

สำนักงานบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ระดับการประเมินคุณภาพ



ดีมาก



ดี



พอ



ปานกลาง





การออกแบบระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง
สำหรับการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสด

พรเทพ จอมเมือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร

สำนักบริหารและพัฒนานิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร

ชื่อเรื่อง

การออกแบบระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง
สำหรับการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสด

โดย

พรเทพ จอมเมือง

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการที่ปรึกษา

วิฑูรย์ ว.กท

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุงศ์ วาฤทธิ)

วันที่ 27 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2552

กรรมการที่ปรึกษา

อ.

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพงษ์ พิมพ์พิมล)

วันที่ 22 เดือน ม.ค. พ.ศ. 52

กรรมการที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์บัณฑิต หิรัญสถิตย์พร)

วันที่ 28 เดือน พ.ค. พ.ศ. 2552

ประธานกรรมการประจำหลักสูตร

อ.ดร. ส.โค

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สิบคำ)

วันที่ 27 เดือน พ.ค. พ.ศ. 2552

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เทพ พงษ์พานิช)

ประธานกรรมการบัณฑิตศึกษา

วันที่ 30 เดือน พ.ค. พ.ศ. 2552

ชื่อเรื่อง	การออกแบบระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง สำหรับการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสด
ชื่อผู้เขียน	นายพรเทพ จอมเมือง
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูป ผลผลิตเกษตร
ประธานกรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพงศ์ วาฤทธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งของการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ผลลำไยสด โดยทำการศึกษาค่าความดันตกคร่อม (ΔP) ของการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยสด ที่มีการจัดเรียง 3 รูปแบบ ของตะกร้าที่แตกต่างกัน 2 รูปทรง โดยเลือกใช้ระดับอัตราการไหล 0.6, 0.8 และ 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จากนั้น จึงใช้หลักการวิเคราะห์มิติตามทฤษฎี Buckingham's π เพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องแล้วจึงทำการออกแบบห้องรม SO_2 ผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง ผลการศึกษาพบว่า ความดันตกคร่อมตะกร้าบรรจุผลลำไยมีค่าอยู่ระหว่าง 10-540 ปาสคาล มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดเรียงตะกร้า และอัตราการไหลของอากาศ เมื่อทำการวิเคราะห์มิติจึงพบว่าการเปลี่ยนแปลงความดันตกคร่อมสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ในรูปของตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของคอลัมน์ตะกร้ากับความสูงชั้นตะกร้า (D/L) จากการออกแบบห้องรม SO_2 โดยอาศัยความสัมพันธ์ของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ได้ พบว่า ระบบหมุนเวียนอากาศจะต้องใช้พัดลมหมุนเวียนอากาศที่มีอัตราการไหลสูงสุด 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และมีความดันรวม 600 ปาสคาล ทำให้ระบบเกิดการหมุนเวียนอากาศที่เหมาะสม ครอบคลุมการจัดเรียงตะกร้าทุกรูปแบบ ในการทดสอบเพื่อยืนยันผลการออกแบบห้องรม SO_2 กับผลลำไยสด โดยใช้ตะกร้าบรรจุผลลำไยสดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จำนวน 50 ตะกร้า และตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู จำนวน 60 ตะกร้า (ความเข้มข้นของ SO_2 เท่ากับ 4,000 ppm) พบว่า สามารถใช้อัตราการไหลของพัดลมหมุนเวียนอากาศที่ต่ำสุด เท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยที่ระบบยังมีการหมุนเวียนอากาศภายในตะกร้าอย่างสม่ำเสมอ และมีปริมาณ SO_2 ตกค้างหลังสิ้นสุดการรมไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) กับการใช้อัตราการไหล 0.8 และ 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

Title	Designing of Vertical Forced-Air Circulation System for SO ₂ Fumigation on Longan (<i>Dimocarpus longan</i> Lour.)
Author	Mr. Pornthep Jommuang
Degree of	Master of Engineering in Agro-Process Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Jatuphong Varith

ABSTRACT

The objective of this research was to analyze the forced-air circulation system of SO₂ fumigation on longan (*Dimocarpus longan* L.) by studying the pressure drop (ΔP) of different baskets containing fresh longan. Two different baskets; rectangular, and trapezoidal shaped baskets used in this study, were aligned into three different patterns of flow rate of regulated blower (0.6, 0.8 and 1.0 m³/s) and were then analyzed by applying the Buckingham Pi theorem to determine the relationship of the parameters. Afterwards, a vertical forced-air SO₂ fumigation chamber was designed using these parameters. Results showed that pressure drop ranged from 10 to 540 Pa with averages being dependent on basket arrangement and flow rate. Dimensional analysis indicated that ΔP was related to Reynolds number (Re) and ratio between hydraulic diameter of basket columns and stack height of basket (D/L). The designed SO₂ fumigation chamber using the relationship of dimensionless parameters, showed that the forced-air circulation system of SO₂ fumigation had an effective flow rate and total pressure drop at 1.0 m³/s and 600 Pa, respectively. As a result, SO₂ fumigation on longan in 50 rectangular shaped baskets and 60 trapezoidal shaped baskets (initial SO₂ concentration of 4,000 ppm) indicated a minimum flow rate of 0.6 m³/s with uniform distribution of forced-air circulation. Meanwhile, SO₂ residue on longan was not significantly different ($p>0.05$) with air flow rates of 0.8 and 1.0 m³/s.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงศ์ วาฤทธิ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการศึกษาดังแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการให้คำปรึกษาในการวางแผนการทดลอง ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขจนกระทั่งได้วิทยานิพนธ์ที่สมบูรณ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ จักรพงษ์ พิมพ์พิมล และรองศาสตราจารย์ บัณฑิต หิรัญสถิตย์พร กรรมการที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำ ปรึกษา เสนอแนะข้อคิดเห็นต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา อีกทั้งกรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐ วรยศ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะ เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีเนื้อหาที่สมบูรณ์ครบถ้วน เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาต่อไปในอนาคต

ขอขอบคุณโครงการวิจัย เรื่อง การออกแบบห้องรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับ ผลลัพท์ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในระดับอุตสาหกรรม โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่เอื้อเฟื้อวัสดุอุปกรณ์ และสถานที่ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านถ่ายทอดวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่เกิดจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร ทุกท่าน ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่คอยช่วยเหลือ ให้การศึกษาสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณพ่ออานนท์ และคุณแม่จันจิรา จอมเมือง รวมทั้งญาติพี่น้องทุกคนที่อบรมสั่งสอน ชี้แนะแนวทางในการดำเนินชีวิต ตลอดจนให้การสนับสนุน อุปการะเลี้ยงดู ข้าพเจ้าตลอดมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

พรเทพ จอมเมือง

พฤศจิกายน 2552

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(9)
สารบัญภาพ	(10)
สารบัญตารางผนวก	(12)
สารบัญภาพผนวก	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
ขอบเขตของการวิจัย	4
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	5
ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ลำไย	5
ลักษณะทั่วไปของลำไย	5
การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไย	5
การยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	7
การรม SO ₂ ผลลำไยสด	8
ปัญหาจากการรม SO ₂ ผลลำไยสด	8
มาตรฐานห้องรม SO ₂ ผลลำไยสด	9
วิธีการคำนวณปริมาณผงกำมะถันที่ใช้สำหรับการรม SO ₂	15
การวิเคราะห์ปริมาณ SO ₂ ตกค้าง	16
ระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ	19
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ	19
หลักการออกแบบระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ	20
การจัดเรียงบรรจุภัณฑ์สำหรับการลดอุณหภูมิด้วยระบบการ	

หมุนเวียนอากาศแบบบังคับ	21
ความต้านทานการไหลของอากาศ	23
พัฒนที่นิยมใช้ในระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ	23
การวิเคราะห์หิมิต	25
การออกแบบระบบหมุนเวียนอากาศ	29
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
การรม SO ₂ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้	32
การใช้ระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ	34
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	36
อุปกรณ์	36
สารเคมี	37
วิธีดำเนินการทดลอง	37
การศึกษาความดันตกคร่อมตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูและรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า	37
การออกแบบห้องรม SO ₂ ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง	45
การทดสอบห้องรม SO ₂ ผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง	46
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	
การศึกษาความดันตกคร่อมตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูและรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า	50
อัตราการไหลของระบบหมุนเวียนอากาศ	50
ผลการศึกษาค่าความดันตกคร่อมของการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง	52
การวิเคราะห์หิมิต	54
ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไว้มิติกับการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม	55
การออกแบบห้องรม SO ₂ ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง	63

การออกแบบโครงสร้างและส่วนประกอบ	63
การคำนวณหาขนาดพัดลมที่เหมาะสม	64
การหมุนเวียนอากาศภายในตะกร้าบรรจุลำไยที่จัดเรียงสำหรับ การรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง	68
การทดสอบความสม่ำเสมอของปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไย ที่ ใช้ระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง	72
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	75
สรุป	75
ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	80
ภาคผนวก ก เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	81
ภาคผนวก ข ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน	86
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หิมิต	90
ภาคผนวก ง ค่าคงที่สำหรับการคำนวณทางกลศาสตร์ของไหล	94
ภาคผนวก จ ประวัติผู้วิจัย	97

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกผลลำไยสดรายเดือน	2
2 ปริมาณก๊าซ SO ₂ ที่ได้จากการประกอบซัลไฟต์ชนิดต่าง ๆ	8
3 มิตของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล	28
4 กลุ่มตัวแปรไร้มิติที่นิยมใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหล	29
5 ขนาดท่อลมที่ใช้จัดเรียงตะกร้าลำไยของชุดทดสอบ	40
6 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมตะกร้าลำไยและมิติพื้นฐาน	44
7 อัตราการไหลของพัลลมหมุนเวียนอากาศของชุดทดสอบ	51
8 ความเร็วลมเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในท่อลมสำหรับจัดเรียงตะกร้าลำไย แบบ 1 ตะกร้าต่อชั้น ที่มีการหมุนเวียนอากาศโดยพัลลมตัวที่ 1	51
9 ความเร็วลมเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในท่อลมของชุดทดสอบสำหรับจัดเรียงตะกร้าลำไย แบบ 4, 5 และ 6 ตะกร้าต่อชั้น ที่มีการหมุนเวียนอากาศโดยพัลลมตัวที่ 2	52
10 การเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมของอากาศที่ไหลผ่านตะกร้าลำไยรูปทรงเหลี่ยม คางหมูด้วยอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ	53
11 การเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมของอากาศที่ไหลผ่านตะกร้าลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ด้วยอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ	54
12 สมการความสัมพันธ์สำหรับการทำนายค่าความดันตกคร่อมตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับการรม SO ₂ ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง	60
13 สมการความสัมพันธ์สำหรับการทำนายค่าความดันตกคร่อมตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับการรม SO ₂ ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง	61
14 ค่าความดันตกคร่อม ที่ได้จากการทดลองและการทำนาย ของการจัดเรียงตะกร้าลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูแบบ 6 ตะกร้าต่อชั้น และตะกร้าลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบ 4 ตะกร้าต่อชั้น	62
15 ความเร็วลมภายในตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ใช้ระดับอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ	69
16 ปริมาณ SO ₂ ตกค้าง ที่เกิดจากการรม SO ₂ ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง ของตะกร้าแตกต่างกัน 2 รูปทรง ที่ระดับอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ	74

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 ลักษณะโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลต่าง ๆ	6
2 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอลและการเกิดสีน้ำตาล	7
3 ตัวอย่างแผนผังสถานประกอบการรวม SO_2 ผลลัพธ์ที่ได้มาตรฐาน	10
4 การจัดเรียงตะกร้าลำไยในการรวม SO_2 ในห้องขนาดเล็ก	12
5 ตำแหน่งการติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในห้องรวม และลักษณะการหมุนเวียนอากาศ	13
6 ตัวอย่างหัวดูดแก๊ส SO_2 รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	14
7 หัวกระจายแก๊สรูปพัด	14
8 ชุดอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้าง	17
9 เปรียบเทียบลักษณะบรรจุภัณฑ์ และหลักการทำความเข้าใจของระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับกับห้องเย็นทั่วไป	20
10 ภาพจำลองการจัดวางภาชนะบรรจุด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ	22
11 พัฒนแบบไหลตามแกน	24
12 พัฒนแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	25
13 ผลที่ได้จากการทดลองกับกระบวนการที่มีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาด	26
14 ผลการทดลองที่เกิดจากการหาความสัมพันธ์ร่วมของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของการทดลองทั้ง 2 ขนาด	26
15 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู(สีขาว) สำหรับใช้ในเชิงการค้า และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า(สีแดง) ใช้ในห้องปฏิบัติการ	38
16 ภาพจำลองรูปแบบการจัดเรียงตะกร้าทั้ง 2 รูปทรง ในแต่ละชั้น	39
17 ภาพตัดขวางตำแหน่งการวัดลมภายในพื้นที่หน้าตัดท่อลมของชุดทดสอบระดับห้องปฏิบัติการซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐานของ ASHRAE	41
18 แสดงตัวอย่างตำแหน่งการวัดความดันขาเข้า และขาออกตะกร้าบรรจุลำไย	42
19 การจัดเรียงตะกร้าสำหรับการรวม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง	47
20 ตำแหน่งสำหรับวัดความเร็วลมภายในตะกร้าบรรจุลำไย	48
21 ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างผลลัพธ์ในตะกร้า เพื่อนำมาวิเคราะห์ SO_2 ตกค้าง	49

ภาพ

หน้า

22	ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ บังคับในแนวตั้งกับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู	56
23	ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ บังคับในแนวตั้ง กับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า	57
24	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์กับค่าความดันตกคร่อม ของตะกร้าบรรจุลำไย ที่แตกต่างกัน 2 รูปทรง	58
25	ภาพจำลองแสดงส่วนประกอบห้องรม SO_2 ผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศ แบบบังคับในแนวตั้ง	64
26	การคำนวณหาความยาวประสิทธิผล	67
27	ความเร็วลมภายในตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ที่มีการหมุนเวียนอากาศ แบบบังคับในแนวตั้งด้วยระดับอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ	70
28	ความเร็วลมภายในตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีการหมุนเวียนอากาศ แบบ บังคับในแนวตั้งด้วยระดับอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ	70
29	ลักษณะช่องว่างเมื่อจัดเรียงของตะกร้าที่แตกต่างกัน 2 รูปทรง	71
30	ปริมาณ SO_2 ตกค้างในลำไยที่บรรจุด้วยตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ที่ระดับอัตรา การไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ	72
31	ปริมาณ SO_2 ตกค้างในลำไยที่บรรจุด้วยตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ระดับอัตรา การไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ	73

สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวก	หน้า
1 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อความดันตกคร่อมของ ตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู	87
2 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อความดันตกคร่อมของ ตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า	87
3 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วในการไหล ของอากาศ	88
4 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณ SO_2 ตกค้าง ในผลลำไยหลังสิ้นสุดการรม	88
5 ตารางเปรียบเทียบค่าความความเร็วลมเฉลี่ยภายในตะกร้า ที่อัตราการไหล 3 ระดับ	89
6 ตารางเปรียบเทียบค่าความความเร็วลมเฉลี่ยภายในตะกร้า ของตะกร้าที่ แตกต่างกัน 2 รูปทรง	89
7 ตารางเปรียบเทียบปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไย ที่อัตราการไหล 3 ระดับ	89
8 ตารางเปรียบเทียบปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไย ของตะกร้าที่แตกต่างกัน 2 รูปทรง	89

สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวก	หน้า
1 เครื่องวัดค่าความเร็วลม ยี่ห้อ TESTO รุ่น 400	82
2 เครื่องวัดค่าความดันตกคร่อม TESTO รุ่น 454	82
3 เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP2100S	83
4 ชุดวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้าง	83
5 ห้องรม SO_2 ผลลัพท์สกัดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง	84
6 การติดตั้งพัดลมหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งด้านบนห้องรม	85
7 คู่มือการทำงานของห้องรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง	85
8 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (ε)	95
9 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับท่อรูปทรงสี่เหลี่ยม งอ 90°	95
10 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับท่อตรงออกจากพัดลมรูปทรงสี่เหลี่ยม	95
11 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับท่อขยายรูปทรงพีระมิด	96

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

ลำไยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของจังหวัดเชียงใหม่ และลำพูน มีแนวโน้มในการขยายพื้นที่ปลูกออกไปในอีกหลายจังหวัดทั่วประเทศไทย เนื่องจากลำไยเป็นไม้ผลเขตร้อนซึ่งมีคู่แข่งทางการตลาดค่อนข้างน้อย มีการบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ ตลาดลำไยสดภายในประเทศที่สำคัญ ได้แก่ ตลาดมหานาค ตลาดสี่มุมเมือง ปากคลองตลาด และตลาดไทย ส่วนตลาดต่างประเทศที่สำคัญ คือ ฮองกง รองลงมาคือ มาเลเซีย อินโดนีเซีย แคนาดา สิงคโปร์ และจีน ตามลำดับ (พาวัน, 2543) ถึงแม้ว่าประเทศไต้หวันก็เป็นอีกประเทศหนึ่งที่มีการผลิตลำไยแต่ก็ยังไม่เพียงพอต่อการบริโภคภายในประเทศ จึงมีการนำเข้าจากประเทศไทยเป็นจำนวนมากในแต่ละปี (Yen et al., 2000) ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2552) พบว่า มูลค่าการส่งออกลำไยสดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี โดยล่าสุดในปี 2551 มีมูลค่าการส่งออกสูงกว่า 2,600 ล้านบาท ดังตาราง 1 โดยเฉพาะในช่วงเดือนกรกฎาคมและเดือนสิงหาคมซึ่งเป็นช่วงที่มีผลผลิตลำไยสดออกสู่ตลาดเป็นจำนวนมากที่สุด ส่งผลให้ปริมาณการส่งออกลำไยเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ลำไยจึงเป็นอีกช่องทางหนึ่งในการสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกร และนำรายได้กลับสู่ประเทศไทยได้ปีละหลายล้านบาท จนมีการขยายพื้นที่ปลูกไปในหลายจังหวัดทั่วประเทศไทย

การส่งออกลำไยสดมีกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญ คือ การรมผลลำไยสดด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่ง SO_2 มีส่วนช่วยในการยืดอายุการเก็บรักษา เนื่องจากลำไยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็วหลังจากเก็บเกี่ยว มีอาการของการเกิดสีน้ำตาล (browning) บนผิวของเปลือก มีอายุการวางขาย (30°C) ไม่เกิน 72 ชั่วโมง ปัญหาที่สำคัญอีกประการ คือ การเจริญเติบโตของเชื้อรา *Botryodiplodia* sp. บนผิวของผลลำไย ในสถานการณ์เก็บรักษาทั้งในอุณหภูมิต่ำและปกติ (ชิงชิง, 2540) การส่งออกผลลำไยสดจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องผ่านกระบวนการรม SO_2 ปัจจุบันกระบวนการรม SO_2 เป็นกระบวนการที่มีการปฏิบัติโดยผู้ประกอบการ หรือผู้รวบรวมผลผลิตจากเกษตรกรเพื่อทำการกระจายผลผลิตในลำดับต่อไป กระบวนการที่ไม่ได้มาตรฐานมักเป็นสาเหตุที่สำคัญของปัญหาการตกค้างของปริมาณ SO_2 เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ โดยคณะกรรมการอาหารระหว่างประเทศหรือ Codex กำหนดให้มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อได้ไม่เกิน 10 ppm (สถาบันอาหาร, 2541) ก่อให้เกิดปัญหาการกีดกันทางการค้าจากประเทศคู่ค้า ส่งผลให้การส่งออกลำไยสดไปยังต่างประเทศยากขึ้นกว่าเดิม

ตาราง 1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกผลลำไยสดรายเดือน

เดือน	2548		2549		2550		2551		2552	
	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
มก.	11,965	203.7	9,685	192.0	14,279	272.7	21,792	325.3	22,238	331.7
กพ.	12,038	180.7	5,220	108.6	11,994	197.0	16,426	230.3	11,126	194.2
มีค.	12,550	190.7	5,688	113.9	13,729	243.9	15,672	216.1	14,399	230.9
เมย.	12,928	189.6	3,408	73.4	7,331	140.2	6,934	97.6		
พค.	4,877	78.3	1,487	43.3	3,899	62.0	2,987	42.9		
มิย.	5,206	85.9	6,452	150.4	3,888	74.4	11,871	209.9		
กค.	32,916	503.8	25,949	458.6	30,217	397.3	28,000	454.1		
สค.	20,126	351.4	22,905	356.2	33,243	450.0	9,484	180.4		
กย.	2,357	35.1	3,495	60.9	11,762	164.9	10,038	188.9		
ตค.	2,641	47.8	8,957	143.7	13,270	189.8	13,508	210.6		
พย.	6,132	112.2	13,892	216.3	6,292	101.2	13,207	194.4		
ธค.	9,310	188.4	11,999	203.3	10,485	158.3	18,714	279.9		
รวม	133,046	2,168	119,137	2,121	160,389	2,452	168,633	2,630	47,763	757

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2552)

กระบวนการรวม SO_2 ที่ใช้ในสถานประกอบการทั่วไปจะทำในห้องรมที่ปิดสนิทภายในห้องประกอบด้วยพัดลมสำหรับช่วยหมุนเวียนอากาศภายในห้อง ช่องสำหรับปล่อยควันที่ได้จากการเผาผงกำมะถัน ส่วนปริมาณผงกำมะถันที่ใช้ในการเผา และระยะเวลาที่ใช้รม จึงมักจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับผู้ประกอบการนั้น ๆ เมื่อสิ้นสุดการรมแล้ว ลำไยสดจะถูกลำเลียงออกมาจากห้องรมมาผึ่งในสภาพบรรยากาศปกติเพื่อเป็นการลดอุณหภูมิก่อนที่จะนำไปเก็บรักษาในห้องเย็นเพื่อรอการขนส่งต่อไป ชิงชิง (2540) ได้ทำการทดลองรม SO_2 กับผลลำไยและถั่วงอกเพื่อการส่งออก พบว่า มีปริมาณ SO_2 ตกค้างเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการรมนานขึ้น และยังพบว่าจากการรมควันลำไยสดด้วยวิธีการดังกล่าว ผลลำไยสดสัมผัสกับแก๊ส SO_2 อย่างไม่สม่ำเสมอ ในทางการค้าจึงมักแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการเพิ่มปริมาณผงกำมะถันที่ใช้เผา และเวลาในการรมให้มากขึ้น จึงเป็นสาเหตุหนึ่งของการมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกและเนื้อลำไยเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพัฒนากระบวนการรวม SO_2 ในผลลำไยสด ให้

มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น กล่าวคือ ต้องทำให้เกิดความสม่ำเสมอของปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยสด หลังจากสิ้นสุดการรม โดยสัมพันธ์กับความเข้มข้นของ SO_2 กับเวลาที่ใช้ในการรม

การนำระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ (forced-air) มาใช้จึงน่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว เนื่องจากระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ เป็นการบังคับทิศทางการไหลของอากาศให้ไหลผ่านตะกร้าที่บรรจุผลลำไยสด โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้อากาศที่มีแก๊ส SO_2 สัมผัสกับผิวลำไยอย่างทั่วถึงและค่อนข้างสม่ำเสมอ จักรพงษ์และคณะ (2550) ได้นำระบบ tunnel forced-air มาใช้ ในการรม SO_2 กับผลลำไยสดในเชิงงานนำร่องจำนวน 32 และในเชิงการค้า จำนวน 126 ตะกร้า พบว่า แก๊ส SO_2 ภายในห้องรมมีการกระจายและแทรกเข้าไปในตะกร้าบรรจุลำไยได้ดีขึ้น และสามารถลดความเข้มข้นของแก๊ส SO_2 ลงจากเดิม 6 เท่า โดยที่ยังคงไว้ซึ่งอายุการเก็บรักษา และคุณภาพไม่แตกต่างจากระบวนการรมแบบเดิม แต่ยังพบว่า ระบบ tunnel forced-air ทำให้เกิดการลัดวงจรของอากาศ (short-air circuit) เมื่อใช้กับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่นิยมใช้ในทางการค้า กล่าวคือ เกิดปัญหาความไม่สม่ำเสมอของอากาศ เนื่องด้วยตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่ใช้ในปัจจุบันเมื่อจัดเรียงแล้วจะมีช่องว่างระหว่างตะกร้า ทำให้อากาศส่วนใหญ่ไหลผ่านทางช่องว่างแทนที่จะผ่านเข้าไปในตะกร้า

การวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม (pressure drop; ΔP) ตะกร้าลำไย ที่เกิดขึ้นจากการจัดเรียงสำหรับการรม SO_2 ด้วยระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง (vertical forced-air) จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบห้องรม SO_2 ด้วยระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง ที่เหมาะสมตามกำลังการผลิตที่ต้องการ โดยยังก่อเกิดการหมุนเวียนอากาศอย่างสม่ำเสมอ และทั่วถึงภายในชั้นตะกร้า

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความดันตกคร่อมของชั้นตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู กับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่จัดเรียงสำหรับการรม SO_2 ผลลัพท์สดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง
2. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมของตะกร้าบรรจุลำไย เพื่อใช้ในการออกแบบห้องรม SO_2 ผลลัพท์สดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง
3. เพื่อออกแบบห้องรม SO_2 และส่วนประกอบของระบบหมุนเวียนอากาศที่เหมาะสม ภายในห้องรม SO_2 ผลลัพท์สดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม ของตะกร้าบรรจุลำไยทั้ง 2 รูปทรง ที่จัดเรียงสำหรับการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง
2. ได้ความสัมพันธ์เชิงตัวเลขของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความดันตกคร่อม เพื่อใช้ในการออกแบบห้องรม SO_2 ผลลัพท์สดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง
3. ได้แนวทางในการออกแบบห้องรม SO_2 ผลลัพท์สดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาความดันตกคร่อมของตะกร้าลำไย พร้อมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงตัวเลขของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่าย เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบห้องรม SO_2 ของลำไยสดพันธุ์ค้อด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง
2. ทำการศึกษาเปรียบเทียบบรรจุภัณฑ์บรรจุผลลัพท์สด 2 รูปทรง คือ รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งเป็นที่ยอมรับใช้ในทางการค้า และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เป็นตะกร้าเชิงอุดมคติในการทดลอง

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ลำไย

ลักษณะทั่วไปของลำไย

ลำไยที่ปลูกในประเทศไทยมีมากกว่า 20 พันธุ์ ซึ่งจำแนกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการเจริญเติบโตของต้น ลักษณะของผล เนื้อ เมล็ดและรสชาติ คือ ลำไยเครือหรือลำไยเถา ซึ่งมีลำต้นเป็นทรงพุ่มเลื้อยคล้ายเถาวัลย์ ผลเล็ก เมล็ดโต มีเนื้อน้อยและกลั่นคล้ายกะมัน มักจะปลูกเป็นไม้ประดับมากกว่าที่จะปลูกเพื่อบริโภค ส่วนอีกชนิดคือ ลำไยต้นซึ่งเป็นลำไยที่พบเห็นโดยทั่วไป นิยมปลูกเพื่อนำมาบริโภค มีหลายพันธุ์ อาทิเช่น พันธุ์คอกหรืออีคอก พันธุ์ชมพูหรือสีชมพู พันธุ์แก้ว หรืออีแก้ว พันธุ์เปี้ยวเขียวหรืออีเปี้ยวเขียว พันธุ์แดงหรืออีแดงกลม เป็นต้น (พาวันและวินัย, 2543) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะพันธุ์ที่นิยมปลูกเป็นการค้าและมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ คือ พันธุ์คอกหรืออีคอก

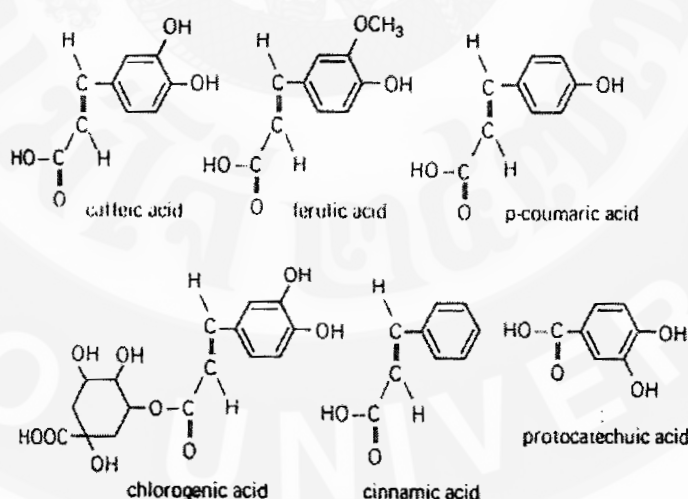
พันธุ์คอกหรืออีคอก เป็นลำไยพันธุ์เบากล่าวคือ สามารถออกดอกและติดผลได้เร็วกว่าพันธุ์อื่น เป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกมากที่สุด เนื่องจากให้ผลผลิตเร็ว เป็นที่ต้องการของตลาดทั้งในและต่างประเทศ สามารถจำหน่ายได้ทั้งแบบผลสดและแปรรูป ลำไยพันธุ์คอกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดตามสีของยอดอ่อน ได้แก่ อีคอกยอดแดง ใบอ่อนจะมีสีออกแดง เจริญเติบโตเร็วกว่าอีคอกยอดเขียว แต่ไม่ค่อยนิยมปลูกเนื่องจากออกดอกติดผลได้ยาก และมีการหลุดร่วงมากหากเก็บเกี่ยวไม่ทัน ส่วนอีกชนิด คือ อีคอกยอดเขียว มีลักษณะโดยทั่วไปคล้ายอีคอกยอดแดง มีใบอ่อนเป็นสีเขียว อีคอกยอดเขียวยังแบ่งออกตามลักษณะก้านช่อผลได้อีก 2 ชนิด คือ อีคอก้านอ่อน และอีคอก้านแข็ง ซึ่ง อีคอก้านแข็งเป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกมากที่สุด เนื่องจากมีเปลือกหนา เนื้อหนาสีขาวขุ่นมีรสหวาน เมล็ดขนาดปานกลาง ขนาดผลใหญ่ เบี้ยวกว่าข้างเดียว ผิวสีน้ำตาล (พิทยาและพาวัน, 2545)

การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไย

ลำไยเป็นผลไม้ที่ไม่สามารถบ่มให้สุกได้หรือแบบ non-climacteric fruit ที่อุณหภูมิ 25 °C มีอัตราการหายใจ 30 - 45 mg CO₂ · kg⁻¹ · h⁻¹ และมีอัตราการผลิตเอทิลีนต่ำกว่ากล่าวคือ น้อยกว่า 0.1 µl · kg⁻¹ · h⁻¹ ลำไยเป็นผลไม้ที่มีการเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว โดยมีสาเหตุของการเสื่อมสภาพมาจากหลายปัจจัย เช่น การเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ การเสื่อมสภาพจากลักษณะทางสรีรวิทยา เป็นต้น

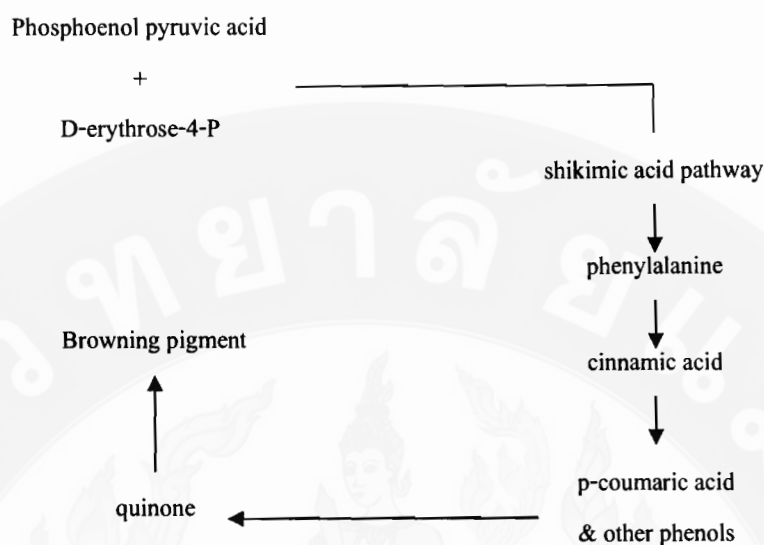
การเสื่อมสภาพของลำไยจากการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ เกิดได้จากเชื้อจุลินทรีย์ที่สำคัญ คือ *Botryodiplodia* sp. หากเก็บไว้ที่อุณหภูมิปกติ (จึงจึง, 2540) พบว่าเชื้อดังกล่าวยังทำให้เกิดโรค stem rot หรือ black rot ได้อีกด้วย (Jiang and Li, 2001) นอกจากนี้ยังพบเชื้ออีกหลายชนิด เช่น *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cephalosporium*, *Cladosporium*, *Curvulavia*, *Fusarium*, *Mucor*, *Nigrospora*, *Penicillium*, *Pestalotiopsis*, *Paecilomyces*, *Phomopsis*, *Rhizopus*, *Rhizoctonia* และ พวกยีสต์ต่าง ๆ (จริยา, 2542)

การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาเป็นปัญหาหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญของลำไย ลักษณะการเสื่อมสภาพของลำไยสดที่สังเกตได้ง่าย คือ เปลือกจะเปลี่ยนจากสีปกติเป็นสีน้ำตาลเข้ม เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอล (phenolic compound) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังภาพ 1 โดยเริ่มมาจากการรวมตัวของโมเลกุล phosphoenol pyruvate จากกระบวนการ glycolysis และ erythrose-4-phosphate จาก Calvin cycle (ภาพ 2) และมีเอนไซม์ที่สำคัญในกระบวนการ คือ phenylalanine ammonialyase (PAL) และ polyphenol oxidase (PPO) จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการจะได้สารสีน้ำตาลเกิดขึ้น แต่สารประกอบฟีนอลก็มีส่วนดีในด้านการป้องกันโรค กล่าวคือ สาร quinone ที่ได้จากการทำงานของ PPO มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ (จริงแท้, 2542)



ภาพ 1 ลักษณะโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลต่างๆ

ที่มา: จริงแท้ (2542)



ภาพ 2 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอลและการเกิดสีน้ำตาล
ที่มา: จริงแท้ (2542)

การยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

ลำไยเป็นผลไม้ที่เกิดการเสียหายได้ง่ายจากลักษณะทางสรีรวิทยาของตัวลำไยเอง และเนื่องจากผลผลิตลำไยส่วนมากจะมีการเก็บเกี่ยวในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นฤดูฝน มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ทำให้ผลลำไยสดที่ทำการขนส่งไปยังต่างประเทศ หรือตลาดปลายทางเกิดความเสียหายอย่างมาก เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวจึงเข้ามามีบทบาทในการช่วยยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดเพื่อการส่งออก โดยกรรมวิธีที่นิยมมาก และมีวิธีการไม่ยุ่งยาก คือ การรมผลลำไยสดด้วยก๊าซ SO_2 ซึ่งมีส่วนช่วยในการป้องกันการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ และที่ระดับการตกค้างของ SO_2 ที่เปลือกเพียง 100 ppm ก็สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์บนผลลำไยได้ (Tongdee, 1994)

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีสูตรทางเคมี คือ SO_2 มีสถานะเป็นก๊าซ ไม่ติดไฟ ไม่มีสี กลิ่นฉุน SO_2 ที่นิยมนำมาใช้ได้มาจากการเผาไหม้กำมะถัน นอกจากนี้ก๊าซ SO_2 ยังได้มาจากการประกอบซัลไฟต์หลายชนิด เมื่อแตกตัวสามารถปลดปล่อยแก๊ส SO_2 ออกมาในปริมาณแตกต่างกัน แสดงได้ดังตาราง 2 (รัตนา, 2535)

ก๊าซ SO_2 มีคุณสมบัติในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็น reducing agent กล่าวคือ เป็นสารที่ไปลดการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการทางเคมีต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบจนทำให้ ไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ตามปกติ และ SO_2 ยังมีคุณสมบัติในการฟอกสี ทำให้ผิวของลำไยดูสวยดึงดูดผู้บริโภค นอกจากนั้น SO_2 ยังสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่เปลือกของผลลำไยในกระบวนการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น (จริงแท้, 2542)

ตาราง 2 ปริมาณก๊าซ SO_2 ที่ได้จากสารประกอบซัลไฟด์ชนิดต่าง ๆ

ชื่อสารประกอบ	ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (เปอร์เซ็นต์)
โพแทสเซียมซัลไฟด์	33.0
โซเดียมซัลไฟด์	50.8
โพแทสเซียมไบซัลไฟด์	53.3
โซเดียมไบซัลไฟด์	61.6
โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟด์	67.4
โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์	57.4

ที่มา: รัตนา (2535)

การรม SO_2 ผลลำไยสด

ปัญหาจากการรม SO_2 ผลลำไยสด

เนื่องจากกระบวนการรม SO_2 ผลลำไยสดเป็นเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้เมื่อมีการขนส่งไปยังประเทศคู่ค้า ดังนั้น จึงมักเกิดปัญหาจากการมีปริมาณ SO_2 ตกค้างเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด จากการศึกษาสถานการณ์ของปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยของจังหวัดเชียงใหม่และลำพูน ของธีรนุช และคณะ (2548) พบว่า มีการตกค้างของ SO_2 ในผลลำไยสด มากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างที่เก็บมาทั้งหมด โดยพบการตกค้างในเปลือกเกินกว่า 1,700 ppm และยังมีการตกค้างในเนื้อถึง 10 ppm ดังนั้น แนวทางหนึ่งที่จะช่วยควบคุมไม่ให้เกิดปัญหาดังกล่าว จึงจำเป็นต้องมีการสร้างมาตรฐานในการปฏิบัติกรรม SO_2 ให้ได้ตามที่มาตรฐานกำหนดให้แก่ผู้ประกอบการ รวมทั้งผู้เกี่ยวข้องทั้งหมด

มาตรฐานห้องรม SO₂ ผลลัาโยสด

การก่อสร้างห้องรม SO₂ ผลลัาโยสดควรคำนึงถึงความเหมาะสมตามข้อกำหนดของวิธีการปฏิบัติที่ดีในการผลิต (good manufacturing practice: GMP) ถูกสุขลักษณะ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจด้วย ควรมีการจัดสรรพื้นที่ในการใช้สอยที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน (ภาพ 3) ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนรับซื้อผลิตผล ส่วนการคัดคุณภาพ ส่วนของการรม SO₂ ส่วนปฏิบัติการหลังจาการรม SO₂ ส่วนของห้องเย็น และส่วนของลานสำหรับจอตบรรทุกที่จะทำการขนส่งลัาโยไปยังตลาดปลายทาง นอกจากนั้นยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น สำนักงาน ห้องเก็บของ เป็นต้น

ข้อพิจารณาในการสร้างห้องรม SO₂ มีดังนี้

1. สถานที่ก่อสร้าง ควรมีพื้นที่เพียงพอสำหรับการปฏิบัติงานต่าง ๆ
2. วัสดุก่อสร้างควรมีความแข็งแรงทนทาน ทนต่อการกัดกร่อนของแก๊ส SO₂
3. พื้นห้องต้องสามารถรองรับน้ำหนักของลัาโยที่ต้องการรม SO₂
4. การออกแบบห้องต้องง่ายในการทำความสะดวก
5. มีฉนวนป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส SO₂ ขณะทำการรม
6. มีหลอดไฟให้แสงสว่าง และช่องกระจกสำหรับมองภายในห้องขณะปฏิบัติงาน
7. มีระบบรักษาความปลอดภัย เช่น ระบบป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร ระบบดับเพลิง

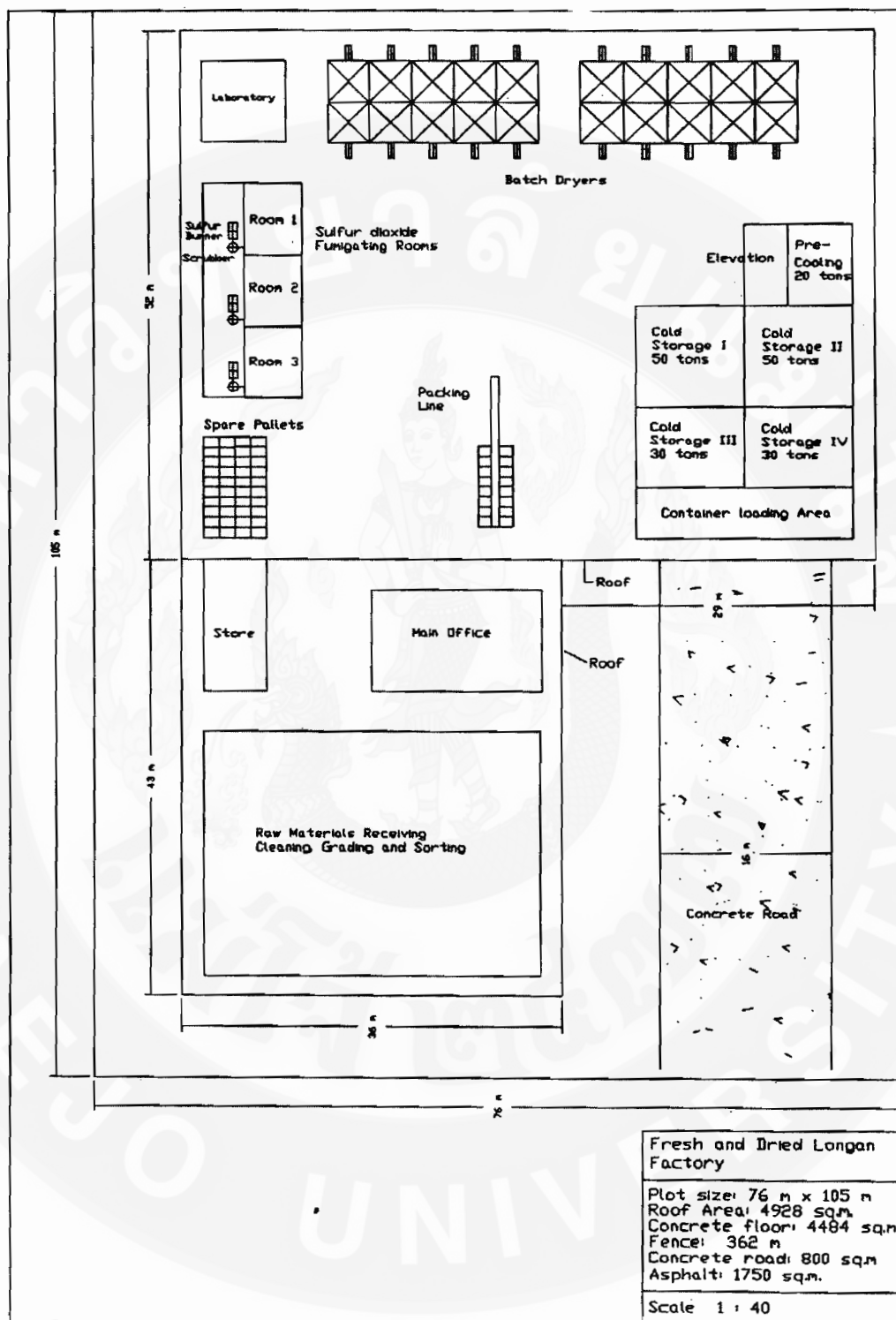
เป็นต้น

สถาบันอาหาร(2541) ได้แนะนำมาตรฐานการก่อสร้างห้องรมควันลัาโยไว้ดังนี้

1 ขนาดของห้องรม SO₂

ขนาดของห้องรมขึ้นอยู่กับปริมาณลัาโยที่ต้องการรมของผู้ประกอบการแต่ละราย อาจมีได้หลายห้องเพื่อความเหมาะสมและความรวดเร็วทันต่อความต้องการ โดยทั่วไปมีการกำหนดสัดส่วนของปริมาตรของห้องเป็นหน่วยลูกบาศก์เมตรต่อน้ำหนักลัาโยที่ต้องการรมมีหน่วยเป็นตันซึ่งแนะนำว่าควรมีสัดส่วนระหว่าง 10:1 ถึง 15:1

ความสูงจากพื้นห้องถึงเพดานควรอยู่ระหว่าง 2.40 ถึง 2.50 เมตร ส่วนความกว้างและยาวขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของพื้นที่และการจัดวางตะกร้าลัาโย ประตูควรมีความกว้างอย่างน้อย 2 เมตร เพื่อสะดวกในการขนย้ายตะกร้าลัาโย วัสดุที่ใช้ทำประตูควรเป็นวัสดุที่ทนการกัดกร่อนของแก๊ส SO₂ เช่น สแตนเลส ไม้อัดบุโพน เป็นต้น



ภาพ 3 ตัวอย่างแผนผังสถานประกอบการรม SO_2 ผลลำไยสดที่ได้มาตรฐาน

ที่มา: สถาบันอาหาร (2541)

2. การจัดวางตะกร้า ตะกร้าลำไยจะถูกวางซ้อนกันบนแผ่นรอง (pallet) แล้วลำเลียงเข้าไปภายในห้องรม การจัดเรียงตะกร้าลำไยภายในห้องรมจะต้องคำนึงถึงทิศทางการหมุนเวียนของอากาศภายในห้องรม SO_2 เพื่อไม่ให้ขัดขวางการหมุนเวียนของอากาศอันจะส่งผลให้ผลลำไยสัมผัสกับแก๊ส SO_2 ได้ไม่ทั่วถึง ตัวอย่างการวางตะกร้าลำไยภายในห้องรม แสดงดังภาพ 4

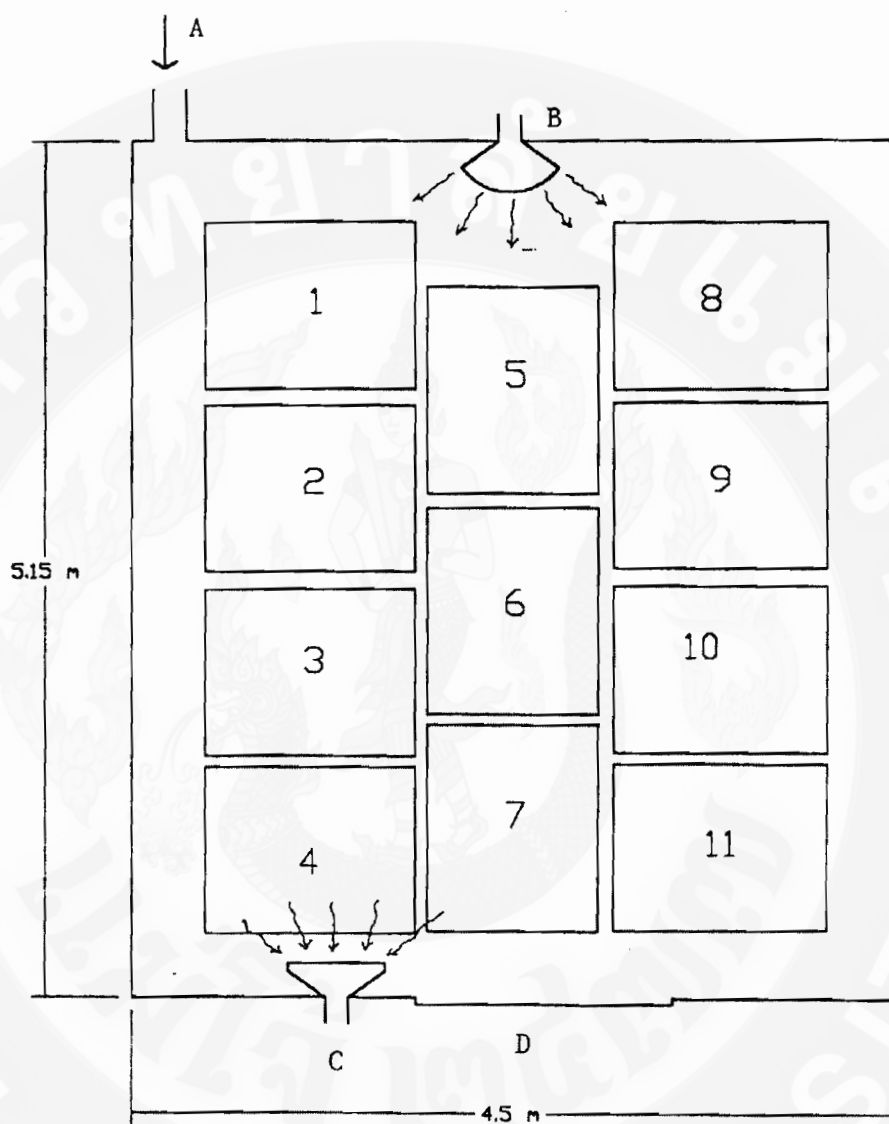
3. การปล่อยแก๊ส SO_2 ภายในห้องรม เมื่อเผากำมะถันจะได้แก๊ส SO_2 ออกมา การจะนำแก๊ส SO_2 เข้าไปรมต้องคำนึงถึงการกระจายตัวของแก๊สที่ดี คือ แก๊สสามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงภายในห้องรม ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ตำแหน่งของหัวปล่อยแก๊ส จำนวนของหัวปล่อยแก๊ส ตำแหน่งของหัวดูดแก๊ส จำนวนหัวดูดแก๊ส ความเร็วที่พ่นและดูดแก๊สภายในห้อง และการจัดเรียงตะกร้าลำไยภายในห้องรม แก๊สที่ปล่อยเข้าไปภายในห้องจะมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณหัวกระจายแก๊ส ดังนั้นตะกร้าลำไยที่อยู่ใกล้หัวกระจายแก๊สจึงมีโอกาสดังจะได้รับปริมาณ SO_2 มากกว่าตะกร้าลำไยที่อยู่ไกลออกไป หากไม่มีการหมุนเวียนอากาศที่ดีภายในห้องรมก็อาจก่อให้เกิดการตกค้างของแก๊ส SO_2 โดยเฉพาะตะกร้าลำไยที่อยู่ใกล้หัวกระจายแก๊ส

อุปกรณ์ในการกระจายแก๊สภายในห้องรม ประกอบไปด้วยท่อดูดแก๊ส (hopper) หัวกระจายแก๊ส (gas diffuser) และพัดลม (blower) ตัวอย่างลักษณะของการทำงานของระบบกระจายแก๊ส ภายในห้องรมแสดงได้ดังภาพ 5 ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งในการติดตั้งท่อดูดแก๊สหัวกระจายแก๊สเพื่อให้สัมพันธ์กับทิศทางการไหลเวียนของอากาศภายในห้องรม

3.1 ท่อดูดแก๊ส (hopper) มีหน้าที่ในการดูดแก๊ส SO_2 ภายในห้องรมที่ปล่อยออกมาจากหัวกระจายแก๊ส แล้วนำแก๊ส SO_2 หมุนเวียนกลับมายังหัวกระจายแก๊สเพื่อปล่อยเข้ามาในห้องรม ดังนั้น ท่อดูดแก๊สจะต้องมีอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกับอัตราการไหลของแก๊ส ที่ออกมาจากหัวกระจายแก๊ส

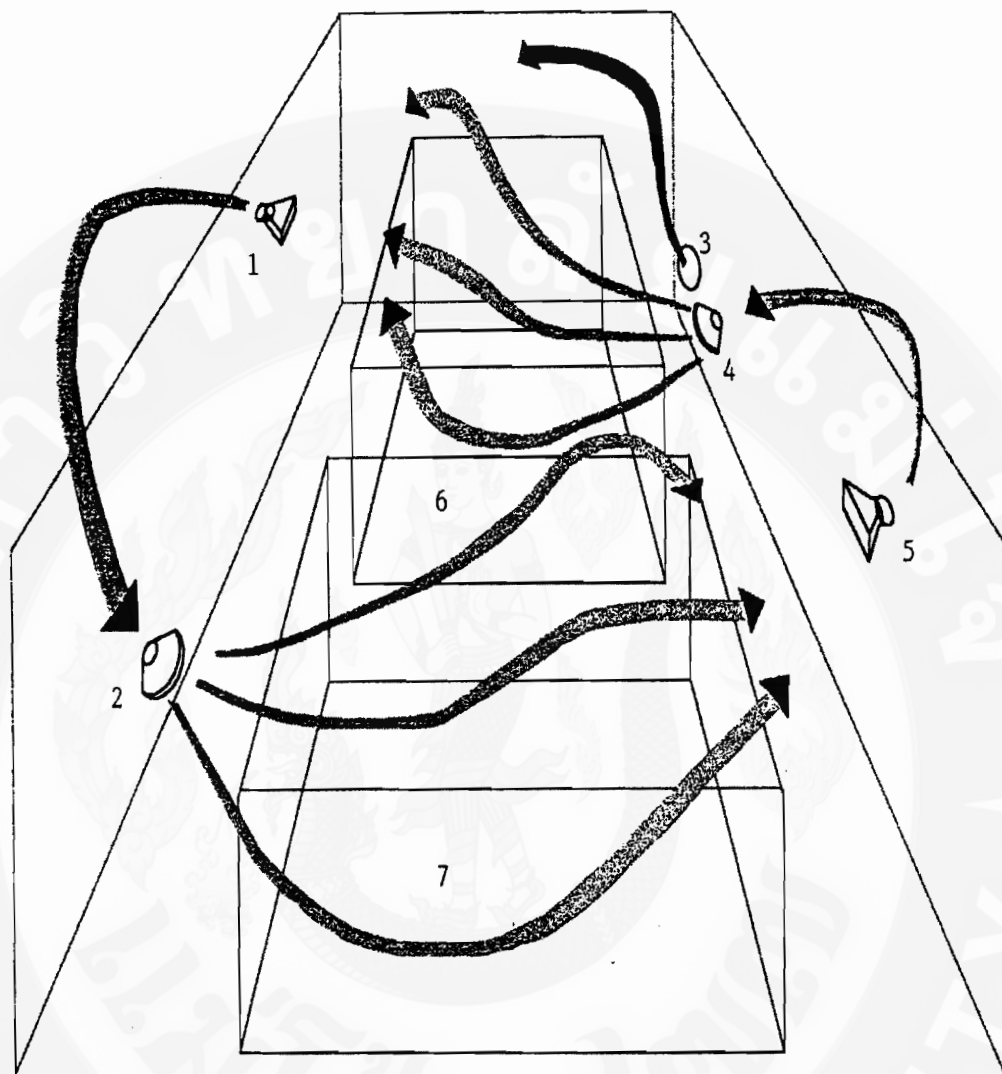
ท่อดูดแก๊สที่ดีจะต้องมีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิต (ภาพ 6) ปากทางเข้าอาจเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular shape) ทรงปากแตร (bellow shape) หรือทรงหางปลา (fish tale shape) ปากทางเข้าจะกว้างแล้วลดขนาดเข้าหาท่อดูด เพื่อเป็นการลดการสูญเสียแรงดูด ขนาดท่อดูดจะต้องสัมพันธ์กับอัตราการหมุนเวียนอากาศที่เหมาะสม วัสดุที่ใช้ทำต้องทนการกัดกร่อน ผิวเรียบ และทำความสะอาดได้ง่าย

3.2 หัวกระจายแก๊ส (diffuser) ลักษณะหัวกระจายแก๊สที่ดีจะต้องสามารถปล่อยแก๊สออกมาในลักษณะที่ก่อให้เกิดการกระจายตัวของแก๊สได้ค่อนข้างดี เพื่อที่จะทำให้เกิดการกระจายตัวของแก๊ส ต้องสามารถควบคุมทิศทาง และอัตราการไหลให้เหมาะสมกับปริมาณตะกร้าลำไยที่ต้องการรม (ภาพ 7)



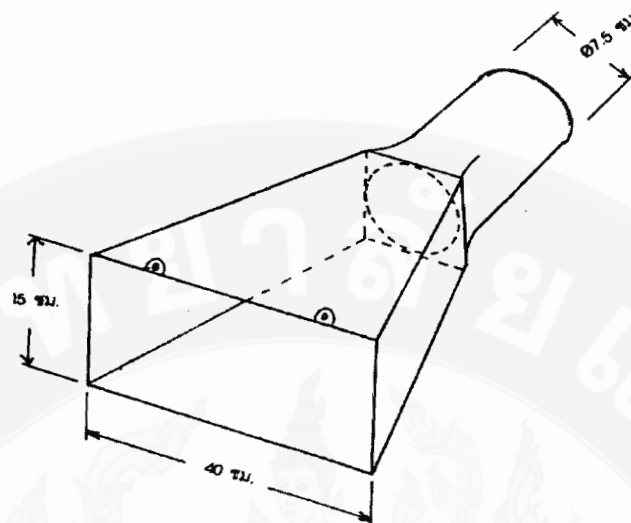
- A ท่อทางเข้าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
- B หัวกระจายก๊าซ
- C ท่อดูดก๊าซ
- D ประตู

ภาพ 4 การจัดเรียงตะกร้าใส่ไข่ในการรม SO_2 ในห้องขนาดเล็ก
ที่มา: สถาบันอาหาร (2541)

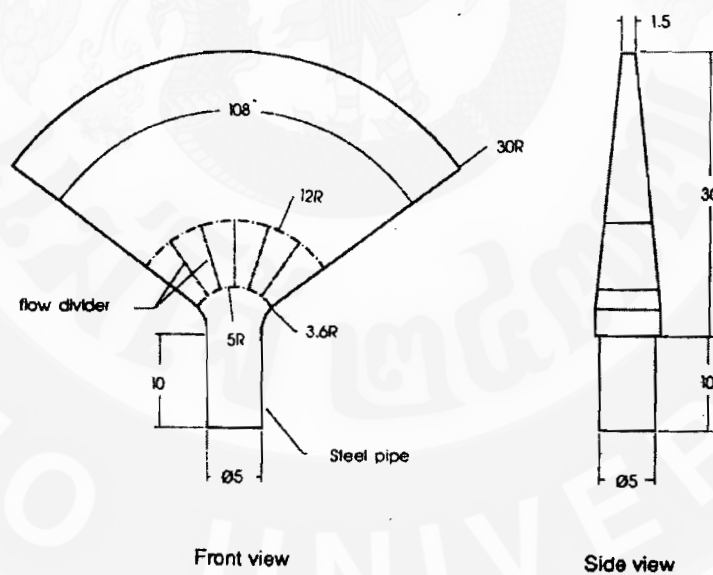


- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1 ท่อดูดก๊าซชุดที่ 1 | 5 ท่อดูดก๊าซชุดที่ 2 |
| 2 หัวกระจายก๊าซตัวที่ 1 | 6 ชั้นวางลำโพงกลุ่มที่ 1 |
| 3 ท่อส่งก๊าซจากเตาเผาถ่าน | 7 ชั้นวางลำโพงกลุ่มที่ 2 |
| 4 หัวกระจายก๊าซชุดที่ 2 | |

ภาพ 5 ตำแหน่งการติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในห้องรม และลักษณะการหมุนเวียนอากาศ
ที่มา: สถาบันอาหาร (2541)



ภาพ 6 ตัวอย่างหัวดูดแก๊ส SO_2 รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
ที่มา: สถาบันอาหาร (2541)



All dimensions in CM

ภาพ 7 หัวกระจายแก๊สรูปพัด
ที่มา: สถาบันอาหาร (2541)

3.3 พัดลม (Fan) มีหน้าที่หลักในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส SO₂ ที่ปล่อยและดูดภายในห้องรมโดยตรง การเลือกใช้พัดลมที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานซึ่งเกี่ยวข้องกับการเลือกกำลังของพัดลม ความเร็วรอบที่เหมาะสม พัดลมที่ผ่านการใช้งานมาได้ระยะหนึ่ง ควรได้รับการบำรุงรักษาพัดลมตลอดจนอุปกรณ์ในระบบทั้งหมดเพื่อให้พัดลมสามารถทำงานได้ตามปกติ

วิธีการคำนวณปริมาณผงกำมะถันที่ใช้สำหรับการรม SO₂

ปริมาณผงกำมะถันที่เหมาะสมกับปริมาณของผลลำไยที่ต้องการรม SO₂ ต้องใช้ในอัตราที่น้อยที่สุดแต่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการควบคุมโรคสูงที่สุด ซึ่งในผลลำไยแต่ละพันธุ์มีความสามารถในการดูดซับ SO₂ แตกต่างกัน ชิงชิง (2540) กล่าวว่าปริมาณการใช้ SO₂ ขึ้นอยู่กับความต้องการปริมาณ SO₂ ตกค้างสูงสุด (maximum residue level: MRL) เท่าใด ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ต้องการยืดอายุการเก็บรักษา และข้อกำหนดระหว่างประเทศคู่ค้า การคำนวณปริมาณกำมะถันที่ใช้เผาในการรม SO₂ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{น้ำหนักของ SO}_2 \text{ (กรัม)} = M + S \quad (1)$$

สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\text{น้ำหนักของ SO}_2 \text{ (กรัม)} = (W \times A) + (C \times F \times D) \quad (2)$$

กำหนดให้ M = ปริมาณ SO₂ ตกค้างสูงสุด (ppm)

S = ความเข้มข้นของ SO₂ ที่เหลือตกค้างภายในห้องหลังจากสิ้นสุดการรม (ppm)

W = น้ำหนักลำไยที่ต้องการรม (kg)

A = อัตราการดูดซึม SO₂ ของผลลำไย (0.66-0.80 g/kg)

C = ร้อยละความเข้มข้นของ SO₂ ในอากาศเมื่อสิ้นสุดการรม

F = ปริมาตรช่องว่างภายในห้อง (L)

D = ความถ่วงจำเพาะของ SO₂ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในห้องรม โดย

$$\text{ที่ } 25^\circ\text{C} \quad D = 2.618 \text{ g/L}$$

$$\text{ที่ } 27^\circ\text{C} \quad D = 2.601 \text{ g/L}$$

$$\text{ที่ } 30^\circ\text{C} \quad D = 2.575 \text{ g/L}$$

จากนั้น นำค่าน้ำหนักของ SO₂ ที่ได้มาหาน้ำหนักของ SO₂ ที่ต้องนำมาเผา โดยคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{น้ำหนักของกำมะถันที่ต้องนำมาเผา} = \frac{\text{น้ำหนักของ SO}_2 \text{ (g)}}{2} \quad (3)$$

การวิเคราะห์ปริมาณ SO₂ ตกค้าง

การวิเคราะห์ปริมาณ SO₂ ตกค้างจะต้องมีการตรวจสอบเป็นประจำหลังจากมีการรม เพื่อเป็นการควบคุมไม่ให้เกิดการตกค้างของ SO₂ เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด วิธีการวิเคราะห์ปริมาณ SO₂ ตกค้างสามารถใช้วิธี Modified Monier-Williams Method (สดศรี, 2535) เริ่มโดยการแกะเปลือกและเนื้อแล้วนำไปชั่งน้ำหนักก่อนที่จะบรรจุลงในขวดก้นกลมชนิดสองคอ (round bottom flask) แล้วประกอบชุดวิเคราะห์ SO₂ ดังภาพ 8 ในการวิเคราะห์ SO₂ ตกค้างจะใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 36-38 % เป็นตัวสกัดเอา SO₂ ออกจากตัวอย่างที่วิเคราะห์ในสภาพที่เป็นไอ และจะใช้แก๊สไนโตรเจนซึ่งทำหน้าที่เป็นแก๊สนำพา (carrier gas) โดยแก๊ส SO₂ จะถูกพาผ่านชุดควบแน่น (condensor) เพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวกลับมายังขวดก้นกลม ส่วนแก๊ส SO₂ จะถูกพาเข้าไปผสมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H₂O₂) จากนั้นจึงนำไปไทเตรท (titration) กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) และคำนวณหาปริมาณ SO₂ ตกค้างต่อไป

