



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับผลล้าไยสดด้วยวิธีหมุนเวียน

อากาศแบบ forced-air

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพงษ์ พิมพ์พิมล และคณะ

กุมภาพันธ์ 2550

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับผลลำไยสดด้วยวิธีหมุนเวียน

อากาศแบบ forced-air

คณะผู้วิจัย

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพงษ์ พิมพ์พิมล ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว
คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จาคูพงศ์ วาฤทธิ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร
คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
3. อาจารย์สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร
คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

สนับสนุนโดย

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
คำนิยาม	ก
Executive summary	ข
บทคัดย่อ	จ
Abstract	ฉ
ชื่อ โครงการ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ต้องทำการวิจัย	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
รายละเอียดของวิธีการทดลอง ผลการทดลอง วิจัยรณั สรุปล และตารางข้อมูลเป็นรายกิจกรรม	6
กิจกรรมที่ 1 การทดสอบประสิทธิภาพระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ภายในห้องรม SO ₂ ทั้งในเชิงงานนำร่อง (pilot scale) และเชิงกัการค้ำ (semi- commercial scale)	6
1.1 การทดสอบประสิทธิภาพระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ภายในห้องรม SO ₂ เชิงงานนำร่อง (pilot scale)	7
1.2 การทดสอบประสิทธิภาพระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ภายในห้องรม SO ₂ เชิงงานกัการค้ำ (semi-commercial scale)	23
1.3 สรุปลผลการทดลองกิจกรรมที่ 1	32
กิจกรรมที่ 2 การรม SO ₂ จากการเผาผลก้ำมะถันกับผลล้าไยสดด้วระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในเชิงงานนำร่องและกัการค้ำ	33
2.1 การรม SO ₂ จากการเผาผลก้ำมะถันกับผลล้าไยสดด้วระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในเชิงงานนำร่อง	33
2.1.1 กิจกรรมและระเบียบวักัยที่ปรบัปรุ้งใหม่	33
2.1.2 วักัยการทดลอง	34
2.1.3 ผลการทดลองและวักัยรณั	37
2.1.4 สรุปลผลการทดลองกิจกรรมที่ 2.1	46
2.2 การรม SO ₂ จากการเผาผลก้ำมะถันกับผลล้าไยสดด้วระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในเชิงกัการค้ำ	47
2.2.1 กิจกรรมและระเบียบวักัยที่ปรบัปรุ้งใหม่	47
2.2.2 วักัยการทดลอง	48
2.2.3 ผลการทดลองและวักัยรณั	49
2.2.4 สรุปลผลการทดลองกิจกรรมที่ 2.2	56

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
กิจกรรมที่ 3 การรวม SO ₂ จากถังอัดความดันโดยตรง (directly SO ₂ gas) กับผลล้าไยสด ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในเชิงงานนาร่องและเชิงกึ่งการค้า	57
3.1 กิจกรรมและระเบียบวิธีที่ปรับปรุงใหม่	57
3.2 วิธีการทดลอง	58
3.3 ผลการทดลองและวิจารณ์	61
3.4 สรุปผลการทดลองกิจกรรมที่ 3	67
กิจกรรมที่ 4 การศึกษาค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการรวมผลล้าไยด้วย SO ₂ จากการเผาผงกำมะถัน และการใช้แก๊ส SO ₂ จากถังอัดความดันโดยตรง	68
4.1 การศึกษาค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการรวมผลล้าไยด้วย SO ₂ จากการเผา ผงกำมะถัน	68
4.2 ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยสำหรับการรวม SO ₂ จากถังอัดความดันโดยตรง	70
4.3 สรุปผลการทดลองกิจกรรมที่ 4	72
ปัญหาและข้อเสนอแนะจากงานวิจัย	73
การใช้ประโยชน์จากงานวิจัย	77
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก	81

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x4x4	7
2	การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 1x4x4	8
3	ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที ผ่านตะกร้าที่มีผลลำไยในเชิงงานนำร่อง ตามการจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x2x4	13
4	ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที ผ่านตะกร้าที่มีผลลำไยในเชิงงานนำร่อง ตามการจัดเรียงตะกร้าแบบ 1x4x4	13
5	ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air	14
6	ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air	14
7	ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยภายในตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไยของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air ที่ระดับความเร็วลมต่างๆ	15
8	ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ผ่านตะกร้าที่มีผลลำไยในเชิงงานนำร่อง	18
9	ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที ผ่านตะกร้าที่มีผลลำไยในเชิงงานนำร่อง	18
10	ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที ผ่านตะกร้าที่มีผลลำไยในเชิงงานนำร่อง	18
11	การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 3x3x7 (คอลัมน์xแถวxชั้น)	23
12	การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x4x8 (คอลัมน์xแถวxชั้น)	23
13	ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ผ่านตะกร้าที่มีผลลำไยในเชิงกึ่งการค้า ตามการจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7 ซึ่งใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ผ่านตะกร้าที่มีผลลําไยในเชิงกึ่งการค้า ตามการจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x4x8 ซึ่งใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1 500 ฟุตต่อนาทีจำนวน 2 ตัว	29
15	ผลลําไยที่ไม่ได้ผ่านการรม SO ₂	34
16	ผลลําไยที่ผ่านการรม SO ₂ จากการเผาพวงกำมะถันด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ซึ่งมีระดับ SO ₂ หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm	34
17	ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างผลลําไยภายในตะกร้า	34
18	การตรวจสอบปริมาณ SO ₂ ตกค้างภายในห้องรมด้วย dosimeter tubes	35
19	การใช้พัดลมเป่าไปยังตะกร้าบรรจุผลลําไยเพื่อป้องกันการดูดแก๊สต่อเนื่อง (carry over effect)	35
20	การตรวจสอบปริมาณ SO ₂ ภายในตะกร้าบรรจุผลลําไย	35
21	ลักษณะการเกิดโรคบนผิวของผลลําไย	40
22	ลักษณะผลลําไยที่มีผิวลายหรือที่เรียกว่า “การเกิดลายแผนที่”	42
23	การสุ่มเก็บตัวอย่างผลลําไยที่ผ่านการรม SO ₂ ด้วยการเผาพวงกำมะถันในเชิงกึ่งการค้า	48
24	ตูรม SO ₂ ผลลําไยสดขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร	57
25	การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลําไยในเชิงงานนำร่องซึ่งใช้ผลลําไยจำนวน 16 ตะกร้า	58
26	การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลําไยในเชิงกึ่งการค้าซึ่งใช้ผลลําไยจำนวน 56 ตะกร้า	59
27	การนำแก๊ส SO ₂ จากถังอัดความดันโดยตรงผ่านชุดควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส SO ₂ เข้าสู่ตูรม	59
28	ผลลําไยที่ติดผลนอกฤดูซึ่งเก็บเกี่ยวในเดือนมีนาคมและผลลําไยที่ติดผลในฤดูซึ่งเก็บเกี่ยวในเดือนกรกฎาคม	64
29	การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลําไยที่ใช้ในทางการค้าแบบ 2x2x4	74
30	ช่องระบายอากาศแบบต่างๆ ของตะกร้าบรรจุผลลําไยเชิงการค้าในปัจจุบัน	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
31	การทดลองรม SO_2 จากการการเผาพวงกำมะถันกับผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air เปรียบเทียบกับระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ของบริษัทพีซีไทยฟรุต จ. ลำพูน	78
32	การทดลองรม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงกับผลลำไยสดที่บรรจุในตะกร้าขาวด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air	78
ภาพผนวกที่		
1	ผลลำไยชุดควบคุมเปรียบเทียบกับผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 จากการเผาพวงกำมะถันในแต่ละสิ่งทดลองเชิงงานนำร่องหลังจาการรม SO_2 ทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	82
2	ผลลำไยชุดควบคุมเปรียบเทียบกับผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 จากการเผาพวงกำมะถันในแต่ละสิ่งทดลองเชิงกึ่งการค้าหลังจาการรม SO_2 ทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	83
3	ผลลำไยชุดควบคุมเปรียบเทียบกับผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรง (directly SO_2 gas) ในเชิงงานนำร่องหลังจาการรม SO_2 ทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	84
4	ผลลำไยชุดควบคุมเปรียบเทียบกับผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรง (directly SO_2 gas) ในเชิงกึ่งการค้าหลังจาการรม SO_2 ทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	84

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลําไยตามการจัดเรียงตะกร้าแต่ละรูปแบบ โดยใช้ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที	10
2	ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ผ่านตะกร้าส่วนในและตะกร้าส่วนนอกของการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลําไยแต่ละรูปแบบ ทั้งที่เป็นตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลําไย โดยใช้ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที	11
3	ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลําไยของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air ที่ระดับความเร็วลมต่างๆ	14
4	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของความเร็วการไหลอากาศผ่านตะกร้าเปล่า	16
5	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของความเร็วการไหลอากาศผ่านตะกร้าที่มีผลลําไย	16
6	ความเร็วเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการไหลอากาศผ่านตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลําไย	16
7	ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยผ่านตะกร้าเปล่าตามตำแหน่งที่สมมาตรกันระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air ที่ระดับความเร็วพัดลม 1,100 และ 1,500 ฟุตต่อนาที ใช้ $\alpha=0.05$	17
8	ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยผ่านตะกร้าที่มีผลลําไยตามตำแหน่งที่สมมาตรกันระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air ที่ระดับความเร็วพัดลม 1,100 และ 1,500 ฟุตต่อนาที ใช้ $\alpha=0.05$	17
9	ปริมาณ SO_2 ตกค้างหลังจากรมทันทีในส่วนของเนื้อและเปลือกผลลําไยซึ่งผ่านการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air	21
10	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลลําไย	22
11	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเนื้อผลลําไย	22

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
12	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกและเนื้อผลลำไย	22
13	ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลลำไยของตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air ที่ระดับความเร็วพัดลม 1,100 และ 1,500 ฟุตต่อนาที ใช้ $\alpha=0.05$	22
14	ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในตะกร้าเปล่าตามการจัดเรียงตะกร้าแต่ละรูปแบบในเชิงกึ่งการค้ำ โดยใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 1 ตัว	25
15	ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในตะกร้าเปล่าตามการจัดเรียงตะกร้าแต่ละรูปแบบในเชิงกึ่งการค้ำ โดยใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว	26
16	ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในตะกร้าที่มีผลลำไยตามการจัดเรียงตะกร้าแต่ละรูปแบบเชิงกึ่งการค้ำ โดยใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว	27
17	ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยผ่านตะกร้าเปล่าตามตำแหน่งที่สมมาตรกันระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว ตามการจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7 และ 2x4x8 ใช้ $\alpha = 0.05$	28
18	ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยผ่านตะกร้าที่มีผลลำไยบรรจุอยู่ตามตำแหน่งสมมาตรกันระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว ตามการจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7 และ 2x4x8 ใช้ $\alpha = 0.05$	28

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	ปริมาณ SO_2 ตกค้างหลังจากรมทันทีในส่วนเปลือกของผลลำไยซึ่งผ่านการรม SO_2 จากการเผาผงกำมะถันด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในเชิงกึ่งการก้ำ โดยใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm	31
20	ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลลำไยของตะกร้ากลุ่มซ้าย และกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในเชิงกึ่งการก้ำ ซึ่งใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรม 2,000 ppm ใช้ $\alpha = 0.05$	31
21	ปริมาณ SO_2 ตกค้าง (ppm) ในเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเข่งงานนำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	39
22	การเกิดโรค (คะแนน) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเข่งงานนำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	40
23	การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเข่งงานนำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	43
24	การเปลี่ยนแปลงค่า h° ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเข่งงานนำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	43
25	การเปลี่ยนแปลงค่า c^* ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเข่งงานนำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	44
26	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (องศาบริกซ์) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเข่งงานนำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	45

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
27	ปริมาณ SO_2 ตกค้าง (ppm) ในเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงกึ่งการค้ำหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาพริกแกงมะดันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	51
28	ปริมาณ SO_2 ตกค้าง (ppm) ในเนื้อผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงกึ่งการค้ำหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาพริกแกงมะดันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	51
29	การเกิดโรค (คะแนน) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงกึ่งการค้ำหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาพริกแกงมะดันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	52
30	การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงกึ่งการค้ำหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาพริกแกงมะดันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	53
31	การเปลี่ยนแปลงค่า h° ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงกึ่งการค้ำหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาพริกแกงมะดันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	54
32	การเปลี่ยนแปลงค่า c^* ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงกึ่งการค้ำหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาพริกแกงมะดันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	54
33	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (องศาบริกซ์) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงกึ่งการค้ำหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาพริกแกงมะดันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	55
34	ปริมาณ SO_2 ตกค้าง (ppm) ในเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	62
35	การเกิดโรค (คะแนน) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
36	การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	65
37	การเปลี่ยนแปลงค่า h^o ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	65
38	การเปลี่ยนแปลงค่า c^* ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	66
39	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (องศาบริกซ์) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์	67
40	สรุปค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการรมผลลำไยสดด้วย SO_2 จากการเผาผงกำมะถัน และจากถังอัดความดันโดยตรงที่ระดับความเข้มข้นหลังสิ้นสุดการรม 12,000 ppm สำหรับระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ 2,000 ppm สำหรับระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air	72

คำนิยม

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยเป็นอย่างสูงที่ได้ให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยโครงการนี้ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. จริ่งแท้ ศิริพานิช ที่เป็นผู้ให้ข้อคิดต่างๆ ตั้งแต่ก่อนเริ่มโครงการวิจัย รวมถึงรองศาสตราจารย์ ดร. คณัย บุญเกียรติ ผู้ประสานงานโครงการวิจัยที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลือตลอดระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้ให้ความสะดวกต่างๆ ทั้งอาคารสถานที่และเวลาในการทำงานวิจัย รวมถึงนักศึกษาสาขาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวทุกคนที่ได้ช่วยเหลือการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายสำคัญที่สุดคือ ขอขอบคุณบริษัทพีชไทยฟรุ๊ต อ.เมือง จ.ลำพูน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์สถานที่ รวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการดำเนินงานวิจัยอย่างดีมาก เช่นเดียวกับผู้ประกอบการรายอื่นๆ ซึ่งคณะผู้วิจัยต้องขอภัยที่ไม่ได้กล่าวนาม ที่ได้ให้ข้อมูล คำแนะนำ และอนุญาตให้เก็บตัวอย่างผลลำไย

Executive Summary

เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่จำเป็นและมีความสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับผลลำไยสดคือ การรมด้วย ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) แต่ในปัจจุบันการรมผลลำไยสดด้วย SO_2 มักมีปัญหาเกี่ยวกับการมี SO_2 ตกค้างในผลลำไยสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ทำให้ผลลำไยจากประเทศไทยถูกห้ามนำเข้าจากประเทศคู่ค้ามากขึ้น ปัญหาการตกค้างของ SO_2 ในผลลำไยที่สูงกว่าเกณฑ์นั้น อาจจะเนื่องมาจาก ผู้ประกอบการขาดความรู้และความเข้าใจที่ถูกต้องในเทคโนโลยีดังกล่าว หรือส่วนหนึ่งอาจเกิดจากตัวของเทคโนโลยีเอง ทั้งนี้เพราะการรม SO_2 ในปัจจุบันเป็นการเผาไหม้ผงกำมะถันเพื่อให้ได้แก๊ส SO_2 ออกมาและที่สำคัญคือ ยังต้องใช้ความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมวันสูงถึง 12,000–15,000 ส่วนในล้านส่วน (ppm)

การวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาถึงกระบวนการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับผลลำไยสดด้วยวิธีหมุนเวียนอากาศแบบ forced – air โดยศึกษาร่วมกับสถานประกอบการรม SO_2 ผลลำไยสดในจังหวัดลำพูน ทั้งในลักษณะที่เป็นงานเชิงนำร่อง (pilot scale) และเชิงการค้า (semi-commercial scale) ตั้งแต่การทดสอบประสิทธิภาพการหมุนเวียนอากาศแบบ forced – air ผ่านตะกร้าบรรจุผลลำไยภายในห้องรม SO_2 เพื่อจะได้ทราบถึงอัตราการไหลเวียนของอากาศที่เหมาะสม รวมไปถึงคุณภาพและค่าใช้จ่ายต่อหน่วย ของผลลำไย หลังจากการรมด้วย SO_2 ทั้งที่ได้จากการเผาผงกำมะถันและจากถังอัดความดันโดยตรง (directly SO_2 gas) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กิจกรรมคือ

กิจกรรมที่ 1 การทดสอบประสิทธิภาพระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced – air ภายในห้องรม SO_2 ทั้งในงานนำร่อง (pilot scale) และเชิงการค้า (semi-commercial scale)

การศึกษาในกิจกรรมที่ 1 ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ การศึกษาในงานนำร่อง ซึ่งใช้ผลลำไยจำนวน 32 ตะกร้า และในเชิงการค้าซึ่งใช้ผลลำไยจำนวน 126 ตะกร้า โดยจัดวางตะกร้าบรรจุผลลำไยซึ่งมีน้ำหนักสุทธิต่อตะกร้า 11 กิโลกรัม (ตามการจำหน่ายจริงของผู้ประกอบการ) ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศ forced – air แบบ tunnel เปรียบเทียบกับการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ตามที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ ผลจากการศึกษาพบว่า การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ช่วยให้มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าบรรจุผลลำไยสูงและสม่ำเสมอมากกว่าการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และรูปแบบการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยที่เหมาะสมสำหรับการทดลองในงานนำร่องและเชิงการค้าคือ 2x2x4 และ 3x3x7 (คอลัมน์xแถวxชั้น) ตามลำดับ เนื่องจากช่วยให้มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าบรรจุผลลำไยสูงและสม่ำเสมอ ทำให้แก๊ส SO_2 สามารถสัมผัสกับผลลำไยได้ดี และมีแนวโน้มที่จะสามารถลดระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมให้เหลือเพียง 2,000 ppm หรือเท่ากับ 6 เท่า เมื่อเทียบกับระดับความเข้มข้นตามคำแนะนำของ ชิงชิง (2535) ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ 12,000 – 15,000 ppm โดยยังคงมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดและไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนของเนื้อผล ซึ่งความเร็วการไหลของอากาศดังกล่าวเมื่อนำมาคิดเป็น

ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านภายในตะกร้าบรรจุผลลำไยแล้วอย่างน้อยที่สุดแล้วต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.50 เมตรต่อวินาที หรือในแง่ของการออกแบบห้องรม SO_2 ควรใช้พัดลมดูดอากาศที่มีอัตราการไหลของ ปริมาตรอากาศไม่น้อยกว่า 15 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมผลลำไย

กิจกรรมที่ 2 การรม SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถันกับผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced – air ในเชิงงานนําร่องและกึ่งการค้า

การศึกษากิจกรรมที่ 2 เป็นการนำเอารูปแบบการจัดเรียงตะกร้าที่เหมาะสมทั้งในเชิงงานนําร่องและ กึ่งการค้ามาใช้ในกระบวนการรม SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถัน

2.1 การทดลองในเชิงงานนําร่อง ประกอบด้วย 4 สิ่งทดลองได้แก่ 1.) ผลลำไยชุดควบคุม 2,3.) ผล ลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุด การรม 200 และ 2,000 ppm และ 4.) ผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating- air ซึ่งมีความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm จากการศึกษาพบว่า ผลลำไยสดที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรม 2,000 ppm สามารถป้องกันการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกของผลลำไยหลังจากการเก็บรักษาเป็น เวลา 20 วัน ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์ได้ดีที่สุด โดยมีปริมาณ SO_2 ตกค้าง ในส่วนของเปลือกผลหลังจากรมทันที 1,260 ppm ต่ำกว่าเกณฑ์ที่สถาบันอาหารกำหนดไว้คือ 1,700 ppm และไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนของเนื้อผล

