่ 2.1 ในการคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลองด้วยสมการที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโล จำลองปริมาตร 0.2285 m^3

	Sum of Squares	df	Mean Square	F
Between Groups	2.21×10^{-7}	3	7.37×10^{-8}	3.124
Within Groups	1.89×10^{-7}	8	2.36×10^{-8}	
Total	4.10×10^{-7}	11		

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโล จำลองปริมาตร 2.160 m^3

	Sum of Squares	df	Mean Square	F
Between Groups	3.68×10^{-7}	3	1.22×10^{-8}	0.755
Within Groups	1.30×10^{-7}	8	1.62×10^{-8}	
Total	1.67×10^{-7}	11		

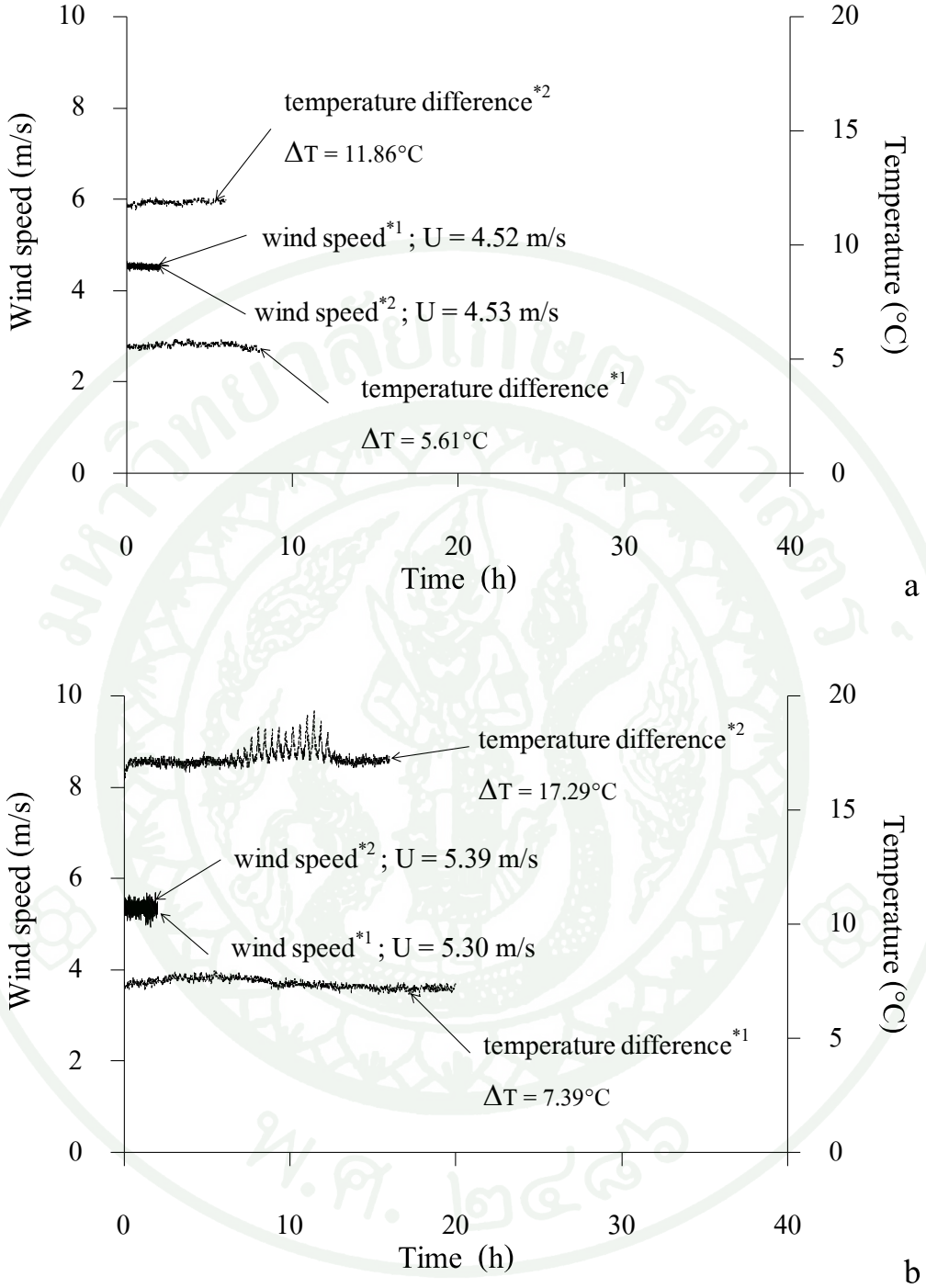
3. ผลการทดลองที่ 3 ความสามารถในการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซของวิธีการรวมผล

ภาพที่ 23 แสดงตัวอย่างผลการวัดความเร็วลม (ความเร็วลมถูกบันทึกค่าไว้เป็นเวลา 2 h) และผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลอง (ผลต่างอุณหภูมิถูกบันทึกค่าตลอดระยะเวลาของการทดลอง) ของไซโลทั้ง 2 ปริมาตร ในระหว่างการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล ภาพที่ 23a แสดงผลการวัดค่าในการรมยาในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 ที่ 2 เงื่อนไขการทดลองคือ 1) ผลต่างอุณหภูมิ 5.61±0.11°C และความเร็วลม 4.52±0.03 m/s และ 2) ผลต่างอุณหภูมิ 11.04±0.14°C และความเร็วลม 1.99±0.03 m/s ภาพที่ 23b แสดงผลการวัดค่าในการรมยาในไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 ที่ 2 เงื่อนไขการทดลองคือ 1) ผลต่างอุณหภูมิ 8.47±0.15°C และความเร็วลม 2.31±0.03 m/s และ 2) ผลต่างอุณหภูมิ 17.25±0.14°C และความเร็วลม 11.75±0.14 m/s ค่าความเร็วลมและผลต่างอุณหภูมิซึ่งวัดได้จากการทดลองทุกซ้ำ มีลักษณะเช่นเดียวกับภาพที่ 23 ซึ่งก็คือ ผลการวัดค่าจากการทดลองทุกซ้ำมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงในแนวนอน ภาพที่ 24a แสดง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