สารเคมีและวิธีการเตรียม

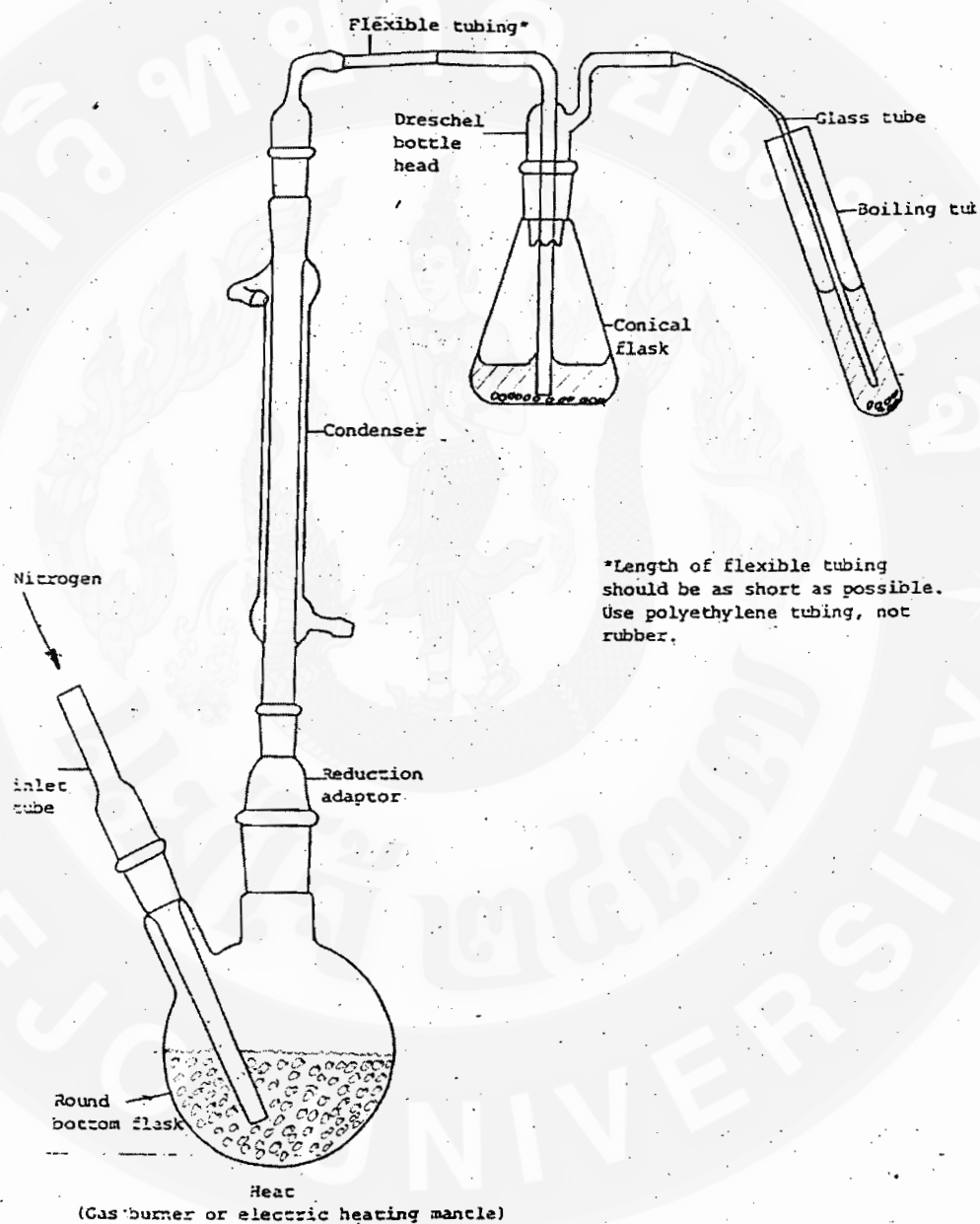
1. อินดิเคเตอร์ เป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย H₂O₂ กับ SO₂ ซึ่งอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณ SO₂ ประกอบด้วย methylene blue กับ methylred โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้

ชั่ง methylene blue และ methylred มาจำนวน 0.05 และ 0.10 g ตามลำดับ จากนั้นนำไปละลายในเอทานอล (ethanol) เข้มข้น 95 % จนกระทั่งได้ปริมาตร 100 ml

2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H₂O₂) เข้มข้น 3 %

เตรียมได้จาก H₂O₂ เข้มข้น 30 % โดยตวง H₂O₂ มา 100 mm มาเจือจางในน้ำกลั่น จนกระทั่งมีปริมาตร 1,000 mm จากนั้นหยดอินดิเคเตอร์ที่ได้จากข้อ 1 จนได้สารละลายเป็นสีม่วงอ่อน ซึ่งสารละลายที่ได้จากขั้นตอนนี้จะมีสภาพเป็นกรด ก่อนนำไปใช้ต้องปรับให้มีสภาพเป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เข้มข้น 0.1 N โดยหยดลงไปจนสารละลาย H₂O₂ สภาพเป็นกลางของสารละลายสามารถสังเกตได้จากสีของสารละลายเป็นสีเขียวอ่อน ๆ

สารละลาย H_2O_2 ที่เตรียมไว้ควรนำไปใช้ทันที หรือเก็บรักษาในตู้เย็นอุณหภูมิประมาณ 10°C และหลีกเลี่ยงการเก็บในที่มืด



ภาพ 8 ชุดอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้าง
ที่มา: จักรพงษ์ (2542)

3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เข้มข้น 0.01 และ 0.1 N

การเตรียม NaOH เข้มข้น 0.01 N ทำได้โดยการชั่งสาร NaOH มา 0.4 g จากนั้นละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1,000 L

การเตรียม NaOH เข้มข้น 0.1 N ทำเหมือนการเตรียม NaOH 0.01 N แต่ชั่งสาร NaOH มาจำนวน 0.4 g

หลังจากเตรียมสารละลาย NaOH ทั้งสองความเข้มข้นเสร็จแล้วให้นำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอน (standardization) โดยการไตเตรทกับสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.1 N ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลินเป็นอินดิเคเตอร์ จนถึงจุดยุติซึ่งสังเกตได้จากสารละลายจะเปลี่ยนจากสีใสเป็นสีชมพูอ่อน จากนั้นจึงนำไปคำนวณโดยใช้สูตรดังนี้

$$N_1 V_1 = N_2 V_2 \quad (4)$$

กำหนดให้	N_1	= ความเข้มข้นของ NaOH (N)
	N_2	= ความเข้มข้นของ HCl (N)
	V_1	= ปริมาณของ NaOH ที่ใช้ในการไตเตรท (ml)
	V_2	= ปริมาณของ HCl ที่ใช้ในการไตเตรท (ml)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้าง

- นำผลล้าโยที่ได้จากการสุ่มเก็บตัวอย่างในแต่ละตะกร้ามาประมาณ 10-15 ผล ทำการแกะผลล้าโยออกโดยแยกเปลือกและเนื้อออกจากกัน
- ชั่งน้ำหนักของเปลือกและเนื้อล้าโย บันทึกข้อมูลน้ำหนักของแต่ละตัวอย่าง
- นำตัวอย่างเปลือกและเนื้อใส่ในขวดก้นกลมชนิด 2 คอ แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปประมาณครึ่งหนึ่งของขวดก้นกลม
- ใส่กรดไฮโดรคลอริก(HCl) ความเข้มข้น 0.1 N ลงไปในขวดประมาณ 20 ml
- เท H_2O_2 เข้มข้น 30 % ลงในขวดรูปชมพู่ (conical flask) ขนาด 250 ml ประมาณ 100 ml และเท H_2O_2 ลงไปใน boiling tube ประมาณครึ่งหลอด
- ประกอบขวดก้นกลมชนิดสองคอ ขวดรูปชมพู่ และ boiling tube เข้ากับคอนเดนเซอร์ของชุดวิเคราะห์ SO_2
- สวมท่อ นำแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในขวดก้นกลม จากนั้นเปิดแก๊สให้มีอัตราไหลประมาณ 1 ฟองปุดต่อวินาที

8. เปิดน้ำไหลผ่านคอนเดนเซอร์
9. เปิดเตาไฟฟ้าให้ความร้อน
10. รอจนกระทั่งตัวอย่างในขวดก้นกลมเดือด แล้วต้มต่อไปประมาณ 50-60 นาที หากตัวอย่างมี SO_2 ตกค้างสารละลาย H_2O_2 ในขวดรูปชมพู่จะเปลี่ยนจากสีเขียวอ่อนเป็นสีชมพู
11. ปิดเตาให้ความร้อนและถอดท่อแก๊สในโตรเจนออก
12. นำสารละลาย H_2O_2 ที่ได้ในข้อ 10 ไปไตเตรทกับสารละลาย NaOH โดยตัวอย่างเปลือยจะไตเตรทกับ NaOH เข้มข้น 0.1 N ส่วนตัวอย่างเนื้อจะไตเตรทกับ NaOH เข้มข้น 0.01 N เมื่อถึงจุดยุติการไตเตรทจะได้สารละลายสีเขียวอ่อน
13. นำค่า NaOH ที่ได้มาคำนวณหาปริมาณ SO_2 ตกค้างได้ดังนี้

$$\text{ปริมาณ } \text{SO}_2 \text{ ตกค้าง (ppm)} = \frac{\text{N NaOH} \times \text{ml NaOH} \times 32 \times 1,000}{\text{Weight of sample (g)}} \quad (5)$$

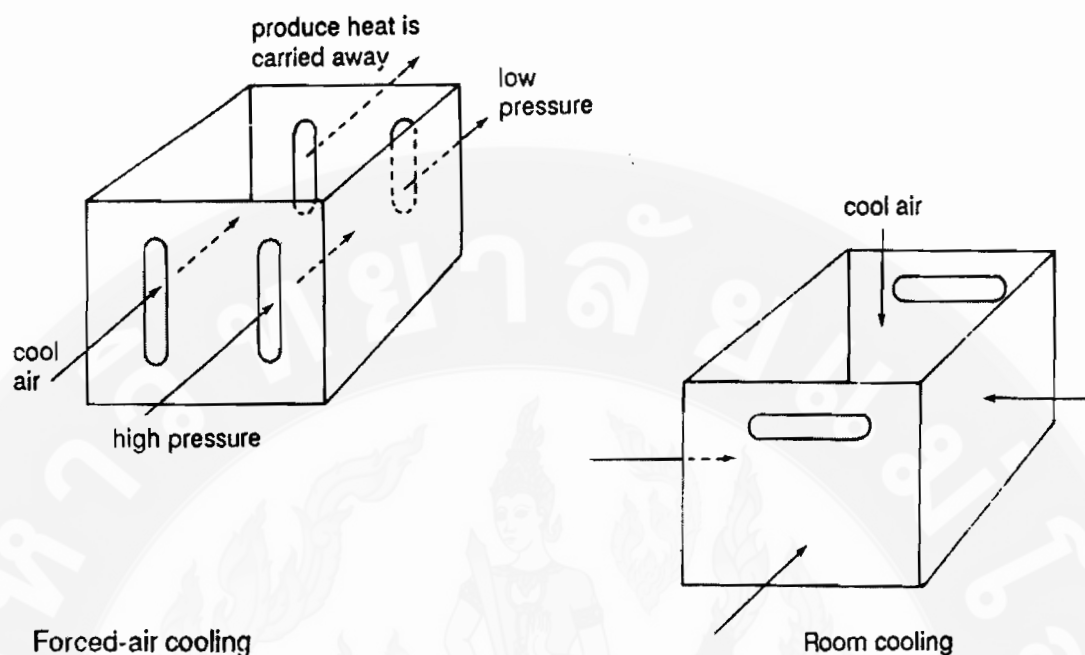
กำหนดให้ N NaOH = ความเข้มข้นของ NaOH (N)

ml NaOH = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ในการไตเตรท (ml)

ระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

ระบบ forced-air ถูกนำมาใช้ลดอุณหภูมิผลิตผลเชิงการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ. 1955 ที่รัฐแคลิฟอร์เนีย (Watkins, 1990) โดยใช้กับอุ้งนึ่งที่ส่งไปขายยังตลาดฟลอริดา การลดอุณหภูมิด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ จะแตกต่างกับระบบห้องเย็นทั่วไป คือ มีความแตกต่างระหว่างความดันทั้ง 2 ด้านของบรรจุภัณฑ์ ก่อให้เกิดการดึงอากาศให้ผ่านเข้าไปด้านใน จำเป็นต้องใช้ร่วมกับบรรจุภัณฑ์ที่ถูกรออกแบบให้มีช่องสำหรับให้อากาศไหลผ่าน โดยมีทิศทางการไหลที่แน่นอน (ภาพ 9) เป็นลักษณะการทำความเย็นที่ใช้ทั้งคุณสมบัติของการนำและการพาความร้อน ซึ่งแตกต่างกับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในห้องเย็นทั่วไปที่มักจะมีช่องว่างไม่เพียงพอให้อากาศ ทำความเย็นโดยการให้อากาศไหลผ่านรอบ ๆ ตัวผลิตผลเท่านั้น



ภาพ 9 เปรียบเทียบลักษณะบรรจุภัณฑ์ และหลักการทำความเย็นของระบบ หมุนเวียนอากาศแบบ บังคับกับห้องเย็นทั่วไป

ที่มา: Watkins (1990)

หลักการออกแบบระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

การออกแบบห้องสำหรับการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับนั้น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องพิจารณาจุดประสงค์ของการออกแบบ พร้อมทั้งศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียด ซึ่งข้อมูลเหล่านั้นจะนำไปสู่การกำหนดส่วนประกอบ การจัดวางองค์ประกอบ และการคำนวณ เช่น ขนาดห้อง ขนาดของพัดลมหมุนเวียนอากาศ และชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ เป็นต้น เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดและกับปริมาณผลผลิตที่ต้องการ (Watkins, 1990) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับออกแบบสามารถแยกออกได้ ดังนี้

1. ชนิดของผลผลิต เป็นข้อมูลที่ผู้ออกแบบจะต้องทราบเพื่อที่จะกำหนดสภาวะที่เหมาะสม และหลีกเลี่ยงสภาวะที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผลผลิตในกระบวนการ เช่น ระยะเวลาที่ใช้ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์หากอยู่ในสภาวะไม่เหมาะสม อาจเร่งให้กระบวนการเมตาบอลิซึมเร่งการคายน้ำ เกิดความสูญเสียต่อผลผลิตได้ (Thompson and Knutson, 1997)
2. น้ำหนักและปริมาณผลผลิต เป็นตัวกำหนดขนาดห้อง วัสดุโครงสร้างของห้อง รวมทั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น การเลือกกำลังพัดลม ความแข็งแรงของโครงสร้าง เป็นต้น

3. ชนิดของภาชนะบรรจุ ต้องเป็นภาชนะที่มีรูระบายอากาศเพื่อให้อากาศมีการหมุนเวียนเข้าสู่ผลิตผล โดยลักษณะของรูระบายอากาศอาจเป็นวงกลม หรือสี่เหลี่ยม เพื่อลดการอุดตันของรูระบายอากาศ ในกรณีของผลลำไยซึ่งมีลักษณะทรงกลมอาจเลือกบรรจุภัณฑ์ที่มีรูระบายอากาศเป็นสี่เหลี่ยม และภาชนะที่ใช้บรรจุผลลำไยสมควรมีขนาดพอดีกับปริมาณผลลำไยที่บรรจุในเชิงการค้า เพื่อลดการเกิดช่องว่างของอากาศ (air gap) ซึ่งอาจส่งผลให้อากาศที่ไหลผ่านในบรรจุภัณฑ์ลดลง

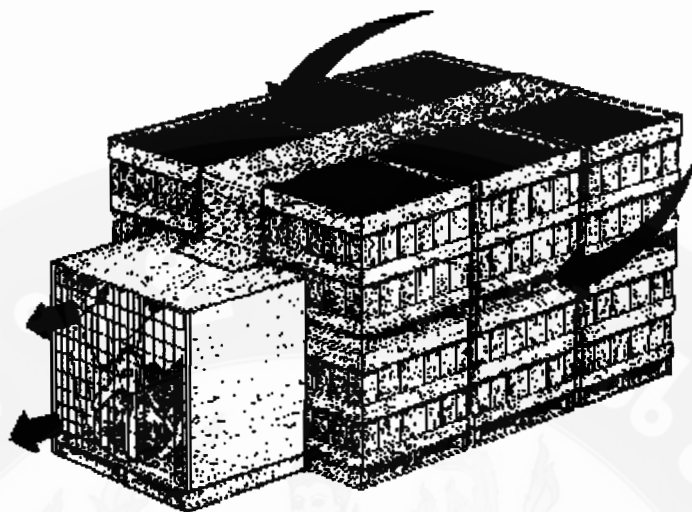
4. การจัดเรียง และการวางซ้อน หากไม่เหมาะสม อาจมีผลให้การหมุนเวียนอากาศภายในผลิตผลไม่ดีเท่าที่ควร นอกจากนั้นยังเป็นตัวกำหนดขนาดมิติของห้องได้อีกด้วย

5. วิธีการลำเลียงผลิตผล มีหลายวิธี เช่น การใช้รถยก (Forklift) รถบรรทุกเล็ก หรือรถลาก (Pallet jack) โดยมีข้อกำหนดเรื่องขนาดของสถานที่ที่เหมาะสม คือ ความกว้างอย่างน้อย 4.3, 2.7 และ 1.8 เมตร ตามลำดับ

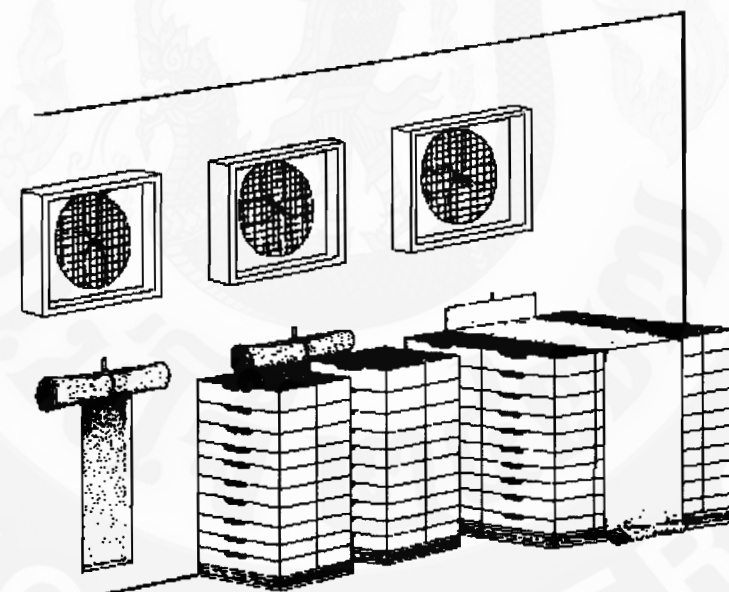
6. คุณสมบัติของอากาศภายในห้อง จะเป็นตัวกำหนดวัสดุที่ใช้สร้าง เช่น สำหรับอากาศที่มีคุณสมบัติเป็นกรด-ด่าง ความชื้นสูง ระดับของอุณหภูมิที่ปฏิบัติงาน วัสดุที่เลือกใช้จะต้องสามารถทนกัดกร่อนได้ดี เป็นต้น

การจัดเรียงบรรจุภัณฑ์สำหรับการลดอุณหภูมิด้วยระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

กระบวนการของระบบการทำความเย็นแบบบังคับอากาศ ทำได้โดยการบรรจุผลิตผลในบรรจุภัณฑ์ที่สามารถทำให้เกิดกระบายอากาศที่ดีจากนั้นจะนำไปจัดเรียง โดยแบ่งเป็น 2 แถว เว้นตรงกลางไว้สำหรับวางพัดลมดูดอากาศไว้ด้านใดด้านหนึ่ง จากนั้นใช้ผ้าใบคลุมเพื่อปิดช่องว่างจากพัดลมจนถึงอีกด้านของตะกร้าที่บรรจุผลิตผล อากาศจะถูกดูดผ่านตัวผลิตผลแล้วไปออกยังอีกด้านของพัดลม ดังนั้น จึงทำให้ผลิตผลได้สัมผัสกับอากาศได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งรูปแบบของการใช้ระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ ที่ใช้ทั่วไปมี 2 ลักษณะดังภาพ 10 (จักรพงษ์, 2542)



ก



ข

ภาพ 10 ภาพจำลองการจัดวางภาชนะบรรจุด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

(ก) แบบ tunnel (ข) แบบ coldwall

ที่มา: Boyette et al. (2004)

ความต้านทานการไหลของอากาศ

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ คือ ความต้านทานการไหลของอากาศ โดยแปรผันขึ้นอยู่กับอัตราการไหล การจัดเรียงผลิตภัณฑ์ และคุณสมบัติของตัวผลิตภัณฑ์ ความต้านทานนี้อาจบ่งบอกได้ถึงปริมาณอากาศที่จะไหลผ่านเข้าไปข้างในบรรจุภัณฑ์ โดยเริ่มจากสถานะที่มีความดันสูงด้านนอก (upstream) ก่อนจะลดลงเมื่อมีการไหลของอากาศผ่านเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ (downstream) แล้วผ่านเข้าสู่ตัวผลิตภัณฑ์อากาศ ความดันที่ดึงอากาศผ่านบรรจุภัณฑ์นี้ เรียกว่า เฮดสถิต (static head; H_{static}) นั่นเอง (Watkins, 1990)

จากการศึกษาของ Watkins (1990) พบว่า การใช้อัตราการไหลอากาศ 2.3 ลิตรต่อวินาทีต่อกิโลกรัม แล้วบังคับอากาศเย็นให้ไหลผ่านกล่องบรรจุเห็ด จะมีค่า H_{static} เพียง 1.2 มิลลิเมตรน้ำ (mm of water) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 5.7 ลิตรต่อวินาทีต่อกิโลกรัม ในขณะที่จำนวนกล่องเท่าเดิม จะทำให้มีค่า H_{static} เพิ่มขึ้นเป็น 15 ลิตรต่อวินาทีต่อกิโลกรัม ในลักษณะเดียวกัน ที่ระดับอัตราการไหลอากาศเท่าเดิม แต่เมื่อเพิ่มจำนวนกล่อง หรือระยะทางที่ดึงอากาศไหลผ่านเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้มีค่า H_{static} เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ด้วยเหตุนี้การเลือกพัดลมสำหรับระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ จะต้องทราบค่าความต้านทานของผลิตภัณฑ์ก่อน แล้วคำนึงถึงความสามารถในการต้านทานการไหลของอากาศด้วยเช่นกัน โดยพิจารณาได้จากค่า H_{static} ของพัดลมนั่นเอง

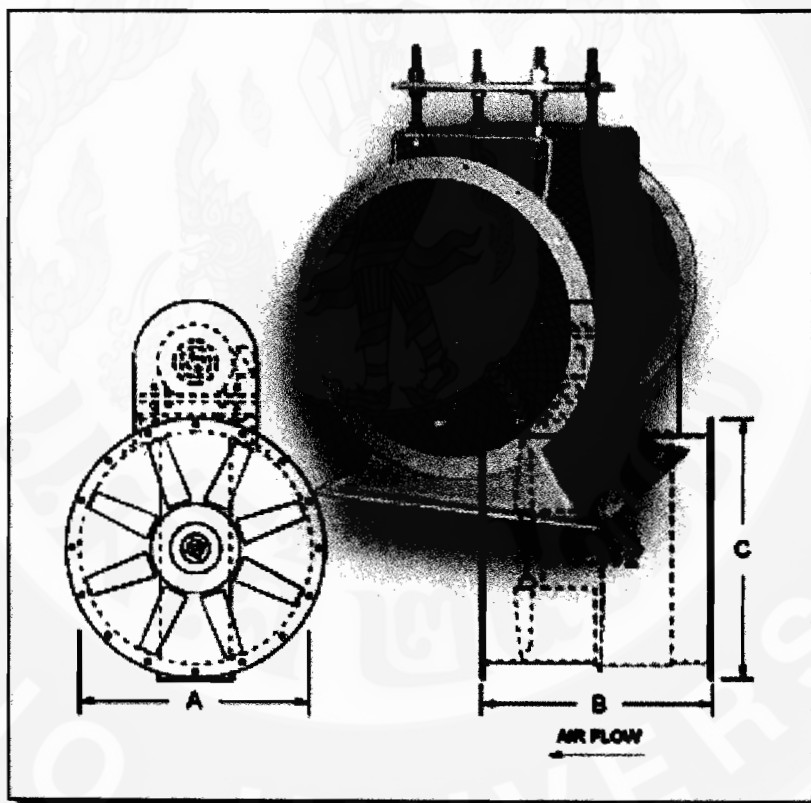
พัดลมที่นิยมใช้ในระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

ในปัจจุบันพัดลมถูกใช้ในงานด้านต่างมากมาย ในทางวิศวกรรมพัดลมมักถูกใช้ในเรื่องเกี่ยวกับ การอบแห้งวัสดุทางการเกษตร การระบายอากาศ การทำความเย็นในระบบปรับอากาศ การลำเลียงวัสดุ โดยพัดลมแต่ละชนิดก็มีลักษณะการทำงาน และประสิทธิภาพแตกต่างกันออกไป จึงได้มีการจำแนกพัดลมออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามลักษณะการไหลของลม และลักษณะการใช้งาน สำหรับการบังคับอากาศในการรม SO_2 ผลลำไยสดด้วยระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ พัดลมที่ใช้จะต้องมีลักษณะดังที่กล่าวมาแล้วในเรื่องส่วนประกอบที่สำคัญของระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ ดังนั้น พัดลมที่เหมาะสมในการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ มีอยู่ 2 ประเภท คือ แบบไหลตามแกน (axial flow fans) และแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal fans) ชนวัฒน์ (2548) ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของพัดลมทั้งสองชนิดไว้ ดังนี้

1. พัดลมแบบไหลตามแกน (axial flow fans) พัดลมชนิดนี้จะทำให้มีการไหลของลมในทิศทางที่ขนานกับแกนของพัดลม นิยมใช้มากในงานอุตสาหกรรม การพาณิชย์ ตลอดจนที่พักอาศัยทั่วไป พัดลมชนิดนี้มีความสามารถในการสร้างแรงดันสถิตได้ดี มีการไหลของอากาศใน

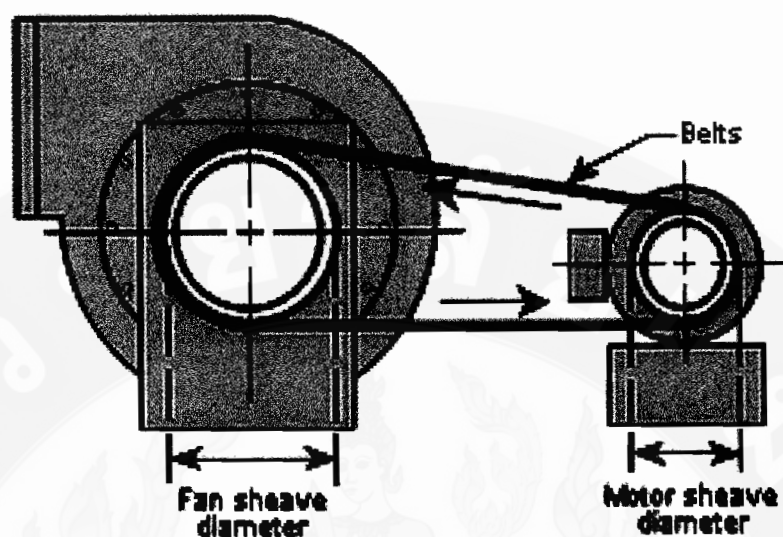
ลักษณะของการดึงอากาศ จึงมักจะถูกนำไปใช้ในการดูดอากาศในสถานที่ต่าง ๆ เพื่อระบายอากาศเสีย อากาศร้อน หรืออากาศที่เป็นพิษ (ภาพ 11)

2. พัดลมแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal fans) เป็นพัดลมที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งมีการไหลของอากาศในทิศทางเดียวกับรศมี พัดลมแบบนี้ประกอบด้วยใบพัดที่อยู่ในตัวเรือนดังภาพ 12 พัดลมแบบนี้จะทำงานโดยการดึงอากาศเข้าหาใบพัดในทิศทางขนานกับแกนของใบพัด จากนั้นอากาศจะถูกเหวี่ยงออกจากใบพัดในแนวรัศมี หรือในทิศตั้งฉากกับแกน พัดลมชนิดนี้สามารถสร้างแรงดันสถิตได้ค่อนข้างสูงภายในตัวเรือน โดยขึ้นอยู่กับขนาดความยาวของใบพัด หากพัดลมมีใบพัดยาวก็จะมีแรงดันสูงกว่าพัดลมที่มีใบพัดสั้นเมื่อเทียบระหว่างพัดลมที่ใช้ขนาดของมอเตอร์เท่ากัน เนื่องจากการใช้ใบพัดยาวจะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมากขึ้นนั่นเอง



ภาพ 11 พัดลมแบบไหลตามแกน

ที่มา: Metal Candling, Inc. (2006)



ภาพ 12 พัฒนแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

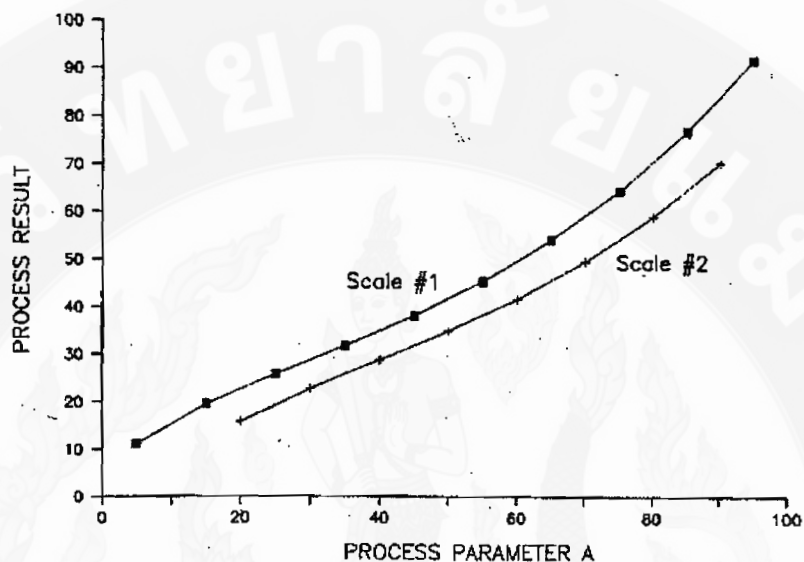
ที่มา: State Master, Inc. (2003)

การวิเคราะห์มิติ

การทดลองทางกลศาสตร์ของไหลในทางทฤษฎีบางกรณี อาจต้องมีการทดลองซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ได้ผลการทดลองครอบคลุมทั้งหมด แต่ในทางปฏิบัติอาจมีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น ระยะเวลาปฏิบัติงานที่จำกัด และค่าใช้จ่ายในการทดลองที่สูง โดยเฉพาะการทดลองที่มีขนาดใหญ่ มีจำนวนพารามิเตอร์หลายตัว จะต้องทำซ้ำจำนวนมากจึงจะได้ผลการทดลองครอบคลุมทุกด้าน เป็นต้น ดังนั้น การวิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) จึงถูกนำมาใช้เพื่อการลดจำนวนซ้ำของการทดลอง โดยการหาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ (dimensionless) จากนั้นจึงสามารถอธิบายปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องทำการทดลองซ้ำทั้งหมด (สมศักดิ์, 2547)

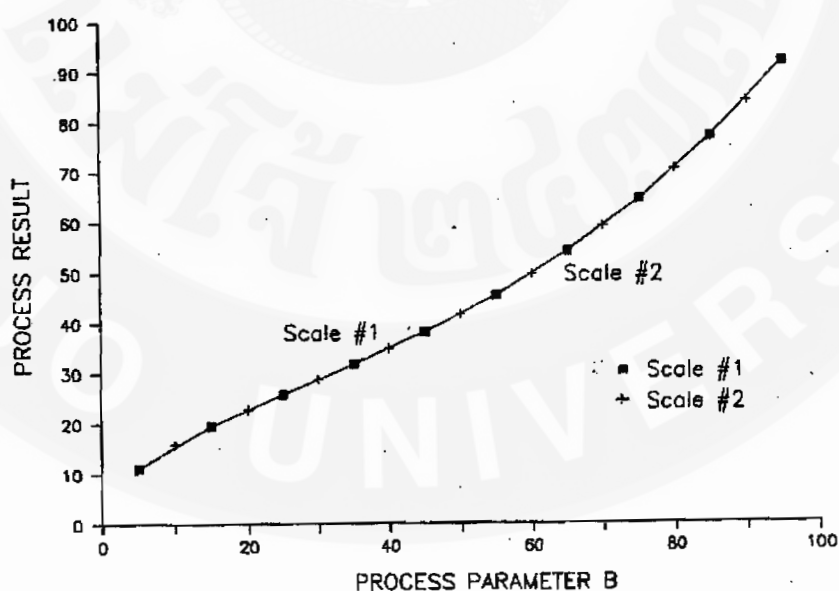
จากแนวคิดนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการขยายส่วน (scale-up) เนื่องจากการออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือในทางอุตสาหกรรม ที่มีขนาดใหญ่ ที่การออกแบบจะต้องมีการทดสอบ และปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ หลายครั้ง เมื่อการทดลองมีคุณสมบัติความคล้ายคลึง ได้แก่ ความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิต เชิงจลนศาสตร์ และเชิงพลวัต ดังนั้นการทดสอบอาจทำได้โดยการทดสอบในชุดทดสอบขนาดเล็กเพื่อลดข้อจำกัดต่าง ๆ ก่อนออกแบบและสร้างจริง ตัวอย่างจากภาพ 13 อธิบายได้ว่า ในกระบวนการเดียวกัน เมื่อขนาดของการทดลองเพิ่มขึ้น จะทำให้ผลลัพธ์

ออกมาแตกต่างกัน แต่เมื่อหาความสัมพันธ์ร่วมของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้หลักการวิเคราะห์มิติ จะทำให้สามารถอธิบายผลการทดลองที่เปลี่ยนไปของการทดลองทั้ง 2 ขนาดที่มีความคล้ายคลึงกัน ได้ดังภาพ 14



ภาพ 13 ผลที่ได้จากการทดลองกับกระบวนการที่มีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาด

ที่มา: Valentas et al. (1991)



ภาพ 14 ผลการทดลองที่เกิดจากการหาความสัมพันธ์ร่วมของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ของการทดลองทั้ง 2 ขนาด

ที่มา: Valentas et al. (1991)