2.2 การทดลองในเชิงกึ่งการค้า ประกอบด้วย 4 สิ่งทดลอง ได้แก่ 1.) ผลลำไยชุดควบคุม 2.) ผลลำไย ที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm 3.) ผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ซึ่งมีความเข้มข้น ของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 12,000 ppm และ 4.) ผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 จากสถานประกอบการในเขต จังหวัดลำพูนจำนวน 8 แห่ง จากการศึกษาพบว่า ผลลำไยสดที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศ แบบ forced-air และมีความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรม 2,000 ppm สามารถป้องกันการเกิดโรค และการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วันได้ใกล้เคียงกับผลลำไยในสิ่งทดลองที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นกระบวนการรม SO_2 ตามคำแนะนำของชิงชิง (2535) หรือ สถาบันอาหาร (2541) และ กระบวนการปฏิบัติงานของสถานประกอบการผลลำไยตามลำดับ โดยยังคงมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนของ เปลือกผลหลังจากรมทันทีต่ำกว่าเกณฑ์ที่สถาบันอาหารกำหนดคือ 1,520 ppm และไม่พบการตกค้างในส่วน ของเนื้อผล ขณะที่ผลลำไยซึ่งผ่านกระบวนการรม SO_2 ตามคำแนะนำของชิงชิงหรือสถาบันอาหารมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือก 2,360 ppm และในส่วนเนื้อผลเท่ากับ 38 ppm เช่นเดียวกับผลลำไยจากสถาน ประกอบการซึ่งมีปริมาณ SO_2 ในส่วนเปลือก 1,400 ppm และในส่วนเนื้อผลเท่ากับ 64 ppm

กิจกรรมที่ 3 การรวม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรง (directly SO_2 gas) กับผลล้าไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced – air ในเชิงงานนำร่องและกึ่งการค้า

การศึกษาในกิจกรรมที่ 3 เป็นการนำเอาแก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงมาใช้กับผลล้าไยสด และกำหนดให้กระบวนการรวม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm เป็นสิ่งทดลอง แล้วเปรียบเทียบกับหน่วยของการทดลองในเชิงงานนำร่องซึ่งใช้ผลล้าไยจำนวน 16 ตะกร้า และเชิงกึ่งการค้าซึ่งใช้ผลล้าไยจำนวน 56 ตะกร้า จากการศึกษาพบว่า ผลล้าไยที่ผ่านการรวม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทั้งในเชิงงานนำร่องและกึ่งการค้าสามารถป้องกันการเกิดโรคหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์ได้ใกล้เคียงกัน แต่ในส่วนของการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลแล้วมีแนวโน้มว่า ผลล้าไยในสิ่งทดลองกึ่งการค้ามีการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลน้อยกว่าผลล้าไยในสิ่งทดลองเชิงงานนำร่อง โดยยังคงมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วน of เปลือกผลหลังจากการหมักที่ใกล้เคียงกันประมาณ 1,390-1,470 ppm และไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วน of เนื้อผล

กิจกรรมที่ 4 การศึกษาค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการรวมผลล้าไยด้วย SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถันและจากถังอัดความดันโดยตรง

การศึกษาค่าใช้จ่ายในการรวม SO_2 กับผลล้าไยสำหรับกิจกรรมที่ 4 เป็นการพิจารณาเฉพาะต้นทุนของสารเคมีหรือวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาผลาญกำมะถันและที่ใช้แก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรง แต่ไม่รวมถึงค่าใช้จ่ายดำเนินงาน เช่น ค่าแรง และค่าต้นทุนการกำจัดแก๊ส SO_2 ที่เหลือจากการรวม เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า การรวม SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถันของผู้ประกอบการซึ่งใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 12,000 ppm มีค่าใช้จ่ายประมาณ 7.00 บาทต่อตันผลล้าไยสด ส่วนการรวม SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถันด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm มีค่าใช้จ่ายประมาณ 5.00-7.50 บาทต่อตันผลล้าไยสด ขณะที่การรวม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm มีค่าใช้จ่ายประมาณ 400-560 บาทต่อตันผลล้าไยสด

บทคัดย่อ

การนำระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งมีความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านภายในตะกร้าบรรจุผลลำไยสดไม่น้อยกว่า 0.50 เมตรต่อวินาที เข้ามาใช้ในกระบวนการรม SO_2 กับผลลำไยช่วยให้มีอัตราเร็วของอากาศที่ไหลผ่านภายในตะกร้าบรรจุผลลำไยสูงและสม่ำเสมอมากกว่าการใช้ระบบหมุนเวียนแบบ circulating-air ส่งผลให้แก๊ส SO_2 สัมผัสกับผลลำไยได้มากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะลดระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมให้เหลือเพียง 2,000 ppm หรือประมาณ 6 เท่า เมื่อเทียบกับระดับความเข้มข้นของ SO_2 ตามคำแนะนำซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ 12,000-15,000 ppm

เมื่อนำเอาระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air มาใช้ในกระบวนการรม SO_2 ที่ได้จากการเผาพริก ก้ามตะกั่วและมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm กับผลลำไยสดพันธุ์อีดอทั้งในเชิงงานนาร่องและกึ่งการค้า โดยศึกษาถึงคุณภาพของผลลำไยหลังจากการรมและหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่า สามารถป้องกันการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลลำไยได้ โดยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนของเปลือกผลหลังจากรมทันทีเฉลี่ยประมาณ 1,260-1,520 ppm ต่ำกว่าเกณฑ์ที่สถาบันอาหารกำหนดไว้ในส่วนของเปลือกผลคือ 1,700 ppm และไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนของเนื้อผล เช่นเดียวกับการนำกระบวนการและระดับความเข้มข้นของ SO_2 ดังกล่าวมาใช้ในการรม SO_2 ที่ได้จากถังอัดความดันโดยตรง (directly SO_2 gas) ทั้งในเชิงนาร่องและกึ่งการค้า สามารถป้องกันการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลลำไยได้เช่นกัน โดยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนของเปลือกผลหลังจากรมทันทีเฉลี่ยประมาณ 1,390-1,470 ppm และไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนของเนื้อผล สำหรับค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการใช้ SO_2 ที่มีระดับความเข้มข้นหลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm นั้นพบว่า การใช้ SO_2 จากการเผาพริก ก้ามตะกั่วมีค่าใช้จ่ายประมาณ 5.00-7.50 บาทต่อตันผลลำไยสด ส่วนการใช้ SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงมีค่าใช้จ่ายประมาณ 400-560 บาทต่อตันผลลำไยสด

Abstract

The implementation of forced-air circulating system at the minimum air flow rate in a fresh longan fumigation room of 0.5 m/s during sulfur dioxide fumigation process helps increase the velocity of air flow with higher consistency than traditional circulating-air system. Sulfur dioxide gas has better chance of getting in contact with longan fruits, and therefore, it is possible to reduce the concentration of the sulfur dioxide residue after fumigation process to 2,000 ppm or approximately 1/6 of that currently leftovers after a traditional fumigation process.

The residual sulfur dioxide at 2,000 ppm after the process of incinerating sulfur powder and fumigating fresh longan fruits cv. Daw with forced-air circulating system did not affect external quality of the fruits in both pilot and semi-commercial scales, as suggested by results from the study on quality of longan fruits after fumigation and after storage at 5 °C in 95 % RH for 20 days. Forced-air system was effective in preventing post-harvest diseases and browning of the fruits while decreasing the residual sulfur dioxide to 1,260-1,520 ppm, which is below the 1,700 ppm constraint of National Food Institute. Moreover, no residual sulfur dioxide was detected in the flesh. These findings were in concord to the results obtained from applying this technique to fumigation with directly sulfur dioxide gas, in both pilot and semi-commercial scales. The residual sulfur dioxide remained in longan fruits in the latter case were in the range of 1,390 – 1,470 ppm and none was found in the flesh as well. However, costs of fumigation process with sulfur powder and directly sulfur dioxide gas were vastly different. Fumigation with sulfur powder costed merely 5 to 7.50 baths per ton of fresh longan fruits in contrast to 400 – 560 baths when directly sulfur dioxide gas was applied.

ชื่อโครงการ : การรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ

forced-air

The fumigation of fresh longan by sulfur dioxide (SO_2) with forced – air technique

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ต้องทำการวิจัย

ลำไยเป็นผลไม้ที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย สามารถส่งออกและนำรายได้เข้าสู่ประเทศปีละหลายล้านบาท ซึ่งสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2549) รายงานว่า ในปี 2548 และ 2549 (เดือนมกราคม-พฤษภาคมที่ผ่านมา) มีปริมาณการส่งออกผลลำไยจำนวน 134,433 และ 25,559 ตัน คิดเป็นมูลค่า 2,198.03 และ 533.48 ล้านบาท ตามลำดับ โดยมีสาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นตลาดส่งออกที่สำคัญ

เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่จำเป็นและมีความสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับผลลำไยสดคือ การรมด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) แต่ในปัจจุบันการรมผลลำไยสดด้วย SO_2 มักมีปัญหาเกี่ยวกับการมี SO_2 ตกค้างในผลลำไยสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ทำให้ผลลำไยจากประเทศไทยถูกห้ามนำเข้าจากประเทศคู่ค้ามากขึ้น ซึ่งสาเหตุการตกค้างของ SO_2 ในผลลำไยที่สูงกว่าเกณฑ์นั้น อาจเนื่องมาจาก ผู้ประกอบการขาดความรู้และความเข้าใจที่ถูกต้องในเทคโนโลยีดังกล่าว หรือส่วนหนึ่งอาจเกิดจากตัวของเทคโนโลยีเอง ทั้งนี้เพราะการรม SO_2 ในปัจจุบันเป็นการเผาไหม้ผงกำมะถันเพื่อให้ได้แก๊ส SO_2 ออกมา ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อย แต่มีข้อเสียคือ เมื่อมีการเผาผงกำมะถันในปริมาณมากกว่า 1 กิโลกรัมภายในระยะเวลาที่จำกัด มักจะเผาไหม้ไม่หมด ทำให้ความเข้มข้นของ SO_2 ที่ได้ไม่ค่อยแม่นยำเท่าที่ควร นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการรมค่อนข้างนานประมาณ 45-60 นาที ทำให้ผลลำไยได้รับปริมาณ SO_2 มากเกินไป และที่สำคัญคือ ยังต้องใช้ความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมคว้นสูงถึง 12,000–15,000 ส่วนในล้านส่วน (ppm)

จากปัญหาดังกล่าว ถ้าเราสามารถหาวิธีที่จะปรับปรุงรูปแบบการใช้ SO_2 กับผลลำไยสด เพื่อให้มีการตกค้างของ SO_2 น้อยลง แต่ยังคงรักษาคุณภาพของผลลำไยสดไว้ได้ ก็อาจเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาดังกล่าว ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาถึงวิธีการใช้ SO_2 กับผลลำไยสด โดยนำเอาระบบการหมุนเวียนอากาศแบบ forced – air เข้ามาช่วยในกระบวนการรม เพื่อให้แก๊ส SO_2 ภายในห้องรมสามารถเข้าไปสัมผัสกับผลลำไยได้อย่างทั่วถึง ซึ่งอาจจะช่วยให้ใช้เวลาและความเข้มข้นของ SO_2 ในการรมลดลง ส่งผลถึงการมีปริมาณ SO_2 ที่ตกค้างภายในผลลำไยและที่ต้องกำจัดก่อนปล่อยออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอกน้อยลงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังได้มีการนำเอาแก๊ส SO_2 จากถังโดยตรง (directly SO_2 gas) มาใช้ในกระบวนการรมเพื่อช่วยให้มีความเข้มข้นของ SO_2 แม่นยำมากยิ่งขึ้น วิธีการที่ว่านี้ได้มีการปฏิบัติมาแล้วกับผลองุ่นสดในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยสามารถลดการนำเข้าเสียของผลองุ่น และทำให้มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลองุ่นไม่เกิน 10 ppm (Luvisi et al., 1992)

วัตถุประสงค์

เพื่อปรับปรุงรูปแบบการใช้ SO_2 กับผลลำไยสด ให้มีปริมาณ SO_2 ตกค้างภายในเนื้อผลเท่ากับ 0 ppm เมื่อถึงตลาดปลายทาง รวมทั้งสามารถป้องกันโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลได้

การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลลำไยหลังเก็บเกี่ยวมาแล้วมักมีการสูญเสียเกิดขึ้นคือ มีการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกอย่างรวดเร็วได้เร็วภายในเวลา 1-2 วัน หลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง และรุนแรงมากขึ้นหลังจากเก็บรักษา 5-6 วัน ซึ่งสาเหตุของการสูญเสียดังกล่าวนี้ Pan (1994) กล่าวว่า ผลลำไยมีไขปกคลุมบริเวณผิวเปลือกชั้นนอก (exocarp) ก่อนข้างบางและไม่ทั่วถึง นอกจากนี้ยังมีชั้นของคิวติเคิลบาง และมีเลนติเซลขนาดใหญ่ ทำให้ผลลำไยมีการสูญเสียน้ำและถูกเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคเข้าทำลายได้ง่าย หรือในส่วนของเซลล์ชั้น parenchyma พบว่า มีช่องว่างระหว่างเซลล์ค่อนข้างใหญ่และมีเป็นจำนวนมาก จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สออกซิเจน (O_2) ได้ง่าย ส่งผลให้เอนไซม์ polyphenol oxidase (PPO) ทำงานได้ดีขึ้น แล้วเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลในลักษณะที่เกิดจากเอนไซม์ (enzyme browning) ตามมา (Paull and Chen, 1987)

โรคหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญของผลลำไยคือ โรคที่เกิดจากเชื้อรา *Botryodiplodia* sp. และ *Geotrichum candidum* (Jiang et al. 2002) ซึ่งเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่จำเป็นและมีความสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการควบคุมโรคของผลลำไยสดคือ การรมด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ทั้งนี้เนื่องจาก SO_2 เป็นแก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรด จึงสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคได้ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการฟอกสีและยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์เก็บเกี่ยวมาแล้วทั้งที่เป็นปฏิกิริยาที่มีและไม่เอนไซม์มาเกี่ยวข้อง (จริงแท้, 2538)

แต่ในปัจจุบันการรมผลลำไยสดด้วย SO_2 มักมีปัญหาเกี่ยวกับการมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ซึ่ง อนวัช (2540) กล่าวว่า ผลลำไยสดหลังการรม SO_2 ด้วยกรรมวิธีที่ถูกต้องตามคำแนะนำของสถาบันอาหาร จะพบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลประมาณ 1,700 ppm และในเนื้อผลไม่เกิน 10 ppm ขณะที่สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2549) ได้กำหนดให้ผลลำไยสดของประเทศไทยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 และพบปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อผลลำไยเกินกว่า 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมหรือ 10 ppm ต้องแสดงข้อความ “ผ่านการรมด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์”

จากรายงานของพรรณี และจันทร์ฉาย (2540) ที่ได้ทำการสำรวจปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยเพื่อการส่งออกระหว่างปี 2536-2538 จำนวน 81 ตัวอย่าง พบว่า ปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเนื้อและเปลือกผลลำไยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยร้อยละ 55.6 มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเนื้อเปลือก และร้อยละ 39.5 มีปริมาณ SO_2 ตกค้างสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ส่วนการตกค้างในเนื้อผลลำไยนั้น พบตัวอย่างที่มีการตกค้างร้อยละ 25.9 และร้อยละ 100 มีปริมาณ SO_2 ตกค้างสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งสาเหตุการ

ตกค้างของ SO_2 ที่สูงกว่ามาตรฐานนั้น อาจจะเนื่องมาจาก (1) การมีผลล้าไยออกสู่ตลาดเป็นจำนวนมาก ทำให้มีการแข่งขันกันค่อนข้างสูงทั้งในด้านคุณภาพและราคา ผู้ส่งออกรวมทั้งผู้ค้าจึงต้องมีการปฏิบัติกับผลล้าไยเพื่อให้มีสีสวยงามและดึงดูดใจผู้บริโภค ซึ่งต้องใช้ SO_2 ในปริมาณที่สูงขึ้น (2) ผู้ประกอบการขาดความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีการรมผลล้าไยสดด้วย SO_2 เทคโนโลยีดังกล่าวถ้ามีการปฏิบัติไม่ถูกต้องหรือมีการปฏิบัติไม่ครบขั้นตอน จะทำให้ผลล้าไยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างสูงเกินกว่ามาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ (3) หน่วยงานที่เกี่ยวข้องขาดการควบคุมหรือไม่มีมาตรการควบคุมที่มีประสิทธิภาพพอ ทำให้ผู้ส่งออกรวมทั้งผู้ค้ารายย่อยจัดตั้งสถานประกอบการรม SO_2 ขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยไม่ได้รับการรับรองมาตรฐาน แต่เป็นเพียงสถานประกอบการที่ทำการจดทะเบียนเท่านั้น หรือจากรายงานของ อาทิตย์ (2545) ซึ่งได้ศึกษาปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลล้าไยสดจากสถานประกอบการในเขตจังหวัดเชียงใหม่และลำพูนจำนวน 7 แห่ง โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ในส่วนของเปลือกและเนื้อผลล้าไยหลังจากการรมแล้วเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ด้วยวิธี Modified Monier-Williams Method พบว่า ผลล้าไยทุกตัวอย่างมีปริมาณ SO_2 ตกค้างสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยมีปริมาณการตกค้างในส่วนของเนื้อและเปลือกเฉลี่ยประมาณ 140 และ 1,880 ppm ตามลำดับ เช่นเดียวกับรายงานของ ฤทธิ์ (2546) ซึ่งได้ศึกษาปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลล้าไยระหว่างเดือนมีนาคมถึงพฤษภาคม 2546 จากสถานประกอบการในเขตจังหวัดลำพูนจำนวน 8 แห่ง โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 หลังจากการรมแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ผลล้าไยทุกตัวอย่างมีปริมาณ SO_2 ตกค้างสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยมีปริมาณการตกค้างในส่วนของเนื้อ เปลือก และทั้งผลเฉลี่ยประมาณ 130 1,470 และ 350 ppm ตามลำดับ หรือจากรายงานของธีรบุษ และคณะ (2548) ซึ่งได้ทำการสำรวจปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลล้าไยนอกฤดูจากสถานประกอบการ 4 แห่ง พบว่ามีปริมาณ SO_2 สูงกว่ามาตรฐานทุกสถานประกอบการ โดยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเนื้อผลเฉลี่ยประมาณ 100-400 ppm และในส่วนเปลือกผลเฉลี่ยประมาณ 1,500-3,000 ppm ซึ่งเมื่อนำผลการวิเคราะห์นั้นมาพิจารณาพร้อมกับข้อมูลที่ได้จากการสังเกตลักษณะโครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ ของห้องรม รวมทั้งวิธีปฏิบัติในการรม SO_2 กับผลล้าไยของสถานประกอบการที่เก็บตัวอย่างมา และน่าจะมีส่วนทำให้มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลล้าไยสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ได้แก่ สถานประกอบการบางแห่งไม่มีหอกำจัดแก๊ส SO_2 หรือมีแต่อยู่ในสภาพที่ไม่สามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากขาดการดูแลหรือการตรวจสอบก่อนการใช้งาน ทำให้ต้องใช้เวลานานในการกำจัดแก๊ส SO_2 ออกจากห้องรมค่อนข้างนาน ผลล้าไยจึงมีการสัมผัสกับ SO_2 ในห้องรมมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลล้าไยสูงขึ้นตามไปด้วย หรือในส่วนของวิธีปฏิบัติในการรม SO_2 นั้น ยังมีการปฏิบัติไม่ถูกต้องหรือขาดขั้นตอนการปฏิบัติที่สำคัญอยู่ได้แก่ ปริมาณการเผาผลาญกำมะถัน ซึ่งเท่าที่ได้สอบถามปริมาณผงกำมะถันที่ใช้เผา แล้วนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณห้องและปริมาณผลล้าไย พบว่า มีการใช้ผงกำมะถันค่อนข้างสูง ทั้งอาจจะเนื่องมาจากการคำนวณที่ผิดพลาด หรือต้องการใช้ SO_2 ในปริมาณที่สูงอยู่แล้ว และที่สำคัญคือ ไม่ได้มีการใช้พัดลมเป่าไปยังชั้นวางหรือตะกร้าผลล้าไยก่อนที่นำออกมาจากห้องรม ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดปัญหาการดูดซึมแก๊สต่อเนื่อง โดย SO_2 จากเปลือกผลล้าไยจะแทรกซึมเข้าไปสะสมในเนื้อผลล้าไยมากเกินไปกว่าที่ต้องการ ส่งผลให้มีปริมาณ SO_2 เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