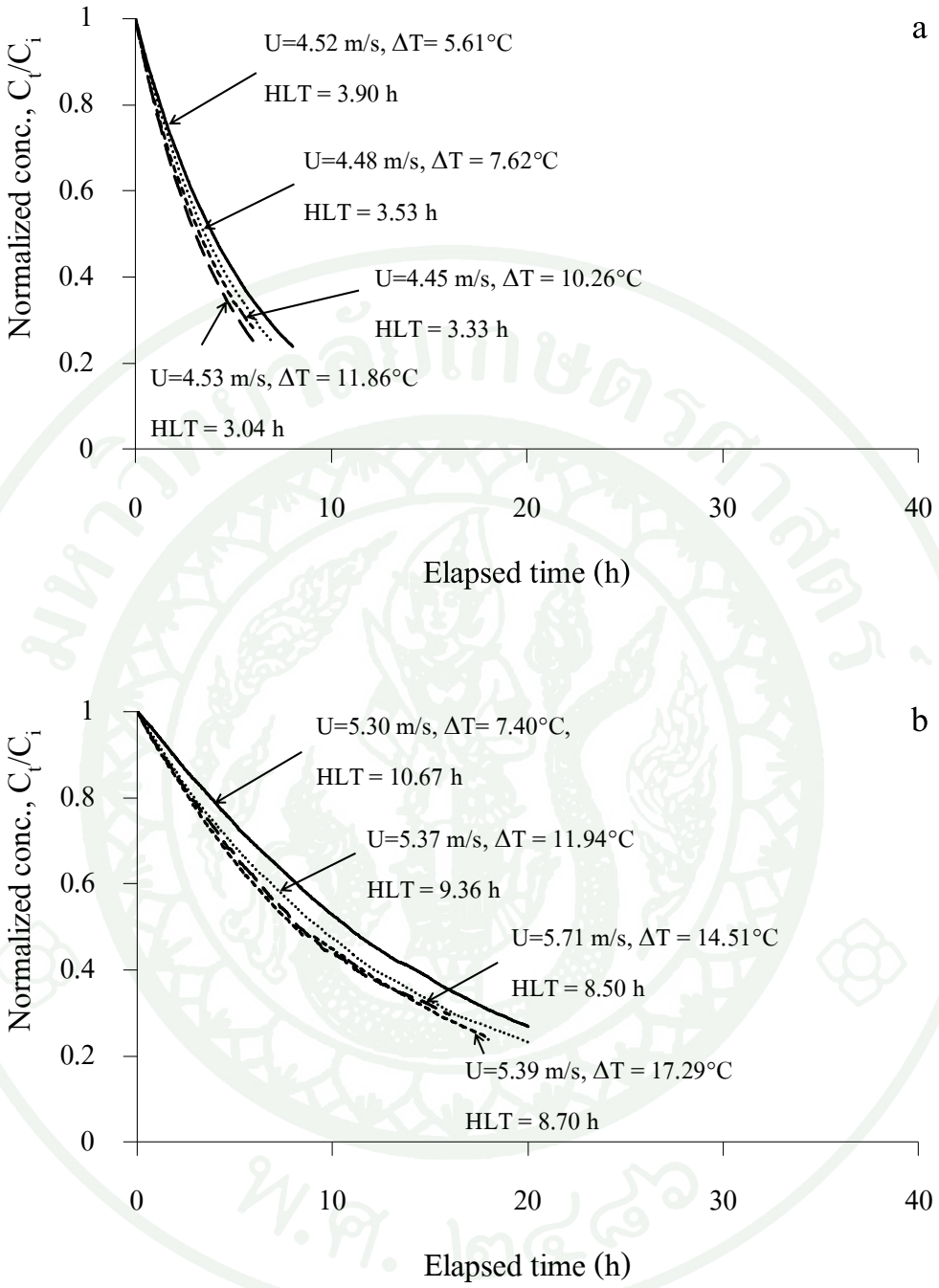
เส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งผ่านกระบวนการ normalization จากการทดลอง 1 ซ้ำในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 ที่เงื่อนไขการทดลองผลต่างอุณหภูมิแตกต่างกัน แต่เงื่อนไขความเร็วลมใกล้เคียงกัน ภาพที่ 24b แสดงผลการทดลองในไซโลจำลองขนาด 2.160 m^3 ในลักษณะเดียวกับภาพที่ 24a สังเกตว่า ความเร็วลมและผลต่างอุณหภูมิในภาพที่ 23 ถูกบันทึกจากการทดลองซ้ำที่ให้ผลเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในภาพที่ 24 ที่มี HLT สูงสุด และต่ำสุด ในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 เมื่อความเร็วลมมีค่าใกล้เคียงกัน (U = 4.45 – 4.53 m/s) แต่ผลต่างอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.61 ไปเป็น 11.86°C (เพิ่มขึ้น 6.25°C หรือประมาณ 2 เท่า) ค่า HLT_a มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยจาก 3.90 ไปเป็น 3.04 h (ลดลงประมาณ 1 h หรือประมาณ 25%) ในทำนองเดียวกัน ในไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 เมื่อความเร็วลมมีค่าใกล้เคียงกัน (U = 5.30 – 5.71 m/s) แต่ผลต่างอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 7.40 ไปเป็น 17.29°C (เพิ่มขึ้น 9.89°C หรือมากกว่า 2 เท่าเล็กน้อย) ค่า HLT_a มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยจาก 10.67 ไปเป็น 8.70 h เช่นเดียวกัน (ลดลงประมาณ 2 h หรือประมาณ 20%) ภาพที่ 25 แสดงตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำที่เงื่อนไขผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลคงที่แต่ความเร็วลมแตกต่างกัน ในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 เมื่อผลต่างอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกัน (Δt = 7.18 – 7.83°C) แต่ความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.03 ไปเป็น 4.48 m/s (เพิ่มขึ้น 2.45 m/s หรือประมาณ 2 เท่า) ค่า HLT_a มีค่าลดลงจาก 5.38 ไปเป็น 3.53 h (ลดลง 1.85 h หรือประมาณ 35%) อย่างไรก็ตาม สังเกตว่า ในภาพที่ 25a เส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ความเร็วลม 2.03 m/s และผลต่างอุณหภูมิ 7.18°C มีค่า HLT_a (4.55 h) ต่ำกว่า ค่า HLT_a ของเส้นโค้งที่ความเร็วลม 2.61 m/s และผลต่างอุณหภูมิ 7.83°C (5.35 h) นอกจากความเร็วลมที่ปะทะกับไซโลจำลองและผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกแล้ว ปัจจัยที่ส่งผลต่อการรั่วไหลของสารมอีกปัจจัยหนึ่งคือ ขนาดของพื้นที่รอยรั่วเสมือน การที่ผลการทดลองที่ความเร็วลมสูงขึ้นให้ค่า HLT_a ที่สูงขึ้นเช่นเดียวกันนี้ มีสาเหตุจากขนาดของพื้นที่รอยรั่วเสมือนที่แตกต่างกันของทั้งสองเงื่อนไขการทดลอง ที่เงื่อนไขการทดลอง U = 2.03 m/s และ Δt = 7.18°C พื้นที่รอยรั่วเสมือนมีค่าเป็น 0.0697 cm^2 ในขณะที่ ที่เงื่อนไขการทดลอง U = 2.61 m/s และ Δt = 7.83°C พื้นที่รอยรั่วเสมือนมีขนาดเล็กกว่าคือ 0.0627 cm^2 ในไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 เมื่อผลต่างอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกัน (Δt = 11.94 – 12.35°C) แต่ความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.37 ไปเป็น 12.06 m/s (เพิ่มขึ้น 9.96 m/s หรือประมาณ 5 เท่า) ค่า HLT_a มีค่าลดลงจาก 13.09 ไปเป็น 4.83 h (ลดลง 8.26 h หรือ 2.7 เท่า)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