การวิเคราะห์มิติจำเป็นจะต้องทราบความสัมพันธ์ร่วมของค่าพารามิเตอร์ ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การไหลทั้งหมด เพื่อที่จะจัดรูปให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ที่สามารถเข้าใจ และสะดวกในการนำไปใช้ สามารถทำได้โดยใช้ ทฤษฎีบทกึ่งแฮมไพ (Buckingham Pi theorem) ซึ่ง Law et al. (2006) ได้อธิบายไว้ว่า การวิเคราะห์มิติด้วยทฤษฎีบทกึ่งแฮมไพ เป็นการลดจำนวน และจัดกลุ่มพารามิเตอร์ให้อยู่ในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless number) ที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงปรากฏการณ์นั้น ๆ โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ซึ่งเรียกว่า มิติปฐมภูมิ แยกออกได้เป็น 2 มิติ ดังนี้

1. มิติ MLTt หมายถึง ปริมาณที่เกี่ยวกับมวล (mass; M) ความยาว (length; L) เวลา (time; T) และอุณหภูมิ (temperature; t)

2. มิติ FLTt หมายถึง ปริมาณที่เกี่ยวกับแรง (force; F) ความยาว (length; L) เวลา (time; T) และอุณหภูมิ (temperature; t)

วิธีการจัดกลุ่มตัวแปรให้อยู่ในรูปไร้มิติ (Frank M., 2008) มีทั้งหมด 5 ขั้นตอน สามารถหาได้ ดังนี้

1. กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การไหลเป็น v จำนวน n พารามิเตอร์ เขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$f(v_1, v_2, v_3, v_4, \dots, v_n) = 0$$

2. กำหนดมิติปฐมภูมิ เป็น MLTt หรือ FLTt และเขียนพารามิเตอร์ทั้งหมดให้อยู่ในรูปของมิติปฐมภูมิ (ตาราง 3)

3. จัดกลุ่มพารามิเตอร์จำนวน j ตัว ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะเป็นตัวประกอบอยู่ในกลุ่มตัวแปรไร้มิติทุกกลุ่ม และเมื่อจัดกลุ่มแล้วต้องมีมิติปฐมภูมิครบทุกมิติ โดยพยายามเลือกพารามิเตอร์ที่มักพบบ่อยในกลุ่มตัวแปรทางกลศาสตร์ของไหล เช่น ความหนาแน่น (ρ) ความเร็ว (v) เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) หรือความยาว (L) เป็นต้น

4. เพิ่มตัวแปรที่นอกเหนือจากที่เลือกไว้ในข้อ 4 ทีละตัว แทนค่าแล้วจัดรูปสมการจนได้ กลุ่มตัวแปรไร้มิติจำนวน $n - j$ กลุ่ม

5. ตรวจสอบความถูกต้องของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้ ด้วยมิติปฐมภูมิด้วยมิติ FLTt ในกรณีที่เลือกมิติปฐมภูมิข้างต้นเป็น MLTt และตรวจสอบด้วยมิติปฐมภูมิด้วยมิติ MLTt ในกรณีที่เลือกมิติปฐมภูมิข้างต้นเป็น FLTt

ตาราง 3 มิติของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล

Quantity	Symbol	Dimensions	
		$MLT\Theta$	$FLT\Theta$
Length	L	L	L
Area	A	L^2	L^2
Volume	V	L^3	L^3
Velocity	V	LT^{-1}	LT^{-1}
Acceleration	dV/dt	LT^{-2}	LT^{-2}
Speed of sound	a	LT^{-1}	LT^{-1}
Volume flow	Q	L^3T^{-1}	L^3T^{-1}
Mass flow	$\dot{m}$	MT^{-1}	FTL^{-1}
Pressure, stress	p, σ, τ	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Strain rate	$\dot{\epsilon}$	T^{-1}	T^{-1}
Angle	θ	None	None
Angular velocity	ω, Ω	T^{-1}	T^{-1}
Viscosity	μ	$ML^{-1}T^{-1}$	FTL^{-2}
Kinematic viscosity	ν	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}
Surface tension	γ	MT^{-2}	FL^{-1}
Force	F	MLT^{-2}	F
Moment, torque	M	ML^2T^{-2}	FL
Power	P	ML^2T^{-3}	FLT^{-1}
Work, energy	W, E	ML^2T^{-2}	FL
Density	ρ	ML^{-3}	FT^2L^{-4}
Temperature	T	Θ	Θ
Specific heat	c_p, c_v	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$
Specific weight	γ	$ML^{-2}T^{-2}$	FL^{-3}
Thermal conductivity	k	$MLT^{-3}\Theta^{-1}$	$FT^{-1}\Theta^{-1}$
Expansion coefficient	β	Θ^{-1}	Θ^{-1}

ที่มา: White (2008)

การอธิบายการไหลด้วยหลักการวิเคราะห์มิติ จะได้กลุ่มตัวแปรไร้มิติจำนวนมาก และมักจะมี ความหมายทางกายภาพ เช่น แรงที่เกิดจากความหนืด ความดัน ความเฉื่อย แรงโน้มถ่วง โลก แรงตึงผิว เป็นต้น ซึ่งกลุ่มตัวแปรไร้มิติบางกลุ่มก็มักนิยมนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรม การไหลอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ตัวเลขออยเลอร์ (Eu) ตัวเลขฟรูด (Fr) และอื่น ๆ อีกหลายตัว แสดงได้ดังตาราง 4 การนำไปใช้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการไหลนั้น ๆ และเงื่อนไขของการไหลที่สนใจ

ตาราง 4 กลุ่มตัวแปรไร้มิติที่นิยมใช้อธิบายพฤติกรรมการไหล

Parameter	Definition	Qualitative ratio of effects	Importance
Reynolds number	$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$	$\frac{\text{Inertia}}{\text{Viscosity}}$	Almost always
Mach number	$Ma = \frac{U}{a}$	$\frac{\text{Flow speed}}{\text{Sound speed}}$	Compressible flow
Froude number	$Fr = \frac{U^2}{gL}$	$\frac{\text{Inertia}}{\text{Gravity}}$	Free-surface flow
Weber number	$We = \frac{\rho U^2 L}{Y}$	$\frac{\text{Inertia}}{\text{Surface tension}}$	Free-surface flow
Rossby number	$Ro = \frac{U}{\Omega_{\text{earth}} L}$	$\frac{\text{Flow velocity}}{\text{Coriolis effect}}$	Geophysical flows
Cavitation number (Euler number)	$Ca = \frac{p - p_v}{\rho U^2}$	$\frac{\text{Pressure}}{\text{Inertia}}$	Cavitation
Prandtl number	$Pr = \frac{\mu c_p}{k}$	$\frac{\text{Dissipation}}{\text{Conduction}}$	Heat convection
Eckert number	$Ec = \frac{U^2}{c_p T_0}$	$\frac{\text{Kinetic energy}}{\text{Enthalpy}}$	Dissipation
Specific-heat ratio	$k = \frac{c_p}{c_v}$	$\frac{\text{Enthalpy}}{\text{Internal energy}}$	Compressible flow
Strouhal number	$St = \frac{\omega L}{U}$	$\frac{\text{Oscillation}}{\text{Mean speed}}$	Oscillating flow
Roughness ratio	$\frac{\epsilon}{L}$	$\frac{\text{Wall roughness}}{\text{Body length}}$	Turbulent, rough walls
Grashof number	$Gr = \frac{\beta \Delta T g L^3 \rho^2}{\mu^2}$	$\frac{\text{Buoyancy}}{\text{Viscosity}}$	Natural convection
Rayleigh number	$Ra = \frac{\beta \Delta T g L^3 \rho c_p}{\mu k}$	$\frac{\text{Buoyancy}}{\text{Viscosity}}$	Natural convection
Temperature ratio	$\frac{T_w}{T_0}$	$\frac{\text{Wall temperature}}{\text{Stream temperature}}$	Heat transfer
Pressure coefficient	$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^3}$	$\frac{\text{Static pressure}}{\text{Dynamic pressure}}$	Aerodynamics, hydrodynamics
Lift coefficient	$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A}$	$\frac{\text{Lift force}}{\text{Dynamic force}}$	Aerodynamics, hydrodynamics
Drag coefficient	$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A}$	$\frac{\text{Drag force}}{\text{Dynamic force}}$	Aerodynamics, hydrodynamics
Friction factor	$f = \frac{h_f}{(V^2/2g)(L/d)}$	$\frac{\text{Friction head loss}}{\text{Velocity head}}$	Pipe flow
Skin friction coefficient	$c_f = \frac{\tau_{\text{wall}}}{\rho V^2/2}$	$\frac{\text{Wall shear stress}}{\text{Dynamic pressure}}$	Boundary layer flow

ที่มา: White (2008)

การออกแบบระบบหมุนเวียนอากาศ

สมการแบร์นูลลี (Bernoulli equation) คือ สมการพลังงานกลสำหรับอธิบายการไหลของของไหล ซึ่งในระบบของการไหลของอากาศจะเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ เช่น เครื่องสูบลม หรือ พัดลม เป็นการอธิบายการไหลในรูปของการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม (ASHRAE, 2001) โดยสมการ

ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเสดความดัน เสดความเร็ว และเสดระดับความสูง โดยค่าเสดแต่ละค่ามีหน่วยเป็น เมตรของไหล สมการแบร์นูลลี เขียนได้ดังนี้

$$\frac{v^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} + gz = \text{Constant} \quad (6)$$

โดย v = ความเร็วในการไหลของอากาศ (m/s)

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (Kg/ m³)

g = ค่าคงที่แรงโน้มถ่วง เท่ากับ 9.81 m/s²

z = ระดับความสูงจากระดับอ้างอิงของพัดลม (m)

เมื่อกำหนดให้ความหนาแน่นของของไหลมีค่าคงที่ สามารถจัดรูปและเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{\overline{V}^2}{2g} + z = \text{Constant} \quad (7)$$

การออกแบบระบบหมุนเวียนอากาศอาจทำได้โดย การคิดค่าการสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบที่สนใจ ซึ่งเกิดจากการไหลผ่านเส้นท่อ ข้อต่อ ข้องอ ข้อลด ฯ (มนตรี, 2545) หรือค่าความดันสูญเสียทั้งหมดในช่วงที่มีการไหล ซึ่งรวมเรียกว่า ความดันตกคร่อมระบบ (Pressure drop; ΔP) แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การสูญเสียจากแรงเสียดทาน (friction losses) และการสูญเสียจากการเคลื่อนที่ของของไหล (dynamic losses) อธิบายได้ดังนี้

การสูญเสียจากแรงเสียดทาน (friction losses) คือ ค่าการสูญเสียความดัน หรือเสดสูญเสียอันเนื่องมาจากความเสียดทาน สามารถหาได้โดยสมการของ Darcy-Weisbach ซึ่งสามารถใช้ได้ดีในการวิเคราะห์การไหลที่เป็นแบบราบเรียบ (Laminar) การไหลที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วน (Transition) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ดังนี้

$$\Delta P_f = \frac{1000 f L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad (8)$$

โดย f = ค่าตัวประกอบความเสียดทาน

L = ความยาวท่อ (m)

D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม (mm)

V = ความเร็วในการไหลของอากาศ (m/s)

ρ = ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

การพิจารณาค่า f จากสมการของ Darcy-Weisbach นอกจากจะขึ้นอยู่กับความขรุขระภายในท่อแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแรงเสียดและแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล หรือเรียกว่า ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number; Re) อีกด้วย สำหรับการไหลแบบ Laminar ($\text{Re} < 2,000$) ค่า f จะเท่ากับ $64/\text{Re}$ และไม่ขึ้นอยู่กับความขรุขระภายในท่อ ในกรณีที่ $2,000 < \text{Re} < 4,000$ จัดว่าเป็นการไหลแบบ Transition ซึ่งไม่สามารถกำหนดค่า Re ได้ แต่เมื่อการไหลเป็นแบบ Turbulent ($\text{Re} > 10,000$) ค่า f จะขึ้นอยู่กับความขรุขระสัมบูรณ์ (ε) ของผิวท่อเท่านั้น (ชนวิวัฒน์, 2548) จึงสามารถคำนวณค่า f ได้จากสมการของ Colebrook ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (9)$$

แต่เนื่องจากสมการที่ 9 มีตัวแปร $\sqrt{f}$ อยู่ทั้งสองข้างสมการ ดังนั้น อาจคำนวณค่า f ได้จากสมการของ Haaland equation ในปี 1983 ซึ่งมีรูปสมการที่ง่ายกว่า โดยมีค่าแตกต่างจากสมการ 9 ไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ (Yunus and John, 2006) ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -1.8 \log \left[\frac{6.9}{\text{Re}} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (10)$$

การสูญเสียจากการเคลื่อนที่ของของไหล (dynamic losses) คือ การสูญเสียความดันอันเนื่องมาจากการไหลผ่านเส้นท่อ ข้อต่อ ข้องอ วาล์ว ข้อลด ข้อเพิ่ม และอุปกรณ์ประกอบท่อ เป็นต้น การสูญเสียความดันเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ประกอบท่อต่าง ๆ เกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์ไร้มิติ (dimensionless coefficient) หาได้จาก

$$C = \frac{\Delta P_j}{(\rho V^2 / 2)} = \frac{\Delta P_j}{P_v} \quad (11)$$

โดย C = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่อุปกรณ์ใด ๆ

ΔP_f = ความดันสูญเสีย (Pa)

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

V = ความเร็วในการไหลของอากาศ (m/s)

P_v = แรงดันจากความเร็วของการไหล (Pa)

การคำนวณหาความดันสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในระบบ เขียนได้เป็น

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{friction} + \Delta P_{Fitting} + \Delta P_{equip} \quad (12)$$

จากสมการ 8 และ 11 สามารถจัดรูปสมการได้ใหม่เป็น

$$\Delta P = \left(\frac{1000 f L}{D_h} + \Sigma C \right) \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) \quad (13)$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กรรม SO_2 เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้

อภिरดา (2548) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาลำไยสดที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยอุณหภูมิ 5 ± 1 และ 10 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ผลปรากฏว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 ± 1 องศาเซลเซียส สามารถชะลอการสูญเสียน้ำหนัก และลดการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกได้ดีกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 ± 1 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิในการเก็บรักษาทั้งสองระดับ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในผลลำไย ได้แก่ ค่า pH ของเปลือกและเนื้อ ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิงและปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณสารประกอบฟีนอล และกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส อย่างไรก็ตาม พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 ± 1 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณ SO_2 ตกค้างมากกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 ± 1 องศาเซลเซียส

Harvey et al., (1988) ได้ทำการออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับการรม SO_2 อุ่น โดยใช้วัสดุที่สามารถดูดซับ SO_2 ได้ 3 ชนิด คือ ถังไม้ (wood/kraft veneer boxes ,WKV) expanded polystyrene foam boxes (EPF) และ บรรจุในกล่องกระดาษ พบว่า ทั้ง 3 ชนิด ทำให้มีปริมาณ SO_2

ตกค้างในองุ่นเท่ากับ 2.3 1.8 และ 1.0 $\mu\text{g/g}$ สามารถลดการนำเข้าขององุ่นได้ และยังมีปริมาณ SO_2 ตกค้างไม่เกินตามที่กำหนดไว้ คือ 10 $\mu\text{g/g}$

Han et al. (2001) ศึกษาผลของการรม SO_2 ที่มีต่อคุณภาพโดยรวมของผลลำไย ระหว่างเก็บรักษาในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่า ก๊าซ SO_2 สามารถลดการเปลี่ยนสีของเปลือกได้ และไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงวิตามินซี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ แต่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดที่สามารถไทเทรตได้ การเก็บรักษาผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สามารถรักษาคุณภาพของลำไยสดได้ดีในช่วงเริ่มต้นของการเก็บรักษา และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลลำไยสดได้นานขึ้น เมื่อเทียบกับผลลำไยที่ไม่ผ่านการรม SO_2

Lin et al. (2001) นำลำไยสดมาผ่านกระบวนการยืดอายุการเก็บรักษา เช่น การจุ่มลำไยในซัลเฟอร์ การรมด้วยก๊าซ SO_2 จากนั้น ทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลลำไยในห้องเย็น ที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส นาน 46 วัน จึงนำออกมาศึกษา ผลการศึกษาพบว่า อัตราการหายใจของผลลำไยลดลงอย่างรวดเร็วในระหว่างการเก็บรักษาในอุณหภูมิเย็น และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากนำออกมาวางที่อุณหภูมิห้อง ผลลำไยที่ผ่านการรม สามารถรักษาสีผิว และคุณภาพได้ดี แต่ผลลำไยที่ผ่านการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ร่วมกับการใช้สารยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะสามารถรักษาคุณภาพสำหรับการวางจำหน่ายได้ 100 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนำออกมาไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 78 ชั่วโมง

Franck et al., (2005) ทำการศึกษาการใช้ SO_2 ในการป้องกันการเข้าทำลายของเชื้อ *Penicillium expansum* ในผลองุ่น โดยการใส่แผ่น $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ เป็นตัวปลดปล่อยแก๊ส SO_2 ลงไปในถุง PE ที่บรรจุองุ่น มีระดับของอากาศ 0.3 - 2 % ซึ่งมีการใช้แผ่นปลดปล่อย SO_2 ที่มีความเข้มข้นต่างกัน ได้แก่ 0.85 g kg^{-1} $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ (G1) และ 1.22 $\text{g Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ (G2) พบว่า ทั้งสองระดับความเข้มข้นสามารถป้องกันการเข้าทำลายของเชื้อ *Penicillium expansum* ในผลองุ่นได้ แต่ก็แนะนำให้ใช้ G2 เนื่องจากสามารถป้องกันเชื้อ *B. cinerea* ได้อีกด้วย แต่มีข้อควรระวัง คือ การใช้แผ่นปลดปล่อย SO_2 G2 อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อองุ่นได้ หากถุงที่ใช้บรรจุองุ่นมีระดับของอากาศมากขึ้น (ประมาณ 2 %)

Jareonkit et al. (2008) ทำการศึกษาวิธีในการลดปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยสดที่ผ่านการรม SO_2 หลังจากเก็บเกี่ยวมาแล้ว โดยการใช้ น้ำที่มีอุณหภูมิ 0 5 และ 23 องศาเซลเซียส แบบไหลผ่าน และแบบแช่ให้ท่วม กับผลลำไยสดที่ผ่านการรม SO_2 มาแล้วไม่เกิน 24 ชั่วโมง นาน 5-10 นาที พบว่า การล้าง SO_2 โดยการให้น้ำไหลผ่านจะลดปริมาณ SO_2 ได้ดีกว่าแบบแช่น้ำ อุณหภูมิของน้ำทั้ง 3 ระดับ ไม่มีผลต่อการลดปริมาณการตกค้างของ SO_2 แต่การล้างเป็นเวลา 5

นาที่ จะทำให้ปริมาณ SO_2 ตกค้างลดลงโดยไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพ และอายุการเก็บรักษาผล
ลำไยสดที่ผ่านการรม SO_2

การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

จักรพงษ์ และคณะ (2550) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการรม SO_2 ผลลำไยสดพันธุ์
ดอ ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air กับแบบบังคับ พบว่า การหมุนเวียนอากาศแบบ
บังคับ จะทำให้มีการหมุนเวียนอากาศผ่านเข้าไปในตะกร้าบรรจุลำไยได้ดีกว่าการหมุนเวียนอากาศ
ด้วยระบบ circulating-air ซึ่งมีการหมุนเวียนภายในตะกร้าที่บรรจุลำไยต่ำ และบางจุดอากาศไม่
สามารถผ่านเข้าไปภายในตะกร้าลำไยได้เลย อีกทั้งยังพบว่า การใช้ระบบการหมุนเวียนอากาศแบบ
บังคับ ยังสามารถลดความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 ลงได้ 5 เท่า โดยยังสามารถรักษาคุณภาพ และอายุ
การเก็บรักษาได้เช่นเดียวกันเมื่อเทียบกับการรมด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบเดิม (12,000 ppm)

Sadashive et al. (1997) ได้พัฒนาและสร้างแบบจำลองการใช้ระบบหมุนเวียน
อากาศแบบบังคับกับอาหารที่มีรูปทรงกลม โดยติดตั้งพัดลมดูดอากาศไว้ด้านบนของบรรจุภัณฑ์
อาหารที่จัดเรียงซ้อนกันให้มีรูปทรงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วบังคับอากาศเย็นให้ไหลจากด้านล่าง
ผ่านกองบรรจุภัณฑ์ทั้งหมดแล้วออกทางด้านบนสุดของชั้นที่จัดเรียง จากนั้นทำการสร้าง
แบบจำลองโดยอาศัยกฎการถ่ายเทพลังงาน การถ่ายเทความร้อนและมวล โดยใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอ
เรนเชียล ซึ่งทำการศึกษาในการจัดเรียงหลายรูปแบบ ผลจากการศึกษาพบว่า การทำความเย็น
แตกต่างกันตามคุณสมบัติของอากาศที่ไหลผ่านชั้นบรรจุภัณฑ์ และระยะเวลาที่ใช้ โดยแบบจำลอง
จะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของกระบวนการทำความเย็นได้ดี เมื่อกำหนดระยะเวลาที่ใช้ใน
กระบวนการ และอุณหภูมิที่ต้องการต่อมวลเฉลี่ยของอาหารที่แน่นอน

Thompson and Knutson (1997) ศึกษาการลดอุณหภูมิस्टรอเบอร์ด้วยระบบ
หมุนเวียนอากาศแบบบังคับ โดยทำการออกแบบตะกร้าสำหรับบรรจุสตรอเบอร์ที่มีพื้นที่ระบาย
อากาศโดยรอบตะกร้าต่างกัน 5 แบบ โดยมีช่องระบายอากาศด้านข้าง 35, 13, 7, 5 และ 0 %
ตามลำดับ และมีช่องระบายอากาศด้านล่าง 31, 10, 6, 4 และ 0 % ตามลำดับ พบว่าตะกร้า 2 แบบ
แรก (ช่องระบายอากาศด้านข้าง 35 และ 13 % ช่องระบายอากาศด้านล่าง 31 และ 10 % ตามลำดับ)
จะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิน้อยกว่า 70 และ 90 นาที ตามลำดับ ซึ่งใช้นเวลาน้อยกว่าแบบอื่น ๆ ที่ใช้
เวลาในการลดอุณหภูมินานกว่า 110 นาที

Fraser (1998) ทำการออกแบบระบบการลดอุณหภูมิของผัก และผลไม้ด้วยการ
หมุนเวียนอากาศแบบบังคับ โดยแบ่งผักและผลไม้ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 มีการเสื่อมสภาพ
เร็วมาก ได้แก่ หน่อไม้ฝรั่ง บรอกคอลลี ผักกาดใบ ผักขม ข้าวโพดหวาน และเห็ด กลุ่มที่ 2 มีการ

เสื่อมสภาพเร็ว ได้แก่ บลูเบอร์รี ราสเบอร์รี สตรอเบอร์รี เชอรี่ กะหล่ำดอก ถั่วแขก และผักกาดขาว กลุ่มที่ 3 มีการเสื่อมสภาพเร็วปานกลาง ได้แก่ แอปเปิล กะหล่ำปลี แคนตาลูป ผักชีฝรั่ง ท้อ พลัม และพริกหยวก พบว่าในการลดอุณหภูมิด้วยระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับพักและผลไม้นี้แต่ละกลุ่ม จะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิถึง 7/8 ของเวลาทำความเย็นทั้งหมด ดังนี้ 0.75 ถึง 1.5 ชั่วโมง สำหรับผักผลไม้กลุ่มแรก 1 ถึง 2.5 ชั่วโมง สำหรับผักและผลไม้กลุ่มที่ 2 และ 2 ถึง 6 ชั่วโมง สำหรับผักและผลไม้กลุ่มที่ 3

Martinez-Romero et al., (2003) ทดลองใช้ระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับกับพลัม (*Prunus salicina* Lindl.) พบว่าสามารถลดการหายใจของพลัมอันเป็นสาเหตุของความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การสูญเสียน้ำหนัก ความแน่นเนื้อ การเปลี่ยนแปลงสี ตลอดจนช่วยยืดอายุการวางจำหน่ายได้อีกด้วย

Agar et al. (2006) ศึกษาผลของระยะสุกแก่ และการใช้ระบบลดอุณหภูมิแบบบังคับอากาศ ที่มีต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลแอปริคอตพันธุ์ *Precoce de Tyrinthe* โดยเก็บเกี่ยวในขณะที่ผลแก่เต็มที่ และขณะที่ผลกำลังเริ่มสุก จากนั้นนำผลแอปริคอตที่เก็บเกี่ยวมาทำให้เย็นด้วยระบบทำความเย็นแบบบังคับอากาศ ด้วยอัตราการไหลอากาศ 600 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่า ผลแอปริคอตที่ผ่านการลดอุณหภูมิด้วยระบบบังคับอากาศ สามารถยืดอายุการเก็บรักษา และรักษาคุณภาพของผลแอปริคอตได้ทั้ง 2 ระยะสุกแก่ นอกจากนี้ยังช่วยลดระยะเวลาในการทำความเย็นลงได้โดยใช้เวลา 86-225 นาที เมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบเดิมที่ต้องใช้เวลาถึง 431 นาที

Ferrua and Singh (2009) ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของระบบการลดอุณหภูมิด้วยการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในบรรจุภัณฑ์ขายปลีกของสตรอเบอร์รี โดยอาศัยกฎการอนุรักษ์มวล โหมดันต์ และพลังงาน พบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการกระจายตัวของอากาศ คือ โครงสร้างและรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ พบว่า $75 \pm 2\%$ ของอัตราการไหลจะเคลื่อนตามช่องว่างของการจัดเรียง และ $46 \pm 2\%$ จะผ่านเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ โดยมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านนอกสุด และในสุดที่อยู่ตรงข้ามกันตามทิศทางการไหลของอากาศ เท่ากับ 2.4 และ 8.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยผู้วิจัยยังกล่าวว่า การวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้นี้จะช่วยให้สามารถออกแบบระบบการลดอุณหภูมิด้วยการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับของผลผลิตทางพืชสวนได้หลายชนิด

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีที่ใช้ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย พร้อมด้วยรายละเอียด โดยการวิจัยแยกออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ 1. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม 2. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และ 3. เป็นการออกแบบห้องรม SO₂ ผลลัาไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ พร้อมทั้งทดสอบ โดยใช้ตะกร้าบรรจุผลลัาไยแตกต่างกัน 2 รูปทรง คือ ตะกร้าลัาไยที่มีรูปทรงแบบสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีรายละเอียดดังนี้

อุปกรณ์

1. พัดลมแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal fan) ใช้กระแสไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ขนาด 3 แรงม้า จำนวน 2 ตัว
2. ชุดอุปกรณ์ปรับรอบมอเตอร์ ยี่ห้อ Delta รุ่น VFR045 FD
3. ชุดอุปกรณ์ปรับรอบมอเตอร์ ยี่ห้อ Delta รุ่น VFD055 F43D
4. เครื่องวัดลม ยี่ห้อ TESTO รุ่น 400 ใช้หัวเซนเซอร์แบบ hot-bulb
5. เครื่องวัดความดันอากาศ ยี่ห้อ TESTO รุ่น 454
6. ท่อลมสำหรับจัดเรียงตะกร้าลัาไยผนังท่อเป็นเป็นผ้าใบ จำนวน 1 ชุด
7. ตะกร้าสำหรับบรรจุผลลัาไยสดรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู จำนวน 60 ตะกร้า
8. ตะกร้าสำหรับบรรจุผลลัาไยสดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จำนวน 50 ตะกร้า
9. แท่นรอง (pallet)
10. แก๊ส SO₂ จากถังอัดความดัน
11. ชุดวิเคราะห์ SO₂ ตกค้างแบบ Monier-William method
12. เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP2100S
13. กล้องถ่ายภาพแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Nikon รุ่น coolpix s9
14. โปรแกรม Microsoft Excel™
15. โปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 15

สารเคมี

1. อินดิเคเตอร์ ที่เป็นส่วนประกอบของ methylene blue กับ methylred
2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) เข้มข้น 3 %
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เข้มข้น 0.01 และ 0.1 N
4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.1 N
5. น้ำกลั่น

วิธีดำเนินการทดลอง

การศึกษาความดันตกคร่อมตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การออกแบบชุดทดสอบหาความดันตกคร่อมของตะกร้าบรรจุลำไย

ตะกร้าบรรจุผลลำไยสดที่ถูกนำมาศึกษามี 2 รูปแบบ คือ รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ขนาด 36 x 49 x 15 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว x สูง) ซึ่งนิยมใช้ในเชิงการค้า และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 36 x 56 x 15 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว x สูง) สำหรับนำมาใช้ทดสอบในเชิงปฏิบัติการ (ภาพ 15) การเก็บข้อมูลค่าความดันตกคร่อม ทำได้โดยการสร้างชุดทดสอบให้สามารถจัดเรียงตะกร้าลำไยเช่นเดียวกับ การจัดเรียงสำหรับการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งที่ต้องการ ซึ่งสามารถจัดเรียงตะกร้าลำไยได้ 1, 4 และ 6 ตะกร้าต่อชั้น สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และ 1, 4 และ 5 ตะกร้าต่อชั้น สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ภาพ 16) และวางซ้อนกันได้ทั้งหมด 10 ชั้น

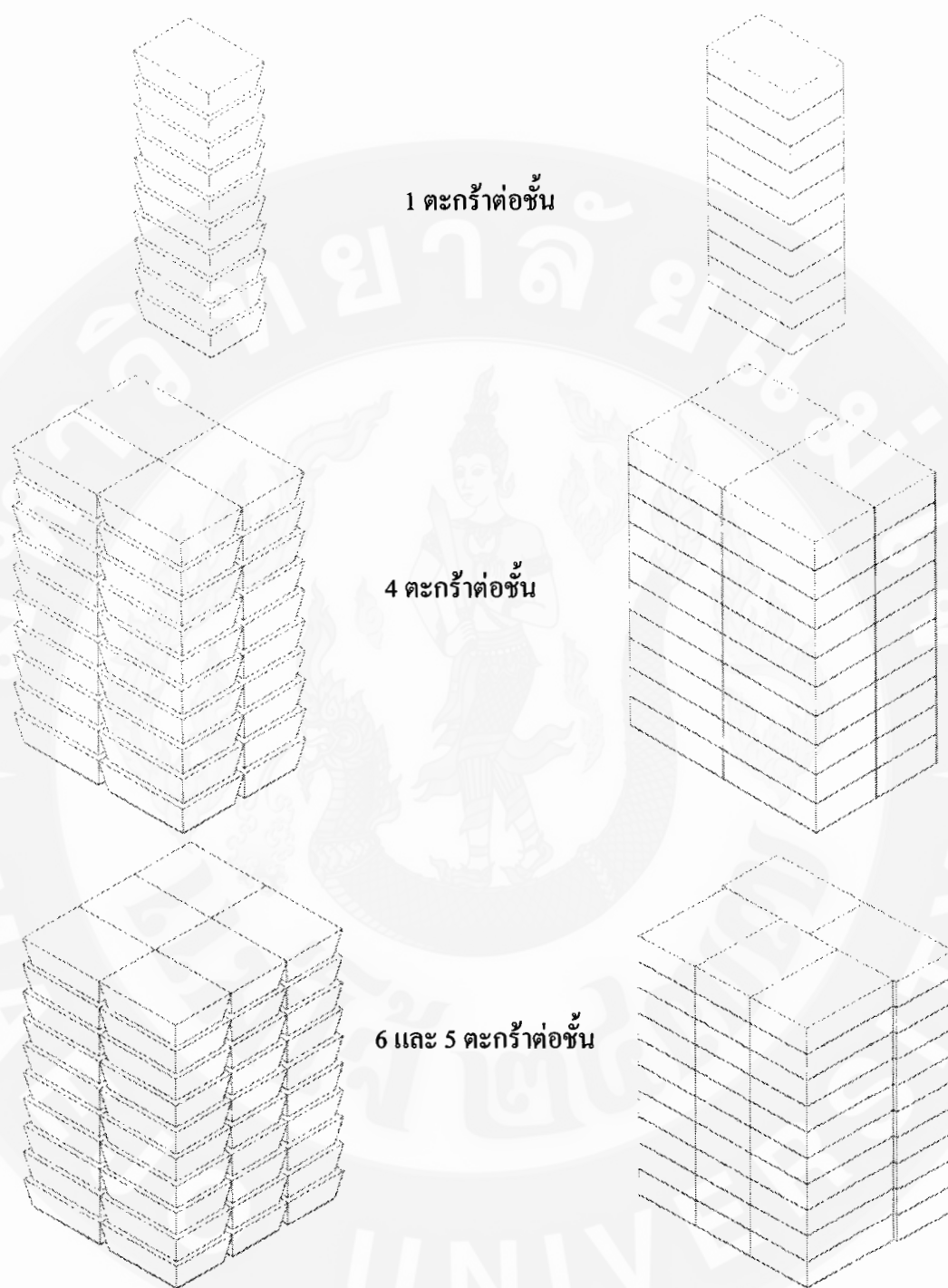
ชุดทดสอบความดันตกคร่อม มีส่วนประกอบ และรายละเอียดได้ดังนี้

1. พัดลมแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal fan) ใช้กระแสไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ขนาด 3 แรงม้าถูกติดตั้งอยู่ด้านบนชุดทดสอบ ทำหน้าที่ในการดูดอากาศให้ผ่านตะกร้าบรรจุลำไยจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน
2. ติดตั้งชุดอุปกรณ์ปรับรอบมอเตอร์ (inverter) เข้ากับพัดลม เพื่อให้สามารถกำหนดอัตราการไหลที่แตกต่างกัน 5 ระดับ โดยการปรับความถี่ของไฟฟ้าจากแผงควบคุมให้เท่ากับ 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ
3. ท่อลมสำหรับจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไยสด มีขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดเรียง และรูปทรงของตะกร้า (ตาราง 6) การสร้างท่อลมจะใช้วัสดุแตกต่างกันโดย ท่อลม

ขนาดเล็กสำหรับทดสอบค่าความดันตกคร่อมของการจัดเรียงตะกร้าลำไย 1 ตะกร้าต่อชั้น จะถูกสร้างขึ้นโดยใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตเป็นผนัง และมีด้านหนึ่งเป็นประตูสามารถเปิด-ปิด เพื่อให้สามารถจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไยได้ ส่วนที่ออกแบบสำหรับการจัดเรียงตะกร้าลำไย 4-5 ตะกร้าต่อชั้น สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และ 4-6 ตะกร้าต่อชั้น สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู จะทำการทดสอบจากห้องรม SO_2 ผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากโครงการวิจัย เรื่อง การออกแบบห้องรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในระดับอุตสาหกรรม โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ซึ่งท่อลมสร้างจากผ้าใบพลาสติก



ภาพ 15 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (สีขาว) สำหรับใช้ในเชิงการค้า และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (สีแดง) ใช้ในเชิงห้องปฏิบัติการ



ก. ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู

ข. ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ภาพ 16 ภาพจำลองรูปแบบการจัดเรียงตะกร้าทั้ง 2 รูปทรง ในแต่ละชั้น

(ก) ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (ข) ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตาราง 5 ขนาดท่อลมที่ใช้จัดเรียงตะกร้าลำไยของชุดทดสอบ

รูปทรงตะกร้า	จำนวนตะกร้าต่อชั้น	ขนาด กว้าง x ยาว x สูง (ซ.ม.)
แบบสี่เหลี่ยมคางหมู	1	36 x 49 x 200
	4	72 x 98 x 200
	6	98 x 108 x 200
แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	1	36 x 56 x 200
	4	72 x 112 x 200
	5	92 x 112 x 200

การกำหนดอัตราการไหลของอากาศของพัดลม

เพื่อความสะดวกในการศึกษาความดันตกคร่อมจากชุดทดสอบ ได้มีการใช้พัดลมแตกต่างกัน 2 ตัว ในที่นี้จะเรียกว่า พัดลมตัวที่ 1 แทนพัดลมที่ใช้ทดสอบสำหรับการจัดเรียงตะกร้า 1 ตะกร้าต่อชั้น และพัดลมตัวที่ 2 แทนพัดลมที่ใช้ทดสอบสำหรับการจัดเรียงตะกร้า 4, 5 และ 6 ตะกร้าต่อชั้น ตามลำดับ เพื่อให้ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันตกคร่อม สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ในทุกรูปแบบการจัดเรียง และเป็นการลดความคลาดเคลื่อนจากการทำงานของพัดลม ดังนั้น จึงทำการวัดอัตราการไหลของอากาศของพัดลมทั้ง 2 ตัว แล้วจึงเลือกอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกันมาทำการศึกษา เพื่อให้การกำหนดระดับการไหลของอากาศให้แม่นยำยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ชุดอุปกรณ์ปรับรอบมอเตอร์ (inverter) เป็นตัวกำหนดอัตราการไหลของอากาศของพัดลมหมุนเวียนอากาศตัวที่ 1 และตัวที่ 2 โดยการปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าจาก inverter จำนวน 7 ระดับ คือ 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 เฮิรตซ์ เพื่อให้ได้อัตราการไหลของพัดลมแต่ละตัวแตกต่างกัน 7 ระดับ การวัดอัตราการไหลของอากาศสามารถทำได้โดยการวัดค่าความเร็วลมภายในท่อ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของพัดลมได้ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

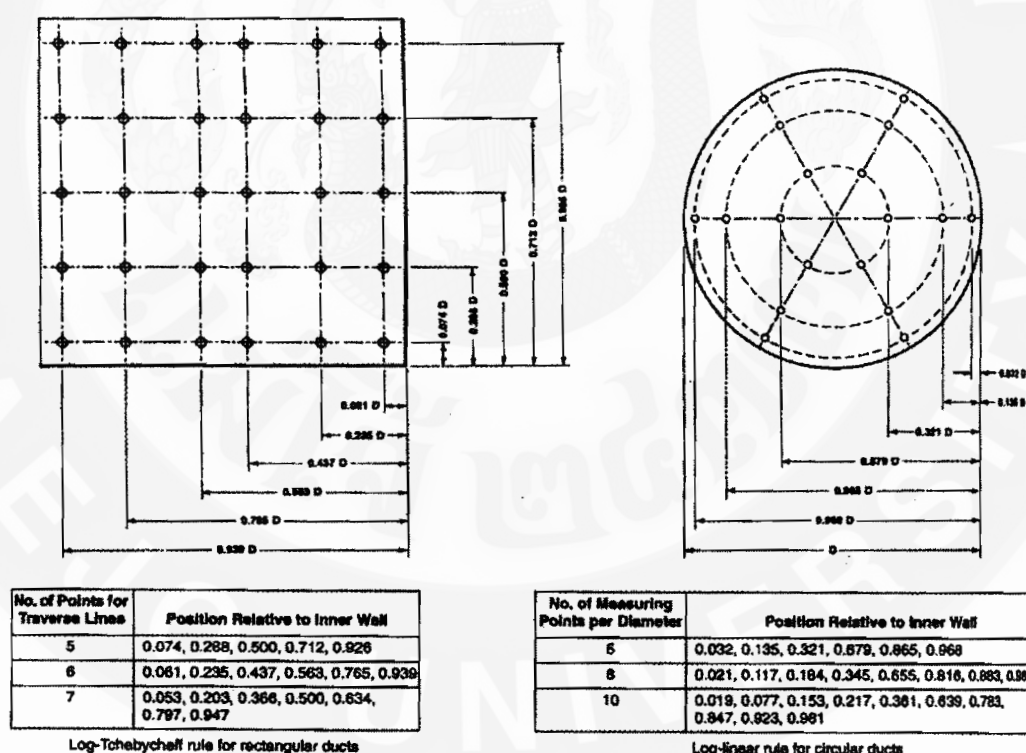
1. การกำหนดระยะห่างเพื่อวัดความเร็วลมของพัดลม ตามหลักการของ ASHRAE (2001) ได้ระยะห่างที่จะทำการวัดจากตัวเรือนของพัดลมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 เท่ากับ 115 และ 150 เซนติเมตร ตามลำดับ
2. กำหนดตำแหน่งภายในพื้นที่หน้าตัดของเส้นท่อ ที่จะทำการวัดความเร็วลมออกเป็น 25 ตำแหน่ง ตามมาตรฐานของ ASHRAE (2001) (ภาพ 17)
3. วัดความเร็วลมโดยเปิดพัดลมแล้วปรับความถี่จาก inverter โดยเริ่มจาก 20 เฮิรตซ์ แล้ววัดความเร็วลมแต่ละตำแหน่งด้วยเครื่อง TESTO รุ่น 400 โดยการเสียบหัววัดแบบ hot-

bulb เข้าไปตามระยะที่กำหนดไว้ แล้ววัดความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่หน้าตัดท่อลม โดยการตั้งค่าการวัดของเครื่องเป็นแบบความเร็วเฉลี่ยต่อเวลา 10 วินาที จนครบ 25 ตำแหน่ง

4. ปรับเพิ่มความเร็วของ inverter ขึ้นทีละ 5 เฮิร์ตซ์ วัดความเร็วลมซ้ำในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่หน้าตัดท่อ จนกระทั่งปรับความเร็วของ inverter จนถึง 50 เฮิร์ตซ์

5. หาค่าเฉลี่ยของความเร็วลมที่วัดได้ในแต่ละระดับความเร็ว แล้วคำนวณหาอัตราการไหลอากาศโดยการแทนค่าลงในความสัมพันธ์ $Q = AV$ โดยกำหนดให้ A คือ พื้นที่หน้าตัดท่อที่ทำกรวัดความเร็วลม ในที่นี้ เท่ากับ 0.052 และ 0.106 ตารางเมตร สำหรับพัดลมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ตามลำดับ V คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ยที่วัดได้ ดังนั้น จะได้อัตราการไหลของอากาศสำหรับพัดลมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อย่างละ 5 ระดับ

6. นำอัตราการไหลอากาศที่ได้ของพัดลมแต่ละตัวมาเปรียบเทียบ และเลือกกระดับอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกัน 3 ระดับ เพื่อนำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม



ภาพ 17 ภาพตัดขวางตำแหน่งการวัดลมภายในพื้นที่หน้าตัดท่อลมของชุดทดสอบระดับห้องปฏิบัติการซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐานของ ASHRAE

ที่มา: ASHRAE (2001)

การวัดค่าความดันตกคร่อมของตะกร้าบรรจุลำไยสด

เมื่อได้ระดับอัตราการไหล จำนวน 3 ระดับ แล้วจึงทำการวัดความแตกต่างของความดันระหว่างด้านขาเข้า และขาออกตะกร้าบรรจุลำไยที่ถูกจัดเรียงไว้ในท่อ ซึ่งเรียกความดันแตกต่างนี้ว่า ความดันตกคร่อม ทำการศึกษาในตะกร้าบรรจุลำไยสดที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 2 รูปทรง และบรรจุผลลำไยสด จำนวน 11 กิโลกรัมต่อตะกร้า โดยมีวิธีการดำเนินงานดังนี้

1. ทำการจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไยสดรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ภายในท่อของชุดทดสอบ โดยเริ่มจากการจัดเรียง 1 ตะกร้าต่อชั้น และวางซ้อนกัน 2 ชั้น
2. เจาะรูผนังท่อลมสำหรับเสียบท่อวัดค่าความดันของเครื่อง TESTO 454 ด้านขาเข้า และด้านขาออกตะกร้า (ภาพ 18)



ภาพ 18 แสดงตัวอย่างตำแหน่งการวัดความดันขาเข้า และขาออกตะกร้าบรรจุลำไย

3. เปิดพัดลมหมุนเวียนอากาศโดยเริ่มจากระดับอัตราการไหลระดับที่ 1 จากนั้นทำการวัดค่าความดันตกคร่อม ซึ่งค่าที่อ่านได้จะแสดงออกมาเป็นค่าความดันต่างระหว่างตำแหน่งทั้งสองที่ทำการวัด มีหน่วยเป็น ปาสคาล (Pa) ทำการวัดจำนวน 3 ซ้ำ
4. เพิ่มจำนวนชั้นของตะกร้าขึ้นไปทีละ 2 ชั้น แล้วทำการวัดค่าความดันตกคร่อมเช่นเดียวกันกับข้อ 2 จนกระทั่งวางซ้อนครบ 10 ชั้น จากนั้นทำซ้ำโดยการเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศของพัดลมจนครบ 3 ระดับ
5. ทำการวัดซ้ำข้อ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนตะกร้าเป็นแบบรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

6. ทำการวัดซ้ำเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 5 โดยเปลี่ยนรูปแบบการจัดเรียงเป็น 4 และ 6 ตะกร้าต่อชั้น สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และ 4 และ 5 ตะกร้าต่อชั้น สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การวิเคราะห์มิติ

การวิเคราะห์มิติ มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาความต้านทานการไหลของอากาศในรูปของความดันตกคร่อม (ΔP) ผ่านตะกร้าลำไยทั้งรูปทรงแบบสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยสร้างรูปแบบความสัมพันธ์อย่างง่าย เพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการคาดคะเนหาค่าความดันตกคร่อม ของตะกร้าลำไยที่มีการจัดเรียงรูปแบบแตกต่างกัน

การกำหนดสมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์มิติ มีดังนี้

1. การไหลเป็นแบบไม่ขุ่นตัว และมีทิศทางการไหลจากด้านล่างขึ้นบน
2. ไม่คิดค่าความขรุขระ และค่าสัดส่วนช่องว่าง (void factor) ของการจัดเรียง เนื่องจากผลลำไยมีขนาด ความขรุขระ และคุณภาพไม่แน่นอน แตกต่างกันขึ้นอยู่กับฤดูกาล และชั้นคุณภาพ นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างของรูปทรง และคุณสมบัติของบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน 2 รูปทรง
3. กำหนดให้ค่าความดันสูญเสียเนื่องจากเสียดทานของผ้าใบพลาสติก ที่คลุมรอบตะกร้าบรรจุลำไยมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความดันในการไหลของอากาศผ่านตะกร้าบรรจุลำไย จึงไม่นำมาพิจารณา
4. กำหนดให้อุณหภูมิในกระบวนการรวม SO_2 คงที่
5. กำหนดให้มีอัตราการไหลอากาศเท่ากันตลอดภายในระบบหมุนเวียนอากาศ

วิธีการวิเคราะห์มิติ

1. กำหนดให้ มีค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล ทั้งหมด 7 ตัวแปร ดังนี้ ความดันตกคร่อม (ΔP) ความเร็วของการไหล (V) ความหนาแน่นของของไหล (ρ) ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (μ) เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นตะกร้า (D) พื้นที่หน้าตัดชั้นตะกร้า (A) และความสูงของชั้นตะกร้า (L) จึงเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$0 = f(\Delta P, V, \rho, \mu, D, A, L)$$

2. กำหนดมิติปฐมภูมิ เป็น MLT และใช้มิติพื้นฐานสำหรับตรวจสอบเป็นมิติ FLT เขียนพารามิเตอร์ทั้งหมดให้อยู่ในรูปของมิติปฐมภูมิ (ตาราง 5)

ตาราง 6 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมตะกร้าลำไยและมิติพื้นฐาน

Parameter	Symbol	Dimensions	
		MLt	FLt
Pressure drop	ΔP	$ML^{-1}t^{-2}$	FL^{-2}
Density	ρ	ML^{-3}	$FL^{-4}t^2$
Viscosity	μ	$ML^{-1}t^{-1}$	$FL^{-2}t$
Air velocity	V	Lt^{-1}	Lt^{-1}
Flow area	A	L^2	L^2
Hydraulic diameter	D	L	L
Stack high	L	L	L

3. จัดกลุ่มพารามิเตอร์ อย่างน้อย 3 ตัว ที่คาดว่าจะเป็นตัวประกอบอยู่ในกลุ่มตัวแปรไร้มิติทุกกลุ่ม และเมื่อจัดกลุ่มแล้วต้องมีมิติปฐมภูมิครบทุกมิติ โดยเลือกพารามิเตอร์ที่มักพบบ่อยในกลุ่มตัวแปรทางกลศาสตร์ของไหล ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) ความเร็ว (V) เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) หรือความยาว (L) เป็นต้น

4. เพิ่มตัวแปรที่นอกเหนือจากที่เลือกไว้ในข้อ 4 ทีละตัว เข้าไปในกลุ่มตัวแปรที่เลือกไว้ จนครบทุกตัว

5. ตรวจสอบความถูกต้องของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้ ด้วยมิติปฐมภูมิด้วยมิติ FLT ในกรณีนี้การศึกษาอากาศที่ไหลผ่านตะกร้าลำไยทั้ง 2 รูปทรง เมื่อจัดเรียงตะกร้าให้มีรูปแบบการจัดเรียงสำหรับการรวม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งแล้วท่อจะมีลักษณะเป็นท่อสี่เหลี่ยมขนาดแตกต่างกันตามชนิดตะกร้า และรูปแบบการจัดเรียง ดังนั้น ค่า D ที่ใช้จึงกำหนดเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (hydraulic diameter) สามารถหาได้ ดังนี้

$$D_h = \frac{4(ab)}{2(a+b)}$$

กำหนดให้ a, b คือ ความกว้าง และความยาวของท่อ ตามลำดับ มีหน่วยเป็นเมตร

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกลุ่มพารามิเตอร์ไร้มิติสำหรับอธิบายการไหล

นำค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบ แทนค่าลงไปในกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์มิติ จากนั้น ทำการหาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel™ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรที่ละกลุ่ม และหาสมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการถดถอย โดยพิจารณาระดับความสัมพันธ์ร่วมของกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2)

การออกแบบห้องรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง

การออกแบบ

การออกแบบห้องรม SO_2 อ้างอิงตามหลักการที่กำหนดไว้โดยสถาบันอาหาร (2541) ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบห้องรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

1. ขนาดห้อง พิจารณาจากความเหมาะสม เช่น การจัดเรียง และการหมุนเวียนอากาศ นอกจากนี้ต้องพิจารณาถึงความสะดวกในการปฏิบัติงาน โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้

1.1 กำหนดให้ ชุดระบบหมุนเวียนอากาศด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง 1 ชุด ต่อจำนวนตะกร้าบรรจุลำไยมากที่สุดที่สามารถจัดเรียงได้บนแผ่นรองขนาด $1 \times 1.2 \times 0.15$ เมตร (กว้าง x ยาว x สูง) ซึ่งเท่ากับ 60 และ 50 ตะกร้า สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตามลำดับ

1.2 มีชุดหมุนเวียนอากาศด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง 2 ชุด ต่อห้อง

1.3 กำหนดให้มีพื้นที่ว่างโดยแผ่นรองที่มีการจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไย อย่างน้อย 30 เซนติเมตร

1.4 มีการจัดวางชุดหมุนเวียนอากาศด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง แล้วต้องเกิดความสะดวกภายในห้อง ก่อให้เกิดการหมุนเวียนอากาศที่ดี และสะดวกในการปฏิบัติงาน

1.5 มีความสูงจากพื้นห้องถึงเพดาน เท่ากับ 2.50 เมตร

2. วัสดุประกอบห้อง มีหลักการพิจารณาดังนี้

2.1 ห้องรมต้องประกอบขึ้นจากวัสดุที่ทนการกัดกร่อน เนื่องจากก๊าซ SO_2 มีสภาพเป็นกรด มีฤทธิ์ในการกัดกร่อน

2.2 โครงสร้างสามารถรับน้ำหนักกลายที่ดำเนินการรม SO_2 ซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 1.32 ตัน (660 กิโลกรัม x 2 ชุดของระบบหมุนเวียนอากาศ)

2.3 ทำความสะอาดได้ง่าย

3. ชุดหมุนเวียนอากาศด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง มีหลักการพิจารณาดังนี้

3.1 พัฒนาระบบหมุนเวียนอากาศ มีสมรรถนะในการเอาชนะความดันสูญเสียรวมของระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งทั้งหมด เช่น ความต้านทานอากาศของตะกร้าบรรจุลำไย ความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ประกอบท่อต่าง ๆ เป็นต้น โดยมีความเร็วลมเฉลี่ยต่ำสุดภายในตะกร้าบรรจุลำไย เท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็น 15 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อกิโลกรัมผลลำไย (จักรพงษ์และคณะ, 2550)

3.2 วัสดุ และอุปกรณ์ทุกชนิดผลิตจากวัสดุทนการกัดกร่อนได้ดี

3.3 อุปกรณ์ทุกชนิดต้องมีการติดตั้งจนวนป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ SO_2 ซึ่งอาจเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของอุปกรณ์

การทดสอบห้องรม SO_2 ผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง

การศึกษาในส่วนนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันผลการออกแบบห้องรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง ที่ได้จากการคำนวณตามความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มิติของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม โดยการศึกษาแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ 1. การศึกษาการกระจายตัวของอากาศภายในตะกร้าโดยการพิจารณาความเร็วการไหลเฉลี่ยของอากาศภายในตะกร้าที่บรรจุลำไย และ 2. การศึกษาปริมาณ SO_2 ตกค้างหลังสิ้นสุดการรม โดยการศึกษาทั้ง 2 ส่วนนี้ ทำการศึกษาภายในตะกร้าบรรจุลำไยแตกต่างกัน 2 ชนิด ที่จัดเรียงสำหรับการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง

การศึกษาการกระจายตัวของอากาศภายในตะกร้า

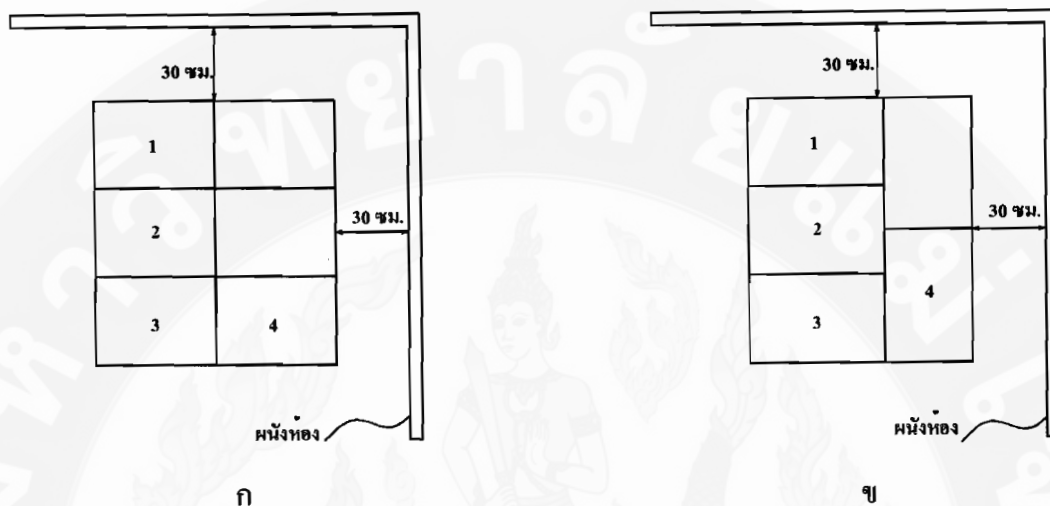
ทำการศึกษาโดยการพิจารณาค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ไหลผ่านตะกร้าบรรจุผลลำไย ทั้ง 2 รูปทรง โดยใช้ระดับอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ และกำหนดให้มีการการจัดเรียงแบบ 6 ตะกร้าต่อชั้น วางซ้อนจำนวน 10 ชั้น สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และการจัดเรียงแบบ 5 ตะกร้าต่อชั้น วางซ้อนจำนวน 10 ชั้น สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตามลำดับ มีวิธีการทดลองดังนี้

1. ทำการทดสอบ โดยการแบ่งการทดลองออกเป็น 6 การทดลอง ดังนี้
 การทดลองที่ 1 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 1
 การทดลองที่ 2 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 2
 การทดลองที่ 3 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 3
 การทดลองที่ 4 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 1
 การทดลองที่ 5 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 2
 การทดลองที่ 6 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 3
2. จัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไยในชุดหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง ชั้นละ 6 ตะกร้า วางซ้อนในแนวตั้ง จำนวน 10 ชั้น ซึ่งรวมจำนวนตะกร้าได้เท่ากับ 60 ตะกร้า สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และ 50 ตะกร้า สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตามลำดับ (ภาพ 19)
3. คึงผ้าใบพลาสติกคลุมรอบตะกร้าบรรจุลำไยที่ได้ทำการจัดเรียงไว้แล้ว
4. ทำการเจาะรู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ทะลุผ้าใบพลาสติก และผิวของตะกร้าลำไย กำหนดตำแหน่งวัดความเร็วลมภายในตะกร้า 4 ตำแหน่ง ดังภาพ 20 ของแต่ละชั้น



ภาพ 19 การจัดเรียงตะกร้าสำหรับการรรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง

5. วัดค่าความเร็วลมภายในตะกร้าลำไย โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วลม ยี่ห้อ TESTO รุ่น 400 โดยอ่านค่าออกมาในหน่วย เมตรต่อวินาที (m/s) ในชั้นที่ 2, 4, 6, 8 และ 10 จนกระทั่งครบทุกการทดลอง



ภาพ 20 ตำแหน่งสำหรับวัดความเร็วลมภายในตะกร้าบรรจุลำไย

(ก) ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (ข) ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การศึกษาปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไย

การทดลองในขั้นตอนนี้ ทำได้โดยทดลองรม SO_2 กับผลลำไยสดด้วยระบบ หมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง จำนวน 60 ตะกร้า สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และ 50 ตะกร้า สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตามลำดับ ด้วยความเข้มข้นหลังสิ้นสุดการรม เท่ากับ 4,000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เพื่อเป็นการยืนยันความสอดคล้องระหว่างความเร็วลมเฉลี่ยภายในตะกร้าลำไย กับปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไย ของอัตราการไหลแต่ละระดับ ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

1. ทำการทดสอบโดยการแบ่งการทดลองออกเป็น 6 การทดลอง ดังนี้
 - การทดลองที่ 1 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 1
 - การทดลองที่ 2 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 2
 - การทดลองที่ 3 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 3
 - การทดลองที่ 4 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 1
 - การทดลองที่ 5 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 2
 - การทดลองที่ 6 ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราการไหลอากาศ ระดับที่ 3

2. ทำการจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไย ในชุดหมุนเวียนอากาศด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง ชั้นละ 6 ตะกร้า วางซ้อนในแนวตั้ง จำนวน 10 ชั้น สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และจัดเรียงชั้นละ 5 ตะกร้า วางซ้อนในแนวตั้ง 10 ชั้น สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เช่นเดียวกับการศึกษาการกระจายตัวของอากาศภายในตะกร้า จากนั้นปิดห้องให้สนิท

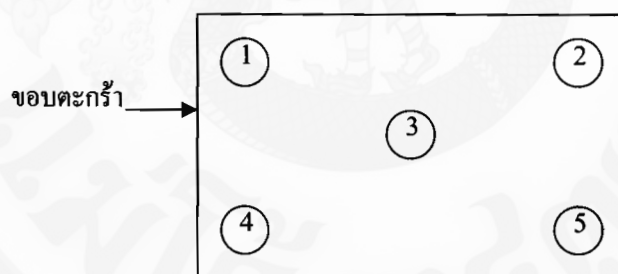
3. ทำการทดลองที่ละการทดลอง โดยปล่อยก๊าซ SO_2 จากถัง (directly gas) ปริมาณ 0.8 กิโลกรัมต่อครั้ง

4. เริ่มต้นเปิดพัดลมหมุนเวียนอากาศนาน 1 ชั่วโมง

5. ปิดพัดลมหมุนเวียนอากาศของชุดหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง และดูอากาศภายในห้องเข้าสู่ชุดหอกำจัดก๊าซ

6. เปิดห้องรมและผ้าใบพลาสติก จากนั้นเปิดพัดลมจากชุดหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งเบาๆ เพื่อระบายอากาศ (aeration) ประมาณ 20 นาที

7. สุ่มเก็บตัวอย่างผลลำไยในชั้นที่ 2, 4, 6 และ 8 ในตำแหน่งที่แสดงไว้ในภาพที่ 20 โดยเก็บตัวอย่างภายในตะกร้า 5 ตำแหน่ง ๆ ละ 5 ผล ดังภาพ 21



ภาพ 21 ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างผลลำไยในตะกร้า เพื่อนำมาวิเคราะห์ SO_2 ตกค้าง

8. นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกและเนื้อ ด้วยวิธี Modified Monier-Williams Method (สคศรี, 2535)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลการวิจัย รวมทั้งการวิเคราะห์ผลที่ได้ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1. ผลการศึกษาความดันตกคร่อม (ΔP) ของตะกร้าลำไย 2. ผลการใช้หลักการวิเคราะห์มิติจัดกลุ่มของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลเพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม ที่เกิดจากการไหลของอากาศผ่านตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และ 3. ผลการออกแบบห้องรม SO_2 ผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง พร้อมทั้งทดสอบ โดยแต่ละหัวข้อได้ผลการทดลองดังนี้

การศึกษาความดันตกคร่อมตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

อัตราการไหลของระบบหมุนเวียนอากาศ

การวัดค่าความเร็วลมภายในท่อลมขาออกจากพัดลมแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทั้ง 2 ตัว โดยการกำหนดความถี่อุปกรณ์ปรับรอบ (Inverter) เท่ากับ 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 เฮิรตซ์ ตามลำดับ แล้วนำไปคำนวณหาอัตราการไหลของพัดลม พบว่า อัตราการไหลของอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการตั้งค่าความถี่จากอุปกรณ์ปรับความถี่กระแสไฟฟ้า (Inverter) เพิ่มขึ้น จากการทดสอบพัดลมทั้งสองตัวมีแนวโน้มของอัตราการไหลไปในทิศทางเดียวกัน และมีค่าใกล้เคียงกัน จำนวน 7 ระดับ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 - 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ตาราง 7)

การเลือกอัตราการไหลอากาศที่เหมาะสมสำหรับการรม SO_2 กับผลลำไยสด พิจารณาได้จากค่าความเร็วลมเฉลี่ยภายในตะกร้าที่แนะนำโดยจักรพงษ์และคณะ (2550) ว่าต้องไม่น้อยกว่า 0.5 เมตรต่อวินาที ในที่นี้จะคิดค่าความปลอดภัย (safety factor) 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการผิดพลาดจากการวัดอัตราการไหล ดังนั้น ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อสำหรับจัดเรียงตะกร้าลำไยที่เหมาะสมจากการวัด ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 0.56 เมตรต่อวินาที เมื่อพิจารณาการจัดเรียงแบบ 1 ตะกร้าต่อชั้น (ตาราง 8) ซึ่งหมุนเวียนอากาศด้วยพัดลมตัวที่ 1 พบว่า มีความเร็วลมเฉลี่ยภายในท่อกว่า 0.5 เมตรต่อวินาที ในทุกระดับอัตราการไหล เนื่องจากมีขนาดพื้นที่หน้าตัดท่อสำหรับจัดเรียงตะกร้าลำไยเล็ก จึงส่งผลให้มีความเร็วลมเฉลี่ยภายในท่อกว้างขึ้นตามไปด้วย

ตาราง 7 อัตราการไหลของพัดลมหมุนเวียนอากาศของชุดทดสอบ

พัดลม ตัวที่	ค่าพารามิเตอร์	ความถี่กระแสไฟฟ้า (เฮิรตซ์)						
		20	25	30	35	40	45	50
1	ความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)	8.30	9.72	11.73	13.02	15.03	16.85	18.25
	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052
	อัตราการไหล (m ³ /s)	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
2	ความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)	3.90	4.99	5.91	7.21	7.73	9.15	10.00
	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106
	อัตราการไหล (m ³ /s)	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

ตาราง 8 ความเร็วลมเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในท่อลมสำหรับจัดเรียงตะกร้าลำไย แบบ 1 ตะกร้าต่อชั้น ที่มีการหมุนเวียนอากาศโดยพัดลมตัวที่ 1

รูปทรงตะกร้า	อัตราการไหลอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)						
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
แบบสี่เหลี่ยมคางหมู	2.44	2.89	3.46	3.85	4.42	4.99	5.39
	(0.2)	(0.3)	(0.4)	(0.3)	(0.6)	(0.6)	(0.6)
แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	2.13	2.53	3.03	3.37	3.87	4.37	4.71
	(0.2)	(0.2)	(0.4)	(0.3)	(0.5)	(0.5)	(0.5)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

เมื่อมีการจัดเรียงแบบ 4 5 และ 6 ตะกร้าต่อชั้น จะทำให้มีพื้นที่หน้าตัดท่อลมเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งท่อลมที่ทำการจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไยแบบ 6 และ 5 ตะกร้าต่อชั้น สำหรับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตามลำดับ ที่ระดับอัตราการไหล 0.4 และ 0.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ตาราง 9) จะมีความเร็วลมเฉลี่ยต่ำกว่า 0.56 เมตรต่อวินาที ดังนั้นอัตราการไหลทั้ง 2 ระดับนี้ จึงไม่ถูกนำมาศึกษา

อัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการนำมาศึกษาของพัดลมทั้งสองตัว ครอบคลุม และเห็นผลการทดลองชัดเจน จึงควรมีค่าประมาณ 0.6 0.8 และ 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งสามารถกำหนดได้จากการปรับความถี่จาก inverter ให้เป็น 30 40 และ 50 เฮิรตซ์ ตามลำดับ

ตาราง 9 ความเร็วลมเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในท่อลมของชุดทดสอบ สำหรับจัดเรียงตะกร้า
ลำไย แบบ 4, 5 และ 6 ตะกร้าต่อชั้น ที่มีการหมุนเวียนอากาศโดยพัดลมตัวที่ 2