สำหรับขั้นตอนและกระบวนการปฏิบัติในการรม SO_2 กับผลลำไยให้มีประสิทธิภาพนั้น พอจะแบ่งออกได้เป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้คือ

1. การนำผลลำไยเข้าสู่ห้องรม และจัดเรียงชั้นวางหรือตะกร้าผลลำไยให้มีการหมุนเวียนของแก๊ส SO_2 เป็นไปอย่างทั่วถึงทั้งห้องรม โดยต้องจัดเรียงไม่ให้ชิดผนังห้อง เพราะจะทำให้เกิดมุมอับ นอกจากนี้ ยังต้องสอดคล้องกับตำแหน่งของพัดลมและท่อดูดแก๊ส เพื่อให้การหมุนเวียนแก๊สเป็นไปอย่างทั่วถึงและมีความเข้มข้นของแก๊สเท่ากัน ซึ่งจะทำให้ผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 แล้วมีคุณภาพรวมทั้งปริมาณการตกค้างของ SO_2 ที่สม่ำเสมอ (สถาบันอาหาร, 2541)

2. การคำนวณผงกำมะถัน ซึ่งชิง (2535) ได้แนะนำวิธีการคำนวณปริมาณผงกำมะถันที่จะต้องใส่เผาว่า ขึ้นอยู่กับปริมาณสาร SO_2 ตกค้างสูงสุดที่ต้องการ (maximum residue level, MRL) และความเข้มข้นสุดท้ายของแก๊ส SO_2 ในห้องรม ซึ่งค้างไว้เมื่อสิ้นสุดการรมคว้นประมาณ 1.2-1.5 เปอร์เซ็นต์ (12,000-15,000 ppm)

3. การเผาผงกำมะถัน อัตราการเผาไหม้ของผงกำมะถันขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของผงกำมะถันและความร้อนที่ใช้ในการเผา ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส และอาจมีการเติมผงโซเดียมไนเตรท (NaNO_3) ลงไปประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ หรือจัดให้มีพัดลมกววนอากาศที่มีกระแสลมกววนประมาณ 0.5-1.0 เมตรต่อวินาที เพื่อช่วยหรือเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ของผงกำมะถัน การสังเกตว่าผงกำมะถันมีการเผาไหม้หมดหรือไม่ ให้สังเกตจากการมีเปลวไฟสีน้ำเงินเกิดขึ้นในภาชนะที่ใช้เผา (สัมพันธุ์, 2535)

4. การรม SO_2 ระยะเวลาการรม SO_2 จะใช้เวลาประมาณ 40-60 นาทีหลังจากการเผา หรือสังเกตจากควันในห้องเริ่มเจือจางจนสามารถมองเห็นสิ่งต่างๆ ภายในห้องได้ชัดเจน จึงถือว่าสิ้นสุดการรมคว้น (ชิงชิง, 2535)

5. การกำจัดแก๊ส SO_2 ที่เหลือออกจากห้องรม ซึ่งต้องมีหอกำจัดแก๊ส (SO_2 scrubber) ที่นิยมใช้คือระบบกำจัดแบบเปียก (wet scrubber) เนื่องจากแก๊ส SO_2 มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี โดยน้ำ 1 หน่วยปริมาตร สามารถละลายแก๊ส SO_2 ได้ 45 หน่วยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊ส SO_2 ให้สูงขึ้น ควรมีการเติมปูนขาวลงไปในน้ำประมาณ 5-15 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปูนขาวละลายน้ำกลายเป็นน้ำปูนใส $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ จะไปทำปฏิกิริยากับแก๊ส SO_2 ได้เป็นยิบซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (สัมพันธุ์, 2535)

6. การเป่าลมเพื่อระบายแก๊ส SO_2 ที่ตกค้างจากห้องรม (aeration) เป็นการปฏิบัติก่อนการขนย้ายชั้นวางหรือตะกร้าผลลำไยออกจากห้องรม โดยใช้พัดลมขนาดใหญ่เป่าเข้าไปในห้องเพื่อระบายแก๊ส SO_2 ที่ตกค้างอยู่ภายในห้อง ชั้นวางตะกร้า รวมทั้งตะกร้าลำไยออกไป ซึ่งแก๊ส SO_2 ที่ตกค้างนี้เป็นส่วนเกินที่จำเป็นต้องระบายออก เพื่อป้องกันปัญหาการดูดแก๊สต่อเนื่อง (carry over effect) ทำให้เกิดการแทรกซึมของ SO_2 จากเปลือกผลลำไยเข้าไปสะสมในเนื้อผลลำไยมากเกินไปกว่าที่ต้องการ (สถาบันอาหาร, 2541)

การใช้ SO_2 อีกรูปแบบหนึ่งนอกเหนือจากการเผาผงกำมะถันคือ การใช้แก๊ส SO_2 ที่อยู่ในถังอัดความดันโดยตรง (directly SO_2 gas) ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการใช้ SO_2 ด้วยการเผาผงกำมะถันแล้ว

สามารถกล่าวได้ว่า การใช้ SO_2 จากถังอัดความดันสามารถปฏิบัติได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ตลอดจนมีความสม่ำเสมอในการรวมมากกว่าการเผาพวงกำมะถัน ซึ่งสิ้นเปลืองเวลาในการเผา และมีโอกาสผิดพลาดได้มากถ้าเผาไหม้ไม่หมด แต่การใช้ SO_2 จากถังอัดความดันนี้มีต้นทุนสูงกว่าการเผาพวงกำมะถัน (สัมพันธ, 2535)

อย่างไรก็ตามในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการนำเอาแก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงมาใช้ในการรมผลองุ่นสด และพบว่า การใช้แก๊ส SO_2 ความเข้มข้น 100 ppm รมผลองุ่นในห้องรมที่มีระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งมีอัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 1.0 ลูกบาศก์ฟุต/นาที/ผลิตผล 1 ปอนด์ เข้ามาช่วยในกระบวนการรมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถลดการเน่าเสียของผลองุ่นที่เกิดจากเชื้อรา *Botrytis cinerea* ได้ โดยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างไม่เกิน 10 ppm และที่สำคัญคือ ความเข้มข้นของ SO_2 และเวลาที่ใช้ในการรมสามารถปรับเปลี่ยนให้สูงหรือต่ำและช้าหรือเร็วได้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ประกอบการ เนื่องจากความเข้มข้นของ SO_2 กับเวลาที่ใช้ในกระบวนการรมมีความสัมพันธ์กันในลักษณะผกผันตรงกันข้ามคือ ถ้าต้องการใช้เวลาในกระบวนการรมสั้นลง ต้องใช้ความเข้มข้นของ SO_2 สูงขึ้น แต่ถ้าต้องการใช้ความเข้มข้นของ SO_2 ต่ำลง ต้องใช้เวลาในกระบวนการรมมากขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า CT product ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร (Luvisi *et al.*, 1992)

$$\text{CT product (ppm.ชั่วโมง)} = \text{ความเข้มข้นของ } \text{SO}_2 \text{ (ppm)} \times \text{เวลาที่ใช้ในกระบวนการรม (ชั่วโมง)}$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการรมผลองุ่นด้วยแก๊ส SO_2 ความเข้มข้น 100 ppm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ค่า CT product คือ 100 ppm.ชั่วโมง แต่ถ้าต้องการใช้เวลาในกระบวนการรมลดลงเหลือ 0.5 ชั่วโมง จะทำให้ค่า CT product ลดลงเหลือ 50 ppm.ชั่วโมง ดังนั้นถ้าต้องการให้มีค่า CT product เท่าเดิมคือ 100 ppm.ชั่วโมง ต้องใช้ความเข้มข้น SO_2 เพิ่มขึ้นเป็น 200 ppm ตรงกันข้ามกัน ถ้าต้องการใช้แก๊ส SO_2 ความเข้มข้นเพียง 50 ppm แต่ให้มีค่า CT product เท่าเดิมคือ 100 ppm.ชั่วโมง ต้องใช้เวลาในการรมมากขึ้นเป็น 2 ชั่วโมง

ซึ่งภูมิพัฒน์(2547)ได้ทดลองเบื้องต้นด้วยวิธีการดังกล่าวกับผลลำไยสดภายในตู้พลาสติกความจุ 76.5 ลิตร โดยให้มีระดับความเข้มข้นของ SO_2 ภายในตู้หลังจากสิ้นสุดการรม 200 และ 2,000 ppm จากนั้นจึงนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 70 เปอร์เซ็นต์ พร้อมทั้งทำการตรวจสอบคุณภาพโดยเปรียบเทียบกับผลลำไยในชุดควบคุมทุก 5 วัน เป็นเวลา 30 วัน พบว่า ผลลำไยที่ผ่านการรมด้วยแก๊ส SO_2 ทั้งสองระดับความเข้มข้น ไม่มีการเกิดโรคปรากฏให้เห็นตลอดระยะเวลาเก็บรักษา นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลได้ดีกว่าผลลำไยในชุดควบคุม เมื่อพิจารณาถึงปริมาณการตกค้างของ SO_2 ในผลลำไยแล้ว พบว่า ผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 ซึ่งมีความเข้มข้นหลังจากสิ้นสุดการรม 200 และ 2,000 ppm มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลหลังจากการรมทันทีประมาณ 1,020 และ 1,156 ppm ตามลำดับ สำหรับส่วนเนื้อของผลมีปริมาณ SO_2 ตกค้างประมาณ 0.93 และ 5.92 ppm ตามลำดับ และหลังจากการเก็บรักษา 5 วัน ผลลำไยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกผลประมาณ 749 ppm และ 916 ppm ตามลำดับ แต่ในส่วนเนื้อผลแล้วไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้าง ทั้งสองระดับความเข้มข้น

รายละเอียดของวิธีการทดลอง ผลการทดลอง วิจารณ์ สรุป และตารางข้อมูลเป็นรายกิจกรรม

กิจกรรมที่ 1 การทดสอบประสิทธิภาพระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced – air ภายในห้องรม SO₂ ทั้งในเชิงงานนำร่อง (pilot scale) และเชิงกึ่งการค้า (semi-commercial scale)

กิจกรรมและระเบียบวิธีวิจัยที่ปรับปรุงใหม่

- ก. คณะผู้วิจัยได้เพิ่มนักวิจัยเข้ามาดำเนินกิจกรรมงานวิจัย จำนวน 1 คน คือ อาจารย์สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290 โทรศัพท์ : 01-3634660 e-mail : yaidragon@thaiengineering.com

ประวัติการศึกษา

ปีที่ยก	ปริญญา	สาขา	มหาวิทยาลัย
1997	B.Eng. Bachelor of Engineering (Mechanical Engineering)	(Mechanical Engineering) (วิศวกรรมเครื่องกล)	Ubonratchathani University
2002	M.Eng. Master of Engineering (Energy Engineering)	(Energy Engineering) (วิศวกรรมพลังงาน)	ChiangMai University

อาจารย์สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ เป็นผู้ที่มีความชำนาญในเรื่องการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้งานวิจัยครั้งนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการจำลองการไหลของอากาศของระบบหมุนเวียนแบบ circulating-air และ forced-air

ข. มีการเปลี่ยนแปลงระเบียบวิธีวิจัย ในส่วนระดับความเร็วของพัดลมจาก 60 80 100 120 140 และ 160 ฟุตต่อนาที (ft/min.) เป็น 525 810 1,100 1,300 และ 1,500 ฟุตต่อนาที เนื่องจากแต่เดิมคาดไว้ว่าระดับความเร็วของพัดลมดังกล่าวจะทำให้ความเร็วการไหลของอากาศอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการรม SO₂ กับผลลำไย แต่เมื่อได้ทำการศึกษาทดลองพบว่า ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยที่ผ่านตะกร้าซึ่งมีผลลำไยบรรจุอยู่มีค่าลดลงมาก (ความดันตกมีค่าสูง) ดังนั้นเพื่อให้ความเร็วการไหลของอากาศที่ผ่านตะกร้าผลลำไยอยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงได้เพิ่มระดับความเร็วของพัดลมไปเป็น 525 810 1,100 1,300 และ 1,500 ฟุตต่อนาที หรือเท่ากับ 2.70 4.10 5.60 6.60 และ 7.60 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

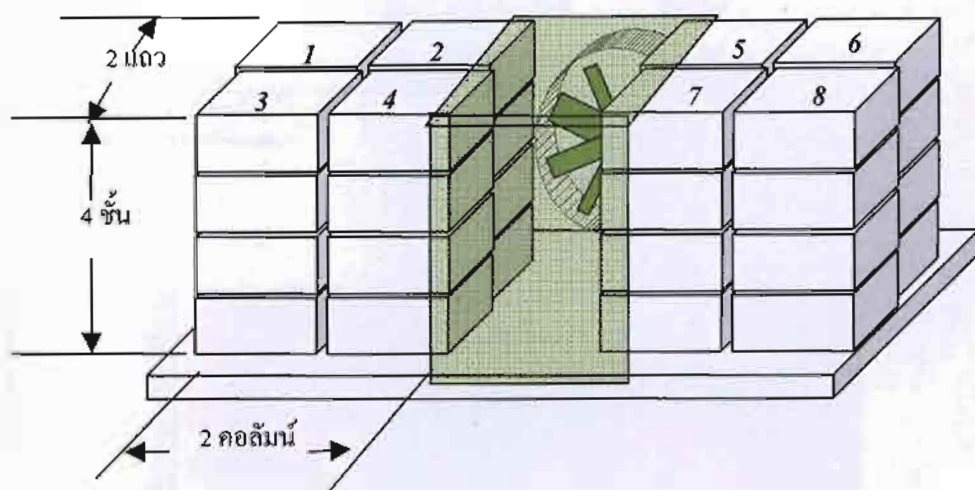
1.1 การทดสอบประสิทธิภาพระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ภายในห้องรม SO₂ เจริ่งงานนำร่อง (pilot scale)

1.1.1 การศึกษารูปแบบการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยต่อชั้นหรือต่อแถว

วิธีการทดลอง

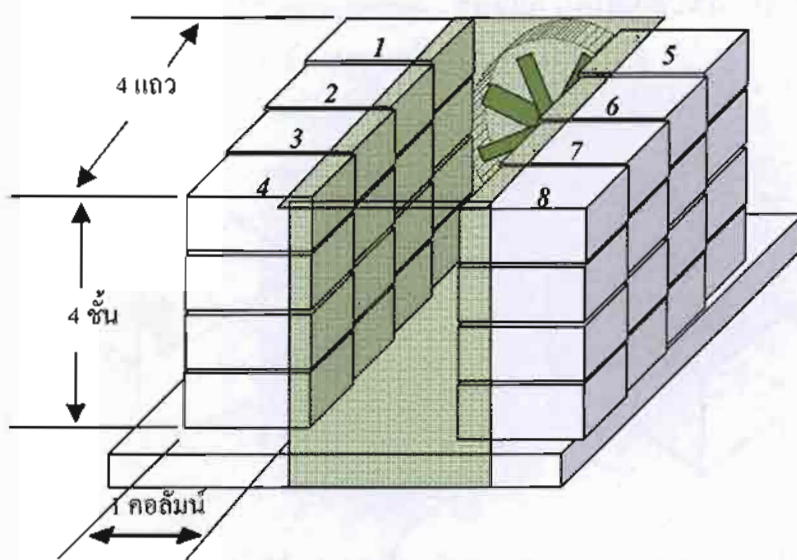
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดรูปแบบการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

ก.) จัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x2x4 (คอลัมน์xแถวxชั้น) หมายถึง การจัดเรียงตะกร้าโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มๆ ละ 2 คอลัมน์ๆ ละ 2 แถวๆ ละ 4 ชั้น รวมเป็น 32 ตะกร้า (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x2x4

ข.) จัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 1x4x4 (คอลัมน์xแถวxชั้น) หมายถึง การจัดเรียงตะกร้าโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มๆ ละ 1 คอลัมน์ๆ ละ 4 แถวๆ ละ 4 ชั้น รวมเป็น 32 ตะกร้า (ภาพที่ 2)

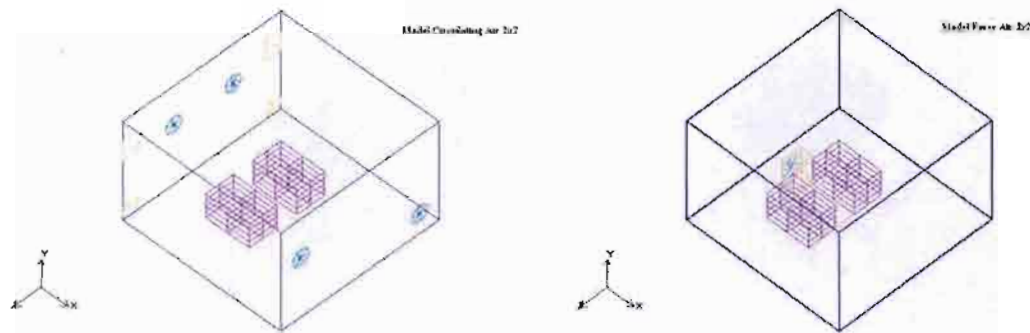


ภาพที่ 2 การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 1x4x4

ขั้นตอนที่ 2 วัดความเร็วการไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบ hot bulb (Testo 400) บริเวณจุดกึ่งกลางภายในตะกร้าทุกตะกร้า ทั้งที่เป็นตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไย (น้ำหนักผลลำไยสุทธิประมาณ 11 กิโลกรัม) ของการจัดเรียงตะกร้าแต่ละรูปแบบ ที่ระดับความเร็วของพัดลมจุดๆ หนึ่งคือ 1,100 ฟุตต่อนาที

ขั้นตอนที่ 3 นำค่าความเร็วการไหลของอากาศที่วัดได้มาสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตามขั้นตอนที่สำคัญดังต่อไปนี้