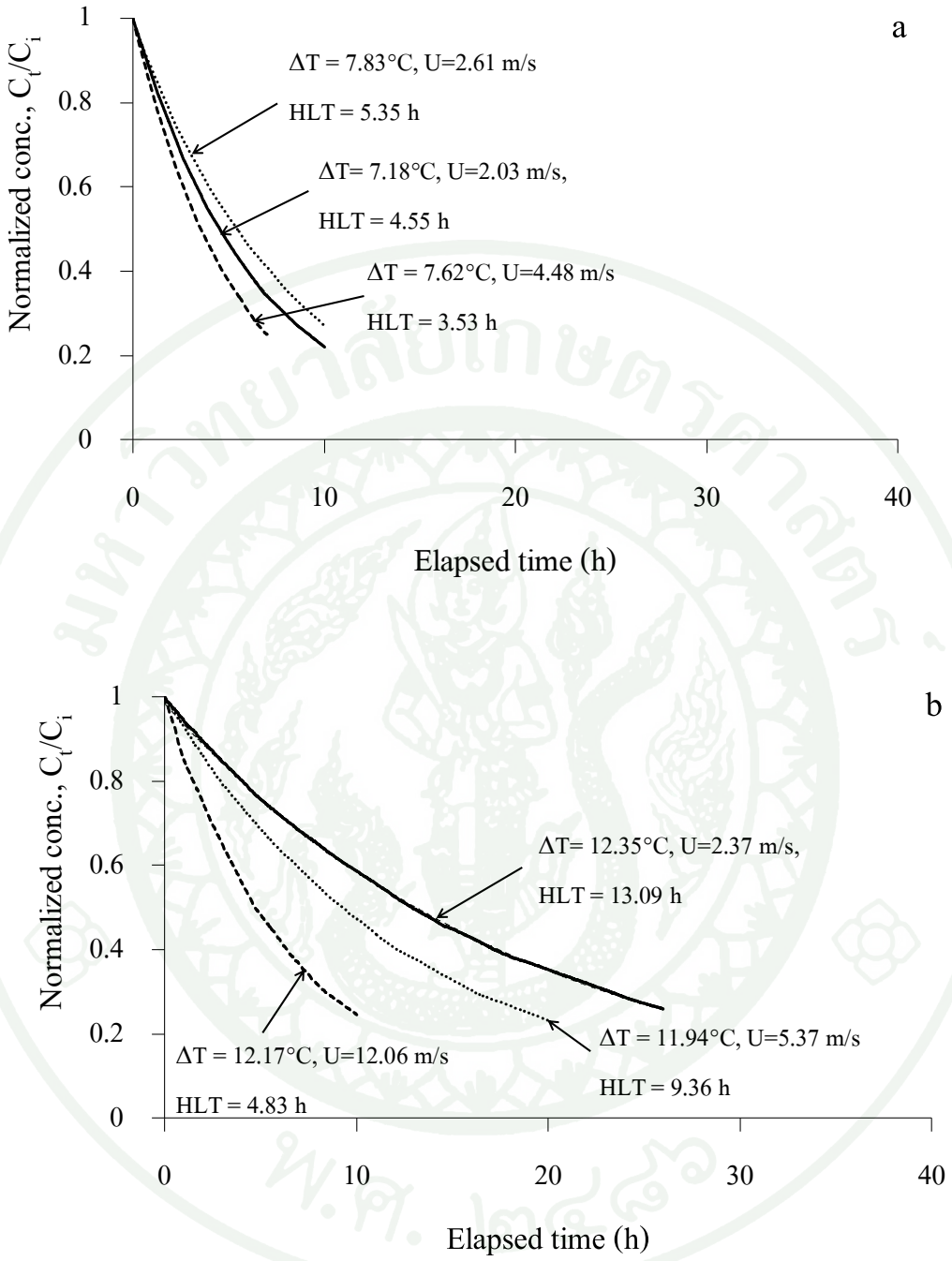
ภาพที่ 23 ตัวอย่างผลการวัดความเร็วลมและผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโล (a) ปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3 ในระหว่างการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถอธิบายได้โดยวิธีการรวมผล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 24 ตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำที่เงื่อนไขความเร็วลมที่ปะทะกับไซโลคงที่แต่ผลต่างอุณหภูมิแตกต่างกัน ของการทดลองที่ 3 ของ (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 25 ตัวอย่างเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซที่ผ่านกระบวนการ normalization จากผลการทดลอง 1 ซ้ำที่เงื่อนไขผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลคงที่แต่ความเร็วลมแตกต่างกัน ของการทดลองที่ 3 ของ (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดลองและการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซด้วยวิธีรวมผลในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 12 และ 13 ตามลำดับ เมื่อค่าเฉลี่ยของความเร็วลมที่ปะทะกับไซโลจำลองและค่าเฉลี่ยของผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโล ถูกแทนค่าลงในสมการที่ 3 ผู้วิจัยจะสามารถคำนวณอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลองได้ จากนั้น ค่าอัตราการรั่วไหลจะถูกแทนค่าลงในสมการที่ 2 ซึ่งจะให้ผลลัพท์เป็นผลการทำนายค่า HLT (i.e., HLT_p) ผลการทดลองในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ 2.160 m^3 ให้ค่า HLT_a ระหว่าง 3.21±0.47 – 6.16±0.35 h และ 4.49±0.67 – 18.74±0.24 h ตามลำดับ เนื่องจากผู้วิจัยไม่สามารถปรับตั้ง blower และระบบควบคุมอุณหภูมิให้สร้างความเร็วลมที่ต่ำกว่า 2 m/s และสร้างผลต่างอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 5°C ตามลำดับ ได้ ผู้วิจัยจึงไม่สามารถทำการทดลองกับไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 โดยให้ผลการทดลอง HLT_a สูงกว่า 7 h ได้ ในการทดลองที่ 3 ไซโลจำลองจะถูกทดสอบความดันแบบ P-Q test ก่อนการทดลองรมยาทุกซ้ำ ผู้วิจัยได้ทำการซีลไซโลก่อนการทดลอง โดยมีเป้าหมายให้พื้นที่รอยรั่วเสมือนของทุกซ้ำการทดลองมีขนาดใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ ค่าเฉลี่ยของพื้นที่รอยรั่วเสมือนที่เงื่อนไขการทดลองแตกต่างกัน (i.e., แต่ละแถวของตารางที่ 12 และ 13) ยังคงมีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อย ค่าเฉลี่ยของพื้นที่รอยรั่วเสมือนของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ซึ่งถูกคำนวณจากผลการทดสอบความดันแบบ P-Q test มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0633±0.0009 – 0.0791±0.0014 cm^2 (แตกต่างกันประมาณ 11%) และ 0.1944±0.0003 – 0.2232±0.0040 cm^2 (แตกต่างกันประมาณ 7%) ตามลำดับ ภาพที่ 26 แสดงผลการบันทึกค่าอัตราการป้อนอากาศและผลต่างความดันของการทดสอบความดันกับไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตร ทุกซ้ำ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนอากาศและผลต่างความดันระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลองแต่ละปริมาตร มีการกระจายตัวค่อนข้างมาก (i.e., ค่าอัตราการป้อนอากาศที่ทำให้เกิดผลต่างความดันระดับเดียวกันมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงวงกว้าง) นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวแสดงให้เห็นว่าในไซโลขนาดเดียวกัน ที่เงื่อนไขการทดลองแตกต่างกัน ค่าพื้นที่รอยรั่วเสมือนมีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากสมการที่ 3 ค่าความเร็วลม, ผลต่างอุณหภูมิ และพื้นที่รอยรั่วเสมือนของไซโลจำลองเป็น 3 กลไกหลักที่ส่งผลต่ออัตราการรั่วไหลของก๊าซออกจากไซโล (i.e., อัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซภายในไซโล) อย่างไรก็ตาม ที่เงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกัน ค่าของพื้นที่รอยรั่วเสมือนมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมและผลต่างอุณหภูมิ ดังนั้นการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองต่อไปจากนี้ ผู้วิจัยจึงไม่คำนึงถึงผลกระทบของความแตกต่างของพื้นที่รอยรั่วเสมือนที่เงื่อนไขการทดลองแตกต่างกัน ที่มีต่ออัตราการรั่วไหลของก๊าซ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 27a เป็นแผนภูมิพื้นผิว (surface plot) ซึ่งถูกสร้างจากข้อมูลในตารางที่ 12 ซึ่งแสดงผลกระทบของความเร็วลม และผลต่างอุณหภูมิ ที่มีต่อ HLT ที่ได้จากการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซจากการทดลองรมยา ด้วยสมการที่ 1 (i.e., HLT_a ในตารางที่ 12) ของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 ภาพที่ 27b เป็นแผนภูมิลักษณะเดียวกับภาพที่ 27a แต่แกนตั้งเป็นค่า HLT ซึ่งถูกทำนายโดยใช้สมการที่ 2 และ 3 (i.e., HLT_p ในตารางที่ 12) ในทำนองเดียวกัน ภาพที่ 28a และ 28b เป็นแผนภูมิพื้นผิวซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของ HLT_a และ HLT_p จากข้อมูลของไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 เมื่อความเร็วลม และผลต่างอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป สังเกตว่า ค่า R^2 ของการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซของการทดลองทุกซ้ำ ในการทดลองที่ 3 กับสมการที่ 1 มีค่าไม่น้อยกว่า 0.990 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดลงของความเข้มข้นก๊าซ มีลักษณะเป็นแบบ first-order kinetic จากภาพที่ 27 และ 28 จะเห็นได้ว่า อัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อความเร็วลม และ/หรือผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลทั้ง 2 ปริมาตร เปลี่ยนแปลงไป ยกตัวอย่างเช่น สำหรับไซโลปริมาตร 0.2285 m^3 ที่ความเร็วลมคงที่ประมาณ 2.45±0.04 – 2.64±0.04 m/s เมื่อผลต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 6.10±0.07 ไปเป็น 11.63±0.07°C (เพิ่มขึ้น 5.53°C หรือ 90.66%) ค่า HLT_a ลดลงจาก 5.40±0.28 ไปเป็น 3.82±0.39 h (ลดลง 1.58 h หรือ 29.25%) และสำหรับไซโลปริมาตร 2.160 m^3 ที่ความเร็วลมคงที่ประมาณ 5.37±0.11 – 5.66±0.09 m/s เมื่อผลต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 7.65±0.24 ไปเป็น 16.67±0.55°C (เพิ่มขึ้น 9.02°C หรือ 117.91%) ค่า HLT_a ลดลงจาก 10.75±0.14 ไปเป็น 8.85±0.15 h (ลดลง 1.9 h หรือ 17.67%) ในทำนองเดียวกัน สำหรับไซโลปริมาตร 0.2285 m^3 ที่ผลต่างอุณหภูมิคงที่ประมาณ 5.38±0.23 – 6.10±0.07°C เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจาก 2.03±0.02 ไปเป็น 4.51±0.03 m/s (เพิ่มขึ้น 2.48 m/s หรือ 122.17%) ค่า HLT_a ลดลงจาก 6.71±0.62 ไปเป็น 3.83±0.07 (ลดลง 2.88 h หรือ 42.92%) และสำหรับไซโลปริมาตร 2.160 m^3 ที่ผลต่างอุณหภูมิคงที่ประมาณ 7.43±0.19 – 7.90±0.54°C เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจาก 2.30±0.01 ไปเป็น 11.35±0.59 (เพิ่มขึ้น 9.05 m/s หรือ 393.48%) ค่า HLT_a ลดลงจาก 18.74±0.24 ไปเป็น 5.00±0.09 (ลดลง 13.74 h หรือ 73.32%) ถึงแม้ว่า อัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อความเร็วลม และ/หรือผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลทั้ง 2 ปริมาตร เปลี่ยนแปลงไป สำหรับไซโลปริมาตร 2.160 m^3 ที่ความเร็วลมสูงสุด (i.e., $U \approx 11.5$ m/s) ผลกระทบของผลต่างอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซ ลดลงอย่างมาก ในภาพที่ 28 จะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วลมสูงกว่า 10 m/s หากกำหนดให้ความเร็วลมคงที่ ความสูงของแผนภูมิพื้นผิวเกือบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดแนวแกนผลต่างอุณหภูมิ หากพิจารณาจากตารางที่ 13 ที่ความเร็วลมคงที่ประมาณ 11.35±0.59 – 11.79±0.07 m/s เมื่อผลต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 7.43±0.19 ไปเป็น 16.80±0.44°C (เพิ่มขึ้น 9.37°C หรือ 126.11%) ค่า HLT_a ลดลงจาก 5.00±0.09 ไปเป็น 4.49±0.67 h ซึ่งเป็นการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลดลงเพียง 0.51 h หรือ 10.20% สังเกตว่า ในสมการที่ 3 ความเร็วลมเป็นพจน์ที่ยกกำลัง 2 ในขณะที่ผลต่างอุณหภูมิซึ่งเป็นพจน์ที่ยกกำลัง 1 ซึ่งสอดคล้องกับข้อสังเกตข้างต้นคือ การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมจะส่งผลกระทบต่ออัตราการรั่วไหลของก๊าซมากกว่าการเปลี่ยนแปลงของผลต่างอุณหภูมิ

ตารางที่ 12 สรุปผลการทดลองและการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซด้วยวิธีการรวมผล ในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3

U±SD (m/s)	ΔT±SD (°C)	A_L±SD*[1] (cm^2)	HLT_a±SD (h)	HLT_p±SD (h)	%error±SD
2.03±0.02	5.60±0.09	0.0639±0.0036a	6.71±0.62	6.16±0.35	7.95±3.16
2.61±0.09	6.10±0.07	0.0633±0.0009a	5.40±0.28	5.40±0.19	5.20±3.68
4.51±0.03	5.38±0.23	0.0673±0.0020abc	3.83±0.07	3.63±0.10	5.20±2.79
2.02±0.01	7.32±0.27	0.0708±0.0011cd	4.58±0.08	5.12±0.10	11.72±3.49
2.64±0.04	7.40±0.49	0.0635±0.0010a	5.26±0.22	5.11±0.14	2.87±1.98
4.43±0.06	7.73±0.09	0.0647±0.0013ab	3.60±0.12	3.66±0.10	1.65±0.50
2.01±0.05	9.27±0.16	0.0761±0.0016e	3.80±0.06	4.39±0.11	15.70±1.10
2.45±0.04	9.66±0.33	0.0683±0.0017abc	4.25±0.05	4.53±0.09	6.48±1.91
4.44±0.01	9.99±0.31	0.0666±0.0036abc	3.43±0.23	3.41±0.20	1.80±0.38
2.00±0.00	11.20±0.30	0.0791±0.0014e	3.48±0.06	3.95±0.04	13.51±1.74
2.46±0.02	11.63±0.07	0.0748±0.0053de	3.82±0.39	3.90±0.27	2.96±4.10
4.48±0.10	10.36±2.56	0.0696±0.0048bc	3.21±0.47	3.25±0.44	2.67±2.93