รูปทรงตะกร้า	จำนวนตะกร้า ต่อชั้น	อัตราการไหลอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)						
		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
แบบสี่เหลี่ยม คางหมู	4	0.58 (0.1)	0.75 (0.1)	0.89 (0.1)	1.08 (0.1)	1.16 (0.1)	1.37 (0.1)	1.50 (0.1)
	6	0.39 (0.1)	0.50 (0.1)	0.60 (0.1)	0.72 (0.2)	0.77 (0.2)	0.92 (0.2)	1.00 (0.2)
แบบสี่เหลี่ยม ผืนผ้า	4	0.51 (0.1)	0.66 (0.1)	0.78 (0.1)	0.94 (0.1)	1.02 (0.1)	1.20 (0.1)	1.31 (0.1)
	5	0.40 (0.1)	0.51 (0.1)	0.61 (0.1)	0.74 (0.2)	0.80 (0.2)	0.94 (0.2)	1.03 (0.2)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

ผลการศึกษาค่าความดันตกคร่อมของการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง

ค่าความดันตกคร่อมของอากาศที่ไหลผ่านตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู มีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับอัตราการไหลของอากาศ จำนวนชั้นตะกร้าที่วางซ้อน และยังคงต่างกันออกไปตามจำนวนตะกร้าต่อชั้นของการจัดเรียง โดยพบว่า ที่ระดับชั้นการจัดเรียงที่สูงขึ้นไปจะมีค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้น โดยมีค่าความดันตกคร่อมสูงสุด เท่ากับ 540 ปาสคาล (Pa) เมื่อมีการจัดเรียงตะกร้าแบบ 1 ตะกร้า x 10 ชั้น ที่ระดับอัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ในขณะที่มีค่าความดันตกคร่อมต่ำที่สุด เท่ากับ 15 ปาสคาล เมื่อมีการจัดเรียงแบบ 5 ตะกร้า x 1 ชั้น (ตาราง 10) การเพิ่มขึ้นของความดันตกคร่อมแตกต่างกันตามอัตราการไหล รูปแบบการจัดเรียง แต่เมื่อพิจารณาแต่ละอัตราการไหลที่แต่ละรูปแบบการจัดเรียงตะกร้า พบว่า จะมีความเร็วลมเฉลี่ยภายในท่อสำหรับบรรจุตะกร้าลำไยแตกต่างกันตามพื้นที่หน้าตัดท่อลมดังที่ได้ศึกษามาแล้วข้างต้น

ซึ่งพบว่าเปลี่ยนไปตามจำนวนตะกร้าต่อชั้นที่จัดเรียง โดยมีค่าความดันตกคร่อมจากมากไปน้อย คือ การจัดเรียง 1, 4 และ 5 ตะกร้าต่อชั้น ตามลำดับ

ตาราง 10 การเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมของอากาศที่ไหลผ่านตะกร้าลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยม ทางมุมด้วยอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ

จำนวน ตะกร้าต่อชั้น	อัตราการไหล (ลบ.เมตร/วินาที)	จำนวนชั้น				
		2	4	6	8	10
1	0.6	162.9(1.4)	175.6(0.6)	179.8(0.3)	188.2(0.6)	194.2(0.2)
	0.8	289.2(0.4)	310.2(0.9)	316.9(0.8)	331.2(1.9)	344.8(1.2)
	1.0	444.8(1.0)	484.0(0.8)	493.3(0.9)	510.1(0.9)	537.5(0.7)
4	0.6	47.8(2.7)	81.5(1.2)	98.4(0.8)	111.5(0.5)	123.3(0.7)
	0.8	95.4(0.6)	160.8(0.9)	187.2(0.6)	202.8(0.3)	221.9(0.8)
	1.0	174.3(2.5)	258.4(1.6)	297.3(1.2)	321.0(1.1)	345.1(1.2)
6	0.6	15.8(0.2)	33.8(0.5)	57.0(1.0)	77.7(0.4)	103.3(1.1)
	0.8	40.5(0.6)	69.9(0.4)	113.1(0.7)	153.3(0.6)	187.1(0.6)
	1.0	58.0(0.1)	112.8(0.6)	182.5(0.9)	248.5(0.2)	298.7(0.5)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

การเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมของอากาศ ที่บังคับให้ไหลผ่านตะกร้าบรรจุ ลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าในแนวตั้ง มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับ ความดันตกคร่อมของตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู โดยความดันตกคร่อมแตกต่างกันตามระดับอัตราการไหลของอากาศ และรูปแบบการจัดเรียง การเปลี่ยนแปลงเห็นได้ชัดเจนเมื่อพิจารณาความเร็วลมเฉลี่ยภายในท่อลมจากหัวข้อที่กล่าวไปแล้วข้างต้นเช่นเดียวกับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู โดยจะมีค่าความดันตกคร่อมอยู่ระหว่าง 25 – 500 ปาสกาล (ตาราง 11)

จากผลการศึกษาข้างต้นไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงความดันตกคร่อมได้ ด้วยการกำหนดปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันตกคร่อมของตะกร้าบรรจุ ลำไยทั้ง 2 รูปทรง เกิดจากอิทธิพลของหลายปัจจัยรวมกัน ดังนั้น เพื่อให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจึงได้นำหลักการวิเคราะห์มิติมาใช้ โดยแสดงในหัวข้อถัดไป

ตาราง 11 การเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมของอากาศที่ไหลผ่านตะกร้าลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยม ผืนผ้าด้วยอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ

จำนวน ตะกร้าต่อชั้น	อัตราการไหล (ลบ.เมตร/วินาที)	จำนวนชั้น				
		2	4	6	8	10
1	0.6	128.6(2.0)	145(2.3)	153.7(4.2)	179(15.2)	182.6(2.7)
	0.8	232.5(6.4)	269.3(1.6)	287.3(2.9)	306.9(3.8)	321(0.4)
	1.0	369.3(0.4)	422.3(1.0)	442.7(2.6)	490.2(5.0)	495.2(0.5)
4	0.6	14.7(0.3)	25.1(0.3)	45.9(1.0)	73.7(0.3)	97.5(0.6)
	0.8	20.5(0.8)	66.3(0.9)	98.9(1.5)	141.6(1.1)	181.5(0.5)
	1.0	45.7(1.1)	103.8(2.7)	163.3(1.8)	223.4(0.9)	293.6(1.3)
5	0.6	27.3(0.5)	49.8(0.5)	76.5(1.0)	86.4(0.2)	100.0(0.9)
	0.8	54.3(2.1)	99.7(1.4)	140.2(2.8)	157.9(1.4)	180.0(1.0)
	1.0	93.4(0.7)	164(1.2)	218.7(2.9)	251(1.1)	281.4(2.2)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

การวิเคราะห์มิติ

การทดลองได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล ทั้งหมดจำนวน 7 ตัว ดังนี้ ความดันตกคร่อม (ΔP) ความเร็วของการไหล (v) ความหนาแน่นของของไหล (ρ) ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (μ) เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของชั้นตะกร้า (D) พื้นที่หน้าตัดชั้นตะกร้า (A) และความสูงของการจัดเรียงชั้นตะกร้า (L) เมื่อถูกนำมาเปลี่ยนรูปให้เป็นตัวแปรไร้มิติ และจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติโดยใช้ทฤษฎี Buckingham π ได้กลุ่มตัวแปรไร้มิติ 4 กลุ่ม ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{\rho v^2}, \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{A}{L^2}, \frac{D}{L}$$

เมื่อพิจารณากลุ่มตัวแปรไร้มิติทั้งหมด สามารถแยกได้ออกเป็น 2 กลุ่ม ใหญ่ ๆ ตามคุณสมบัติของตัวแปรที่ประกอบ ได้ดังนี้

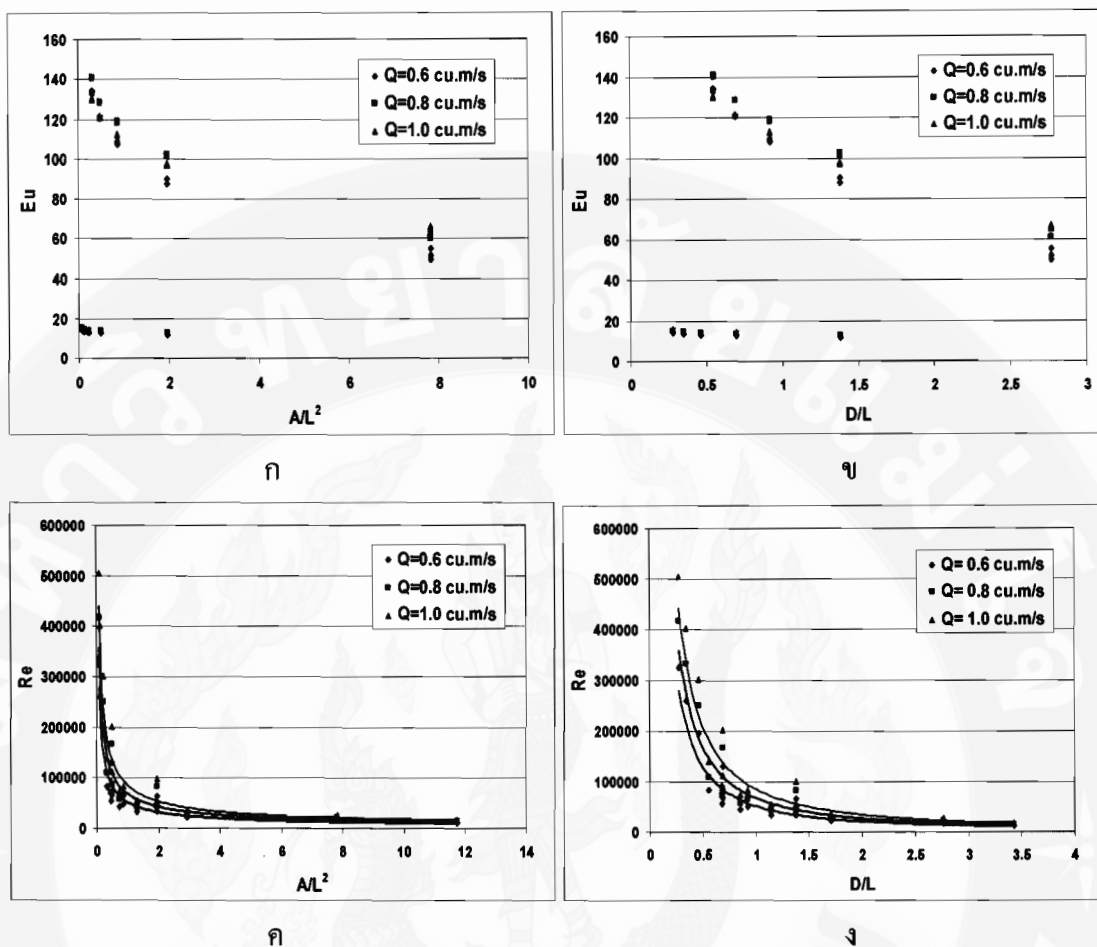
1. กลุ่มที่ใช้อธิบายคุณสมบัติการไหลของอากาศ ได้แก่ ค่า $\Delta P / \rho v^2$ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเนื่องจากความแตกต่างของความดันต่อแรงเฉื่อยของของไหล เรียกว่า ตัวเลขออยเลอร์ (Euler number; Eu) ส่วนอีกค่า คือ $\rho v L / \mu$ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยและแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล หรือเรียกว่า ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number; Re)

2. กลุ่มที่ใช้อธิบายรูปแบบการจัดเรียง ได้แก่ ค่า A/L^2 และค่า D/L ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เปลี่ยนไปตามจำนวนการจัดเรียงตะกร้าต่อชั้น กับความสูงชั้นตะกร้า

เมื่อพิจารณากลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้ทั้งหมด พบว่า มีตัวแปร 2 ตัว ที่สามารถกำหนดให้เป็นค่าคงที่ได้ คือ ค่าความหนาแน่นของของไหล (ρ) ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (μ) ดังนั้น จึงเหลือตัวแปร 5 ตัว ที่จะต้องทำการเก็บข้อมูล ได้แก่ ความดันตกคร่อม (ΔP) ความเร็วของการไหล (v) เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นตะกร้า (D) พื้นที่หน้าตัดชั้นตะกร้า (A) และความสูงของชั้นตะกร้า (L)

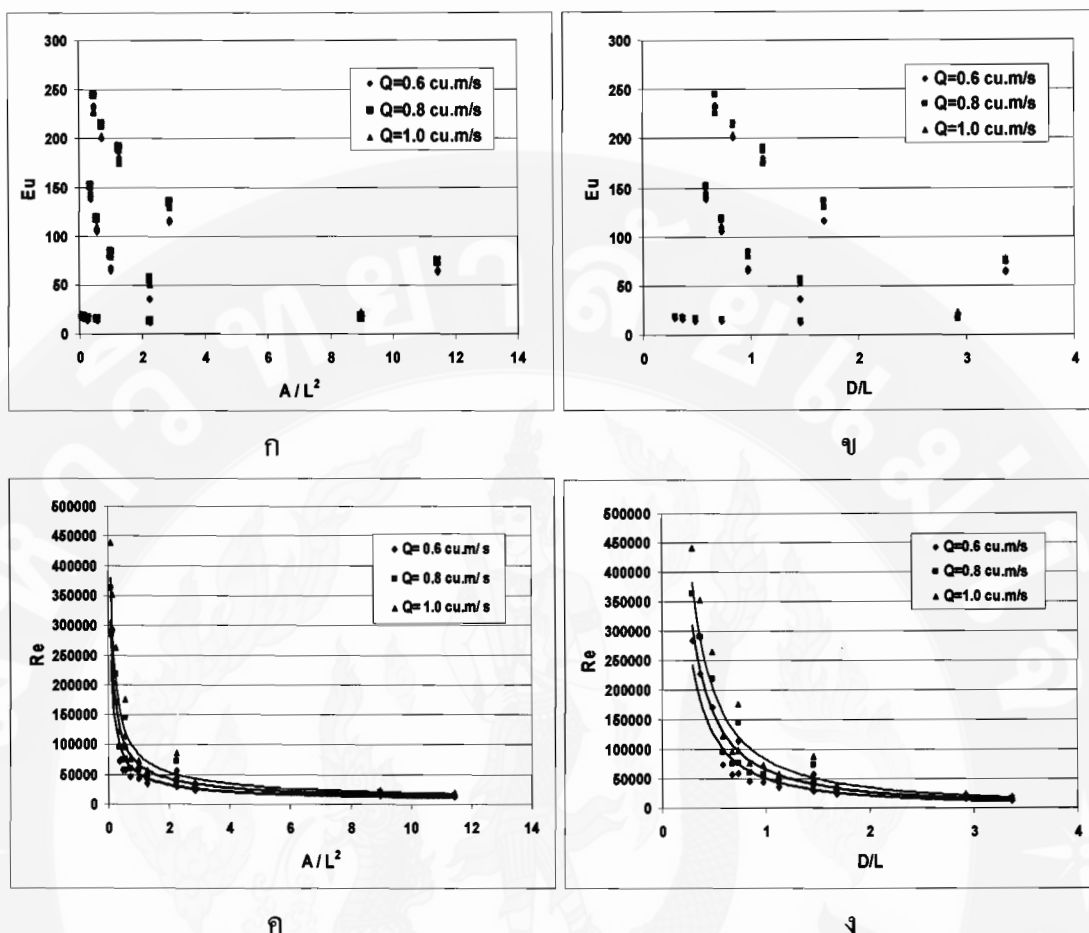
ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติกับการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ปรากฏในกลุ่มตัวแปรไร้มิติ แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ เพื่ออธิบายและคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากรูปแบบการจัดเรียงแบบต่าง ๆ ของตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู พบว่า ตัวเลขออยเลอร์ (Eu) (ภาพ 22 ก และ ข) ไม่มีความสัมพันธ์รูปแบบใด ๆ กับกลุ่มตัวแปรไร้มิตigroup อื่น ๆ แต่พบว่า กลุ่มตัวแปรไร้มิติที่สัมพันธ์กับกลุ่มตัวแปรไร้มิติสำหรับอธิบายรูปแบบการจัดเรียงตะกร้าทุกแบบ คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) โดยมีความสัมพันธ์แบบยกกำลัง กับอัตราส่วนที่เปลี่ยนไปตามรูปแบบการจัดเรียงตะกร้า (A/L^2 และ D/L) (ภาพ 22 ค และ ง)



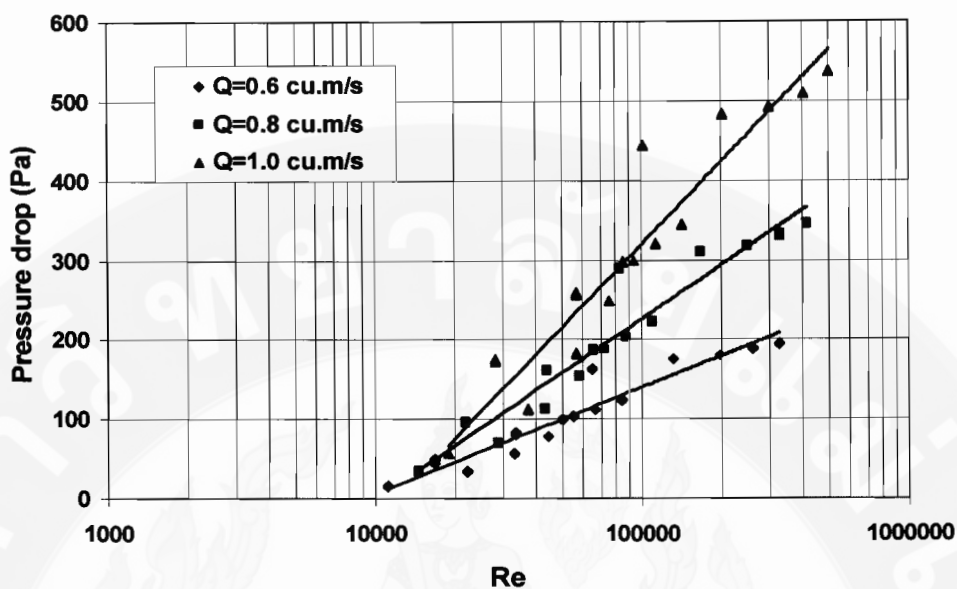
ภาพ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งกับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของอากาศผ่านตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีลักษณะเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงความดันตกคร่อมของตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู กล่าวคือ ไม่พบความสัมพันธ์ของตัวเลข Eu (ภาพ 23 ก และ ข) กับกลุ่มตัวแปรใด ๆ แต่พบว่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์จะมีความสัมพันธ์กับกลุ่มตัวแปรไร้มิติสำหรับอธิบายรูปแบบการจัดเรียง ได้แก่ ค่า A/L^2 และ D/L (ภาพ 23 ค และ ง)

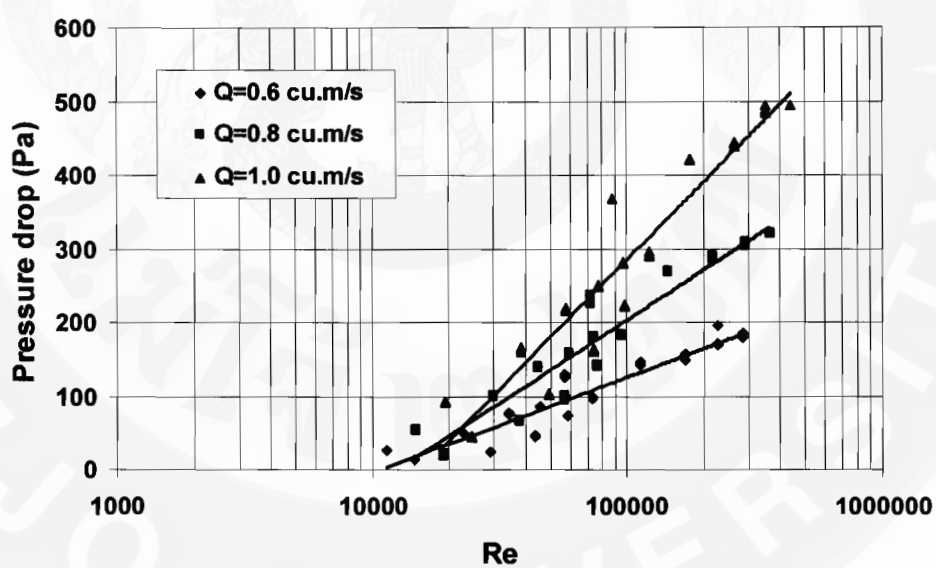


ภาพ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้ จากการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ ในแนวตั้ง กับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เลือกความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ D/L มาใช้เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงค่า ΔP เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.9 และอยู่ในรูปตัวแปรที่สามารถนำไปใช้งานได้ง่าย ด้วยเหตุนี้ ตัวเลขเรย์โนลด์จึงถูกนำมาหาความสัมพันธ์ เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมของตะกร้าทั้ง 2 รูปทรง พบว่า ตัวเลขเรย์โนลด์มีความสัมพันธ์กับค่าความดันตกคร่อมในแบบลอการิทึม โดยความดันตกคร่อมจะมีค่าเพิ่มตามการเพิ่มขึ้นของตัวเลขเรย์โนลด์ และแตกต่างกันตามระดับอัตราการไหล (ภาพ 24)



ก. ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู



ข. ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ภาพ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ กับค่าความดันตกคร่อม ของตะกร้าบรรจุลำไยที่แตกต่างกัน 2 รูปทรง

(ก) ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (ข) ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตัวเลขเรย์โนลด์สามารถนำมาอธิบายรูปแบบการไหลได้ Yunus and John (2006) กล่าวว่า การไหลจะเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow) เมื่อมีเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2,000 และการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) เมื่อมีเลขเรย์โนลด์ มากกว่า 4,000 ดังนั้น การไหลของอากาศผ่านตะกร้าบรรจุลำไยทั้ง 2 รูปทรง จัดได้ว่าเป็นแบบปั่นป่วน เนื่องจากมีตัวเลขเรย์โนลด์สูงเกินกว่า 4,000 และเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่ประกอบอยู่ในตัวเลขเรย์โนลด์ ($\rho v L / \mu$) จากการทดลองกำหนดให้อากาศมีความหนืด (μ) และความหนาแน่น (ρ) คงที่ขณะทำการทดลอง เท่ากับ 1.86×10^{-5} N.s/m² และ 1.164 kg/m³ ตามลำดับ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมจึงขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหล (v) และความสูงของชั้นตะกร้า (L) สอดคล้องกับการทดลองของ บัญชา (2549) และ Freund et. al. (2003) ที่ทำการทดสอบการไหลผ่านของอากาศผ่านชั้นวัสดุกลมอัด แต่แตกต่างกันในเชิงปริมาณ จึงกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า ตัวเลขเรย์โนลด์เป็นค่าที่แสดงถึงความยากง่ายในการไหลของอากาศผ่านการจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไย โดยแสดงออกอยู่ในรูปของความดันตกคร่อม

เมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม กับตัวเลขเรย์โนลด์ข้างต้น ยังพบว่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากการจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไยทั้ง 2 รูปทรง ไม่ได้มีค่าแปรผันตรงกับตัวเลขเรย์โนลด์ แต่มีค่าแปรผันกับตัวเลขเรย์โนลด์แบบลอการิทึม กล่าวคือ ความดันตกคร่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อการไหลของระบบในช่วงที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ 10,000 – 100,000 และจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อมีตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้น ($Re > 100,000$) โดยมีแนวโน้มของค่าความดันตกคร่อม ที่เกิดจากการจัดเรียงตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู สูงกว่าตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จึงกล่าวได้ว่า ค่าความดันตกคร่อมจะอธิบายได้ด้วยความเร็วในการไหลของอากาศ และความสูงของชั้นตะกร้าที่อากาศไหลผ่านแล้ว ลักษณะการเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างของความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น อาจเป็นผลมาจากค่าสัดส่วนช่องว่าง (void factor) ของการไหล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐาน โดยให้ค่าสัดส่วนช่องว่างเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถคิดแยกเป็นปัจจัยเดียวในการวิเคราะห์มิติได้ เนื่องจากรูปทรงของตะกร้าที่แตกต่างกัน 2 รูปทรง โดยเฉพาะตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ไม่เพียงแต่มีช่องว่างภายในระหว่างตะกร้าและผลลำไย แต่ยังมีผลของช่องว่างด้านข้างระหว่างตะกร้า เมื่อทำการจัดเรียงแล้วจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างตะกร้าค่อนข้างมาก จึงทำให้ค่าสัดส่วนช่องว่างของการจัดเรียงแตกต่างกับตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่นำมาจัดเรียง ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงคิดรวมปัจจัยของค่าสัดส่วนช่องว่างเป็นส่วนหนึ่งของความดันตกคร่อม ซึ่งจัดให้เป็นปัจจัยร่วมไม่สามารถแยกคิดต่างหากได้

เพื่อให้เกิดความสะดวกและง่ายในการคาดคะเนค่าความดันตกคร่อม ที่เกิดจากการจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไยทั้ง 2 รูปทรง สำหรับการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ

บังคับในแนวตั้ง จึงวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยโปรแกรม Microsoft Excel™ ของความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการจัดเรียง (D/L) กับตัวเลขเรย์โนลด์ และระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์กับค่าความดันตกคร่อม พบว่า ค่าความดันตกคร่อมของตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ที่ได้จากการคำนวณจากสมการมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 26 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเหลือเพียง 7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการลดขอบเขตของปัจจัยให้แคบลง เช่น การกำหนดจำนวนตะกร้าต่อชั้น และเลือกใช้อัตราการไหลค่าใดค่าหนึ่ง (ตาราง 12) ในขณะที่ผลการทำนายค่าความดันตกคร่อมของตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงเช่นเดียวกัน เมื่อทำนายค่าความดันตกคร่อมของการจัดเรียงจากสมการความสัมพันธ์สำหรับการทำนายการจัดเรียงทุกรูปแบบรวมกัน โดยพบว่า การทำนายมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงถึง 33 เปอร์เซ็นต์ และจะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเหลือเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการจำกัดขอบเขตของปัจจัยให้แคบลง เช่นเดียวกับการศึกษาในตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (ตาราง 13)

ตาราง 12 สมการความสัมพันธ์สำหรับการทำนายค่าความดันตกคร่อมตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับการรวม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง

การจัดเรียง	Flow rate (m^3/s)	Re	ΔP	% error
ทุกรูปแบบ	0.6	$52516 (D/L)^{-1.3015}$	$57.635 \ln(\text{Re}) - 523.75$	29.58
	0.8	$68270 (D/L)^{-1.2937}$	$98.35 \ln(\text{Re}) - 906.26$	24.42
	1.0	$86678 (D/L)^{-1.2699}$	$151.34 \ln(\text{Re}) - 1422.1$	23.90
1 ตะกร้าต่อชั้น	0.6	$90013 (L/D)$	$18.717 \ln(\text{Re}) - 45.231$	0.79
	0.8	$115329 (L/D)$	$32.569 \ln(\text{Re}) - 81.783$	0.97
	1.0	$140037 (L/D)$	$52.547 \ln(\text{Re}) - 161.98$	1.14
4 ตะกร้าต่อชั้น	0.6	$46221 (L/D)$	$46.392 \ln(\text{Re}) - 402.73$	1.53
	0.8	$60455 (L/D)$	$76.921 \ln(\text{Re}) - 668.63$	2.72
	1.0	$78208 (L/D)$	$104.83 \ln(\text{Re}) - 895.64$	1.62
6 ตะกร้าต่อชั้น	0.6	$38093 (L/D)$	$52.538 \ln(\text{Re}) - 480.38$	22.13
	0.8	$49823 (L/D)$	$94.614 \ln(\text{Re}) - 885.99$	16.13
	1.0	$64455 (L/D)$	$149.63 \ln(\text{Re}) - 1435.9$	16.03

ตาราง 13 สมการความสัมพันธ์สำหรับการทำนายค่าความดันตกคร่อมตะกร้าบรรจุล้าไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง

การจัดเรียง	Flow rate (m^3/s)	Re	ΔP	% error
ทุกรูปแบบ	0.6	$50394 (D/L)^{-1.2719}$	$55.642 \ln(\text{Re}) - 514.98$	37.86
	0.8	$65496 (D/L)^{-1.2642}$	$97.413 \ln(\text{Re}) - 918.29$	31.35
	1.0	$83094 (D/L)^{-1.2407}$	$152 \ln(\text{Re}) - 1464.3$	28.92
1 ตะกร้าต่อชั้น	0.6	$82774 (L/D)$	$117.04 \ln(\text{Re}) - 1191.4$	2.09
	0.8	$106054 (L/D)$	$54.203 \ln(\text{Re}) - 375.24$	1.13
	1.0	$128774 (L/D)$	$80.484 \ln(\text{Re}) - 549.74$	1.27
4 ตะกร้าต่อชั้น	0.6	$42552 (L/D)$	$47.021 \ln(\text{Re}) - 446.58$	32.82
	0.8	$55656 (L/D)$	$96.817 \ln(\text{Re}) - 944.26$	19.21
	1.0	$72000 (L/D)$	$151.67 \ln(\text{Re}) - 1522$	21.95
5 ตะกร้าต่อชั้น	0.6	$38443 (L/D)$	$47.205 \ln(\text{Re}) - 418.03$	6.61
	0.8	$50282 (L/D)$	$78.302 \ln(\text{Re}) - 701.14$	3.22
	1.0	$65047 (L/D)$	$117.04 \ln(\text{Re}) - 1065.5$	2.10

การทำนายค่าความดันตกคร่อมจากสมการความสัมพันธ์ของระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งข้างต้น ของตะกร้าทั้ง 2 รูปทรง สามารถนำไปใช้ทำนายประกอบการออกแบบระบบหมุนเวียนอากาศสำหรับการรม SO_2 ผลล้าไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งได้ดี แต่พบว่า ยังมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากการทำนายค่อนข้างสูงที่การจัดเรียงตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูแบบ 6 ตะกร้าต่อชั้น โดยมีค่าประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ และที่การจัดเรียงตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบ 4 ตะกร้าต่อชั้น มีค่าประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาผลจากการทำนายที่รูปแบบการจัดเรียงทั้ง 2 แบบ ที่กล่าวมา (ตาราง 14) พบว่า มักเกิดความผิดพลาดจากการทำนายสูงเมื่อมีการวางซ้อนตะกร้าที่จำนวนชั้นน้อย ๆ (2 – 4 ชั้น) จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์มิติข้างต้นจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมของทุกการจัดเรียงเป็นผลมาจากความเร็วของการไหล (v) และความสูงของชั้นตะกร้า (L) จึงอธิบายได้ว่าที่จำนวนชั้นการวางซ้อน 2-4 ชั้น จะเกิดระยะห่างระหว่างฝาชีกับตะกร้าชั้นบนสุดที่จัดเรียงค่อนข้างมาก จึงเป็นผลทำให้โครงสร้างของผ้าใบพลาสติกที่คลุมตะกร้าล้าไยทั้งหมด เกิดการหุบตัวเข้าด้านในค่อนข้างมาก

เมื่อเทียบกับตะกร้าที่มีจำนวนชั้นการวางซ้อนที่สูงขึ้นไป ซึ่งคาดว่าผลจากการหุบตัวของผ้าใบพลาสติกทำให้อากาศภายในผ้าคลุมพลาสติกมีความเร็วสูงขึ้น จึงให้ค่าความดันตกคร่อมตะกร้าลำไยเปลี่ยนไป โดยค่าที่วัดได้จากการทดลองไม่ได้เป็นผลจากความผิดพลาดของเครื่องมือวัด แต่เป็นสาเหตุมาจากความผิดพลาดในการเก็บบันทึกข้อมูล

ตาราง 14 ค่าความดันตกคร่อมที่ได้จากการทดลอง และการทำนาย ของการจัดเรียงตะกร้าลำไย รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูแบบ 6 ตะกร้าต่อชั้น และตะกร้าลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบ 4 ตะกร้าต่อชั้น

อัตรา การไหล (m ³ /s)	จำนวน ชั้น	รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู 6 ตะกร้าต่อชั้น			รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า 4 ตะกร้าต่อชั้น		
		ความดันตกคร่อม (Pa)		error (%)	ความดันตกคร่อม (Pa)		error (%)
		ทดลอง	ทำนาย		ทดลอง	ทำนาย	
0.6	2	15.8(0.2)	7.4	53.27	14.7(0.3)	4.2	71.80
	4	33.8(0.5)	43.7	29.15	25.1(0.3)	36.7	46.62
	6	57.0(1.0)	64.9	13.98	45.9(1.0)	55.8	21.62
	8	77.7(0.4)	80.0	2.98	73.7(0.3)	69.3	5.96
	10	103.3(1.0)	91.7	11.26	97.5(0.6)	79.8	18.09
0.8	2	33.8(0.6)	20.9	38.30	20.5(0.8)	9.8	51.89
	4	69.9(0.4)	86.4	23.65	66.3(0.9)	76.9	16.09
	6	113.1(0.7)	124.8	10.38	98.8(1.5)	116.2	17.60
	8	153.3(0.6)	152.0	0.84	141.6(1.0)	144.0	1.73
	10	187.1(0.6)	173.1	7.48	181.5(0.5)	165.6	8.73
1.0	2	58.0(0.1)	36.8	36.55	45.7(1.1)	11.6	74.52
	4	112.8(0.6)	140.5	24.59	103.8(2.7)	116.8	12.47
	6	182.5(0.9)	201.2	10.23	163.3(1.8)	178.3	9.21
	8	248.5(0.2)	244.2	1.73	223.4(0.8)	221.9	0.67
	10	298.7(0.5)	277.6	7.06	293.6(1.3)	255.7	12.89