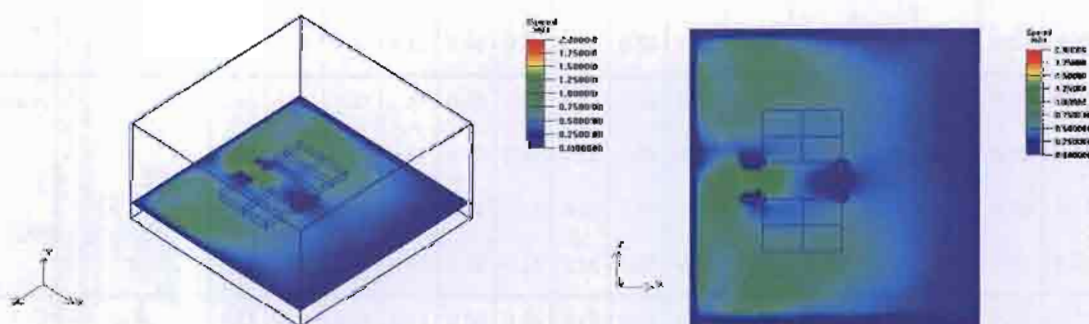
ก. การเขียนแบบโครงสร้าง (pre-processing) ซึ่งเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบคล้ายกับลักษณะการเขียนแบบด้วยโปรแกรมพิกเตอร์ (AUTOCAD) ดังภาพ



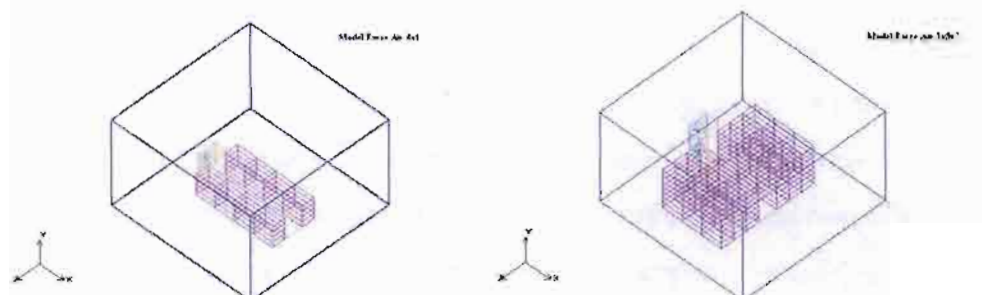
ข. การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับระบบที่กำลังจะศึกษา (boundary condition) เช่น การป้อนค่าคุณสมบัติของไหล (fluid properties) และวัสดุในตะกร้า (bulk density) การกำหนดค่าอุณหภูมิที่ผนัง การบอกชนิด ขนาด และกำลังพัดลม การป้อนค่าความเร็วทางเข้าช่องเปิดต่าง ๆ เป็นต้น

ค. การควบคุมระบบการคำนวณ (processing) ได้แก่ สภาวะการคำนวณ จำนวนรอบ และการระบุค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ เพื่อให้ระบบหยุดเมื่อได้คำตอบที่ถูกระหว่าง (convergence)

ง. การแสดงผลลัพธ์ที่ต้องการ (post-processing) ซึ่งสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การแสดงเป็นเส้นกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง หรือการแสดงผลออกมาในรูปของแผนภาพจำลองการไหลซึ่งมีอยู่ 2 รูปแบบคือ ในรูปของการกระจายความเร็ว (velocity profile) หรือในรูปของเส้นชั้นสี (contour profile) สำหรับการวิจัยครั้งนี้ใช้การแสดงผลในรูปของเส้นชั้นสี เนื่องจากสามารถแสดงผลได้ชัดเจนกว่า พร้อมกับจัดให้มีการแสดงผลทั้งในแบบภาพสามมิติ (isometric) และภาพด้านบน (top view) ดังภาพ



จ. การศึกษาผลต่อเนื่อง โดยการเขียนแบบโครงสร้างลักษณะการจัดวางตะกร้าแบบต่าง ๆ ดังภาพ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลความแตกต่างของการกระจายความเร็ว และนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดลองที่ได้ (validation)



ผลการทดลองและวิจารณ์

การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x2x4 มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าทั้งที่เป็นตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไยเฉลี่ยแล้วสูงกว่าการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 1x4x4 (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไยตามการจัดเรียงตะกร้าแต่ละรูปแบบ โดยใช้ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อวินาที

กลุ่ม ตะกร้า	ตะกร้า ที่	การจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x2x4								การจัดเรียงตะกร้าแบบ 1x4x4							
		ตะกร้าเปล่า				ตะกร้าที่มีผลลำไย				ตะกร้าเปล่า				ตะกร้าที่มีผลลำไย			
		ชั้นที่				ชั้นที่				ชั้นที่				ชั้นที่			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
กลุ่มข้าว	1	0.47	0.48	0.46	0.75	0.41	0.27	0.41	0.50	0.80	0.97	0.90	1.32	0.80	0.56	0.63	0.55
	2	0.93	1.14	1.20	1.46	0.56	0.58	0.59	0.98	0.51	0.45	0.51	0.69	0.07	0.33	0.40	0.34
	3	0.31	0.40	0.48	0.64	0.19	0.20	0.26	0.40	0.26	0.30	0.32	0.47	0.13	0.19	0.20	0.31
	4	0.53	0.52	0.77	0.83	0.40	0.42	0.64	0.82	0.24	0.21	0.23	0.36	0.12	0.07	0.13	0.22
กลุ่มขาว	5	0.86	1.08	1.27	1.52	0.62	0.64	0.87	0.78	0.78	0.76	0.95	1.05	0.40	0.62	0.85	0.92
	6	0.41	0.32	0.41	0.81	0.32	0.26	0.32	0.46	0.52	0.41	0.46	0.73	0.21	0.32	0.36	0.57
	7	0.57	0.72	0.65	0.81	0.24	0.32	0.45	0.50	0.28	0.21	0.21	0.31	0.12	0.14	0.13	0.20
	8	0.36	0.25	0.31	0.57	0.23	0.18	0.16	0.27	0.17	0.16	0.25	0.31	0.05	0.09	0.07	0.17
	เฉลี่ย	0.55	0.61	0.69	0.93	0.34	0.36	0.47	0.60	0.45	0.44	0.48	0.66	0.24	0.29	0.35	0.42
	เฉลี่ยทั้งหมด	0.70				0.45				0.50				0.32			

เมื่อแยกกลุ่มการไหลของอากาศที่ผ่านตะกร้าส่วนในคือ ตะกร้าที่ 2 4 5 และ 7 ของแต่ละชั้นซึ่งอยู่ติดกับพัดลมดูดอากาศ และตะกร้าส่วนนอกคือ ตะกร้าที่ 1 3 6 และ 8 ของแต่ละชั้นซึ่งอยู่ห่างจากพัดลมออกมา ไปวิเคราะห์ความเร็วการไหลของอากาศด้วยวิธีทางสถิติพบว่า การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x2x4 และ 1x4x4 ทั้งตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไย มีความเร็วการไหลของอากาศผ่านตะกร้าส่วนในสูงกว่าตะกร้าส่วนนอก (ตารางที่ 2) เมื่อพิจารณาถึงการกระจายอากาศผ่านตะกร้าบรรจุผลลำไยตามการจัดเรียงตะกร้าทั้ง 2 แบบ พบว่า ในกรณีที่เป้นตะกร้าเปล่า มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าช่วงพิสัยของความเร็วการไหลอากาศแตกต่างกันมาก ซึ่งหมายถึง มีการกระจายอากาศผ่านตะกร้าไม่ค่อยสม่ำเสมอ แต่สำหรับตะกร้าที่มีผลลำไยมีแนวโน้มว่า การจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x2x4 มีการกระจายอากาศผ่านตะกร้าสม่ำเสมอมากกว่าการจัดเรียงตะกร้าแบบ 1x4x4 สังเกตได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและช่วงพิสัยของความเร็วการไหลอากาศที่แคบลงมากกว่าการจัดเรียงตะกร้าแบบ 1x4x4

ตารางที่ 2 ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ผ่านตะกร้าส่วนในและตะกร้าส่วนนอกของการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแต่ละรูปแบบ ทั้งที่เป็นตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไย โดยใช้ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟูตต่อนาที

รูปแบบการจัดเรียง	ตำแหน่งตะกร้า	ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)					
		ตะกร้าเปล่า			ตะกร้าที่มีผลลำไย		
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ช่วงพิสัย	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ช่วงพิสัย
2x2x4	ส่วนใน	0.93 ^a	0.32	1.00	0.58 ^a	0.26	0.93
2x2x4	ส่วนนอก	0.46 ^c	0.16	0.56	0.30 ^b	0.22	0.63
1x4x4	ส่วนใน	0.74 ^b	0.26	0.91	0.50 ^a	0.24	0.85
1x4x4	ส่วนนอก	0.27 ^d	0.08	0.31	0.15 ^c	0.07	0.26

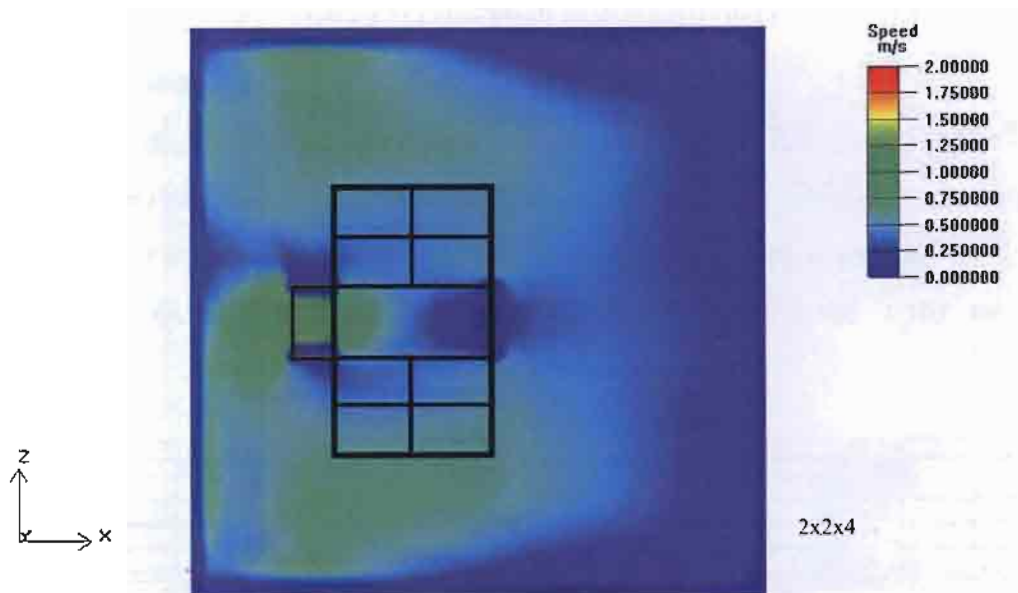
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ $\alpha=0.05$

ภาพที่ 3 และ 4 เป็นการจำลองการไหลของอากาศ (air flow simulation) ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ผ่านตะกร้าที่มีผลลำไย ตามการจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x2x4 และ 1x4x4 ซึ่งเห็นได้ว่า การจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x2x4 มีระดับความเร็วและการกระจายของอากาศมากกว่าการจัดเรียงตะกร้าแบบ 1x4x4 นอกจากนี้ยังพบข้อสังเกตเกี่ยวกับการไหลของอากาศที่สำคัญคือ อากาศที่ไหลผ่านตะกร้าส่วนใหญ่เป็นการไหลตามแนวแกน X (แนวการไหลตามยาว) มากกว่าที่จะเป็นการไหลตามแนวแกน Z (แนวการไหลตามขวาง) ดังนั้นจึงทำให้การไหลของอากาศผ่านตะกร้าส่วนใน (ส่วนที่อยู่ใกล้พัดลม) มีความดันตกคร่อม (pressure drop) จากพัดลมจนเกิดแรงดึงของอากาศไหลผ่านตะกร้าในทิศทางที่เข้าสู่พัดลม ขณะที่ตะกร้าส่วนนอก (ส่วนที่อยู่ห่างจากพัดลม) ไม่มีความดันตกคร่อมจากจากพัดลมมาเกี่ยวข้อง ข้อสังเกตนี้เป็นอีก

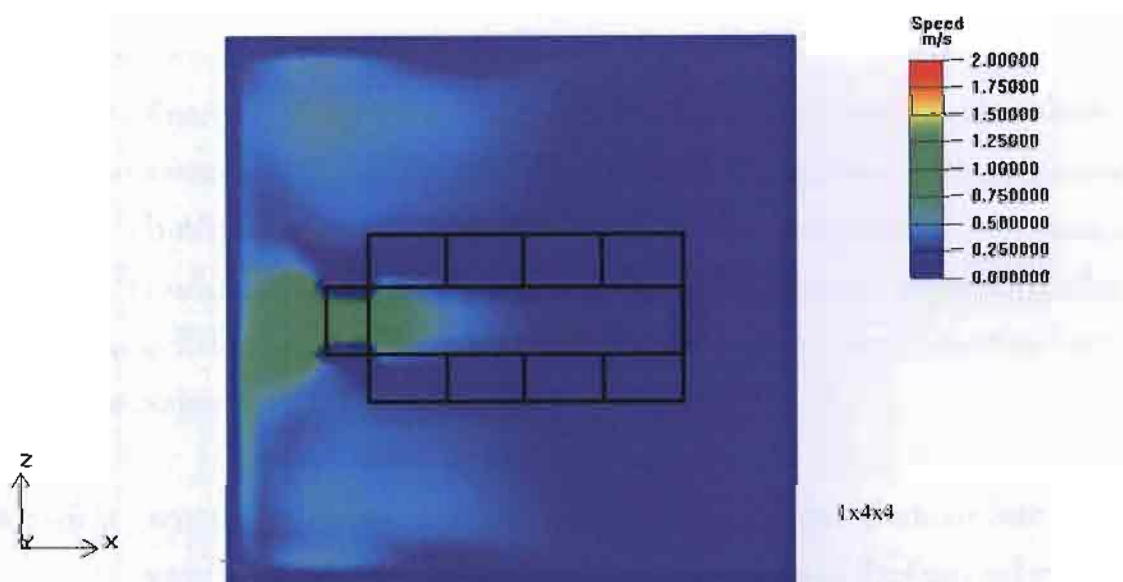
ประเด็นหนึ่งที่ช่วยอธิบายหรือสนับสนุนว่า การไหลของอากาศผ่านการจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x2x4 ดีกว่าการจัดเรียงตะกร้าแบบ 1x4x4 เนื่องจากมีจำนวนแถวของตะกร้าสั้นกว่า ทำให้มีกลุ่มของตะกร้าที่อยู่ใกล้หัดลมมาก ส่งผลให้มีความดันตกคร่อมผ่านตะกร้าโดยเฉลี่ยแล้วมากกว่าตามไปด้วย

สรุปผลการทดลองกิจกรรมที่ 1.1.1

การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x2x4 ทำให้มีความเร็วและมีการกระจายตัวของอากาศดีว่าการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 1x4x4 ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปที่เป็นงานเชิงนำร่อง จึงได้เลือกใช้การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยเป็นแบบ 2x2x4



ภาพที่ 3 ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที ผ่านตะแกรงที่มีผลล้าไยในเชิงงานนำร่อง ตามการจัดเรียงตะแกรงแบบ 2x2x4

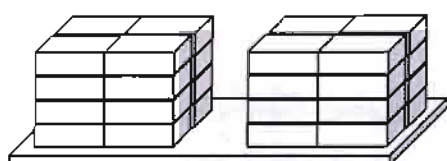


ภาพที่ 4 ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที ผ่านตะแกรงที่มีผลล้าไยในเชิงงานนำร่อง ตามการจัดเรียงตะแกรงแบบ 1x4x4

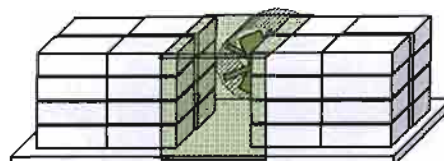
1.1.2 การศึกษาความเร็วการไหลของอากาศภายในห้องรม SO_2 ที่เหมาะสม

วิธีการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 จัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x2x4 จากนั้นจึงทำการวัดความเร็วการไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดความเร็วลม ณ จุดกึ่งกลางภายในตะกร้าทุกตะกร้า ทั้งที่เป็นตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไย ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบปกติที่สถานประกอบการใช้อยู่ (circulating-air) (ภาพที่ 5) และแบบ forced-air (ภาพที่ 6) ตามระดับความเร็วของพัดลมที่ 525 810 1,100 1,300 และ 1,500 ฟุตต่อ นาที



ภาพที่ 5 ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air



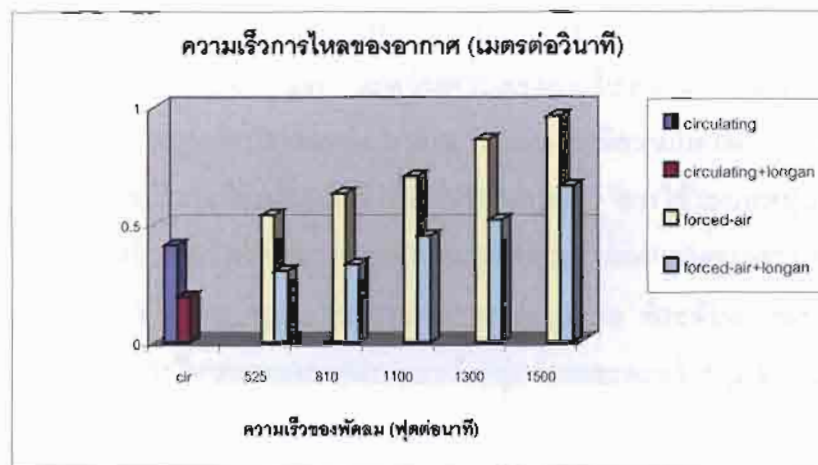
ภาพที่ 6 ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air

ผลการทดลองและวิจารณ์

การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air มีปริมาณการไหลของอากาศภายในตะกร้าทั้งที่เป็นตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไยเฉลี่ยแล้วน้อยกว่าการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ทั้งนี้เนื่องจากการไหลเวียนของอากาศที่ผ่านตะกร้าบรรจุผลลำไยด้วยระบบหมุนเวียนแบบ circulating-air มีความดันตกคร่อมในตะกร้าน้อยกว่าระบบการหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ใช้ความเร็วของพัดลมสูงทำให้มีปริมาณการไหลของอากาศภายในตะกร้าเฉลี่ยสูงกว่าที่ใช้ความเร็วของพัดลมต่ำ (ตารางที่ 3 และภาพที่ 7)

ตารางที่ 3 ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไยของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air ที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

รูปแบบตะกร้า	Circulating-air	Forced-air ที่ระดับความเร็วลมต่างๆ (ft/min)				
		525	810	1,100	1,300	1,500
ตะกร้าเปล่า	0.41	0.54	0.64	0.70	0.86	0.96
ตะกร้าที่มีผลลำไย	0.19	0.30	0.33	0.45	0.52	0.66



ภาพที่ 7 ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยภายในตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไย ของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air ที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2 เปรียบเทียบความเร็วการไหลของอากาศผ่านตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไยด้วยวิธีทางสถิติ โดยวางแผนการทดลองแบบ randomized complete block design (RCBD) มีระบบหมุนเวียนอากาศเป็นสิ่งทดลอง ได้แก่ 1.) ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air 2.) ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที และ 3.) ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที ซึ่งมีกลุ่มของตะกร้าผลลำไยทั้ง 2 กลุ่มคือ กลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาเป็นบล็อก