หมายเหตุ * ค่าพื้นที่รอยรั่วเสมือนมีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

[1] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

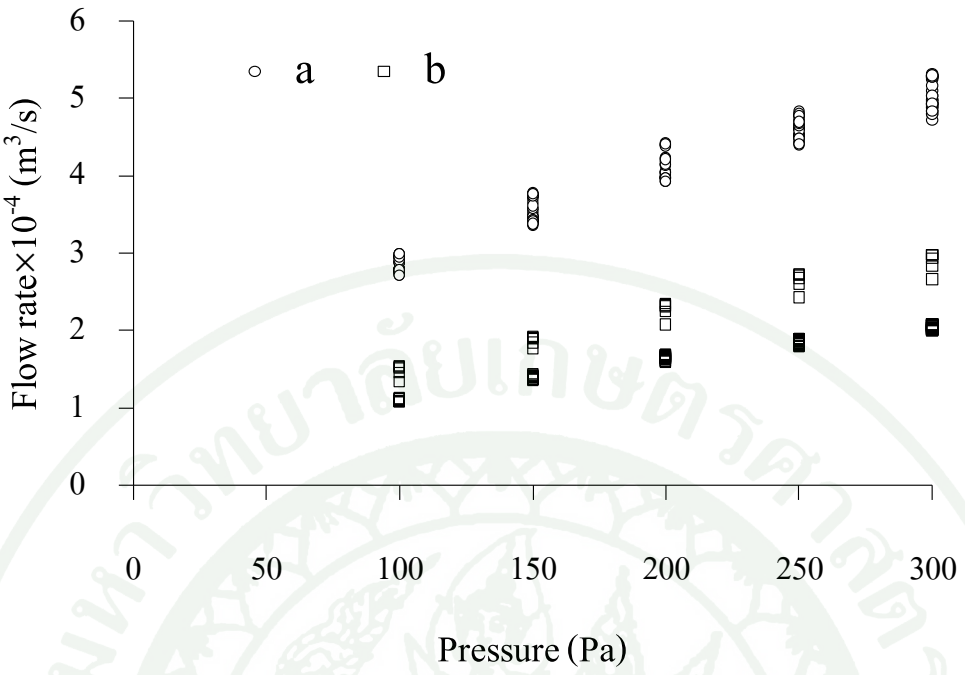
ตารางที่ 13 สรุปผลการทดลองและการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซด้วยวิธีการรวมผล ในไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3

U±SD (m/s)	ΔT±SD (°C)	A_L±SD*[1] (cm^2)	HLT_a±SD (h)	HLT_p±SD (h)	%error±SD
2.30±0.01	7.90±0.54	0.1944±0.0003a	18.74±0.24	16.78±0.34	10.43±1.36
5.37±0.11	7.65±0.24	0.1973±0.0026a	10.75±0.14	9.94±0.09	7.51±0.52
11.35±0.59	7.43±0.19	0.1994±0.0045a	5.00±0.09	5.09±0.14	3.38±2.94
2.32±0.04	12.48±0.36	0.2114±0.0010ab	14.11±0.92	13.28±0.09	6.31±5.01
5.44±0.09	12.10±0.13	0.2068±0.0055ab	9.34±0.11	8.87±0.31	5.00±3.32
11.59±0.40	12.26±0.52	0.2056±0.0221ab	4.62±0.73	4.78±0.45	5.20±6.43
2.34±0.04	14.54±0.07	0.2232±0.0040b	11.69±0.20	11.89±0.25	1.76±1.21
5.66±0.09	14.54±0.06	0.2098±0.0063ab	8.79±0.12	8.27±0.25	5.90±3.43
11.64±0.28	14.77±0.70	0.2092±0.0207ab	4.51±0.71	4.64±0.46	5.29±3.57
2.30±0.03	17.14±44	0.2250±0.0038b	10.83±0.07	11.14±0.18	2.93±2.06
5.39±0.55	16.67±0.55	0.2061±0.0056ab	8.85±0.15	8.51±0.19	3.79±3.22
11.79±0.07	16.80±0.44	0.2069±0.0205ab	4.49±0.67	4.61±0.43	6.59±3.18

หมายเหตุ * ค่าพื้นที่รอยรั่วเสมือนมีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

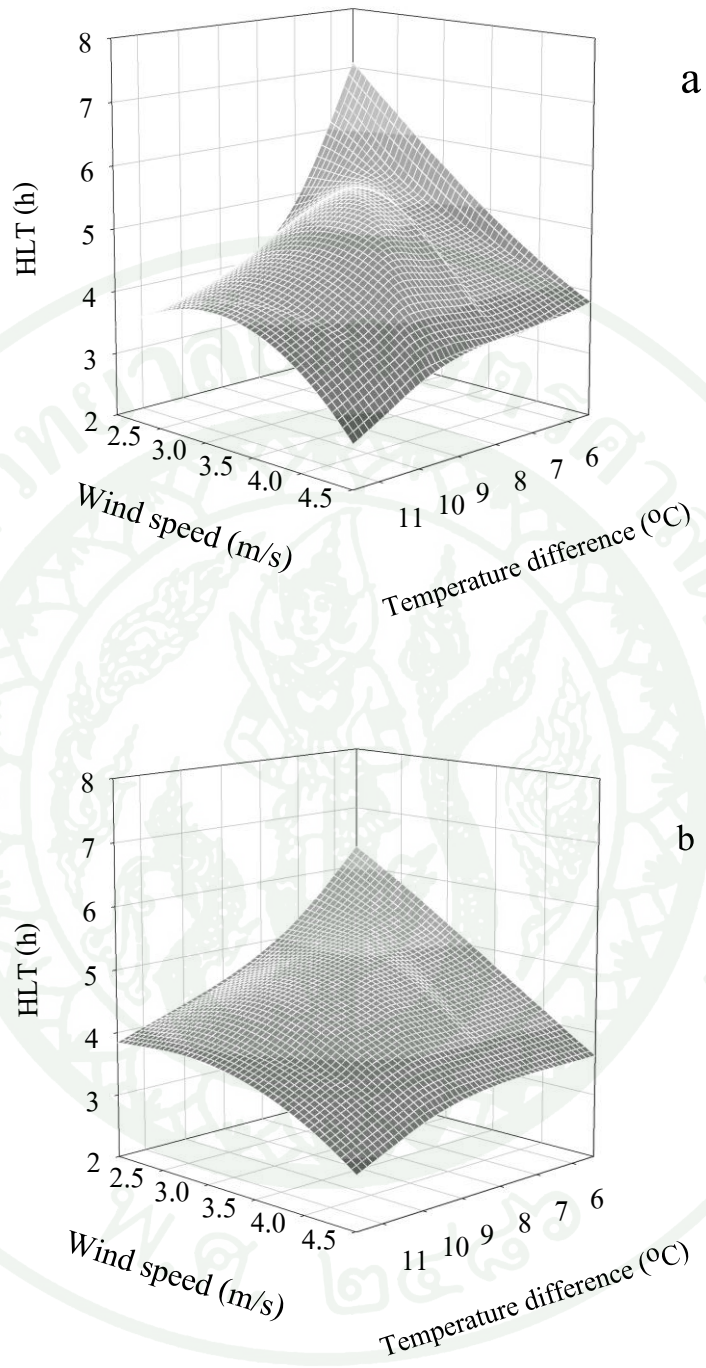
[1] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