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

การออกแบบห้องรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง

การออกแบบโครงสร้างและส่วนประกอบ

ห้องรม SO_2 ที่ได้ออกแบบและก่อสร้าง มีขนาด 3 x 3 x 2.5 เมตร (กว้าง x ยาว x สูง) ดังมีส่วนประกอบดังภาพ 25 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. โครงสร้างจากเหล็กฉากเคลือบสี ขนาดกว้างด้านละ 3 นิ้ว เพื่อสามารถรองรับน้ำหนักผลผลิต และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นในการปฏิบัติงาน ด้านล่างของห้องมีการติดตั้งล้อ เพื่อสะดวกในการเคลื่อนย้าย และจัดวางในบริเวณที่ต้องการ

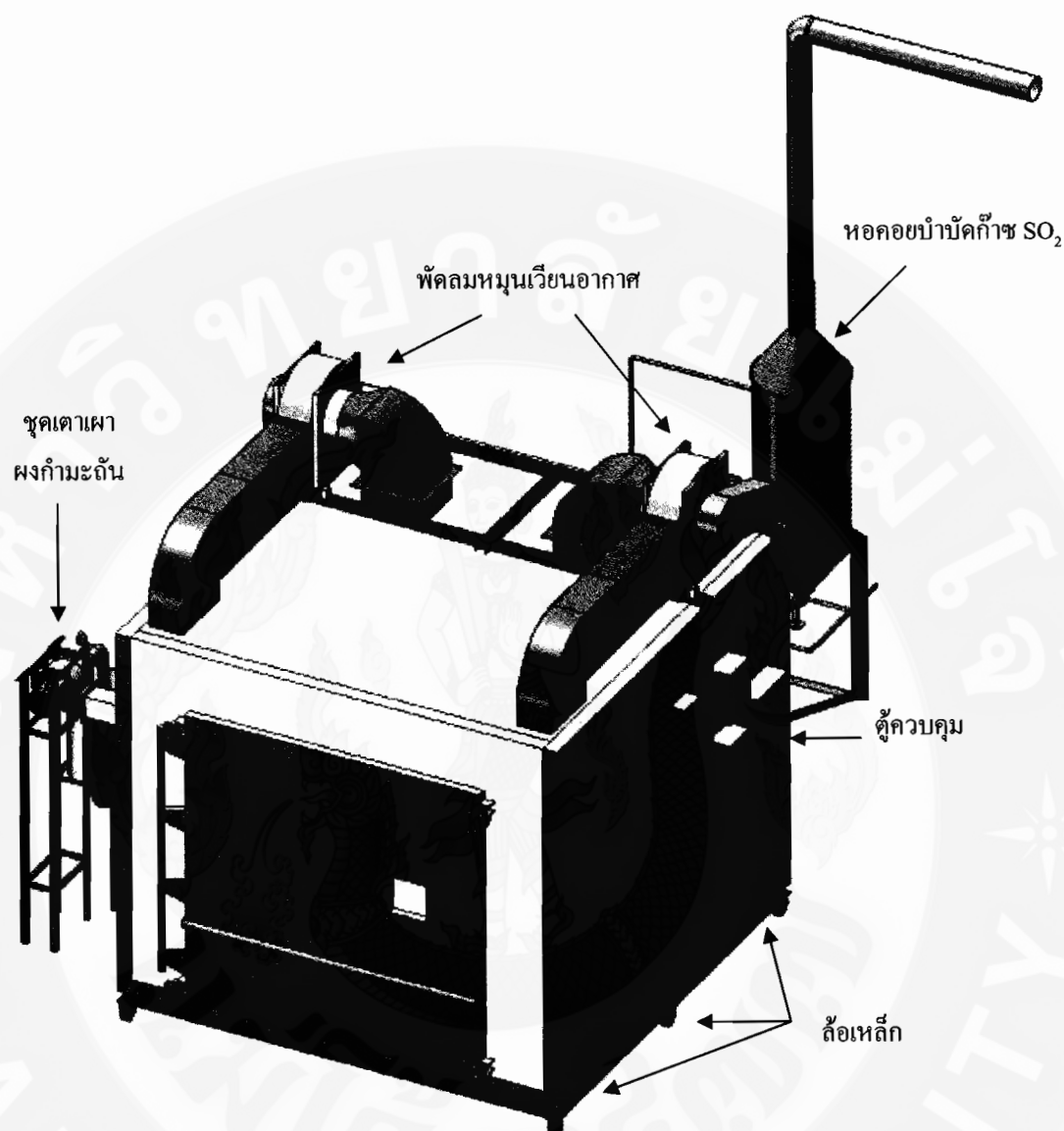
2. ผนังห้อง ประกอบจากวัสดุซึ่งมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับห้องเย็น โดยสร้างจากแผ่นสังกะสีเคลือบทั้งสองด้าน มีฉนวนโฟม หนา 4 นิ้ว คั่นอยู่ตรงกลาง เพื่อเสริมความแข็งแรงของผนัง

3. ประตู ขนาด 2 x 2 เมตร (กว้าง x ยาว) สร้างด้วยวัสดุแบบเดียวกับผนังห้อง มีช่องกระจก สำหรับมองสังเกตความเรียบร้อยของกระบวนการรม SO_2 ภายในห้อง

4. พัฒนาระบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ตัวตัวเรือนสร้างจากสแตนเลส ยี่ห้อ Kruger กระแสไฟฟ้า 3 เฟส (แสดงการคำนวณในหัวข้อถัดไป) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งด้านบนของห้องรม โดยยึดไว้ด้วยโครงเหล็ก เพื่อเสริมความแข็งแรง

5. อุปกรณ์ประกอบท่อสร้างจากสแตนเลส จำนวน 2 ชุด เหมือน ๆ กัน โดยแต่ละชุดประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ชิ้น ได้แก่ ท่อลดขนาดปากทางเข้ารูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้างด้านละ 1 เมตร ท่อลมกลับหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 0.24 x 0.46 เมตร โดยท่อมีความยาว 1.08 เมตร และข้อต่อ 90 องศา ขนาดเดียวกันกับท่อลมกลับ

6. ชุดเตาเผา และหอคอยบำบัดก๊าซ SO_2 โดยได้รับความอนุเคราะห์จากโครงการวิจัย เรื่อง การออกแบบห้องรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับผลล้าไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในระดับอุตสาหกรรม สนับสนุนโดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.)



ภาพ 25 ภาพจำลองแสดงส่วนประกอบห้องรม SO_2 ผลลัพท์สอดคล้องกับระบบหมุนเวียนอากาศแบบ บังคับในแนวตั้ง

การคำนวณหาขนาดพัดลมที่เหมาะสม

จากการออกแบบห้องรมในหัวข้อที่ผ่านมา จะได้ว่า พัดลม 1 ตัว จะสามารถรองรับภาระ หรือความดันตกคร่อมทั้งหมดตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้ 60 และ 50 ตะกร้า ตามลำดับ เพื่อให้พัดลมสามารถใช้งานได้ครอบคลุม ในที่นี้จึงเลือกใช้ข้อมูลทั้งหมดของตะกร้าลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู โดยอัตราการไหลอากาศที่เหมาะสม คือ 5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมลำไย (จักรพงษ์และคณะ, 2550) ดังนั้น อัตรา

การไหลอากาศที่ต้องการ คือ 660×5 เท่ากับ 3,300 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือ ประมาณ 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (m^3/s) ซึ่งคิดเป็น 2,118.88 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (cfm)

การคำนวณหาภาระของพัดลมทั้งหมด คือ ค่าเสียดสูญเสียความดัน หรือความดันตกคร่อมทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบการหมุนเวียนอากาศ หาได้โดยดัดแปลงจาก ASHRAE (2001) ดังนี้

$$\Delta P_{Total} = \Delta P_{Basket} + \Delta P_{Piping} + \Delta P_{Fitting}$$

เขียนได้เป็น
$$\Delta P_{Total} = \Delta P_{Basket} + \left(\frac{fL}{D_h} + \Sigma C \right) \left(\frac{\rho V^2}{2} \right)$$

พิจารณารูปแบบการจัดเรียง และอัตราการไหลอากาศที่ทำให้ระบบมีค่าความดันตกคร่อมมากที่สุด จากตาราง 7 จะได้ว่า ค่าความดันตกคร่อมตะกร้าลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ที่มีการจัดเรียงแบบ 1 ตะกร้า $\times 10$ ชั้น และใช้ระดับอัตราการไหล เท่ากับ 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จะได้ค่าความดันตกคร่อมมากที่สุด ดังนั้น จึงทำการออกแบบโดยทำนายค่าความดันตกคร่อมจากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$Re = 140,037(L/D)$$

$$Re = 140,037(1.5/0.415) = 506,157.83$$

แทนค่า Re ใน

$$\Delta P = 52.547 \ln(Re) - 161.98$$

$$\Delta P = 52.547 \ln(506,157.83) - 161.98$$

$$\Delta P = 528.2 \text{ Pa}$$

ดังนั้น

$$\Delta P_{basket} = 528.2 \text{ Pa}$$

จากนั้นคำนวณความดันตกคร่อมที่เกิดจากการสูญเสียในระบบท่อลมและอุปกรณ์ ข้อต่อ จากห้องรม SO_2 ที่ออกแบบไว้ จะได้

$$\Delta P_{Piping} + \Delta P_{Fitting} = \left(\frac{fL}{D_h} + \Sigma C \right) \left(\frac{\rho V^2}{2} \right)$$

เลือกใช้สมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของ Haaland equation

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -1.8 \log \left[\frac{6.9}{\text{Re}} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

ในการออกแบบผู้วิจัยกำหนดให้ มีความเร็วอากาศภายในท่อ เท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที (ตาราง 4) สำหรับอากาศปกติที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดจลน์ เท่ากับ 1.6×10^{-5} ตารางเมตรต่อวินาที สามารถคำนวณค่า Re ได้จากสมการ

$$\text{Re} = \frac{D_h V}{1000 \nu}$$

ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง ถูกออกแบบใช้ท่อหมุนเวียนอากาศที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 0.24 เมตร และยาว 0.46 เมตร ดังนั้นจึงสามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าได้ เท่ากับ

$$D_h = \frac{4(ab)}{2(a+b)} = \frac{2(460 \times 240)}{460 + 240} = 315.43 \text{ mm}$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$\text{Re} = \frac{315.43 \times 10}{1000(1.6 \times 10^{-5})} = 1.97 \times 10^6$$

เปิดตาราง 25 (ภาคผนวก ง) จะได้ว่าท่อลมสแตนเลส มีความขรุขระ (ε) เท่ากับ 0.002 มิลลิเมตร สามารถคำนวณค่าความขรุขระสัมพัทธ์ได้ ดังนี้

$$\frac{\varepsilon}{D_h} = \frac{0.002}{315.43} = 6.34 \times 10^{-6}$$

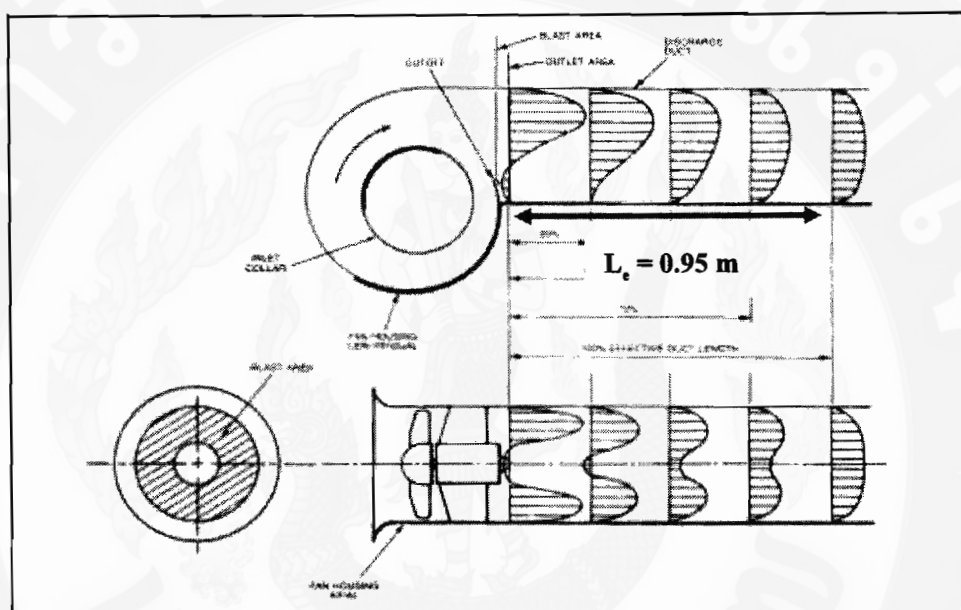
ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจึงคำนวณได้ ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{1.97 \times 10^6} + \left(\frac{6.34 \times 10^{-6}}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

$$f = 0.011$$

เนื่องจากความเร็วในการไหลต่ำกว่า 13 เมตรต่อวินาที ดังนั้น คำนวณหาความยาวประสิทธิผล (effective duct length; L_e) หรือความยาวท่อลมที่เกิดการไหลเต็มหน้าตัดท่อ (ภาพ 26) ได้ดังนี้

$$L_e = \frac{\sqrt{A_0}}{350} = \frac{\sqrt{(240 \times 460)}}{350} = 0.95m$$



ภาพ 26 การคำนวณหาความยาวประสิทธิผล

ที่มา: ASHRAE (2001)

การหาค่าสัมประสิทธิ์ (C) ของอุปกรณ์ประกอบท่อดัง ๆ ในระบบหมุนเวียนอากาศที่ออกแบบ หาได้จากตารางผนวก โดยพัฒนาแต่ละตัวจะมีรายละเอียดของอุปกรณ์ประกอบท่อ ดังนี้

- ข้องอ 90° (C_1) ทำจากสแตนเลส 1 ตัว ขนาด 0.24 เมตร x 0.46 เมตร
- ท่อลมสแตนเลส (C_2) ขนาด 0.24 เมตร x 0.46 เมตร ยาว 1.08 เมตร
- ท่อลดขนาดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (C_3) ขนาด 1 เมตร x 1 เมตร

เปิดตาราง 26 (ภาคผนวก ง) $C_1 = 0.248$ ($r/W = 1$ และ $H/W = 0.52$)

เปิดตาราง 27 (ภาคผนวก ง) $C_2 = 0$ ($Ab/Ao = 1$ และ $L/Le = 1.14$)

เปิดตาราง 28 (ภาคผนวก ง)

$$C_3 = 0.99 \quad (A_i/A_o = 4, Re/1000 = 1970$$

$$\text{และ } \theta = 45)$$

ดังนั้นจะได้ความดันตกคร่อมรวมของพัดลมสำหรับระบบหมุนเวียนอากาศแบบ บังคับในแนวดิ่ง ได้คือ

$$\Delta P_{Piping} + \Delta P_{Fitting} = \left(\frac{fL}{D_h} + \sum C \right) \left(\frac{\rho V^2}{2} \right)$$

$$\Delta P_{Piping} + \Delta P_{Fitting} = \left[\frac{0.011 \times 1.08}{0.315} + (0.248 + 0 + 0.99) \right] \left(\frac{1.164 \times 10^2}{2} \right)$$

$$\Delta P_{Piping} + \Delta P_{Fitting} = 71.6 Pa$$

$$\Delta P_{Total} = \Delta P_{Basket} + \Delta P_{Piping} + \Delta P_{Fitting}$$

$$\Delta P_{Total} = 528.2 + 71.6 = 599.8 Pa (2.41 in H_2O)$$

ดังนั้น คุณสมบัติของพัดลมที่เหมาะสมสำหรับการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียน อากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง คือ อัตราการไหล เท่ากับ 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที หรือประมาณ 2,100 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที สามารถสร้างแรงดัน เท่ากับ 600 ปาสคาล หรือ 2.5 นิ้วน้ำ

การหมุนเวียนอากาศภายในตะกร้าบรรจุลำไยที่จัดเรียงสำหรับการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียน อากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง

ความเร็วลมที่วัดได้ภายในตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ไม่มีความ แตกต่างกันตามจำนวนชั้นของการวางซ้อนตะกร้า แต่มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของ อากาศ ซึ่งค่าความเร็วลมภายในตะกร้าที่อัตราการไหล 0.6 และ 0.8 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จะมีค่า ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ย เท่ากับ 1.37 และ 1.81 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และจะมีค่าแตกต่างกันเมื่อเพิ่มอัตราการไหลอากาศเป็น 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดย จะมีความเร็วลมเฉลี่ย เท่ากับ 2.36 เมตรต่อวินาที ส่วนความเร็วลมในแต่ละชั้นของการจัดเรียง ตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงระดับอัตราการไหลเช่นเดียวกัน และมีความแตกต่างค่อนข้างชัดเจนในแต่ละระดับอัตราการไหล (ตาราง 15)

ตาราง 15 ความเร็วลมภายในตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ใช้ระดับอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ

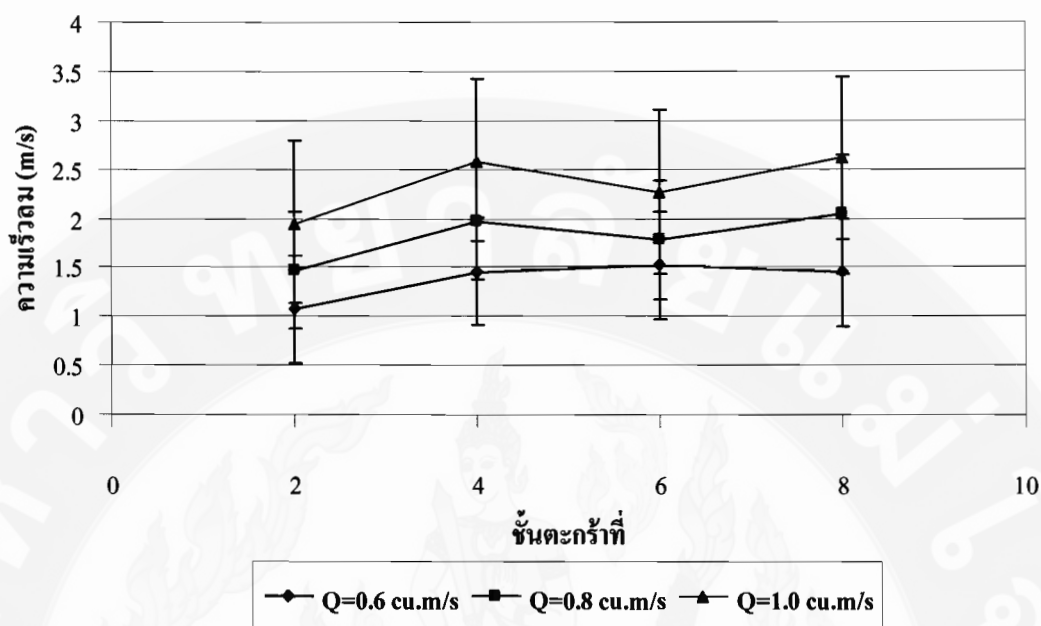
รูปทรงตะกร้า	ชั้นที่	ความเร็วลมภายในตะกร้า (เมตรต่อวินาที)		
		อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)		
		0.6	0.8	1.0
สี่เหลี่ยมคางหมู	2	1.07(0.4)	1.47(0.4)	1.96(0.7)
	4	1.46(0.9)	1.97(0.9)	2.59(1.0)
	6	1.52(0.5)	1.78(0.5)	2.27(0.8)
	8	1.45(0.4)	2.04(0.6)	2.62(0.8)
Sig.		ns	ns	ns
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	2	1.79(0.1)	2.35(0.1)	2.94(0.2)
	4	1.71(0.1)	2.34(0.1)	3.25(0.2)
	6	1.82(0.1)	2.32(0.2)	2.89(0.2)
	8	1.87(0.3)	2.56(0.4)	3.09(0.3)
Sig.		ns	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

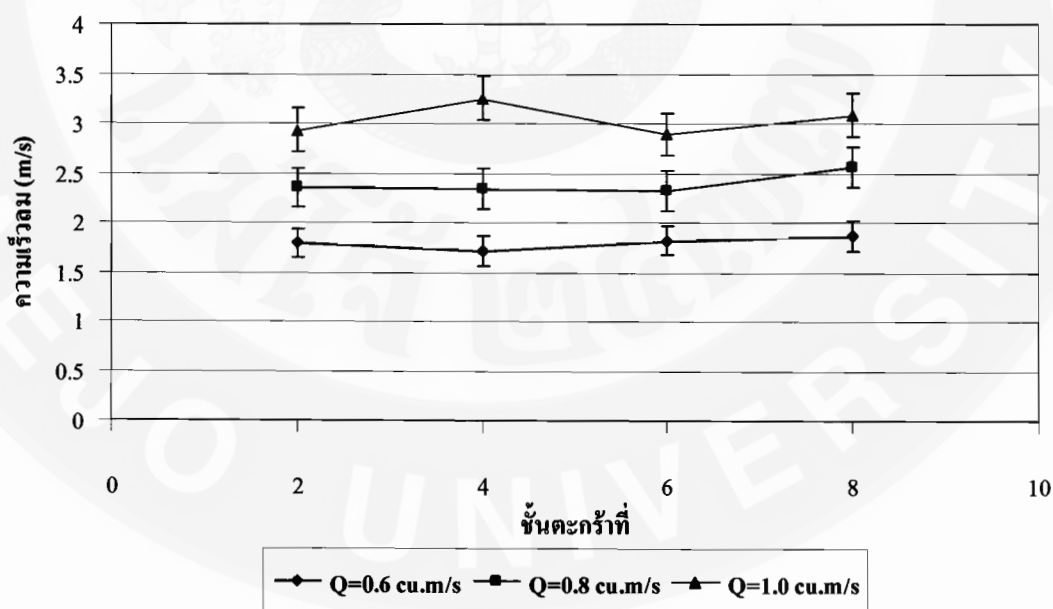
ns หมายถึง ข้อมูลในสคริปต์เดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

จากภาพ 27 แสดงความเร็วลมภายในตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู จะเห็นได้ว่า ที่ระดับชั้นตะกร้าที่สูงขึ้นไป จะมีแนวโน้มของค่าความเร็วลมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากมีระยะห่างจากตัวพัดลมน้อยลง แต่ยังคงพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วลมยังไม่ค่อยสม่ำเสมอ โดยเฉพาะในชั้นที่ 6 ของระดับอัตราการไหล 0.8 และ 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

แต่เมื่อพิจารณาค่าความเร็วลมในแต่ละชั้น ของการจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ก่อนข้างมีความสม่ำเสมอมากกว่าความเร็วลมที่วัดได้จากการจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากชั้นล่างไปชั้นบนเช่นกัน และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับอัตราการไหลของอากาศ ($\alpha = 0.05$) แต่เมื่อพิจารณาที่ระดับอัตราการไหลเดียวกัน ความเร็วเฉลี่ยของอากาศจะไม่มี ความแตกต่างกันตามจำนวนชั้นของการวางซ้อน จึงกล่าวได้ว่าตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีการหมุนเวียนอากาศภายในดีกว่าตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (ภาพ 28)

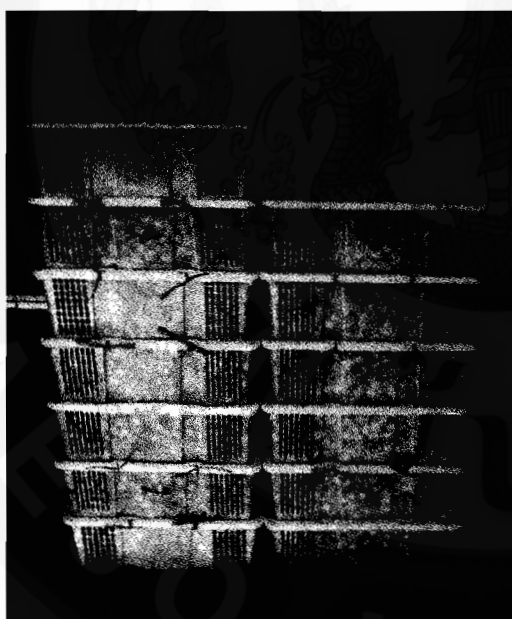


ภาพ 27 ความเร็วลมภายในตึกจำลองรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ที่มีการหมุนเวียนอากาศแบบ บังคับในแนวตั้งด้วยระดับอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ



ภาพ 28 ความเร็วลมภายในตึกจำลองรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีการหมุนเวียนอากาศแบบ บังคับในแนวตั้งด้วยระดับอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ

การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมภายในตะกร้าทั้งสองรูปทรงมีค่าแตกต่างกัน ทั้งรูปแบบ และปริมาณ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากรูปทรงของตะกร้า เนื่องจากตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อจัดเรียงแล้วทุกด้านของตะกร้าจะแนบกัน ส่งผลให้การไหลของอากาศมีทิศทางที่ค่อนข้างแน่นอน โดยมีความเร็วลมเฉลี่ยภายในตะกร้าอยู่ระหว่าง 1.8 – 3.3 เมตรต่อวินาที และมีรูปแบบการไหลของอากาศจากด้านล่างสู่ด้านบน ในขณะที่พื้นที่ด้านล่างของตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูเล็กกว่าด้านบน ดังนั้น พื้นที่ในการไหลเข้าของอากาศจึงน้อยลง โดยมีความเร็วลมเฉลี่ยภายในตะกร้าอยู่ในช่วง 1.0 – 2.6 เมตรต่อวินาที อีกทั้งยังเกิดช่องว่างระหว่างตะกร้า (ภาพ 29) จึงทำให้ลมมีโอกาสเล็ดลอดผ่านช่องว่างด้านข้างโดยไม่ผ่านเข้าไปในตะกร้า อีกทั้งยังอาจทำให้เกิดการปั่นป่วน และการอัดตัวของอากาศที่ไหลไปรวมกันในช่องว่างข้างตะกร้า จึงทำให้อากาศที่ไหลผ่านตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูมีความต้านทาน หรือความดันตกคร่อมมากกว่าตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังผลจากการศึกษาค่าความดันตกคร่อมของการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู

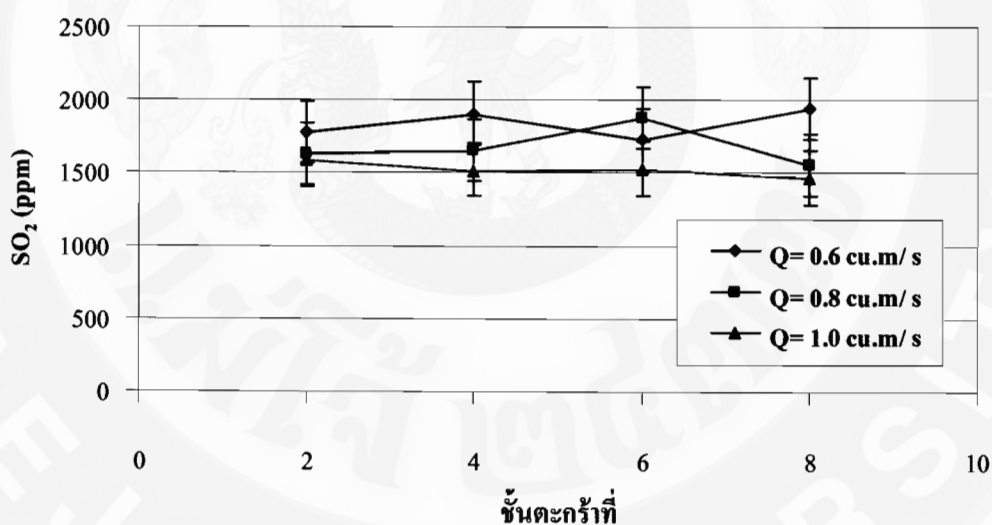


ตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ภาพ 29 ลักษณะช่องว่างเมื่อจัดเรียงของตะกร้าที่แตกต่างกัน 2 รูปทรง

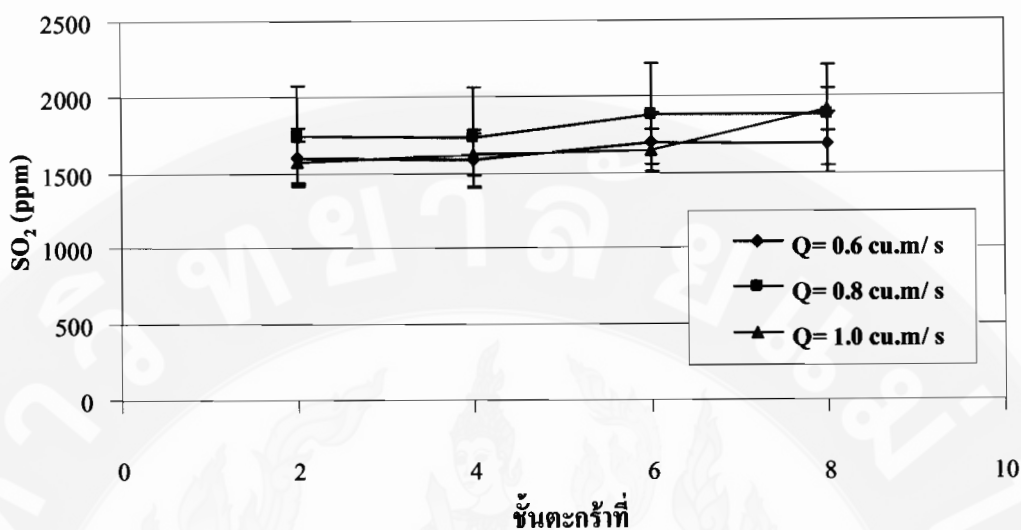
การทดสอบความสม่ำเสมอของปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไย ที่ใช้ระบบการหมุนเวียนอากาศแบบ บังคับในแนวดิ่ง

การเก็บตัวอย่างผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ ในแนวดิ่ง ด้วยอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ ไปวิเคราะห์หาปริมาณ SO_2 ตกค้าง จากภาพ 30 พบว่า การรม SO_2 กับลำไยที่บรรจุด้วยตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในลำไย ที่บรรจุด้วยตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู แตกต่างตามอัตราการไหล โดยมีปริมาณการตกค้าง มากที่สุด เท่ากับ 1,838 ppm เมื่อใช้อัตราการไหลของอากาศ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และที่ ระดับอัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จะมีปริมาณ SO_2 ตกค้าง น้อยที่สุด เท่ากับ 1,527 ppm ในขณะที่ระดับอัตราการไหล 0.8 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับการ ใช้ระดับอัตราการไหลอื่น ๆ และยังพบว่าลำไยที่บรรจุด้วยตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู มีปริมาณ SO_2 ตกค้างหลังสิ้นสุดการรม ไม่แตกต่างกันตามตำแหน่งชั้นของการวางซ้อน ($\alpha = 0.05$)



ภาพ 30 ปริมาณ SO_2 ตกค้างในลำไยที่บรรจุด้วยตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ที่ระดับอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ

จากภาพ 31 ปริมาณ SO_2 ตกค้างในลำไยที่บรรจุด้วยตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีค่าใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันตามระดับอัตราการไหล และตำแหน่งชั้นในการวางซ้อน ($\alpha = 0.05$) แสดงถึงความสม่ำเสมอของอากาศที่หมุนเวียนภายในตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้ดีกว่า การรม SO_2 โดยใช้ตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู



ภาพ 31 ปริมาณ SO_2 ตกค้างในลำไยที่บรรจุด้วยตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ระดับอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ

การรวม SO_2 กับลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง โดยใช้ตะกร้าบรรจุลำไยที่แตกต่างกัน 2 รูปทรง ที่อัตราการไหลแต่ละระดับให้ปริมาณ SO_2 ตกค้างใกล้เคียงกันโดยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างเฉลี่ย ประมาณ 1,600–1,700 ppm พบว่า ไม่มีความแตกต่างในแต่ละตำแหน่งชั้นการจัดเรียง และรูปทรงของตะกร้า ในทุกระดับอัตราการไหล ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ (ตาราง 16) เมื่อพิจารณาความเร็วลมภายในตะกร้าของแต่ละระดับอัตราการไหล จึงกล่าวได้ว่า อัตราการไหลอากาศทุกระดับมีการหมุนเวียนอากาศภายในตะกร้าบรรจุลำไยทั้ง 2 รูปทรง อย่างทั่วถึงและเพียงพอ โดยมีความเร็วลมภายในตะกร้า ระหว่าง 1.0–3.5 เมตรต่อวินาที ซึ่งสูงกว่าที่แนะนำไว้โดยจักรพงษ์และคณะ (2550) ที่แนะนำให้ว่าความเร็วในการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับการรวม SO_2 ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.5 เมตรต่อวินาที จึงมีความเป็นไปได้ที่การมีปริมาณ SO_2 ตกค้าง มีปริมาณใกล้เคียงกัน เป็นผลมาจากคุณสมบัติการดูดซับ SO_2 ที่จำกัดของผลลำไย ซึ่งเท่ากับ 0.66–0.80 กรัมต่อกิโลกรัม (จึงจึง, 2540) เมื่อใช้ระยะเวลาในการหมุนเวียนอากาศที่เท่ากัน (1 ชั่วโมง) จึงทำให้ผลลำไยดูดซับก๊าซ SO_2 ในอัตราที่เท่า ๆ กัน และเกิดการอิ่มตัวจนไม่สามารถดูดซับต่อไปได้ ดังนั้น ปริมาณ SO_2 ตกค้างสุดท้ายหลังสิ้นสุดการรวมจึงมีค่าใกล้เคียงกันในทุกชั้น ของอัตราการไหลทุกระดับ

ตาราง 16 ปริมาณ SO_2 ตกค้าง ที่เกิดจากการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง ของตะกร้าแตกต่างกัน 2 รูปทรง ที่ระดับอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ

รูปทรงตะกร้า	ชั้นที่	ปริมาณ SO_2 ตกค้าง (ppm)		
		อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)		
		0.6	0.8	1.0
สี่เหลี่ยมคางหมู	2	1,780.3(201.5)	1,623.7(298.1)	1,589.4(383.0) ^a
	4	1,907.9(294.3)	1,659.9(63.1)	1,521.6(54.1) ^a
	6	1,723.1(128.3)	1,873.3(411.8)	1,530.9(177.1) ^a
	8	1,941.4(233.6)	1,553.2(72.2)	1,466.3(122.2) ^a
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	2	1,602.0(197.0)	1,745.6(224.0)	1,577.2(256.1) ^a
	4	1,590.7(119.0)	1,734.6(328.0)	1,622.5(67.7) ^{ab}
	6	1,697.5(167.6)	1,882.4(235.7)	1,646.2(139.4) ^{ab}
	8	1,691.2(288.7)	1,876.3(523.2)	1,908.2(80.6) ^b
Sig.		ns	ns	*

หมายเหตุ * = ข้อมูลในสคมภ์เดียวกันอย่างน้อย 1 ค่า มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$)
 ns = ข้อมูลในสคมภ์เดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$)
 ตัวอักษรที่เหมือนกันภายในสคมภ์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

เมื่อพิจารณาผลการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง โดยใช้อัตราการไหลอากาศ เท่ากับ 0.6, 0.8 และ 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที พบว่า การใช้อัตราการไหลทั้ง 3 ระดับ มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยหลังสิ้นสุดการรมไม่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และประกอบห้อง จึงสามารถเลือกใช้พัดลมที่มีอัตราการไหลต่ำที่สุด เท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที หรือ 1,300 CFM ซึ่งจะทำให้ระบบยังคงมีการหมุนเวียนอากาศอย่างทั่วถึงทุกรูปแบบการจัดเรียง ภายในตะกร้าลำไยทั้ง 2 รูปทรง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปประเด็นสำคัญของผลการวิจัย ตามวัตถุประสงค์ คือ การศึกษาและสร้างความสัมพันธ์อย่างง่ายเพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม อันเกิดจากการจัดเรียงตะกร้าบรรจุลำไยทั้ง 2 รูปทรง พร้อมทั้งออกแบบก่อสร้าง และทดสอบการหมุนเวียนอากาศของห้องรม SO_2 ผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนแบบบังคับในแนวตั้ง

สรุป

ความดันตกคร่อมมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับความเร็วลม ซึ่งอธิบายอยู่ในรูปตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) และเนื่องจากตัวเลข Re ยังสัมพันธ์กับรูปแบบการจัดเรียง (D/L) ดังนั้น จึงสามารถคาดคะเนความดันตกคร่อมจากความสมการสัมพันธ์ได้เมื่อกำหนดรูปแบบการจัดเรียง

ห้องรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ ที่ออกแบบสามารถใช้ได้กับการรม SO_2 ผลลำไยสดที่บรรจุในตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และตะกร้ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จำนวน 60 และ 50 ตะกร้า ตามลำดับ ต่อพัสดุมหมุนเวียนอากาศ 1 ตัว โดยสามารถใช้อัตราการไหลอากาศ เท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที หรือ 1,300 ลูกบาศก์ฟุตต่ออนาที จะทำให้ระบบมีการหมุนเวียนอากาศอย่างทั่วถึง และมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยหลังสิ้นสุดการรม อยู่ในช่วง 1,600 – 1,700 ppm ซึ่งไม่แตกต่างกับการใช้ระดับอัตราการไหลที่ 0.8 และ 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษา และตรวจสอบความแม่นยำของความดันตกคร่อมจากความสัมพันธ์ โดยใช้ผลผลิตลำไยที่มีชั้นคุณภาพแตกต่างกัน
2. ควรศึกษาระยะเวลาถึงจุดอิ่มตัวในการดูดซับก๊าซ SO_2 ของผลลำไย เพื่อให้สามารถคาดคะเนระยะเวลาที่น้อยที่สุด และเหมาะสมสำหรับการรม SO_2 ผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง

บรรณานุกรม

- จริงแท้ ศิริพานิช. 2542. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 396 น.
- จริยา วิสิทธิ์พานิช. 2542. โรคและแมลงศัตรูลำไย. เชียงใหม่: ธนพรรณการพิมพ์. 102 น.
- จักรพงษ์ พิมพ์พิมล. 2542. เอกสารประกอบการสอนวิชา ทก 460 เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. เชียงใหม่: ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 206 น.
- จักรพงษ์ พิมพ์พิมล จาคูพงศ์ วาฤทธิ และ สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ. 2550. การรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) กับผลลำไยสดด้วยวิธีหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air. เชียงใหม่: สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย. 87 น.
- ชนวัฒน์ นิตศนวิจิตร. 2548. เอกสารประกอบการสอนวิชา วก 433 เครื่องสูบลและพัดลม. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 356 น.
- ชิงชิง ทองดี. 2540. GMP การรมควันลำไยสดด้วย SO₂. น.21. ใน เอกสารประกอบการสัมมนาเชิงปฏิบัติการชมรมพัฒนาคุณภาพลำไยเพื่อการส่งออก. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- ธีรนุช เจริญกิจ จักรพงษ์ พิมพ์พิมล และ สุชาดา ทองศรี. 2548. สถานการณ์ค้ำคั่งของซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนผลลำไยสดที่จังหวัดเชียงใหม่และลำพูน. น. 28. ใน เอกสารประกอบการสัมมนาวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 5 26-29 เมษายน 2548. กรุงเทพฯ: ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บัญชา ธนปิยะวงษ์. 2549. คุณลักษณะทางความร้อนและการไหลในห้องเผาไหม้แบบชั้นวัสดุกลมอัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 105 น.
- พรรรัตน์ สิ้นชัยพานิช และ จันทรฉาย แจ้สว่าง. 2540. การสำรวจปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์วารสารอาหาร 27 (2): 100-107.
- พิทยา สรวมสิริ และ พาวิน มะโนชัย. 2545. การผลิตลำไยนอกฤดูอย่างมืออาชีพ. เชียงใหม่: ธนพรรณการพิมพ์. 64 น.
- พาวิน มะโนชัย. 2543. ลำไย. เชียงใหม่: สิรินาถการพิมพ์. 115 น.
- พาวิน มะโนชัย และ วินัย วิริยะอลงกรณ์. 2543. พันธุ์ลำไย. น. 12-22. ใน การผลิตลำไย. เชียงใหม่: คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

- มนตรี พิรุณเกษตร. 2545. **กลศาสตร์ของไหล**. กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์. 588 น.
- รัตนา อัดตปัญญา. 2535. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และการควบคุมการใช้กับลำไยสด. น. 20-28. ใน **รายงานการประชุมสัมมนาเรื่องเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวลำไยเพื่อการส่งออก**. 26-27 มิถุนายน 2535. เชียงใหม่: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สดศรี เนียมเปรม. 2535. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และการวิเคราะห์หาปริมาณผลตกค้างในผลลำไยสด. น. 81-95. ใน **รายงานการฝึกอบรมการรมควันซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับลำไยสดหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อการส่งออก**. 18 มีนาคม 2535 ณ โรงแรมมารวยการ์เดน. กรุงเทพฯ: สถาบันอาหาร
- สถาบันอาหาร. 2541. **คู่มือการอบรมควัน-อบแห้งลำไย พร้อมวิธีการผลิตและแบบแปลน**. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม. 74 น.
- สมศักดิ์ ไชยะภินันท์. 2547. **กลศาสตร์ของไหล**. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 736 น.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. **นำเข้า-ส่งออกสินค้าเกษตรที่สำคัญ**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.pht (15 กรกฎาคม 2552).
- อภิรดา รินพล. 2548. **ผลของอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาต่อคุณภาพของผลลำไยพันธุ์คอทิมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 96 น.
- Agar, T., S. Paydas, O. Ozakaya, O. Buyukalaca and F. Ekinici. 2006. Effect of harvest dates and forced air cooling on Post-harvest quality of apricot cv.Precoce Tyrinthe. **Acta horticulturae 701**: 577-580.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). 2001. **ASHRAE Fundamentals Handbook**. Atlanta :GA. 992 p.
- Boyette, M. D., L. G. Wilson and E. A. Ester. 2004. **Postharvest Cooling and Handling of Apples**. [Online]. Available <http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/publicat/postharv/ag-413-1/index.html> (20 September 2004).
- Ferrua, M. J. and R. P. Singh. 2009. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, part I: numerical model. **International Journal of Refrigeration 32(2)**: 335-348.
- Franck, J., B.A. Latorre, R. Torres and J.P. Zoffoli. 2005. The effect of preharvest fungicide and postharvest sulfur dioxide use on postharvest decay of table grapes caused by *Penicillium expansum*. **Postharvest Biology and Technology 37**: 20-30.

- Fraser, H. W. 1998. **Tunnel forced-air coolers for fresh fruits & vegetables**. [Online]. Available <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/98-031.htm> (8 August 2006).
- Freund, H., T. Zeiser, F. Huber, E. Klemm and G. Brenner. 2003. Numerical simulations of single phase reacting flows in randomly packed-bed reactors and experimental validation. **Chemical Engineering Science** **58**: 903-910.
- Han, D.M., Z.X. Wu, and Z.L. Ji. 2001. Effect of SO₂ treatment on the overall quality of longan fruits (cv.Shixia) during cold storage. **Acta Horticulturae** **558**: 375-379.
- Harvey, J.M., C.M. Harris, T.A. Hanke and P.L. Hartsell. 1988. Sulfur dioxide fumigation of table grapes: relative sorption of SO₂ by fruit and packages, SO₂ residues, decay and bleaching. **The American Society for Enology and Viticulture** **39(2)**: 132-136.
- Jaroenkit, T., S. Ussahatanonta and J. Phimphimol. 2008. Postharvest method to reduce sulfur dioxide residues in fresh longan. **Acta horticulturae** **804**: 183-190.
- Jiang, Y. and Y. Li. 2001. Effect of coating on postharvest life and quality of longan fruit. **Food Chemistry** **73**: 139-143.
- Law, C. L., S. S. Sablani and A. S. Mujumdar. 2006. **Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques**. Canada: Taylor & Francis group. 636 p.
- Lin, H.T., S.J. Chen and Q.Z. Hong. 2001. A study of the shelf-life of cold-stored longan fruit. **Acta Horticulturae** **558**: 353-357.
- Luvisi et al., 1992. **Sulfur dioxide fumigation of table grapes**. California: University of California. 21 p.
- Martinez-Romero, D., S. Castillo and D. Valero. 2003. Forced-air cooling applied before fruit handling to prevent mechanical damage of plums (*Prunus salicina* Lindl.). **Postharvest Biology and Technology** **28** : 135-142.
- Metal Candling, Inc. 2006. **High Pressure-Composite Tube Axial Fans**. [Online]. Available www.compositefantechology.com/tubeaxial/tahp/ (23 January 2006).
- Sadashive, B. G., G. S. V. L. Narasimham and M. V. Krishna Murthy. 1997. Forced-air precooling of spherical foods in bulk: A parametric study. **International of Heat and Fluid Flow** **18(6)**: 613-624.

- State Master, Inc. 2003. **Components of Centrifugal Fans**. [Online]. Available www.statemaster.com/encyclopedia/Centrifugal-fan (10 May 2003)
- Thompson, J. and J. Knutson. 1997. forced air cooling of strawberries in clamshell baskets. **Perishable Handling Newsletter 90**: 29 p.
- Tongdee, S.C. 1994. Sulfur dioxide fumigation in postharvest handling of fresh longan and lychee for export. p 186-195. In An International Conference Postharvest Handling of Tropical Fruits. Bangkok: ACIAR.
- Valentas, K. J., Leon Levine and J. P. Clark. 1991. **Food Processing Operations and Scale-up**. New York: Marcel Dekker. 398 p.
- Watkins, J. B. 1990. **Forced-Air Cooling**. Queensland: Formerly of Horticulture branch Department of Primary Industries. 56 p.
- White, F. M. 2008. **Fluid mechanics**. 6th. Rhode Island: McGraw-Hill. 864 p.
- Yen, C.R., C.N. Chau, J.W. Chang and J.C. Tzeng, 2000. **Longan product in Taiwan**. [Online]. Available http://www.actahort.org/books/665_6.html (7 December 2005).
- Yunus A. Cengel and John M. Cimbala. 2006. **Fluid Mechanics : Fundamental and Applications**. Singapore: McGraw-Hill. 960 p.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย



ภาพผนวก 1 เครื่องวัดค่าความเร็วลม ซีห้อ TESTO รุ่น 400



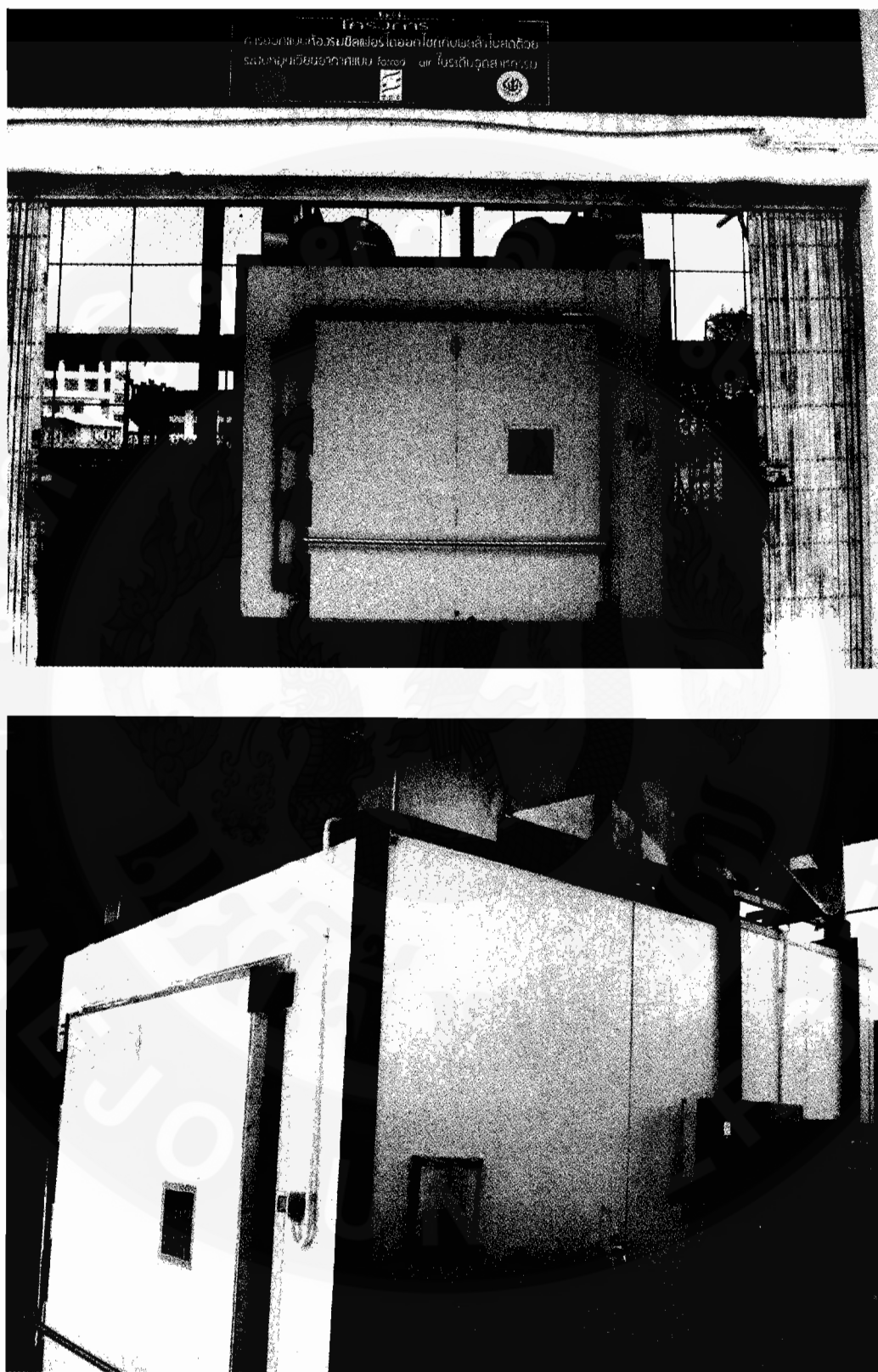
ภาพผนวก 2 เครื่องวัดค่าความดันตกคร่อม TESTO รุ่น 454



ภาพผนวก 3 เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP2100S



ภาพผนวก 4 ชุดวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้าง



ภาพผนวก 5 ห้องรม SO_2 ผลทำลายสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง



ภาพผนวก 6 การติดตั้งพัดลมหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งด้านบนห้องรม



ภาพผนวก 7 ตู้ควบคุมการทำงานของห้องรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง



ภาคผนวก ข

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางผนวก 1 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อความดันตกคร่อมของ
ตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู

Source	df	Sum of squares	Means square	F	Sig.
No. of stack (A)	2	1087442.616	543721.308	559085.81**	0.000
Level (B)	4	215617.842	53904.461	55427.696**	0.000
Flow rate (C)	2	974599.452	487299.726	501069.87**	0.000
A * B	8	37571.368	4689.671	4822.192**	0.000
A * C	4	142837.746	35709.437	36718.516**	0.000
B * C	8	29381.248	3672.656	3776.438**	0.000
A * B * C	16	6260.974	391.311	402.369**	0.000
Error	90	87.527			
Total	134	8429617.840			

หมายเหตุ ** หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางผนวก 2 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อความดันตกคร่อมของ
ตะกร้าบรรจุลำไยรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Source	df	Sum of squares	Means square	F	Sig.
No. of stack (A)	2	942195.755	471097.878	50137.340**	0.000
Level (B)	4	274028.943	68507.236	7290.991**	0.000
Flow rate (C)	2	717604.537	358802.269	38186.102**	0.000
A * B	8	18591.743	2323.968	247.332**	0.000
A * C	4	133285.853	33321.463	3546.290**	0.000
B * C	8	38091.468	4761.433	506.743**	0.000
A * B * C	16	4367.451	272.966	29.051**	0.000
Error	90	845.653	9.396		
Total	135	6397064.850			

หมายเหตุ ** หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางผนวก 3 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วในการไหลของอากาศ

Source	df	Sum of squares	Means square	F	Sig.
Flow rate (A)	2	19.939	9.969	38.970**	0.000
Basket shape (B)	1	7.538	7.538	29.464**	0.000
Level (C)	3	1.655	0.552	2.157	0.101
A * B	2	0.264	0.132	0.516	0.599
A * C	6	0.494	0.082	0.322	0.924
B * C	3	0.733	0.244	0.956	0.419
A * B * C	6	0.096	0.016	0.063	0.999
Error	72	18.419	0.256		
Total	96	484.766			

หมายเหตุ ** หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางผนวก 4 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณ SO₂ ตกค้างในผลลำไยหลังสิ้นสุดการรม

Source	df	Sum of squares	Means square	F	Sig.
Flow rate (A)	2	388432.804	194216.402	3.308*	0.042
Basket shape (B)	1	27095.040	27095.040	0.461	0.499
Level (C)	3	123165.762	41055.254	0.699	0.556
A * B	2	618753.758	309376.879	5.269**	0.007
A * C	6	214479.799	35746.633	0.609	0.722
B * C	3	172591.566	57530.522	0.980	0.407
A * B * C	6	260454.321	43409.054	0.739	0.620
Error	72	4227631.000	58717.097		
Total	96	282729861.8			

หมายเหตุ *,** หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ 0.01 ตามลำดับ

ตารางผนวก 5 ตารางเปรียบเทียบค่าความความเร็วลมเฉลี่ยภายในตะกร้า ที่อัตราการไหล 3 ระดับ

Source	Mean	StDev	Sig.
0.6 m ³ /s	1.59	0.45	0.000
0.8 m ³ /s	2.10	0.54	
1.0 m ³ /s	2.70	0.67	

ตารางผนวก 6 ตารางเปรียบเทียบค่าความความเร็วลมเฉลี่ยภายในตะกร้า ของตะกร้าที่แตกต่างกัน 2 รูปทรง

Source	Mean	StDev	Sig.
White	1.85	0.76	0.000
Red	2.41	0.56	

ตารางผนวก 7 ตารางเปรียบเทียบปริมาณ SO₂ ตกค้างในผลลำไย ที่อัตราการไหล 3 ระดับ

Source	Mean	StDev	Sig.
0.6 m ³ /s	1741.77	223.78	0.045
0.8 m ³ /s	1743.63	295.64	
1.0 m ³ /s	1607.77	211.16	

ตารางผนวก 8 ตารางเปรียบเทียบปริมาณ SO₂ ตกค้างในผลลำไย ของตะกร้าที่แตกต่างกัน 2 รูปทรง

Source	Mean	StDev	Sig.
White	1680.92	258.76	0.516
Red	1714.52	246.61	



ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์มิติ

การวิเคราะห์มิติ ได้ตั้งสมมติฐานให้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม (Pressure drop; ΔP) เป็นผลมาจากปัจจัยทั้งหมด 6 ปัจจัย ดังนี้

1. ความเร็วของการไหลอากาศ (V)
2. ความหนาแน่นของของไหล (ρ)
3. ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (μ)
4. เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของชั้นตะกร้า (D)
5. พื้นที่หน้าตัดชั้นตะกร้า (A)
6. ความสูงของการวางซ้อนชั้นตะกร้า (L)

จากนั้น ทำการจัดกลุ่มตัวแปรให้อยู่ในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ โดยใช้ทฤษฎีบทกึ่งแฮมไพ (Buckingham Pi Theorem) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$0 = f(\Delta P, V, \rho, \mu, A, D, L)$$

นำตัวแปรทั้งหมดมาเขียนให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ โดยเลือกใช้มิติปฐมภูมิ MLt จะได้

ΔP	V	ρ	μ	A	D	L
$\frac{M}{Lt^2}$	$\frac{L}{t}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{Lt}$	L^2	L	L

ทำการเลือกพารามิเตอร์ตัวซ้ำ ที่คาดว่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อมมาก ในที่นี้เลือก ρ , V และ L ดังนั้น

กลุ่มตัวแปรไร้มิติตัวที่ 1 (π_1) หาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \rho^a V^b L^c \Delta P \\ &= \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L^c) \left(\frac{M}{Lt^2}\right)\end{aligned}$$

$$M: \quad a + 1 = 0 \qquad a = -1$$

$$L: \quad -3a + b + c - 1 = 0 \qquad c = 0$$

$$t: \quad -b - 2 = 0 \qquad b = -2$$

จะได้ว่า $\pi_1 = \rho^{-1} V^{-2} L^0 \Delta P$
 ดังนั้น $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho V^2} = \text{Euler number (Eu)}$

กลุ่มตัวแปรไร้มิติตัวที่ 2 (π_2) หาได้ดังนี้

$$\pi_2 = \rho^a V^b L^c \mu$$

$$= \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L^c) \left(\frac{M}{Lt}\right)$$

M: $a + 1 = 0$ $a = -1$

L: $-3a + b + c - 1 = 0$ $c = -1$

t: $-b - 1 = 0$ $b = -1$

จะได้ว่า $\pi_1 = \rho^{-1} V^{-1} L^{-1} \mu$
 ดังนั้น $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V L}$ ซึ่ง $Re = \frac{\rho V L}{\mu}$

กลุ่มตัวแปรไร้มิติตัวที่ 3 (π_3) หาได้ดังนี้

$$\pi_3 = \rho^a V^b L^c A$$

$$= \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L^c) (L^2)$$

M: $a = 0$

L: $-3a + b + c + 2 = 0$ $c = -2$

t: $-b = 0$

จะได้ว่า $\pi_3 = \rho^0 V^0 L^{-2} A$
 ดังนั้น $\pi_3 = \frac{A}{L^2}$

กลุ่มตัวแปรไร้มิติตัวที่ 4 (π_4) หาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\pi_4 &= \rho^a V^b L^c D \\ &= \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L^c)(L)\end{aligned}$$

M: $a = 0$

L: $-3a + b + c + 1 = 0$ $c = -1$

t: $-b = 0$

จะได้ว่า $\pi_4 = \rho^0 V^0 L^{-1} D$
 ดังนั้น $\pi_4 = \frac{D}{L}$

จากการวิเคราะห์มิติได้กลุ่มตัวแปรไร้มิติทั้งหมด 4 กลุ่ม จึงนำกลุ่มตัวแปรไร้มิติทั้งหมดมาตรวจสอบโดยใช้มิติปฐมภูมิแบบ FLt จะได้ว่า

$$\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho V^2} = \frac{F}{L^2} \times \frac{L^4}{F t^2} \times \frac{t^2}{L^2} = 1$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V L} = \frac{F t}{L^2} \times \frac{L^4}{F t^2} \times \frac{t}{L} \times \frac{1}{L} = 1$$

$$\pi_3 = \frac{A}{L^2} = \frac{L^2}{L^2} = 1$$

$$\pi_4 = \frac{D}{L} = \frac{L}{L} = 1$$

ดังนั้น จะได้ว่า $0 = f\left(\frac{\Delta P}{\rho V^2}, \frac{\rho V L}{\mu}, \frac{A}{L^2}, \frac{D}{L}\right)$

หรือเขียนได้เป็น $0 = f\left(Eu, Re, \frac{A}{L^2}, \frac{D}{L}\right)$



ภาคผนวก ง

คำคงที่สำหรับการคำนวณทางกลศาสตร์ของไหล

ภาพผนวก 8 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (ϵ)

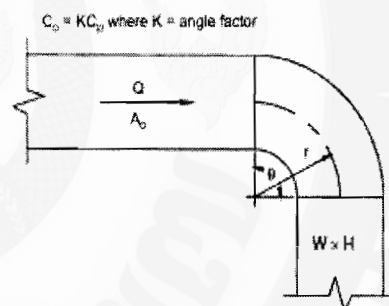
Material	Roughness, ϵ	
	ft	mm
Glass, plastic	0	0
Concrete	0.003–0.03	0.9–9
Wood stave	0.0016	0.5
Rubber, smoothed	0.000033	0.01
Copper or brass tubing	0.000005	0.0015
Cast iron	0.00085	0.26
Galvanized iron	0.0005	0.15
Wrought iron	0.00015	0.046
Stainless steel	0.000007	0.002
Commercial steel	0.00015	0.045

ภาพผนวก 9 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับท่อรูปทรงสี่เหลี่ยม งอ 90°

CR3-1 Elbow, Smooth Radius, Without Vanes

C_p Values											
r/W	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00
0.50	1.53	1.38	1.29	1.18	1.06	1.00	1.00	1.06	1.12	1.16	1.18
0.75	0.57	0.52	0.48	0.44	0.40	0.39	0.39	0.40	0.42	0.43	0.44
1.00	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.21	0.21
1.50	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17
2.00	0.20	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15

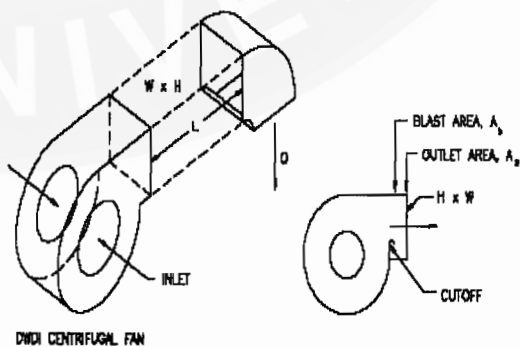
Angle Factor K											
θ	0	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
K	0.00	0.31	0.45	0.60	0.78	0.90	1.00	1.13	1.20	1.28	1.40



ภาพผนวก 10 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับท่อตรงออกจากพัดลมรูปทรงสี่เหลี่ยม

SR7-9 Fan Outlet, Centrifugal, DWDI, with Elbow (Position A)

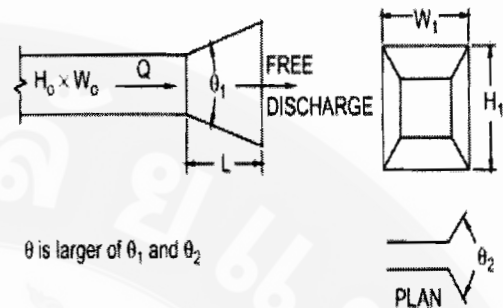
A_p/A_o	C_o					
	0.00	0.12	0.25	0.50	1.00	10.00
0.4	3.20	2.50	1.80	0.80	0.00	0.00
0.5	2.20	1.80	1.20	0.53	0.00	0.00
0.6	1.60	1.40	0.80	0.40	0.00	0.00
0.7	1.00	0.80	0.53	0.26	0.00	0.00
0.8	0.80	0.67	0.47	0.18	0.00	0.00
0.9	0.53	0.47	0.33	0.18	0.00	0.00
1.0	0.53	0.47	0.33	0.18	0.00	0.00



ภาพผนวก 11 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับท่อขยายรูปทรงพีระมิด

SR2-5 Pyramidal Diffuser, Free Discharge

A_1/A_0	Re/1000	C_p Values								
		θ								
		8	10	14	20	30	45	60	90	120
1	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	50	0.65	0.68	0.74	0.82	0.92	1.05	1.10	1.08	1.08
	100	0.61	0.66	0.73	0.81	0.90	1.04	1.09	1.08	1.08
	200	0.57	0.61	0.70	0.79	0.89	1.04	1.09	1.08	1.08
	400	0.50	0.56	0.64	0.76	0.88	1.02	1.07	1.08	1.08
	2000	0.50	0.56	0.64	0.76	0.88	1.02	1.07	1.08	1.08
4	50	0.53	0.60	0.69	0.78	0.90	1.02	1.07	1.09	1.09
	100	0.49	0.55	0.66	0.78	0.90	1.02	1.07	1.09	1.09
	200	0.42	0.50	0.62	0.74	0.87	1.00	1.06	1.08	1.08
	400	0.36	0.44	0.56	0.70	0.84	0.99	1.06	1.08	1.08
	2000	0.36	0.44	0.56	0.70	0.84	0.99	1.06	1.08	1.08
6	50	0.50	0.57	0.66	0.77	0.91	1.02	1.07	1.08	1.08
	100	0.47	0.54	0.63	0.76	0.98	1.02	1.07	1.08	1.08
	200	0.42	0.48	0.60	0.73	0.88	1.00	1.06	1.08	1.08
	400	0.34	0.44	0.56	0.73	0.86	0.98	1.06	1.08	1.08
	2000	0.34	0.44	0.56	0.73	0.86	0.98	1.06	1.08	1.08
10	50	0.45	0.53	0.64	0.74	0.85	0.97	1.10	1.12	1.12
	100	0.40	0.48	0.62	0.73	0.85	0.97	1.10	1.12	1.12
	200	0.34	0.44	0.56	0.69	0.82	0.95	1.10	1.11	1.11
	400	0.28	0.40	0.55	0.67	0.80	0.93	1.09	1.11	1.11
	2000	0.28	0.40	0.55	0.67	0.80	0.93	1.09	1.11	1.11





ภาคผนวก จ

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายพรเทพ จอมเมือง
เกิดเมื่อ 30 กันยายน 2524
สถานที่เกิด จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2542 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนจอมทอง
จังหวัดเชียงใหม่
พ.ศ. 2546 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว)
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
พ.ศ. 2552 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร)
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่