ผลการทดลองและวิจารณ์

ความเร็วการไหลของอากาศผ่านตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไยบรรจุอยู่ของระบบหมุนเวียนอากาศทั้ง 3 แบบ มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ของความเร็วการไหลของอากาศระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและตะกร้ากลุ่มขวา ทั้งที่เป็นตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีผลลำไย (ตารางที่ 4 และ 5) โดยการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที ทำให้มีความเร็วการไหลของอากาศผ่านตะกร้าสูงกว่าการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที และการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ตามลำดับ (ตารางที่ 6) เมื่อพิจารณาถึงความเร็วการไหลของอากาศที่ลดลง โดยเปรียบเทียบจากความเร็วการไหลของอากาศผ่านตะกร้าเปล่ากับตะกร้าที่มีผลลำไยของระบบหมุนเวียนอากาศทั้ง 3 แบบ พบว่า การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที ทำให้มีความเร็วการไหลของอากาศลดลงน้อยที่สุดคือ 31.20 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที ซึ่งทำให้มีความเร็วการไหลของอากาศลดลง 35.70 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ทำให้มีความเร็วการไหลของอากาศลดลงถึง 53.60 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 6)

อย่างไรก็ตามในส่วนของการไหลอากาศระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและตะกร้ากลุ่มขวา เมื่อนำมาเปรียบเทียบโดยใช้ Paired t-test ระหว่างการไหลของอากาศเฉลี่ยผ่านตะกร้าเปล่า กลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศทั้ง 3 แบบ พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติเช่นเดียวกัน ($p>0.05$) (ตารางที่ 7) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตะกร้าที่มีผลล้าไลพบว่า การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ทำให้มีความเร็วการไหลของอากาศผ่านตะกร้ากลุ่มซ้ายแตกต่างจากตะกร้ากลุ่มขวาอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) ขณะที่การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วลม 1,100 และ 1,500 ฟุตต่อวินาที มีความเร็วการไหลของอากาศผ่านตะกร้ากลุ่มซ้ายและตะกร้ากลุ่มขวาไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของความเร็วการไหลอากาศผ่านตะกร้าเปล่า

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
สิ่งทดลอง (ระบบหมุนเวียนอากาศ)	2	4.778	2.389	13.7	<.0001
บล็อก (ตะกร้ากลุ่มซ้ายและขวา)	1	0.003	0.003	0.018	0.8934
ความคลาดเคลื่อน	92	16.043	0.174		

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของความเร็วการไหลอากาศผ่านตะกร้าที่มีผลล้าไล

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
สิ่งทดลอง (ระบบหมุนเวียนอากาศ)	2	3.575	1.788	20.623	<.0001
บล็อก (ตะกร้ากลุ่มซ้ายและขวา)	1	0.008	0.008	0.097	0.7558
ความคลาดเคลื่อน	92	7.975	0.087		

ตารางที่ 6 ความเร็วเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการไหลอากาศผ่านตะกร้าเปล่า และตะกร้าที่มีผลล้าไล

สิ่งทดลอง	Circulating	Forced-air 1,100 ฟุต ต่อวินาที	Forced-air 1,500 ฟุต ต่อวินาที
ตะกร้าเปล่า	0.41(± 0.18) ^c	0.70(± 0.34) ^b	0.96(± 0.60) ^a
ตะกร้าที่มีผลล้าไล	0.19(± 0.14) ^c	0.45(± 0.21) ^b	0.66(± 0.44) ^a
ความเร็วการไหลอากาศที่ลดลง (%)	53.6	35.7	31.2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่มีตัวอักษรต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha=0.05$ ตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Fisher's Protected Least Significant Differences

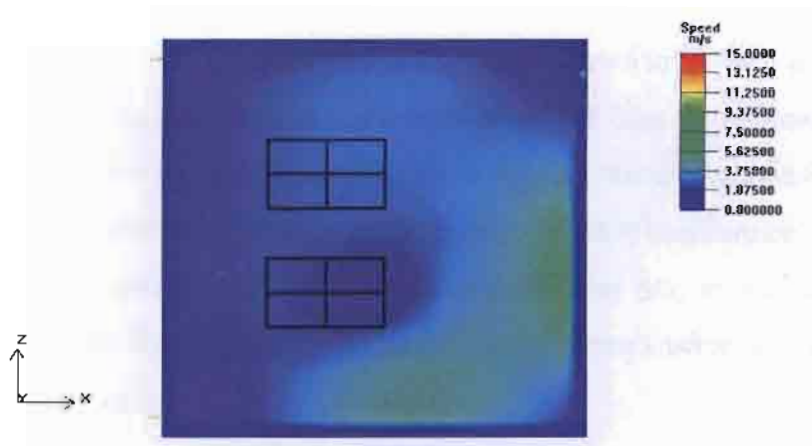
ตารางที่ 7 ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยผ่านตะกร้าเปล่าตามตำแหน่งที่สมมาตรกันระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air ที่ระดับความเร็วพัดลม 1,100 และ 1,500 ฟุตต่อนาที ใช้ $\alpha = 0.05$

Treatment	Mean difference of penetrating velocity through empty basket between left and right groups	Degree of freedom	t-Value	P-Value
Circulating-air	-0.034	15	-0.817	0.427
Forced-air 1,100 ฟุตต่อนาที	0.028	15	0.209	0.837
Forced-air 1,500 ฟุตต่อนาที	-0.028	15	-0.11	0.914

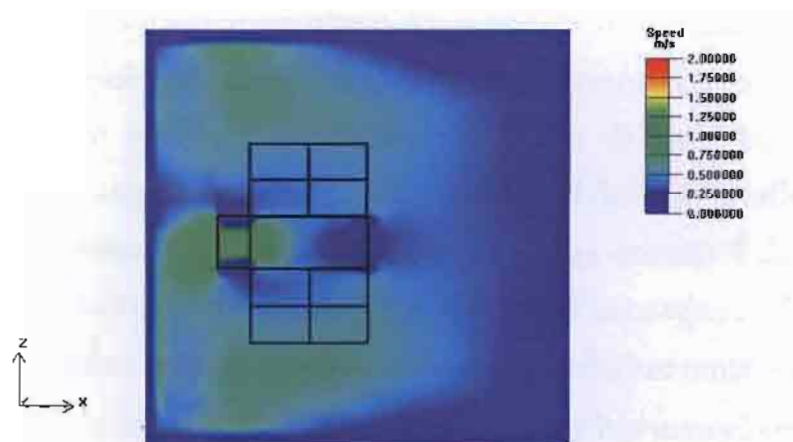
ตารางที่ 8 ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยผ่านตะกร้าที่มีผลล้าใบตามตำแหน่งที่สมมาตรกันระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air ที่ระดับความเร็วพัดลม 1,100 และ 1,500 ฟุตต่อนาที ใช้ $\alpha = 0.05$

Treatment	Mean difference of penetrating velocity through empty basket between left and right groups	Degree of freedom	t-Value	P-Value
Circulating-air	-0.103	15	-3.832	0.002
Forced-air 1,100 ฟุตต่อนาที	0.063	15	0.775	0.451
Forced-air 1,500 ฟุตต่อนาที	0.096	15	0.48	0.638

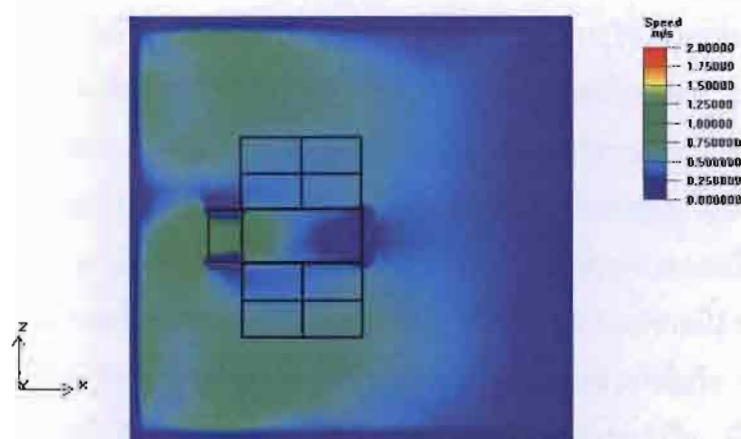
ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที ช่วยให้มีความเร็วของอากาศไหลผ่านตะกร้าบรรจุผลล้าใบได้ดีที่สุดทั้งในเรื่องปริมาณการไหลของอากาศและการกระจายตัวของอากาศระหว่างทั้งกลุ่มซ้ายและกลุ่มขวา นอกจากนี้ยังช่วยให้มีความเร็วการไหลของอากาศลดลงน้อยที่สุดเมื่อมีการบรรจุผลล้าใบลงไปในตะกร้า ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้ผลล้าใบมีโอกาสดัมผัสกับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 8 9 และ 10 เป็นการจำลองการไหลของอากาศที่ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 และ 1,500 ฟุตต่อนาที ผ่านตะกร้าที่มีผลล้าใบพบว่า การไหลของอากาศที่ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที และ 1,100 ฟุตต่อนาที มีระดับความเร็วและการกระจายของอากาศภายในตะกร้ามากกว่าการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air



ภาพที่ 8 ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ผ่านตะแกรงที่มีผลล้าในเชิงงานนำร่อง



ภาพที่ 9 ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที ผ่านตะแกรงที่มีผลล้าในเชิงงานนำร่อง



ภาพที่ 10 ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที ผ่านตะแกรงที่มีผลล้าในเชิงงานนำร่อง

ขั้นตอนที่ 3 ทำการรม SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถันกับผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ แบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 และ 1,500 ฟุตต่อนาที โดยใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมคว้นเท่ากับ 2,000 ppm จากนั้นจึงสุ่มเก็บตัวอย่างผลลำไยในตะกร้าชั้นที่ 2 และ 4 ของแต่ละกลุ่ม ไปวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้างภายในเปลือกและเนื้อของผลลำไยทันที เพื่อต้องการทราบความแตกต่างรวมทั้งความสม่ำเสมอของปริมาณ SO_2 ตกค้างในแต่ละกลุ่มของตะกร้าบรรจุผลลำไย ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันระดับความเร็วของพัดลมและความเร็วการไหลของอากาศภายในห้องที่เหมาะสมต่อการรม SO_2 กับผลลำไยสดเชิงงานนำร่อง

ผลการทดลองและวิจารณ์

การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที ทำให้ผลลำไยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกสูงกว่าการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที และการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ตามลำดับ แต่ในส่วนของเนื้อผลแล้วพบว่า การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศทั้ง 3 แบบ ทำให้ผลลำไยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 9) และเมื่อนำเอาปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับวิธีทางสถิติ โดยวางแผนการทดลองแบบ randomized complete block design (RCBD) ซึ่งมีระบบหมุนเวียนอากาศเป็นสิ่งทดลอง และมีกลุ่มของตะกร้าผลลำไยทั้ง 2 กลุ่มคือ กลุ่มซ้ายและกลุ่มขวา เป็นบล็อก พบว่า การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศทั้ง 3 แบบ ทำให้ผลลำไยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ในส่วนของเนื้อผล รวมทั้งกลุ่มของตะกร้าบรรจุผลลำไยระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและตะกร้ากลุ่มขวา (ตารางที่ 10 และ 11) โดยการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที ทำให้ผลลำไยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือก 1,260 ppm สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที และการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ซึ่งทำให้ผลลำไยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกใกล้เคียงกันประมาณ 662 และ 509 ppm ตามลำดับ แต่ในส่วนของเนื้อผลแล้ว มีปริมาณ SO_2 ตกค้างใกล้เคียงกันในระบบหมุนเวียนอากาศทั้ง 3 แบบ ประมาณ 0.4-1.1 ppm (ตารางที่ 12) ซึ่งปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกของผลลำไยนั้นสอดคล้องกับการทดลองในขั้นตอนที่ 2 โดยการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที มีความเร็วของอากาศไหลผ่านตะกร้าบรรจุผลลำไยได้มากที่สุด นอกจากนี้ยังมีความเร็วการไหลของอากาศลดลงน้อยที่สุดเมื่อมีการบรรจุผลลำไยลงไปในตะกร้า ดังนั้นจึงช่วยให้แก๊ส SO_2 สามารถสัมผัสกับผลลำไยได้มากขึ้น สังเกตได้จากปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกของผลลำไย ซึ่งการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศทั้ง 3 แบบ ใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมคว้นเท่ากันคือ 2,000 ppm แต่การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที ช่วยให้ผลลำไยสามารถสัมผัสกับแก๊ส SO_2 ได้ดีกว่าจึงทำให้มีปริมาณ SO_2 ในเปลือกผลสูงกว่าการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศ

แบบอื่นๆ ที่สำคัญคือ ปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกและเนื้อผลลำไยดังกล่าว ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามที่สถาบันอาหาร (2541) กำหนดไว้ว่า ต้องมีในเปลือกผลไม่เกิน 1,700 ppm และในเนื้อผลไม่เกิน 10 ppm

อย่างไรก็ตามในส่วนของคุณภาพ SO_2 ตกค้างระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศทั้ง 3 แบบ เมื่อนำมาเปรียบเทียบโดยใช้ Paired t-test พบว่า มีปริมาณ SO_2 ตกค้างไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 13) ซึ่งไม่สอดคล้องกับความเร็วการไหลของอากาศผ่านตะกร้าที่มีผลลำไยตามตำแหน่งที่สมมาตรกันระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศทั้ง 3 แบบ ตามตารางที่ 8 โดยคาดหวังไว้ว่าการกระจายของ SO_2 ที่ตกค้างภายในเปลือกผลลำไยน่าจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับความเร็วกว่าอากาศที่ผ่านตะกร้าระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและขวา ซึ่งจะแตกต่างกันเมื่อใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air แต่ไม่แตกต่างกันเมื่อใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air สาเหตุนี้ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดและอาจมีปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ความชื้นบริเวณผิวเปลือกของผลลำไยในแต่ละตะกร้าซึ่งอาจมีไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการละลายหรือการดูดซึม SO_2 บริเวณผิวของผลลำไยที่แตกต่างกันได้ ทั้งนี้เนื่องจากแก๊ส SO_2 มีคุณสมบัติที่สามารถละลายน้ำได้ดี

สรุปผลการทดลองกิจกรรมที่ 1.1.2

ระบบหมุนเวียนอากาศที่เหมาะสมสำหรับการรม SO_2 กับผลลำไยสดในเชิงงานนำร่องคือ การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 วัตต์ต่อนาที (7.60 เมตรต่อวินาที) ซึ่งเมื่อนำมาคิดเทียบเป็นปริมาณอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณผลลำไย 32 ตะกร้าคือ 352 กิโลกรัม (32 ตะกร้า x 11 กิโลกรัม) มีค่าเท่ากับ 30 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีต่อกิโลกรัมผลลำไย หรือประมาณ 5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมผลลำไย

ตารางที่ ๑ ปริมาณ SO₂ ตกค้างหลังจากรวมพื้นที่ในส่วนของการปล่อยและเลือกผลล้า ไขซึ่งผ่านการรวม SO₂ ตัวธรรมดาหมุนเวียนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air

circulating-air					forced-air ที่ระดับความเร็วพัดลม 1,100 ฟุตต่อนาที					forced-air ที่ระดับความเร็วพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที				
ชั้นที่/กลุ่ม	ตะกร้าที่	ปริมาณ SO ₂ ตกค้าง (ppm)			ชั้นที่/กลุ่ม	ตะกร้าที่	ปริมาณ SO ₂ ตกค้าง (ppm)			ชั้นที่/กลุ่ม	ตะกร้าที่	ปริมาณ SO ₂ ตกค้าง (ppm)		
		เนื้อ	เปลือก				เนื้อ	เปลือก				เนื้อ	เปลือก	
4/กลุ่มซ้าย	1	2	556		4/กลุ่มซ้าย	1	1	503		4/กลุ่มซ้าย	1	0	1173	
	2	0	545			2	2	772			2	1	1195	
	3	0	324			3	0	496			3	0	1344	
	4	2	732			4	2	654			4	2	554	
4/กลุ่มขวา	5	0	386		4/กลุ่มขวา	5	0	732		4/กลุ่มขวา	5	0	1298	
	6	0	793			6	1	510			6	0	1589	
	7	0	418			7	1	531			7	0	1289	
	8	0	249			8	1	998			8	0	1292	
2/กลุ่มซ้าย	1	2	650		2/กลุ่มซ้าย	1	0	499		2/กลุ่มซ้าย	1	0	1690	
	2	0	491			2	1	640			2	0	1819	
	3	2	363			3	1	468			3	0	1176	
	4	1	640			4	1	974			4	0	952	
2/กลุ่มขวา	5	1	491		2/กลุ่มขวา	5	2	857		2/กลุ่มขวา	5	0	1425	
	6	2	561			6	1	332			6	0	338	
	7	0	390			7	1	774			7	3	1740	
	8	0	557			8	2	860			8	0	1304	
เฉลี่ย		0.74	509		เฉลี่ย		1.1	662		เฉลี่ย		0.4	1,260	

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลลำไย

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
สิ่งทดลอง (ระบบหมุนเวียนอากาศ)	2	5052692.2	2526346.1	34.2	<.0001
บล็อก (ตะกร้ากลุ่มซ้ายและขวา)	1	5292	5292	0.072	0.7903
ความคลาดเคลื่อน	44	3253533.5	73943.9		

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเนื้อผลลำไย

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
สิ่งทดลอง (ระบบหมุนเวียนอากาศ)	2	3.792	1.896	2.676	0.08
บล็อก (ตะกร้ากลุ่มซ้ายและขวา)	1	0.521	0.521	0.735	0.3958
ความคลาดเคลื่อน	44	31.167	0.708		

ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกและเนื้อผลลำไย

	เปลือก	เนื้อ
Circulating	509 (± 150.0) ^b	0.8 (± 0.9)
Forced air 1,100 ฟุตต่อนาที	662 (± 197.3) ^b	1.1 (± 0.7)
Forced air 1,500 ฟุตต่อนาที	1,260 (± 394.8) ^a	0.4 (± 0.9)

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีตัวอักษรต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha=0.05$ ตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Fisher's Protected Least Significant Differences

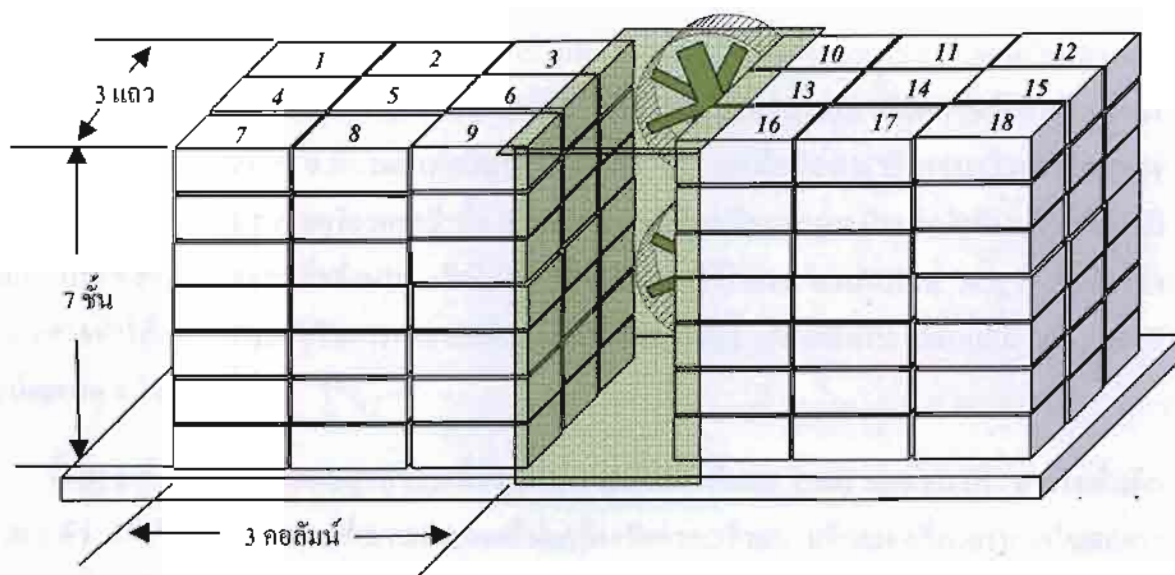
ตารางที่ 13 ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลลำไยของตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวา ของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ forced-air ที่ระดับความเร็วพัดลม 1,100 และ 1,500 ฟุตต่อนาที ใช้ $\alpha=0.05$