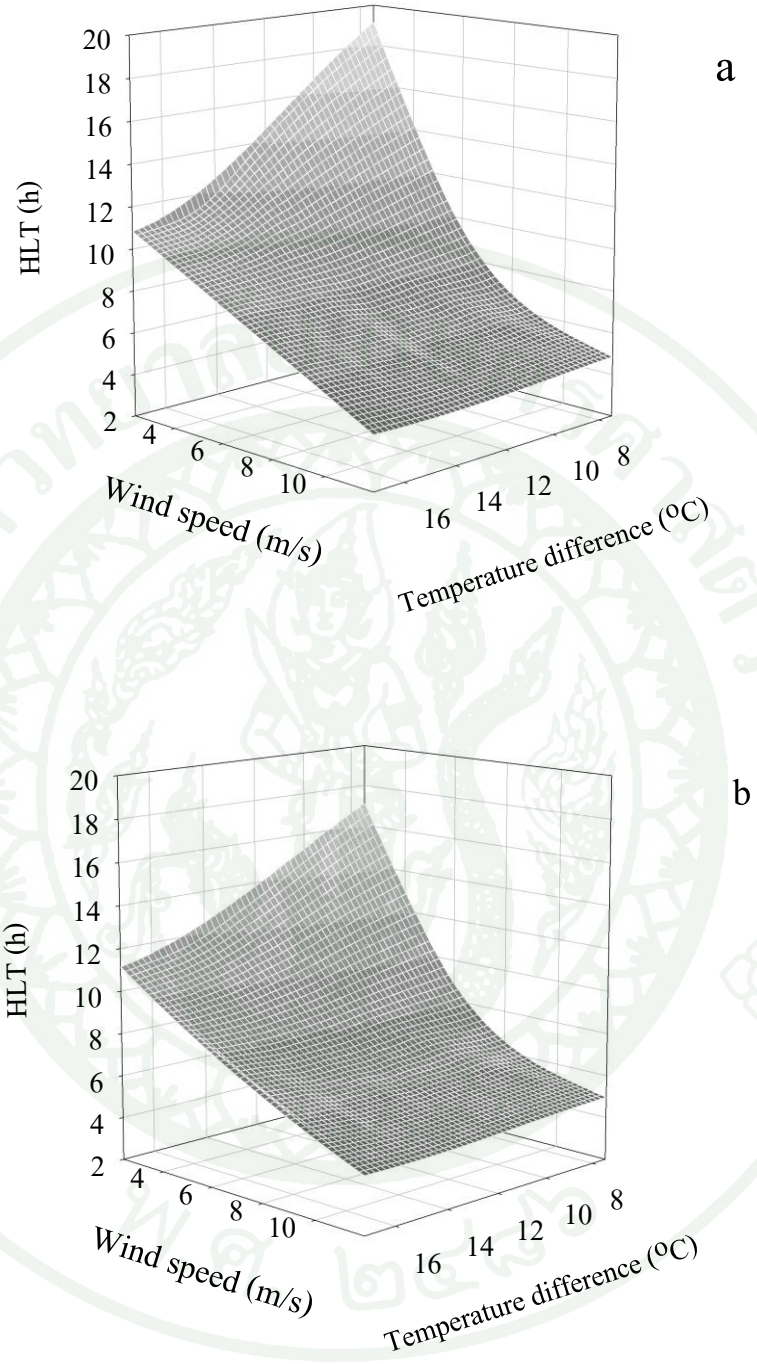
ภาพที่ 26 ผลการบันทึกค่าอัตราการป้อนอากาศและผลต่างความดันของการทดสอบความดันแบบ P-Q test กับไซโลจำลองปริมาตร (a) 0.2285 และ (b) 2.160 m^3 ก่อนการทดลองรมยาทุกซ้ำ ในการทดลองที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 27 (a) แผนภูมิพื้นผิวซึ่งถูกสร้างจากข้อมูลในตารางที่ 12 ซึ่งแสดงผลกระทบของความเร็วลม และผลต่างอุณหภูมิ ที่มีต่อ HLT_a ของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 (b) ผลการทำนาย HLT ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 2 และ 3 (i.e., HLT_p ในตารางที่ 12)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 28 (a) แผนภูมิพื้นผิวซึ่งถูกสร้างจากข้อมูลในตารางที่ 13 ซึ่งแสดงผลกระทบของความเร็วลม และผลต่างอุณหภูมิ ที่มีต่อ HLT_a ของไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3 (b) ผลการทำนาย HLT ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 2 และ 3 (i.e., HLT_p ในตารางที่ 13)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในภาพที่ 27 และ 28 ถึงแม้ว่า วิธีการรวมผลจะให้แผนภูมิพื้นผิวการทำนายค่า HLT_p ที่ใกล้เคียงกับค่า HLT_a ผู้วิจัยยังคงสามารถสังเกตความคลาดเคลื่อนของการทำนายได้ %error ของการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซ ถูกแสดงในคอลัมน์ที่ 6 ของตารางที่ 12 และ 13 ถูกคำนวณด้วยสมการที่ 11

$$\%error = \left|\frac{HLT_a - HLT_p}{HLT_a}\right| \times 100 \qquad (11)$$

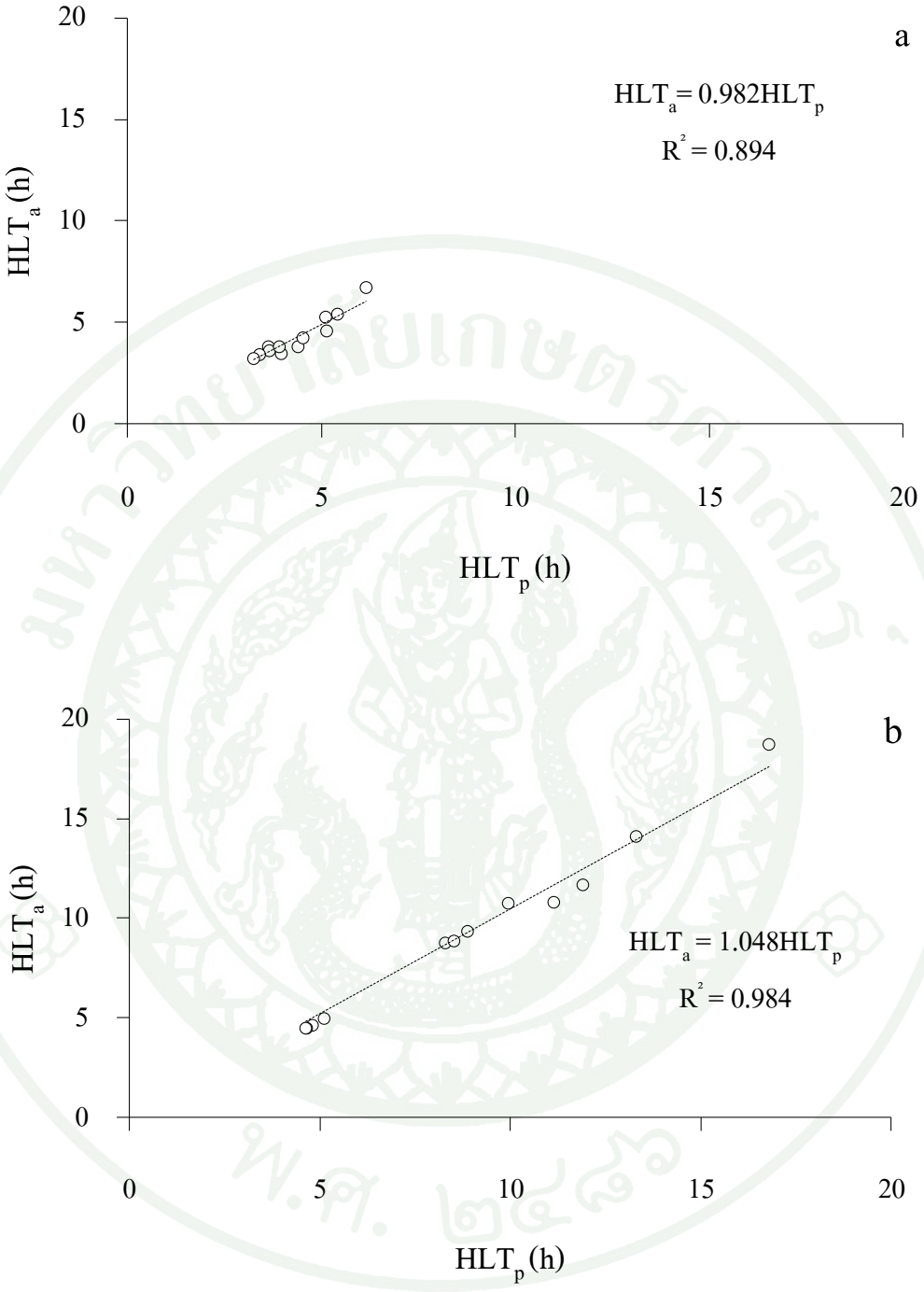
%error ในการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซของไซโลปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.65±0.50 – 15.70±1.10% และ 1.76±1.21 – 10.43±1.36% ตามลำดับ ซึ่ง %error ส่วนใหญ่ของไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตรมีค่าไม่เกิน 10% ผู้วิจัยคาดว่า ผลการทดลองที่ให้ %error ที่สูงกว่า 10% เกิดจากสาเหตุหลักคือ ที่ความเร็วลมช่วงต่ำๆ (e.g., $U \approx 2.0$ m/s) ความเร็วลมที่ออกจากท่อลมทรงเหลี่ยม (ภาพที่ 8) มีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัดของท่อ ทำให้ค่าความเร็วลมที่วัดได้อาจมีค่าแตกต่างจากความเร็วลมจริงที่ปะทะกับไซโลจำลอง (data not shown) ภาพที่ 29a และ 29b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า HLT_a และ HLT_p ของการทดลองทุกซ้ำ ในการทดลองที่ 3 ของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างค่า HLT_a และ HLT_p ถูกฟิตเคอร์ฟด้วยสมการเส้นตรงที่มีจุดตัดแกน y ที่ (x,y) = (0,0) ผลลัพธ์การฟิตเคอร์ฟสำหรับไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 คือ สมการที่ 12 ($R^2 = 0.894$) และ 13 ($R^2 = 0.984$) ตามลำดับ ซึ่งความชัน (slope) ของทั้ง 2 สมการมีค่าใกล้เคียง 1

$$HLT_a = 0.982HLT_p \qquad (12)$$

$$HLT_a = 1.048HLT_p \qquad (13)$$

การที่ 1) %error ส่วนใหญ่ของการทำนาย HLT ของไซโลทั้ง 2 ปริมาตร มีค่าไม่เกิน 10%, 2) การลดลงของความเข้มข้นก๊าซซึ่งเป็นผลของปัจจัยลมและผลต่างอุณหภูมิร่วมกัน ยังคงถูกอธิบายได้ด้วยสมการ firt-order kinetic (สมการที่ 1) และ 3) การที่ความชันของสมการที่ 12 และ 13 มีค่าใกล้เคียง 1 เป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่า ผู้วิจัยสามารถใช้สมการรวมผล (สมการที่ 3) ทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาในไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตรได้เป็นอย่างดี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HLT_a และ HLT_p ของการทดลองทุกซ้ำ ในการทดลองที่ 3 ของ (a) ไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ (b) ปริมาตร 2.160 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ผู้วิจัยประเมินความเป็นไปได้ของการใช้วิธีการรวมผล ในการอธิบายอัตราการสูญเสียก๊าซในระหว่างการรมยา โดยทำการทดลองรมยาจำลองในไซโลจำลอง 2 ปริมาตร (i.e., 0.2285 และ 2.160 m^3) โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซตัวแทนสารรม สมการที่ 1 แสดงให้เห็นว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาสามารถถูกอธิบายได้โดยสมการ first-order kinetic ซึ่งอัตราการลดลงถูกกำหนดโดย HLT สมการที่ 2 แสดงให้เห็นว่า HLT มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลอง สมการรวมผล (สมการที่ 3) แสดงให้เห็นว่า อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลเป็นฟังก์ชั่นของสภาวะอากาศโดยรอบไซโล (i.e., ความเร็วลมที่ปะทะกับไซโล และผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโล) นอกจากนี้ อัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลยังเป็นฟังก์ชั่นของคุณลักษณะของไซโล (i.e., สัมประสิทธิ์ความลอยตัว, สัมประสิทธิ์ลม และพื้นที่รอยรั่วเสมือน) เช่นกัน ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลอง เพื่อ 1) พิสูจน์ว่าการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยามีพฤติกรรมเป็นไปตามสมการ first-order kinetic (i.e., การทดลองที่ 1), 2) หาค่าของคุณลักษณะของไซโลจำลองที่ใช้ในการศึกษา (i.e., การทดลองที่ 2) และ 3) พิสูจน์ว่าสมการรวมผลสามารถทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาในไซโลจำลอง (i.e., การทดลองที่ 3)

ในการรมยาจำลอง ในการทดลองที่ 1 ผู้วิจัยทำการป้อนอากาศเข้าสู่ไซโลจำลองผ่าน Thorpe tube flow meter พร้อมวาล์วปรับอัตราการไหล ทำให้ผู้วิจัยทราบค่าที่แน่นอนของอัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลอง สำหรับไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 อัตราป้อนอากาศที่ใช้ในการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 2.00 – 8.33 และ 20.0 – 83.3 m^3/s ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณค่า HLT จากสมการที่ 2 (HLT_c) กับค่า HLT ที่ได้จากการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซด้วยสมการที่ 1 (HLT_a) %error ระหว่าง HLT_c และ HLT_a ของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าอยู่ระหว่าง 4.92 – 21.04% และระหว่าง 5.60 – 31.92% ตามลำดับ %error ส่วนใหญ่ที่มีค่าไม่เกิน 20% ซึ่งผู้วิจัยกำหนดให้เป็นระดับความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ผลการทดลองที่ 1 แสดงให้เห็นว่าสมการที่ 1 และ 2 สามารถอธิบายอัตรา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การลดลงของความเข้มข้นก๊าซในไซโลจำลองได้เป็นอย่างดี โดยไม่ขึ้นกับปริมาตรของไซโล หรืออัตราการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ไซโลจำลอง

ในการทดลองที่ 2 ผู้วิจัยทำการทดลองรมยาจำลองที่ 2 สภาวะ สภาวะที่ 1 เป็นสภาวะที่มีลมพัดปะทะไซโลจำลองด้วยความเร็วคงที่ ในขณะที่ไซโลถูกควบคุมให้ไม่มีผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโล สภาวะที่ 2 เป็นสภาวะที่ผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกไซโลจำลองมีค่าคงที่ โดยที่ไซโลจำลองไม่ถูกลมพัดปะทะ ค่าสัมประสิทธิ์ลมและสัมประสิทธิ์ความลอยตัวถูกคำนวณจากผลการทดลองในสภาวะที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สัมประสิทธิ์ลมของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 6 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.08±0.07 – 1.41±0.04 ($\times 10^{-3}$) และ 1.09±0.07 – 1.34±0.18 ($\times 10^{-3}$) ตามลำดับ สัมประสิทธิ์ความลอยตัวของไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ซึ่งถูกคำนวณด้วยสมการที่ 7 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.20±0.11 – 1.52±0.0204 ($\times 10^{-3}$) และ 1.12±0.03 – 1.31±0.12 ($\times 10^{-3}$) ตามลำดับ ทั้งสัมประสิทธิ์ลม และสัมประสิทธิ์ความลอยตัวเป็นคุณสมบัติของไซโลจำลอง ซึ่งในทางอุดมคติ ถึงแม้ว่าความเร็วลม และ/หรือผลต่างอุณหภูมิจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป หากการซีลไซโลในทุกการทดลองมีคุณภาพเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 2 จะไม่เปลี่ยนแปลง ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ลม ที่ทุกเงื่อนไขการทดลอง มีค่าไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ความลอยตัว ให้ผลเป็นไปในทางเดียวกัน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้ค่าเฉลี่ยรวมของสัมประสิทธิ์ลมและสัมประสิทธิ์ความลอยตัย จากผลการทดลองที่ทุกเงื่อนไขการทดลอง ในการทดลองที่ 2 ในการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซด้วยวิธีการรวมผลในการทดลองที่ 3 ต่อไป

ผู้วิจัยพิสูจน์สมการรวมผล โดยทำการทดลองรมยาจำลองในลักษณะที่ สภาวะอากาศโดยรอบไซโลจำลองถูกควบคุม และแสดงให้เห็นว่าสมการที่ 2 และสมการที่ 3 สามารถให้ผลการทำนายค่า HLT (HLT_p) ที่สอดคล้องกับผลลัพธ์ HLT ที่ได้จากการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซจากการทดลองรมยา กับสมการที่ 1 (HLT_a) ในการทดลองที่ 3 สำหรับไซโลจำลองแต่ละขนาด ผู้วิจัยเลือกทำการทดลองรมยาจำลองที่ความเร็วลม 3 ระดับ และที่ผลต่างอุณหภูมิ 4 ระดับ (รวม 12 เงื่อนไขการทดลอง) ที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง ผู้วิจัยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ไซโลจำลองถูกทดสอบความดันแบบ P-Q test ก่อนการทดลองทุกซ้ำ เพื่อหาขนาดของพื้นที่รอยรั่วเสมือน ค่า R^2 ของการฟิตเคอร์ฟเส้นโค้งการลดลงของความเข้มข้นก๊าซของการทดลองทุก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ซ้ำ ในการทดลองที่ 3 กับสมการที่ 1 มีค่าไม่น้อยกว่า 0.990 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดลงของความเข้มข้นก๊าซ มีลักษณะเป็นแบบ first-order kinetic ผลการทดลองในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3 และ 2.160 m^3 ให้ค่า HLT_a ระหว่าง 3.21±0.47 – 6.16±0.35 h และ 4.49±0.67 – 18.74±0.24 h ตามลำดับ %error ในการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซของไซโลปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.65±0.50 – 15.70±1.10% และ 1.76±1.21 – 10.43±1.36% ตามลำดับ ซึ่ง %error ส่วนใหญ่ของไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตรมีค่าไม่เกิน 10% เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างค่า HLT_a และ HLT_p ถูกฟิตเคอร์ฟด้วยสมการเส้นตรงที่มีจุดตัดแกน y ที่ (x,y) = (0,0) ผลลัพธ์การฟิตเคอร์ฟสำหรับไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ให้สมการเส้นตรงซึ่งมีความชันใกล้เคียง 1 การที่ 1) %error ส่วนใหญ่ของการทำนาย HLT ของไซโลทั้ง 2 ปริมาตร มีค่าไม่เกิน 10%, 2) การลดลงของความเข้มข้นก๊าซซึ่งเป็นผลของปัจจัยลมและผลต่างอุณหภูมิร่วมกันยังคงถูกอธิบายได้ด้วยสมการ firt-order kinetic และ 3) การที่ความชันของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า HLT_a และ HLT_p มีค่าใกล้เคียง 1 เป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่า สมการรวมผลสามารถทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรมยาในไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตรได้เป็นอย่างดี

ข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงถึง ความสามารถของวิธีการรวมผลในการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในไซโลจำลองว่างเปล่าปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ภายใต้สภาวะการรมยาจำลอง (e.g., ผู้วิจัยทราบขนาดและตำแหน่งที่แน่นอนของพื้นที่รอยรั่วบนไซโลจำลอง และสภาวะอากาศรอบไซโลถูกควบคุมให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด) ดังนั้น การศึกษาในอนาคตควรแสดงให้เห็นถึง ความสามารถของวิธีการนี้ในการทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซในไซโลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และในสภาวะเหมือนจริงมากขึ้น

ในความเป็นจริง ไซโลอาจมีปริมาตรได้มากถึง 20,000 m^3 และมีวัตถุดิบบรรจุอยู่เต็มความจุ ในสภาวะการรมยาจริง ผู้ปฏิบัติงานจะไม่สามารถทราบถึง ตำแหน่งและขนาดของรอยรั่วต่างๆ โดยรอบไซโลได้ เนื่องจาก การทำการทดสอบความดันกับปริมาตรไซโลขนาดใหญ่ อาจไม่สามารถทำได้ หรืออาจไม่คุ้มค่ากับการลงทุน การศึกษาต่อไป อาจศึกษาความเป็นไปได้และความคุ้มค่าของการทำการทดสอบความดัน กับไซโลจริง หากพบว่าไม่มีอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความดันกับโครงสร้างขนาดใหญ่ ผู้วิจัยมีแนวคิดว่า ค่าสัมประสิทธิ์ลม และสัมประสิทธิ์ความลอยตัวอาจถูกประมาณค่าได้จากฐานข้อมูลความเข้มข้นในระหว่างการรมยาในอดีต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรหลายๆ ชนิดมีคุณสมบัติดูดซับสารรม ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้ความเข้มข้นสารรมลดลง ผู้วิจัยเสนอให้ทำการศึกษาความสามารถในการทำนายของวิธีการรวมผล ในสภาวะที่โครงสร้างการรมยามีการบรรจุผลผลิตทางการเกษตรอยู่ภายใน และโครงสร้างถูกรมยาด้วยสารรมจริง เช่น เมทิลโบรไมด์ หรือฟอสฟีน เป็นต้น ในระหว่างกระบวนการรมยาสภาวะอากาศโดยรอบโครงสร้างการรมยามักมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ควรมีการศึกษาแนวทางการใช้วิธีการรวมผลร่วมกับข้อมูลสภาวะอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น การทำนายอัตราการลดลงของความเข้มข้นก๊าซจากค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง (hourly average) ของสภาวะอากาศ และควรมีการศึกษาตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บันทึกค่าสภาวะอากาศ (e.g., วัดความเร็วลม และอุณหภูมิบรรยากาศ) ที่สามารถทำให้ผลการทำนายของวิธีการรวมผลมีความถูกต้องสูงสุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ธีรเดช เดชทองจันทร์, วัชรพล ชยประเสริฐ และ เอนก สุขเจริญ. 2553. การศึกษาอัตราการรั่วไหลของก๊าซฟอสฟีนจากโครงสร้างผ้าคลุมรมยา polyvinyl chloride (PVC) ที่มีความหนาต่างกัน. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**. 42 (3 พิเศษ): 485-488.