Treatment	Mean difference of SO_2 residue between group left and right	Degree of freedom	t-Value	P-Value
Circulating-air	-57	7	-0.824	0.437
Forced-air 1,100 ฟุตต่อนาที	73.5	7	0.782	0.460
Forced-air 1,500 ฟุตต่อนาที	46.5	7	0.191	0.854

1.2.1 การศึกษารูปแบบการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยต่อชั้นหรือต่อแถว

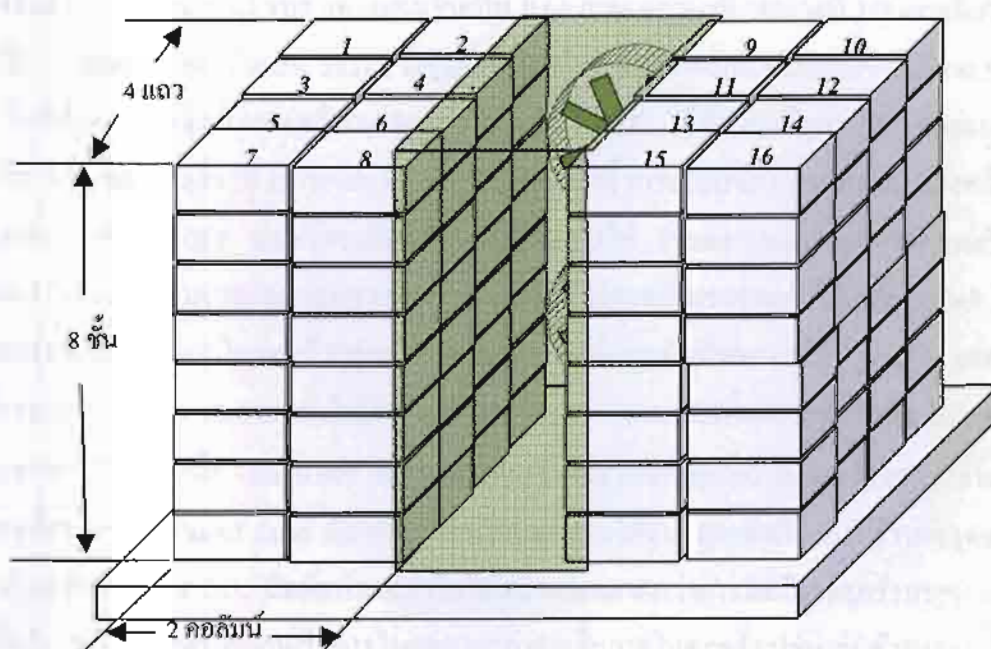
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดรูปแบบการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

ก.) จัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ $3 \times 3 \times 7$ (คอลัมน์ $\times$ แถว $\times$ ชั้น) หมายถึง การจัดเรียงตะกร้าโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มๆ ละ 3 คอลัมน์ๆ ละ 3 แถวๆ ละ 7 ชั้น รวมเป็น 126 ตะกร้า (ภาพที่ 11)



ภาพที่ 11 การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ $3 \times 3 \times 7$

ข.) จัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ $2 \times 4 \times 8$ (คอลัมน์ $\times$ แถว $\times$ ชั้น) หมายถึง การจัดเรียงตะกร้าโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มๆ ละ 2 คอลัมน์ๆ ละ 4 แถวๆ ละ 8 ชั้น รวมเป็น 128 ตะกร้า (ภาพที่ 12)



ภาพที่ 12 การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ $2 \times 4 \times 8$

ขั้นตอนที่ 2 วัดความเร็วการไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดความเร็วลม บริเวณจุดกึ่งกลางภายใน ตะกร้าเปล่าของการจัดเรียงตะกร้าแต่ละรูปแบบ โดยใช้พัดลมดูดอากาศที่ระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 1 ตัว

ผลการทดลองและวิจารณ์

การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 3x3x7 มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าเปล่าเฉลี่ย 0.36 เมตรต่อวินาที ใกล้เคียงกับการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x4x8 ที่มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าเปล่าเฉลี่ย 0.30 เมตรต่อวินาที (ตารางที่ 14) แต่เมื่อพิจารณาถึงความเร็วการไหลของอากาศผ่านตะกร้าเปล่าตามการจัดเรียงตะกร้าทั้ง 2 แบบ โดยเปรียบเทียบกับงานในเชิงนาร่องแล้วพบว่า มีความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยต่ำมาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในกระบวนการรม SO_2 เชิงกึ่งการค้า เนื่องจากอาจทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของแก๊ส SO_2 ลดลง ส่งผลถึงการได้รับแก๊ส SO_2 ของผลลำไยน้อยลงตามไปด้วย

ขั้นตอนที่ 3 นำเอาพัดลมดูดอากาศที่มีระดับความเร็วของพัดลม 1,500 ฟุตต่อนาที มาวางเพิ่มอีก จำนวน 1 ตัว แล้ววัดความเร็วการไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดความเร็วลม บริเวณจุดกึ่งกลางภายในตะกร้าเปล่าของการจัดเรียงตะกร้าแต่ละรูปแบบ

ผลการทดลองและวิจารณ์

การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 3x3x7 มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าเปล่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 0.71 เมตรต่อวินาที ใกล้เคียงกับการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x4x8 ที่ทำให้มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าเปล่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 0.66 เมตรต่อวินาที (ตารางที่ 15) เช่นเดียวกับตะกร้าที่มีผลลำไย การจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7 มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าเฉลี่ย 0.51 เมตรต่อวินาที ใกล้เคียงกับการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x4x8 ที่มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าเฉลี่ย 0.50 เมตรต่อวินาที (ตารางที่ 16) เมื่อนำเอาความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าเปล่าตามการจัดเรียงตะกร้าทั้ง 2 แบบ มาเปรียบเทียบทางสถิติโดยใช้ Paired t-test ระหว่างความเร็วการไหลของอากาศผ่านตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาพบว่า การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 3x3x7 มีความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยภายในตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x4x8 ทำให้มีความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยภายในตะกร้าเปล่ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 17) เช่นเดียวกับกับตะกร้าที่มีผลลำไย (ตารางที่ 18) ผลการเปรียบเทียบโดยใช้ Paired t-test ดังกล่าว ทำให้คาดคะเนได้ว่า การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 3x3x7 น่าจะช่วยให้แก๊ส SO_2 สัมผัสกับผลลำไยได้สม่ำเสมอมากกว่าการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x4x8 ซึ่งสังเกตได้จากการมีความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยภายในตะกร้าเปล่ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังแสดงในภาพที่ 13 และ 14

ตารางที่ 14 ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในตะกร้าเปล่าตามการจัดเรียงตะกร้าแต่ละรูปแบบในเชิงกึ่งการคำนวณ โดยใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 1 ตัว

การจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7									การจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x4x8										
กลุ่ม	ตะกร้าที่	ชั้นที่							กลุ่ม	ตะกร้าที่	ชั้นที่								
		1	2	3	4	5	6	7			1	2	3	4	5	6	7	8	
ซ้าย	1	0.21	0.49	0.51	0.41	0.44	0.42	0.66	ซ้าย	1	0.51	0.43	0.29	0.30	0.31	0.34	0.48	0.63	
	2	0.40	0.62	0.61	0.53	0.50	0.54	0.91		2	0.86	0.95	1.46	1.01	0.70	0.50	0.60	0.95	
	3	1.41	1.34	1.50	0.98	0.73	0.8	1.39		3	0.16	0.39	0.12	0.14	0.16	0.15	0.26	0.44	
	4	0.29	0.31	0.26	0.22	0.18	0.16	0.27		4									
	5									5	0.32	0.38	0.11	0.08	0.19	0.18	0.19	0.30	
	6									6									
	7	0.26	0.12	0.13	0.08	0.07	0.13	0.27		7	0.38	0.28	0.09	0.10	0.11	0.16	0.24	0.75	
	8	0.37	0.30	0.20	0.21	0.23	0.21	0.62		8	0.46	0.28	0.21	0.15	0.12	0.16	0.37	0.48	
	9	0.51	0.45	0.39	0.37	0.32	0.54	0.54											
ขวา	10	1.28	1.43	1.06	0.96	0.77	0.83	1.23	ขวา	9	1.35	1.42	1.11	0.97	0.70	0.48	0.51	0.83	
	11	0.37	0.62	0.43	0.36	0.40	0.44	0.80		10	0.31	0.45	0.41	0.34	0.36	0.35	0.37	0.64	
	12	0.35	0.34	0.25	0.31	0.34	0.37	0.84		11									
	13									12	0.40	0.46	0.21	0.28	0.24	0.25	0.25	0.44	
	14									13									
	15	0.27	0.25	0.39	0.28	0.29	0.29	0.45		14	0.18	0.21	0.23	0.17	0.25	0.12	0.19	0.38	
	16	0.45	0.28	0.34	0.25	0.28	0.47	0.60		15	0.41	0.29	0.15	0.10	0.10	0.17	0.28	0.61	
	17	0.34	0.36	0.24	0.25	0.21	0.18	0.27		16	0.43	0.40	0.17	0.18	0.17	0.23	0.33	0.62	
	18	0.25	0.36	0.20	0.19	0.14	0.15	0.16											
	เฉลี่ย	0.50	0.31	0.27	0.30	0.36	0.40	0.38		เฉลี่ย	0.37	0.37	0.29	0.24	0.22	0.20	0.26	0.44	
เฉลี่ยทั้งหมด									0.36	เฉลี่ยทั้งหมด		0.30							

หมายเหตุ ตะกร้าที่ 5,6,13,14 ของการจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7 และตะกร้าที่ 4,6,11,13 ของการจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x4x8 ไม่สามารถตรวจวัดความเร็วการไหลของอากาศได้ เนื่องจากเป็นตะกร้าส่วนในที่อยู่ติดกับพัดลมดูดอากาศ ทำให้ไม่สามารถยื่นเครื่องวัดความเร็วลมเข้าไปได้

ตารางที่ 15 ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในตะกร้าเปล่าตามการจัดเรียงตะกร้าแต่ละรูปแบบในเชิงกึ่งการคำนวณ โดยใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว

การจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7									การจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x4x8									
กลุ่ม	ตะกร้าที่	ชั้นที่							กลุ่ม	ตะกร้าที่	ชั้นที่							
		1	2	3	4	5	6	7			1	2	3	4	5	6	7	8
ชาย	1	0.47	0.51	0.46	0.48	0.56	0.48	0.41	ชาย	1	0.69	0.62	0.49	0.56	0.60	0.50	0.52	0.99
	2	0.53	0.70	1.06	1.19	0.89	1.14	0.87		2	1.17	1.70	1.63	1.16	1.28	1.32	1.73	1.63
	3	1.06	2.32	2.11	2.34	1.94	1.51	1.76		3	0.54	0.55	0.49	0.44	0.60	0.49	0.47	0.75
	4	0.27	0.30	0.37	0.32	0.41	0.61	0.47		4								
	5									5	0.41	0.43	0.34	0.39	0.40	0.32	0.32	0.47
	6									6								
	7	0.38	0.33	0.26	0.28	0.25	0.36	0.39		7	0.19	0.21	0.18	0.15	0.16	0.19	0.19	0.78
	8	0.54	0.50	0.42	0.36	0.43	0.41	0.34		8	0.44	0.41	0.34	0.37	0.42	0.30	0.48	0.51
	9	0.27	0.70	0.58	0.60	0.64	0.58	0.80										
ขวา	10	1.07	1.34	1.56	1.60	1.52	1.92	1.76	ขวา	9	0.87	1.39	1.69	1.66	1.54	1.57	1.47	2.46
	11	0.84	1.06	0.72	0.71	0.95	0.89	0.87		10	0.68	0.68	0.51	0.45	0.54	0.55	0.50	0.79
	12	0.79	0.80	0.59	0.69	0.57	0.62	0.82		11								
	13									12	0.83	0.74	0.53	0.52	0.51	0.44	0.45	0.67
	14									13								
	15	0.42	0.47	0.43	0.42	0.35	0.46	0.58		14	0.53	0.61	0.49	0.47	0.40	0.39	0.39	0.66
	16	0.33	0.57	0.65	0.73	0.55	0.59	0.72		15	0.56	0.61	0.51	0.52	0.37	0.49	0.71	1.03
	17	0.35	0.41	0.40	0.39	0.47	0.44	0.44		16	0.40	0.31	0.33	0.32	0.23	0.23	0.45	0.82
	18	0.44	0.42	0.42	0.49	0.43	0.53	0.47										
	เฉลี่ย	0.55	0.75	10.72	0.76	0.71	0.75	0.76		เฉลี่ย	0.61	0.69	0.63	0.58	0.59	0.57	0.64	0.96
เฉลี่ยทั้งหมด		0.71							เฉลี่ยทั้งหมด		0.66							

หมายเหตุ ตะกร้าที่ 5,6,13,14 ของการจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7 และตะกร้าที่ 4,6,11,13 ของการจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x4x8 ไม่สามารถตรวจวัดความเร็วการไหลของอากาศได้ เนื่องจากเป็นตะกร้าส่วนในที่อยู่ติดกับพัดลมดูดอากาศ ทำให้ไม่สามารถยื่นเครื่องวัดความเร็วลมเข้าไปได้

ตารางที่ 16 ความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที) ภายในตะกร้าที่มีผลล้าโยตามการจัดเรียง ตะกร้าแต่ละรูปแบบเชิงกึ่งการค้ำ โดยใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่ออนาที จำนวน 2 ตัว

การจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7									การจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x4x8									
กลุ่ม	ตะกร้าที่	ชั้นที่							กลุ่ม	ตะกร้าที่	ชั้นที่							
		1	2	3	4	5	6	7			1	2	3	4	5	6	7	8
ซ้าย	1	0.36	0.52	0.34	0.29	0.38	0.54	0.36	ซ้าย	1	0.59	0.45	0.44	0.46	0.33	0.27	0.45	0.50
	2	0.49	0.48	0.46	0.72	0.46	0.62	0.61		2	1.53	1.44	1.20	1.09	1.13	1.05	0.74	1.28
	3	0.85	1.16	1.41	1.37	1.29	1.55	1.49		3	0.29	0.46	0.46	0.38	0.48	0.55	0.36	0.33
	4	0.54	0.22	0.24	0.34	0.47	0.26	0.26		4								
	5									5	0.28	0.36	0.31	0.32	0.36	0.25	0.20	0.38
	6									6								
	7	0.18	0.21	0.12	0.23	0.32	0.30	0.16		7	0.11	0.11	0.18	0.10	0.14	0.18	0.10	0.27
	8	0.46	0.30	0.35	0.29	0.16	0.38	0.47		8	0.30	0.27	0.38	0.27	0.32	0.26	0.35	0.46
	9	0.67	0.28	0.46	0.48	0.55	0.60	0.65										
ขวา	10	0.95	1.44	1.51	1.52	0.90	1.81	1.04	ขวา	9	1.36	0.98	1.27	1.45	1.50	0.95	1.05	1.86
	11	0.42	0.41	0.70	0.42	0.48	0.79	0.63		10	0.36	0.61	0.64	0.30	0.24	0.45	0.34	0.66
	12	0.20	0.40	0.44	0.49	0.27	0.51	0.31		11								
	13									12	0.35	0.40	0.30	0.57	0.41	0.46	0.37	0.40
	14									13								
	15	0.40	0.20	0.37	0.27	0.26	0.13	0.30		14	0.36	0.23	0.35	0.48	0.41	0.34	0.26	0.30
	16	0.20	0.55	0.58	0.46	0.26	0.53	0.58		15	0.22	0.53	0.35	0.21	0.34	0.45	0.53	0.84
	17	0.18	0.29	0.32	0.36	0.19	0.39	0.22		16	0.33	0.25	0.25	0.29	0.21	0.26	0.31	0.30
	18	0.25	0.18	0.10	0.21	0.15	0.28	0.20										
	เฉลี่ย	0.44	0.47	0.53	0.53	0.44	0.62	0.52		เฉลี่ย	0.51	0.51	0.51	0.49	0.49	0.46	0.42	0.63
เฉลี่ยทั้งหมด		0.51							เฉลี่ยทั้งหมด		0.50							

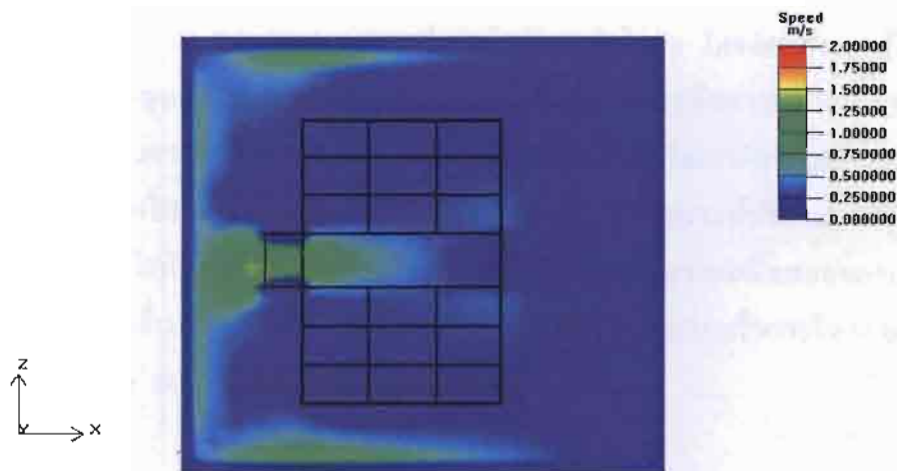
หมายเหตุ ตะกร้าที่ 5,6,13,14 ของการจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7 และตะกร้าที่ 4,6,11,13 ของการจัดเรียง ตะกร้าแบบ 2x4x8 ไม่สามารถตรวจวัดความเร็วการไหลของอากาศได้ เนื่องจากเป็นตะกร้าส่วน ในที่อยู่ติดกับพัดลมดูดอากาศ ทำให้ไม่สามารถขึ้นเครื่องวัดความเร็วลมเข้าไปได้

ตารางที่ 17 ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยผ่านตะกร้าเปล่าตามตำแหน่งที่สมมาตรกันระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว ตามการจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7 และ 2x4x8 ใช้ $\alpha = 0.05$

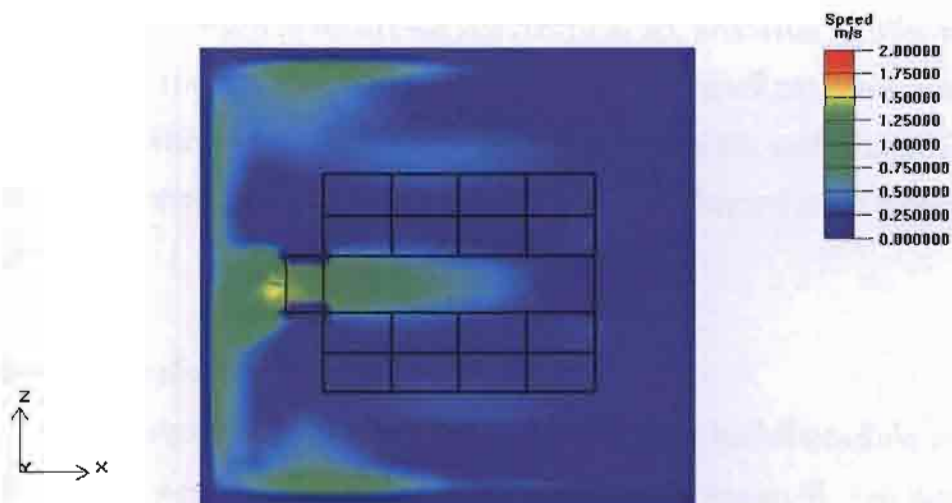
Treatment Basket arrangement	Mean difference of penetrating velocity through empty basket between left and right groups	Degree of freedom	t-Value	P-Value
3x3x7	-0.002	48	-0.052	0.959
2x4x8	-0.095	47	-3.289	0.002