บุษรา พรหมสถิต, ชูวิทย์ ศุขปราการ และ พรทิพย์ วิสารทานนท์. 2537. ความต้านของมอดข้าวเปลือก Rhyzopertha dominica (Fabricius) แมลงศัตรูผลิตผลเกษตรต่อสารรมฟอสฟีน. **วารสารกีฏและสัตววิทยา**. 16: 165-173.

บุษรา พรหมสถิต, ชูวิทย์ ศุขปราการ และ พรทิพย์ วิสารทานนท์. 2541. การศึกษาความต้านทานของแมลงศัตรูผลิตผลเกษตรต่อสารรมฟอสฟีน. **วารสารกีฏและสัตววิทยา**. 20: 176-183.

Anonymous. 2008. **Phosphine resistance in insect pests of stored grain**. Australian Centre for International Agricultural Research Available at: http://www.aciar.gov.au/project/PHT/1994/015. Accessed 5 January 2013.

Armstrong, J.W. and L.C. Whitehand. 2005. Effects of methyl bromide concentration, fumigation time, and fumigation temperature on mediterranean and oriental fruit fly egg and larval survival. **Journal of Economic Entomology**. 98: 1116-1125.

ASHRAE. 2001. **ASHRAE Handbook - Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA.

Banks, H.J., A.K. Sharp and A.R. Irving. 1974. Gas interchange in freight containers. pp. 519-531. *In* **Proceedings of the first International Working Conference on Stored-Product Entomology**. 7-11 October 1974, Savannah, Georgia.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Bell, C.H. 1992. Time, concentration and temperature relationships for phosphine toxicity in tests on diapausing larvae of Ephestia elutella. **Journal of Pesticide Science**. 35: 255-264.

Bell, C.H. 2000. Fumigation in the 21st century. **Journal of Crop Protection**. 19: 563-569.

Bell, C.H. and S.M. Wilson. 1995. Phosphine tolerance and resistance in Trogoderma granarium everts (Coleoptera:Dermestidae). **Journal of Stored Products Research**. 31: 199-205.

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

Bond, E.J. 1984. **Manual of fumigation for insect control**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Chayaprasert, W., D.E. Maier, K.E. Ileleji and J.Y. Murthy. 2007a. Investigation of gas distribution due to circulation fans in structural fumigation. *In* **Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions**. 29 October - 1 November 2007, San Diego, CA.

Chayaprasert, W., D.E. Maier, B. Subramanyam and M. Hartzer. 2012. Gas leakage and distribution characteristics of methyl bromide and sulfuryl fluoride during fumigations in a pilot flour mill. **Journal of Stored Products Research.** 50: 1-7.

Cryer, S.A. 2007. Predicted gas loss of sulfuryl fluoride and bromide during structral fumigation. **Journal of Stored Products Research**. 44: 1-10.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Cryer, S.A. and D.E. Barnekow. 2006. Estimating outside air concentrations surrounding fumigated grain mills. **Journal of Stored Products Biosystems Engineering**. 94: 557-572.

Devore, J.L. 2000. **Probability and Statistics for Engineering and the Sciences**. 5th ed. Duxbury: Thomson Learning, Pacific Grove, CA.

Fields, P.G.and N.D.G. White. 2002. Alternatives to methyl bromide treatments for stored-product and quarantine insects. **Journal of Annual Review of Entomology**. 47: 331-359.

Jay, E.G. and G.C. Pearman. 1973. Carbon dioxide for control of an insect infestation in stored corn (maize). **Journal of Stored Products Research**. 9: 25-29.

Kenaga, E.E. 1961. Time, temperature and dosage relationships of several insecticidal fumigants. **Journal of Economic Entomology**. 54: 537-542.

Navarro, S. 1998. Pressure tests for gaseous applications in sealed storages: Theory and practice. **Journal of Stored-Product Protection**. 7: 385-390.

Pimentel, M.A.G., L.R.D. Faroni, M.D. Batista and F.H.d. Silva. 2008. Resistance of stored-product insects to phosphine. **Journal of Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 43: 1671-1676.

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. **Journal of Pest Management Science**. 58: 277-281.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Rajendran, S. and N. Muralidharan. 2001. Performance of phosphine in fumigation of bagged paddy rice in indoor and outdoor stores. **Journal of Stored Products Research**. 37: 351-358.

Reed, C. 2001. Movement of phosphine gas in upright concrete elevators. pp. 273-278 *In* **Proceedings of International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products**, 29 October - 3 November 2000, Fresno, CA, USA.

Reed, C. and H. Pan. 2000. Loss of phosphine from unsealed bins of wheat at six combinations of grain temperature and grain moisture content. **Journal of Stored Products Research.** 36: 263-279.

Sherman, M.H. and D.T. Grimsrud. 1980. Infiltration-pressurization correlation: Simplified physical modeling. **ASHRAE Transactions**. 86: 778-803.

Su, N.-Y., W.L.A. Osbrink and R.H. Scheffrahn. 1989. Concentration-time relationship for fumigant efficacy of sulfuryl fluoride against the Formosan subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae). **Journal of Economic Entomology.** 82: 156-158.

UNEP. 2000. **The Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer**. Available at: http://ozone.unep.org/pdfs/Montreal-Protocol2000.pdf. Accessed 12 January 2007.

Weller, G.L. 1999. The role of concentration, time and temperature in determining dosage for fumigation with carbonyl sulphide. pp. 548-553. *In* **Proceedings of the Seventh International Working Conference on Stored Product Protection**. 14-19 October 1998, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.

White, N.D.G. and D.S Jays. 1993. Effectiveness of carbon dioxide in compressed gas or solid formulation for the control of insects and mites in stored wheat and barley. **Journal of Phytoprotection**. 74: 101-111.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาคผนวก

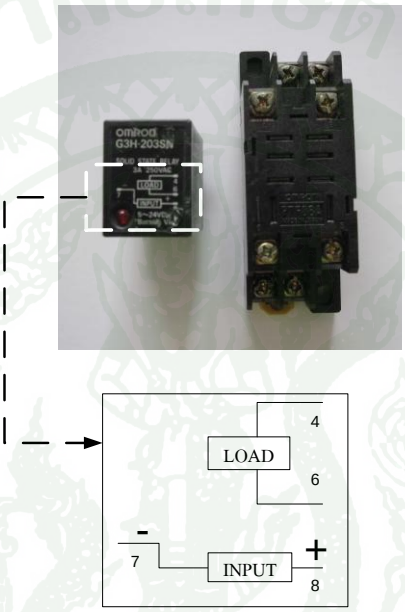
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

การประกอบอุปกรณ์ของระบบควบคุมอุณหภูมิ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ 1 และ 2 แสดงรีเลย์แบบ solid state relay (SSR) ซึ่งทำหน้าที่ตัด-ต่อวงจรไฟฟ้าควบคุมการทำงานของ heater ภายในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 และ 2.160 m^3 ตามลำดับ SSR มีขั้วต่อ 2 ขั้วคือ ขั้ว input (หมายเลข 7 และ 8) ทำหน้าที่รับสัญญาณควบคุมจากชุด PLC เพื่อเปิด-ปิดอุปกรณ์ load ต่างๆ ซึ่งในที่นี้คือ heater ซึ่งสายไฟฟ้าของวงจร load จะถูกติดตั้งเข้ากับขั้วหมายเลข 4 และ 6 ของรีเลย์ รีเลย์ในภาพผนวกที่ 2 มีลักษณะการทำงานคล้ายกับรีเลย์ในภาพผนวกที่ 1



ภาพผนวกที่ 1 รีเลย์ควบคุม heater ในไซโลจำลองปริมาตร 0.2285 m^3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ 2 รีเลย์ควบคุม heater ในไซโลจำลองปริมาตร 2.160 m^3

ภาพผนวกที่ 3 แสดงจอสัมผัสแสดงผล ซึ่งมี tool port (ภาพผนวกที่ 3b) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อจอสัมผัสแสดงผลกับ com port ของ control unit (หมายเลข 2 ในภาพผนวกที่ 4a) โดยที่ลักษณะการเชื่อมต่อปลายสายสัญญาณถูกแสดงอยู่ในตารางในภาพผนวกที่ 4b นอกจากนี้ บนจอสัมผัสแสดงผลยังมี com port เป็นส่วนที่เชื่อมต่อจอสัมผัสแสดงผลกับ RS232 port ของคอมพิวเตอร์ โดยที่ลักษณะการเชื่อมต่อปลายสายสัญญาณถูกแสดงอยู่ในตารางในภาพผนวกที่ 3c ภาพผนวกที่ 4 แสดง control unit ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนประมวลผลของชุด PLC ภาพผนวกที่ **5** แสดงโปรแกรม ladder logic ที่ระบบควบคุมอุณหภูมิใช้ควบคุมอุณหภูมิภายในไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตร ซึ่งถูกเขียนขึ้นในคอมพิวเตอร์และถูก download ให้กับ control unit ผ่าน com port ภาพผนวกที่ **6** แสดง expansion I/O unit ซึ่งจะถูกประกอบเป็นชิ้นเดียวกันกับ control unit สายสัญญาณจาก expansion I/O unit จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับรีเลย์ (ภาพผนวกที่ 1 และ 2) เพื่อสั่งงานให้รีเลย์เปิด-ปิด heater

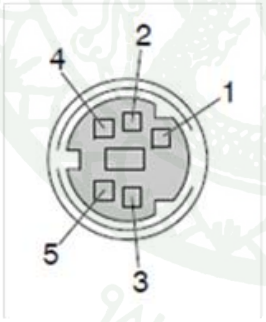
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



a



b

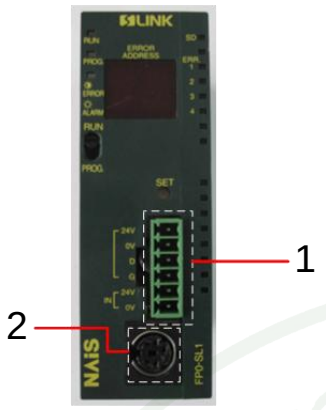


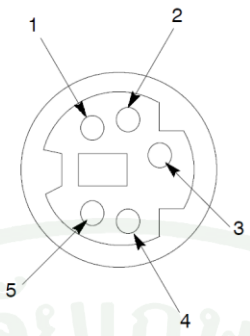
Pin No.	Contents
1	SG
2	SD
3	RD
4	N.C.
5	(+5 V)

c

ภาพผนวกที่ 3 (a) จอสัมผัสแสดงผล, (b) tool port บนจอสัมผัสแสดงผล และ (c) com port บนหน้าจอสัมผัสแสดงผล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

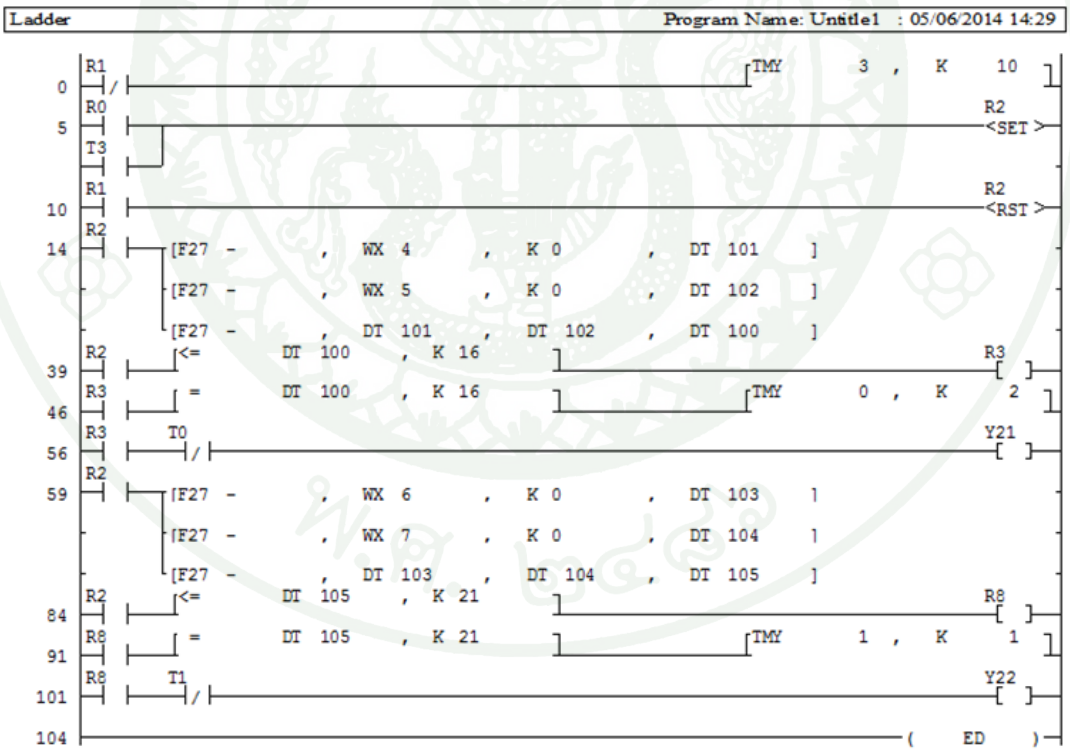




Pin no.	Abbreviation
1	—
2	SD (TXD)
3	SG
4	RD (RXD)
5	+ 5 V

a b

ภาพผนวกที่ 4 (a) control unit และ (b) ลักษณะการเชื่อมต่อปลายสายสัญญาณระหว่าง tool port ของจอสัมผัสแสดงผล (ภาพผนวกที่ 3b) และ com port ของ control unit



ภาพผนวกที่ 5 โปรแกรม ladder logic ของระบบควบคุมอุณหภูมิ

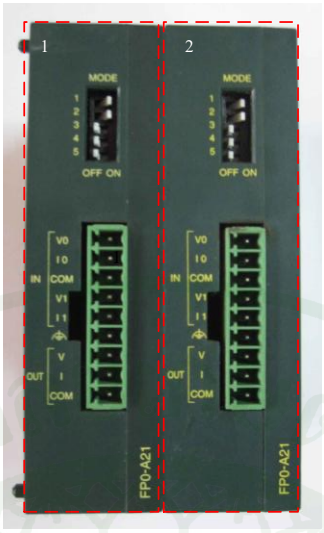
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



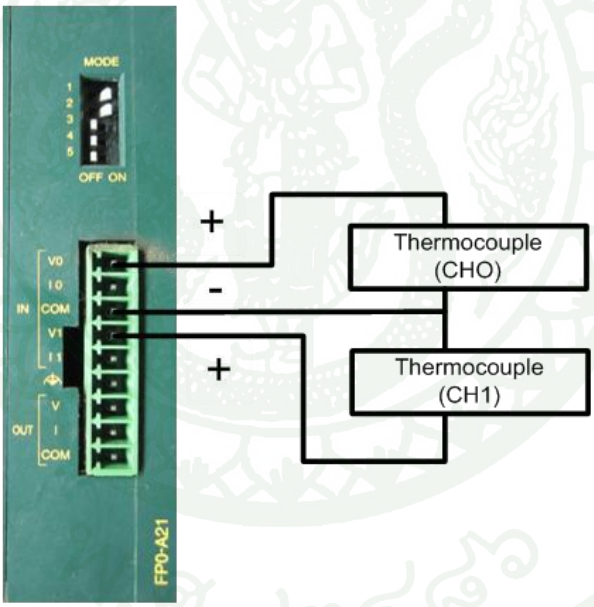
ภาพผนวกที่ 6 expansion I/O unit

ภาพผนวกที่ 7 แสดง analog I/O unit ซึ่งเป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างชุด PLC กับ thermo-couple ระบบควบคุมอุณหภูมิจำนวน 1 ชุด สามารถวัดอุณหภูมิทั้งภายในและภายนอก และควบคุมภายในไซโลจำลองทั้ง 2 ปริมาตรพร้อมๆ กัน การติดตั้ง thermocouple เข้ากับ analog I/O unit ถูกแสดงในภาพผนวกที่ 8 ซึ่งการติดตั้งในลักษณะดังกล่าวเป็นการติดตั้งที่เงื่อนไขอุณหภูมิภายในสูงกว่าภายนอกไซโลจำลอง thermocouple บน CH0 จะถูกติดตั้งอยู่ภายในไซโลจำลอง ส่วน thermocouple บน CH1 จะถูกติดตั้งอยู่ภายนอกไซโลจำลอง ภาพผนวกที่ 9 เป็นตัวอย่างเส้น thermocouple ชนิด type K ที่ใช้ในการทดลอง ภาพผนวกที่ 10 แสดง power supply ซึ่งแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V_{AC} เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 V_{DC} เพื่อจ่ายให้แก่อุปกรณ์ต่างๆ ของระบบควบคุมอุณหภูมิ ภาคผนวกที่ 11 แสดงพัดลมไฟฟ้าเพื่อระบายความร้อนของระบบควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ด้านบนชุด PLC

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

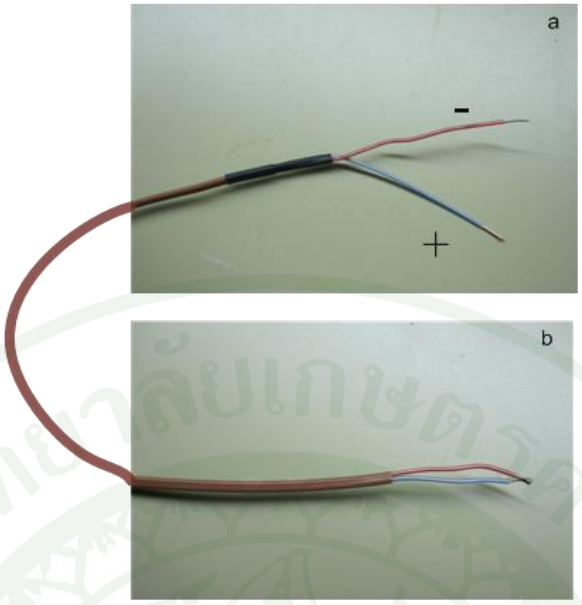


ภาพผนวกที่ 7 analog I/O unit



ภาพผนวกที่ 8 การติดตั้ง thermocouple เข้ากับ analog I/O unit

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ 9 thermocouple ซึ่งมี (a) ส่วนที่เชื่อมต่อเข้ากับ analog I/O unit และ (b) ส่วนที่วัดอุณหภูมิ



ภาพผนวกที่ 10 power supply

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ 11 พัดลมไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวกัลยา หนูขำ
เกิดวันที่	15 กุมภาพันธ์ 2531
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดตรัง
ประวัติการศึกษา	วศ.บ (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	นิสิตปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์