ตารางที่ 18 ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบความเร็วการไหลของอากาศเฉลี่ยผ่านตะกร้าที่มีผลล้าไยบรรจุอยู่ตามตำแหน่งสมมาตรกันระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว ตามการจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7 และ 2x4x8 ใช้ $\alpha = 0.05$

Treatment Basket arrangement	Mean difference of penetrating velocity through empty basket between left and right groups	Degree of freedom	t-Value	P-Value
3x3x7	0.034	48	1.346	0.1847
2x4x8	-0.066	47	-2.485	0.0166



ภาพที่ 13 ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ผ่าน ตะกร้าที่มีผลลำไยในเชิงกิ่งการค้า ตามการจัดเรียงตะกร้าแบบ 3x3x7 ซึ่งใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว



ภาพที่ 14 ภาพตัดด้านบน (top view) จำลองการไหลอากาศของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ผ่าน ตะกร้าที่มีผลลำไยในเชิงกิ่งการค้า ตามการจัดเรียงตะกร้าแบบ 2x4x8 ซึ่งใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว

สรุปผลการทดลองกิจกรรมที่ 1.2.1

การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 3x3x7 มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าบรรจุผลลำไยใกล้เคียงกับการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x4x8 แต่การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 3x3x7 มีความเร็วการไหลของอากาศระหว่างตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาที่สม่ำเสมอมากกว่าการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x4x8 ดังนั้นจึงได้เลือกใช้การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยเป็นแบบ 3x3x7 สำหรับงานในเชิงกิ่งการค้า

ขั้นตอนที่ 4 ทำการรม SO_2 จากการเผาผงกำมะถันกับผลลำไยสด โดยจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ $3 \times 3 \times 7$ ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว และใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมควันเท่ากับ 2,000 ppm จากนั้นจึงสุ่มเก็บตัวอย่างผลลำไยทุกชั้นในตะกร้าที่ 5 และ 14 ของแต่ละกลุ่ม ไปวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้างภายในเปลือกและเนื้อของผลลำไยทันที เพื่อต้องการทราบความแตกต่างรวมทั้งความสม่ำเสมอของปริมาณ SO_2 ตกค้างในแต่ละกลุ่มของตะกร้าบรรจุผลลำไย ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันระดับความเร็วการไหลของอากาศภายในห้องที่เหมาะสมต่อการรม SO_2 กับผลลำไยสดในเชิงกึ่งการค้า

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว และใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมควันเท่ากับ 2,000 ppm มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกเฉลี่ย 1,520 ppm แต่ไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนของเนื้อผล (ตารางที่ 19) และเมื่อนำเอาปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกของผลลำไยดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับวิธีทางสถิติ โดยการใช้ Paired t-test ระหว่างปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกของผลลำไยตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาทราบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 20) ผลการทดลองดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานทดลองในเชิงงานนาร่อง ทั้งในแง่ของปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไย ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ตามที่สถาบันอาหารกำหนดไว้ และมีการกระจายตัวของ SO_2 ในตะกร้าผลลำไยทั้งกลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาใกล้เคียงกัน

สรุปผลการทดลองกิจกรรมที่ 1.2.2

ระบบหมุนเวียนอากาศที่เหมาะสมสำหรับการรม SO_2 กับผลลำไยสดในเชิงกึ่งการค้าคือ การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งใช้พัดลมที่มีระดับความเร็วลม 1,500 ฟุตต่อนาที (7.60 เมตรต่อวินาที) จำนวน 2 ตัว ซึ่งเมื่อนำมาคิดเทียบเป็นปริมาณอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณผลลำไย 126 ตะกร้าคือ 1,386 กิโลกรัม ($32 \text{ ตะกร้า} \times 11 \text{ กิโลกรัม}$) มีค่าเท่ากับ 15 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีต่อกิโลกรัมผลลำไย หรือประมาณ 3.75 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมผลลำไย

ตารางที่ 19 ปริมาณ SO_2 ตกค้างหลังจากกรรมพันธุ์ในส่วนเปลือกของผลลำไยซึ่งผ่านการรม SO_2 จากการเผาผลาญด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในเชิงกึ่งการค้าโดยใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm

กลุ่มของ ตะกร้า	ตะกร้าที่	ปริมาณ SO_2 ตกค้าง (ppm)	
		เนื้อ	เปลือก
กลุ่มซ้าย	1	0	1,665
	2	0	1,085
	3	0	1,644
	4	0	1,558
	5	0	1,463
	6	0	1,436
	7	0	1,797
กลุ่มขวา	1	0	1,462
	2	0	1,908
	3	0	1,201
	4	0	1,481
	5	0	1,574
	6	0	1,324
	7	0	1,857
เฉลี่ย		0	1,520

ตารางที่ 20 ผลของ Paired t-test เปรียบเทียบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลลำไยของตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวาของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในเชิงกึ่งการค้า ซึ่งใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรม 2,000 ppm ใช้ $\alpha = 0.05$

Treatment	Mean difference of SO_2 residue between group left and right	Degree of freedom	t-Value	P-Value
Forced-air 1,500 ทุตต่อหน้าที่ จำนวน 2 ตัว	27.0	6	0.181	0.863

1.3 สรุปผลการทดลองกิจกรรมที่ 1

1.3.1 การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ช่วยให้มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าบรรจุผลลำไยสูงและสม่ำเสมอมากกว่าการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ซึ่งเป็นระบบหมุนเวียนอากาศตามปกติที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ และมีแนวโน้มที่จะสามารถลดระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมได้ประมาณ 6 เท่า เมื่อเทียบกับระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมตามที่ชิงชิง (2535) แนะนำไว้คือ 12,000-15,000 ppm โดยผลลำไยยังคงมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกอยู่ในเกณฑ์ตามที่สถาบันอาหารกำหนด และไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเนื้อมะม่วง

1.3.2 รูปแบบการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยที่เหมาะสมสำหรับการทดลองในเชิงงานนำร่องคือ 2x2x4 และสำหรับงานทดลองในเชิงกึ่งการค้าคือ 3x3x7 ซึ่งหมายความว่า รูปแบบการจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยที่จะนำมาใช้กับระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air แบบ tunnel ควรมีจำนวนแถวของตะกร้าน้อยกว่าจำนวนคอลัมน์ หรือถ้าจะมองอย่างง่าย ๆ แล้ว ควรจัดวางตะกร้าให้มีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมจัตุรัสมากกว่าที่จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (สังเกตจากภาพที่ 1, 2, 11 และ 12)

1.3.3 ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านภายในตะกร้าบรรจุผลลำไยที่เหมาะสมหรืออย่างน้อยที่สุดแล้วควรมีค่าไม่น้อยกว่า 0.50 เมตรต่อวินาที หรือในแง่ของพัลลมุดอากาศแล้วควรมีอัตราการไหลของปริมาตรอากาศไม่น้อยกว่า 15 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมผลลำไย

กิจกรรมที่ 2 การรวม SO_2 จากการเผาฟองกำมะถันกับผลล่ำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced – air ในเชิงงานนำร่องและกึ่งการค้า

2.1 การรวม SO_2 จากการเผาฟองกำมะถันกับผลล่ำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced – air ในเชิงงานนำร่อง ซึ่งใช้ผลล่ำไยจำนวน 32 ตะกร้า

2.1.1 กิจกรรมและระเบียบวิธีที่ปรับปรุงใหม่

ก. การเปลี่ยนแปลงระเบียบวิธี โดยเปลี่ยนวิธีวางแผนการทดลองจากเดิมคือ Completely Randomized Design และจัดสิ่งทดลองแบบ factorial มี 2 ปัจจัย ได้แก่

ปัจจัยที่ 1 ระบบการหมุนเวียนอากาศภายในห้อง 2 ระบบคือ circulating – air และ forced – air

ปัจจัยที่ 2 ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 2 ระดับคือ 200 ppm และ 2,000 ppm

มาเป็นวิธีวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) มี 4 สิ่งทดลอง ได้แก่

สิ่งทดลองที่ 1 ผลล่ำไยในชุดควบคุม (control)

สิ่งทดลองที่ 2 ผลล่ำไยที่ผ่านการรวม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 200 ppm (forced-air 200 ppm)

สิ่งทดลองที่ 3 ผลล่ำไยที่ผ่านการรวม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm (forced-air 2,000 ppm)

สิ่งทดลองที่ 4 ผลล่ำไยที่ผ่านการรวม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และมีความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm (circulating-air 2,000 ppm)

โดยตัดเอาสิ่งทดลองที่ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating – air และมีความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 200 ppm ออก ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองในกิจกรรมที่ 1 ซึ่งได้ทำการรวม SO_2 กับผลล่ำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และมีความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลล่ำไยหลังจากการรวมที่เพียง 509 ppm อีกทั้งเมื่อสังเกตจากคุณภาพภายนอกของผลล่ำไย โดยเฉพาะสีผิวเมื่อเปรียบเทียบกับผลล่ำไยที่ไม่ได้ผ่านการรวม SO_2 แล้ว ยังไม่เป็นที่ยอมรับเท่าที่ควรทั้งจากคณะผู้วิจัยและผู้ประกอบการส่งออกผลล่ำไย (ภาพที่ 15 และ 16) ดังนั้นในส่วนของการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating – air จึงไม่นำเป็นไปได้อันจะลดระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรวมเหลือเพียง 200 ppm

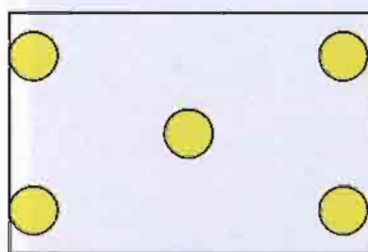


ภาพที่ 15 ผลลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรม SO_2



ภาพที่ 16 ผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 จากการเผาพวง
กำมะถันด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ
circulating-air ซึ่งมีระดับ SO_2 หลังสิ้นสุด
การรม 2,000 ppm

ข. มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการสุ่มเก็บตัวอย่างผลลำไยในตะกร้า จากเดิมที่สุ่มเก็บตะกร้าละ 1 จุด (บริเวณกึ่งกลางตะกร้า) จุดละ 10 ผล เป็นสุ่มเก็บตะกร้าละ 5 จุดๆ ละ 2-3 ผล รวมเป็น 10-15 ผล (ภาพที่ 17)



ภาพที่ 17 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างผลลำไยภายในตะกร้า

2.1.2 วิธีการทดลอง

นำผลลำไยสดพันธุ์อู่ค้อที่เก็บเกี่ยวจากสวนในจังหวัดลำพูน และจัดเรียงในตะกร้าเรียบร้อยแล้ว ตะกร้าละ 11 กิโลกรัม มายังสถานประกอบการคือ บริษัทพีชไทยฟรุต อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน จากนั้นจึงดำเนินการทดลองตามขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ

2.1.2.1 ทำการจัดวางตะกร้าบรรจุผลลำไยสิ่งทดลองที่ 2, 3 และ 4 ลงบนแท่นรอง (pallet) ภายในห้องรม SO_2 ของสถานประกอบการ ซึ่งมีขนาด 38 ลูกบาศก์เมตร โดยจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 2x2x4 ตามการทดลองในเชิงงานนำร่องของกิจกรรมที่ 1

2.1.2.2 ทำการรม SO_2 ที่ได้จากการเผาผงกำมะถันกับผลลำไยตามกรรมวิธีของแต่ละสิ่งทดลอง ซึ่งใช้ผงกำมะถันประมาณ 150 กรัม ในกรณีที่มีระดับเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 200 ppm และ 250 กรัม ในกรณีที่มีระดับเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm

2.1.2.3 ทำการตรวจสอบปริมาณ SO_2 ภายในห้องรมด้วย dosimeter tubes สำหรับวัดปริมาณแก๊ส SO_2 เพื่อให้มีระดับเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมตามสิ่งทดลองคือ 200 และ 2,000 ppm (ภาพที่ 18)



ภาพที่ 18 การตรวจสอบปริมาณ SO_2 ภายในห้องรมด้วย dosimeter tubes

2.1.2.4 นำผลลำไยออกมาจากห้องรม จากนั้นจึงใช้พัดลมเป่าไปยังตะกร้าบรรจุผลลำไยเป็นเวลา 15 นาที เพื่อป้องกันการดูดแก๊สต่อเนื่อง (carry over effect) (ภาพที่ 19)



ภาพที่ 19 การใช้พัดลมเป่าไปยังตะกร้าบรรจุผลลำไยเพื่อป้องกันการดูดแก๊สต่อเนื่อง (carry over effect)

2.1.2.5 ทำการตรวจสอบปริมาณ SO_2 ภายในตะกร้าบรรจุผลลำไยด้วย dosimeter tubes (ภาพที่ 20)

2.1.2.5 ทำการตรวจสอบปริมาณ SO_2 ภายในตะกร้าบรรจุผลลำไยด้วย dosimeter tubes (ภาพที่ 20)



ภาพที่ 20 การตรวจสอบปริมาณ SO_2 ภายในตะกร้าบรรจุผลลำไย

2.1.2.6 สุ่มเก็บตัวอย่างผลลำไยแต่ละกิ่งทดลอง โดยสุ่มเก็บในตะกร้าชั้นที่ 2 และชั้นที่ 4 ของ ตะกร้ากลุ่มซ้ายและตะกร้ากลุ่มขวา ทุกๆ ตะกร้า รวมเป็นตัวอย่างผลลำไยทั้งหมด 16 ตัวอย่าง

2.1.2.7 ตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างผลลำไยในด้านต่างๆ หลังจากการรม SO_2 ทันที และหลังจาก เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ทุก 5 วัน เป็นเวลา 20 วัน เพื่อจำลองสภาพการขนส่ง ผลลำไยทางเรือไปตลาดต่างประเทศ ได้แก่

- ปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกและเนื้อผลลำไยด้วยวิธี Modified Monier-William Method
- การเกิดโรค โดยการให้คะแนนตามความรุนแรงของโรคบนผิวผลลำไย ดังนี้

0 คะแนน	ไม่มีการเกิดโรคให้เห็น
1 คะแนน	มีการเกิดโรค 1-25 เปอร์เซ็นต์ของผิวผล
2 คะแนน	มีการเกิดโรค 26-50 เปอร์เซ็นต์ของผิวผล
3 คะแนน	มีการเกิดโรค 51-75 เปอร์เซ็นต์ของผิวผล
4 คะแนน	มีการเกิดโรค 76-100 เปอร์เซ็นต์ของผิวผล

- การเปลี่ยนแปลงสีเปลือกของผลลำไย โดยใช้เครื่องวัดสีรุ่น Miniscan XE Plus (Hunter Associate Laboratory, Inc.) แล้วรายงานผลเป็นค่า L^* , a^* และ b^* โดยที่

ค่า L^* คือ ค่าความสว่างของสี ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสว่างของสีวัตถุ หากเข้าใกล้

0 หมายถึง วัตถุมีสีคล้ำ แต่หากเข้าใกล้ 100 แสดงว่าวัตถุมี ความสว่าง

ค่า a^* เมื่อมีค่าบวกหมายถึง วัตถุมีสีแดง หากมีค่าลบ หมายถึง วัตถุมีสีเขียว

ค่า b^* เมื่อมีค่าบวกหมายถึง วัตถุมีสีเหลือง หากมีค่าลบ หมายถึง วัตถุมีสีน้ำเงิน

จากนั้นจึงนำค่า a^* และ b^* มาคำนวณเพื่อให้อยู่ในรูปของค่าเฉดสี (hue angle, h°) และ ค่าความเข้มของสี (chroma, c^*) ดังสมการ

$$(\text{hue angle, } h^\circ) = \arctangent(b^*/a^*)$$

ซึ่งค่า h° ถ้ามีค่า $0-45^\circ$ = สีม่วง-สีส้มแดง, $45-90^\circ$ = สีส้มแดง-สีเหลือง

$90-135^\circ$ = สีเหลือง-สีเหลืองเขียว, $135-180^\circ$ = สีเหลืองเขียว-สีเขียว, $180-225^\circ$ = สีเขียว-สีน้ำเงินเขียว

$225-270^\circ$ = สีน้ำเงินเขียว-สีน้ำเงิน, $270-315^\circ$ = สีน้ำเงิน-สีม่วง, $315-360^\circ$ = สีม่วง-สีม่วงแดง

$$(\text{chroma, } c^*) = \sqrt{a^2 + b^2}$$

ซึ่งค่า c^* ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าวัตถุมีสีเทา ถ้าค่า c^* เพิ่มขึ้นแสดงว่า มีความเข้มของสี มากขึ้น

- ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ วัดจากน้ำคั้นของผลลำไย โดยใช้ hand refractometer (ATAGO; N-1E 0-32 %) แล้วรายงานค่าเป็น องศาบริกซ์ ($^\circ$ brix)

2.1.3 ผลการทดลองและวิจารณ์

2.1.3.1 ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการรวม SO_2 จากการเผาพองกำมะถันกับผลล่ำไยแต่ละกรรมวิธีตามสิ่งทดลองในเชิงงานนาร่อง รวมทั้งระดับความเข้มข้นของ SO_2 ภายในห้องรวมและภายในตะกร้าผลล่ำไย

กรรมวิธี	กระบวนการ	เวลาที่ใช้ (นาที)	ความเข้มข้นของ SO_2 (ppm)
1. forced-air 200 ppm	1.1 การเผาพองกำมะถัน	10	2,500-2,800 ^{1'}
	1.2 การรวม	45	200 ^{2'}
	1.3 การกำจัด SO_2	5	0 ^{3'}
	1.4 การทำ aeration	15	20 ^{4'}
	รวม	75	
2. forced-air 2,000 ppm	2.1 การเผาพองกำมะถัน	15	4,500 ^{1'}
	2.2 การรวม	60	2,000 ^{2'}
	2.3 การกำจัด SO_2	5	10 ^{3'}
	2.4 การทำ aeration	15	15 ^{4'}
	รวม	95	
3. circulating-air 2,000 ppm	3.1 การเผาพองกำมะถัน	15	5,000 ^{1'}
	3.2 การรวม	90	2,000 ^{2'}
	3.3 การกำจัด SO_2	5	10 ^{3'}
	3.4 การทำ aeration	15	20 ^{4'}
	รวม	125	

หมายเหตุ ^{1'} หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในห้องรวมหลังจากสิ้นสุดการเผาไหม้พองกำมะถัน

^{2'} หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในห้องรวมหลังจากสิ้นสุดกระบวนการรวม

^{3'} หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในห้องรวมหลังจากการกำจัด SO_2

^{4'} หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในตะกร้าผลล่ำไยหลังจากการทำ aeration

ผลการทดลองพบว่า ผลลัพท์กลุ่ม forced-air 200 ppm ใช้เวลาในกระบวนการรม SO_2 ทั้งหมดน้อยที่สุดคือ 75 นาที เนื่องจากใช้ปริมาณผงกำมะถันในการเผาเพียง 150 กรัม แต่สำหรับผลลัพท์กลุ่ม forced-air 2,000 ppm และกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm ซึ่งใช้ปริมาณผงกำมะถันเท่ากันคือ 250 กรัม กลับพบว่าผลลัพท์กลุ่ม forced-air 2,000 ppm ใช้เวลาในกระบวนการรม SO_2 ทั้งหมด 95 นาที น้อยกว่าผลลัพท์กลุ่ม circulating-air 2,000 ppm ซึ่งใช้เวลาในกระบวนการรม SO_2 ทั้งหมด 125 นาที ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ช่วยให้ผลลัพท์สัมผัสกับ SO_2 ได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณ SO_2 ภายในห้องลดลงได้เร็วกว่าการใช้ระบบหมุนเวียนแบบ circulating-air และหลังจากการกำจัด SO_2 โดยใช้พัดลมดูดอากาศภายในห้องรมผ่านเข้าไปในหอกำจัดแก๊ส SO_2 เป็นเวลา 5 นาที (เทียบจากวิธีปฏิบัติโดยทั่วไปของสถานประกอบการ) พบว่า ทุกกรรมวิธีมีปริมาณ SO_2 ตกค้างภายในห้องรมจากการวัดด้วย dosimeter tube อยู่ในช่วง 0-10 ppm ส่วนระดับความเข้มข้นของ SO_2 ภายในตะกร้าหลังจากการทำ aeration เป็นเวลาประมาณ 15 นาที ตามคำแนะนำของ ชิงชิง (2535) พบว่า ทุกกรรมวิธีมีปริมาณ SO_2 ภายในตะกร้าจากการวัดด้วย dosimeter tube อยู่ในช่วง 10-20 ppm

ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการรม SO_2 จากการเผาผงกำมะถันกับผลลัพท์ไม่มีปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้องหลายประการด้วยกัน ได้แก่ 1) ปริมาณผงกำมะถันที่จะใช้เผา ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของ SO_2 ภายในห้องรมหลังสิ้นสุดกระบวนการรม 2) อาจขึ้นอยู่กับระบบหมุนเวียนอากาศที่นำมาใช้ในกระบวนการรม และ 3) ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของหอกำจัดแก๊ส SO_2 (SO_2 scrubber)

2.1.3.2 คุณภาพของผลลัพท์หลังจากรม SO_2 ทันที และหลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

ก. ปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนของเปลือกและเนื้อผลลัพท์

จากการสุ่มตัวอย่างผลลัพท์ไปวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนของเปลือกและเนื้อผลลัพท์ด้วยวิธี Modified Monier-William Method หลังการรม SO_2 ทันที พบว่า ผลลัพท์กลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือก 1,260 ppm สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลัพท์กลุ่ม forced-air 200 ppm และกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm ซึ่งมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกใกล้เคียงกันประมาณ 400-450 ppm (ตารางที่ 21) ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air เป็นการทำให้อากาศไหลเวียนรอบๆ ภาชนะบรรจุเท่านั้น ต่างจากการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่มีพัดลมดูดอากาศ (auxiliary fan) เข้ามาช่วยหมุนเวียนอากาศภายในห้องรม โดยดูดเอาอากาศจากช่องว่างตรงกลางของตะกร้าทั้ง 2 กลุ่มออกมา ซึ่งเป็นการบังคับให้อากาศที่อยู่รอบๆ ไหลผ่านเข้าไปในตะกร้าบรรจุผลลัพท์ จึงทำให้แก๊ส SO_2 สัมผัสกับผลลัพท์ได้มากขึ้นและมีปริมาณ SO_2 ตกค้างสูงกว่าผลลัพท์กลุ่ม circulating-air 2,000 ppm ถึงแม้จะใช้ความเข้มข้นหลังสิ้นสุดการรมเท่ากัน แต่ในส่วนของผลลัพท์กลุ่ม forced-air 200 ppm แล้ว ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมที่ใช้นั้นต่ำกว่าผลลัพท์กลุ่มอื่นประมาณ 10 เท่า จึงทำให้มีปริมาณ SO_2 ดำตามไปด้วย สำหรับส่วนเนื้อของผลลัพท์ซึ่งไม่พบปริมาณ SO_2

ตกค้างนั้น อาจเป็นไปได้ว่าระดับความเข้มข้นของ SO_2 ที่ใช้เป็นระดับความเข้มข้นต่ำกว่าปกติตามที่จึงจึง (2535) แนะนำไว้คือ 12,000-15,000 ppm ประมาณ 6 เท่า จึงทำให้แก๊ส SO_2 ไม่สามารถซึมลงไปถึงส่วนของเนื้อผลไม้ หรือกรณีของการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งจากการทดลองในกิจกรรมที่ 1 พบว่า ช่วยให้มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าผลลำไยเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงอาจทำให้แก๊ส SO_2 สัมผัสกับผลลำไยโดยเฉพาะบริเวณผิวเปลือกได้มากกว่าที่จะซึมลงไปในส่วนเนื้อของผล และหลังจากการเก็บรักษา ผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก SO_2 มีสถานะเป็นแก๊สจึงสามารถระเหยได้ง่าย โดยผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm ยังคงมีปริมาณ SO_2 ตกค้างสูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 200 ppm และกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm ที่มีปริมาณ SO_2 ตกค้างใกล้เคียงกัน ซึ่งหลังจากการเก็บรักษา 20 วัน ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีปริมาณ SO_2 ตกค้างลดลงเหลือ 355 ppm ขณะที่ผลลำไย กลุ่ม circulating-air 2,000 ppm และกลุ่ม forced-air 200 ppm ปริมาณ SO_2 ตกค้างลดลงเหลือ 30 ppm และ 0 ppm ตามลำดับ (ตารางที่ 21) สอดคล้องกับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการของ ภูมิพัฒน์ (2547) ที่รายงานว่า ผลลำไยสดซึ่งผ่านการรม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงและมีความเข้มข้นหลังจากสิ้นสุดการรม 200 และ 2,000 ppm มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 21 ปริมาณ SO_2 ตกค้าง (ppm) ในเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเจียนานำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ปริมาณ SO_2 ตกค้าง				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Forced-air 200 ppm	440 ^b	190 ^b	220 ^b	104 ^b	0 ^b
Forced-air 2,000 ppm	1,260 ^a	710 ^a	590 ^a	600 ^a	355 ^a
Circulating-air 2,000 ppm	450 ^b	320 ^b	360 ^b	140 ^b	30 ^b
F-test	*	*	*	*	*
CV(%)	19.6	12.9	10.5	12.1	20.3

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ข. การเกิดโรค

ผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 ทุกสิ่งทดลอง ไม่มีการเกิดโรคปรากฏให้เห็นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 20 วัน ทั้งนี้เนื่องจาก SO_2 เป็นแก๊สมีฤทธิ์เป็นกรด จึงสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราที่เป็นสาเหตุของโรคเน่าได้ (จักรพงษ์, 2542) ขณะที่ผลลำไยชุดควบคุมเริ่มมีการเกิดโรคปรากฏให้เห็นหลังจากการเก็บรักษา 15 วัน โดยมีคะแนนการเกิดโรค 1 คะแนน และรุนแรงมากขึ้นเป็น 3 คะแนน หลังจากการเก็บรักษา 20 วัน (ตารางที่ 22) ซึ่งลักษณะการเกิดโรคของผลลำไยนั้นเป็นโรคเน่าและมีสปอร์สีเทาของเชื้อราเกาะอยู่บริเวณผิวของผลลำไย (ภาพที่ 21)

ตารางที่ 22 การเกิดโรค (คะแนน) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองซึ่งงานนำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	การเกิดโรค				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	0	0	0	1.00	3.00
Forced-air 200 ppm	0	0	0	0	0
Forced-air 2,000 ppm	0	0	0	0	0
Circulating-air 2,000 ppm	0	0	0	0	0
F-test	-	-	-	-	-
CV(%)	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - ไม่ได้วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติ



ภาพที่ 21 ลักษณะการเกิดโรคบนผิวของผลลำไย

ค. การเปลี่ยนแปลงค่า L^* ค่า h° และค่า c^* ของสีเปลือกผลลำไย

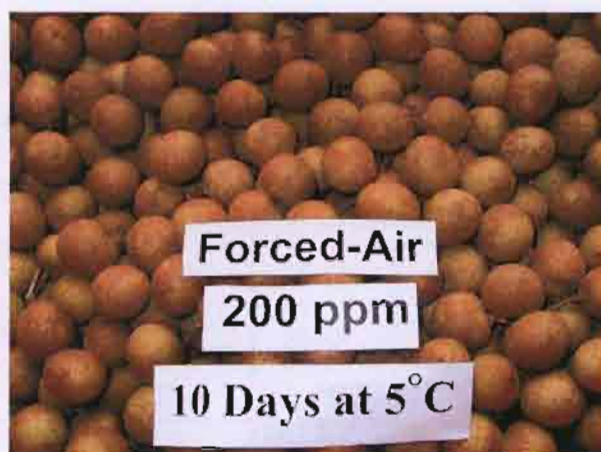
ผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 ทุกสิ่งทดลองมีการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกจากสีน้ำตาลเป็นสีน้ำตาลปนเหลือง จึงทำให้มีค่า L^* เพิ่มขึ้นสูงกว่าผลลำไยชุดควบคุม โดยหลังจาการรม SO_2 ทันที ผลลำไยกลุ่ม forced-air 200 และ 2,000 ppm มีค่า L^* ใกล้เคียงกันประมาณ 57.19-57.73 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm และผลลำไยชุดควบคุมที่มีค่า L^* เท่ากับ 55.23 และ 51.67 ตามลำดับ และหลังจากเก็บรักษามีแนวโน้มว่า ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีค่า L^* ลดลงน้อยกว่าผลลำไยกลุ่มอื่นๆ โดยหลังจากการเก็บรักษา 20 วัน ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีค่า L^* เท่ากับ 55.81 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 200 ppm และ circulating-air 2,000 ppm ซึ่งมีค่า L^* ลดลงเหลือ 54.39 และ 51.11 ตามลำดับ ขณะที่ผลลำไยชุดควบคุมมีการเกิดสีน้ำตาลและการเกิดโรคที่เปลือกผลจนไม่เป็นที่ยอมรับ (ตารางที่ 23)

สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่า h° ซึ่งผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 มีค่า h° ของสีเปลือกสูงกว่าผลลำไยชุดควบคุม โดยผลลำไยกลุ่ม forced-air 200 และ 2,000 ppm มีค่า h° หลังจาการรม SO_2 ทันทีอยู่ในช่วงแดงสีเหลืองและมีค่า h° ใกล้เคียงกันประมาณ 79.06-79.47 จึงทำให้มีสีเปลือกเหลืองมากกว่าและแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm และผลลำไยชุดควบคุมที่มีค่า h° 75.70 และ 77.03 ตามลำดับ และหลังจากเก็บรักษา ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีค่า h° ลดลงน้อยกว่าผลลำไยกลุ่มอื่นๆ โดยหลังจากการเก็บรักษา 20 วัน ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีค่า h° เท่ากับ 77.11 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 200 ppm และกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm ที่มีค่า h° ลดลงเหลือ 76.02 และ 70.68 ตามลำดับ (ตารางที่ 24)

เช่นเดียวกับค่า c^* ซึ่งผลลำไยกลุ่ม forced-air 200 และ 2,000 ppm มีสีเปลือกเหลืองมากกว่ากับผลลำไยชุดควบคุมและผลลำไยกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm จึงทำให้มีสีเทาน้อยลง ดังนั้นผลลำไยกลุ่ม forced-air 200 และ 2,000 ppm จึงมีค่า c^* หลังจาการรม SO_2 ทันทีใกล้เคียงกันคือ 34.70-35.05 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยชุดควบคุมและผลลำไยกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm ที่มีค่า c^* ของสีเปลือกใกล้เคียงกันประมาณ 32.34-32.63 และหลังจากเก็บรักษา ผลลำไยกลุ่ม 2,000 ppm มีค่า c^* ลดลงน้อยกว่าผลลำไยกลุ่มอื่นๆ โดยหลังจากการเก็บรักษา 20 วัน ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีค่า c^* เท่ากับ 34.35 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 200 ppm และกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm ที่มีค่า c^* ลดลงเหลือ 32.97 และ 30.01 ตามลำดับ (ตารางที่ 25)

การเปลี่ยนแปลงค่า L^* ค่า h° และค่า c^* ของสีเปลือกผลลำไยดังกล่าวเป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติ SO_2 ที่สามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลบริเวณผิวเปลือกผลลำไยได้ โดยไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ polyphenol oxidase (PPO) ซึ่งเป็นเอนไซม์สำคัญในปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของผักและผลไม้ (จักรพงษ์, 2542) และเมื่อนำเอาการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกของผลลำไยดังกล่าวมาพิจารณาถึงเกิดสีน้ำตาลบริเวณผิวเปลือกของผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ทุกสิ่งทดลองแล้ว มีแนวโน้มว่า ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm

เกิดสีน้ำตาลบริเวณผิวเปลือกน้อยกว่าผลลำไยสิ่งทดลองอื่นๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัย 2 ประการที่แตกต่างก็คือ ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรม และระบบหมุนเวียนอากาศที่นำมาใช้ในกระบวนการรม โดยผลลำไยกลุ่ม forced-air 200 ppm และ 2,000 ppm ถึงแม้จะใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบเดียวกัน และมีค่า L^* ค่า h° รวมทั้งค่า c^* แตกต่างกันไม่มากนัก แต่เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพหลังจากการเก็บรักษาด้วยสายตาแล้วพบว่า ผลลำไยกลุ่ม forced-air 200 ppm มีลักษณะผิวดำเกิดขึ้นบนผิวของผลลำไย โดยสีของผิวเปลือกไม่สม่ำเสมอ ทำให้มองดูคล้ายกับผลลำไยมีผิวลาย (ภาพที่ 22) จากการสอบถามผู้ประกอบการรม SO_2 ผลลำไย พบลักษณะผิวดำดังกล่าวเกิดขึ้นเหมือนกันและมักจะเรียกว่า “การเกิดลายแผ่นที่” สาเหตุยังไม่ทราบแน่ชัด อาจเป็นไปได้ว่าเกิดจากการใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 ที่ต่ำเกินไป แต่สำหรับผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm และกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm แล้ว น่าจะเกิดจากความแตกต่างของระบบหมุนเวียนอากาศ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ช่วยให้อากาศที่อยู่รอบๆ ไหลผ่านเข้าไปในตะกร้าบรรจุผลลำไย ดังนั้นจึงช่วยให้แก๊ส SO_2 สัมผัสกับผลลำไยได้มากขึ้น และสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลได้ดีกว่าตามไปด้วย



ภาพที่ 22 ลักษณะผลลำไยที่มีผิวลายหรือที่เรียกว่า “การเกิดลายแผ่นที่”

ตารางที่ 23 การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงงานนำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงบำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ค่า L^*				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	51.67 ^c	50.74 ^d	49.96 ^c	46.69 ^d	N/A
Forced-air 200 ppm	57.89 ^a	55.60 ^b	54.88 ^a	54.36 ^b	54.36 ^b
Forced-air 2,000 ppm	57.73 ^a	57.60 ^a	56.32 ^a	55.96 ^a	55.81 ^a
Circulating-air 2,000 ppm	55.23 ^b	52.75 ^c	52.90 ^b	51.89 ^c	51.11 ^c
F-test	*	*	*	*	*
CV(%)	0.9	1.6	2.2	1.7	1.7

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์
N/A คือ ผลลำไยมีการเกิดสีน้ำตาลและการเกิดโรคที่เปลือกผลจนไม่เป็นที่ยอมรับ

ตารางที่ 24 การเปลี่ยนแปลงค่า h° ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงงานนำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงบำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ค่า h°				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	77.03 ^b	73.09 ^c	70.01 ^d	67.72 ^c	N/A
Forced-air 200 ppm	79.06 ^a	77.60 ^b	77.14 ^b	76.65 ^a	76.02 ^b
Forced-air 2,000 ppm	79.47 ^a	79.11 ^a	78.22 ^a	77.30 ^a	77.11 ^a
Circulating-air 2,000 ppm	75.70 ^c	73.35 ^c	72.39 ^c	71.26 ^b	70.68 ^c
F-test	**	**	**	**	**
CV(%)	1.99	1.71	1.62	1.48	0.96

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 25 การเปลี่ยนแปลงค่า c^* ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงงานนำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ค่า c^*				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	32.63 ^b	30.72 ^d	29.05 ^d	26.61 ^d	N/A
Forced-air 200 ppm	34.70 ^a	34.68 ^b	34.40 ^b	33.20 ^b	32.97 ^b
Forced-air 2,000 ppm	35.05 ^a	35.29 ^a	35.58 ^a	34.23 ^a	34.35 ^a
Circulating-air 2,000 ppm	32.34 ^b	31.97 ^c	31.51 ^c	30.73 ^c	30.01 ^c
F-test	**	**	**	**	**
CV(%)	2.47	1.84	2.26	2.85	3.08

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ

Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

N/A คือ ผลลำไยมีการเกิดสีน้ำตาลและการเกิดโรคที่เปลือกผลจนไม่เป็นที่ยอมรับ

ง. ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 ทุกสิ่งทดลอง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลลำไยชุดควบคุมพบว่า ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ใกล้เคียงกับผลลำไยชุดควบคุมคือ 20.76-20.82 องศาบริกซ์ สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 200 ppm และกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 19.02 และ 17.77 องศาบริกซ์ ตามลำดับ (ตารางที่ 26) และหลังจากเก็บรักษาผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองนั้น ไม่สามารถบอกสาเหตุของความแตกต่างได้แน่ชัด เนื่องจากผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองที่นำมาศึกษาไม่ได้มาจากแหล่งปลูกเดียวกัน อีกทั้งไม่ทราบอายุการเก็บเกี่ยวที่แน่นอนของผลลำไย รวมไปถึงการไม่ได้ตรวจสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของผลลำไยในแต่ละสิ่งทดลองก่อนที่จะทำการรม SO_2 แต่จากการทดลองชิมทั้งจากคณะผู้วิจัยและผู้ประกอบการแล้วยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้โดยเฉพาะผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm

ตารางที่ 26 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (องศาบริกซ์) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงงานนำร่องหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	(องศาบริกซ์)				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	20.82 ^a	20.47 ^a	19.79 ^a	19.10 ^{ab}	N/A
Forced-air 200 ppm	19.02 ^b	18.72 ^b	18.67 ^{ab}	17.69 ^b	17.66 ^b
Forced-air 2,000 ppm	20.76 ^a	20.09 ^a	19.39 ^a	19.38 ^a	19.35 ^a
Circulating-air 2,000 ppm	17.77 ^c	17.74 ^c	17.54 ^b	17.55 ^b	17.20 ^b
F-test	*	*	*	*	*
CV(%)	3.2	2.8	4.2	5.6	4.0

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ

Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

N/A คือ ผลลำไยมีการเกิดสีน้ำตาลและการเกิดโรคที่เปลือกผลจนไม่เป็นที่ยอมรับ

จากผลการทดลองในเชิงงานนำร่องทั้งหมดที่กล่าวมาจึงช่วยยืนยันได้ว่า ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ทำให้แก๊ส SO_2 สัมผัสกับผลลำไยได้ดีกว่าการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ซึ่งพิจารณาจากผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกผลสูงกว่าผลลำไยกลุ่ม circulating-air 2,000 ppm ถึงแม้จะใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เท่ากัน แต่ปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกของผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm ที่สูงกว่าดังกล่าวยังต่ำกว่าเกณฑ์ที่สถาบันอาหารกำหนดไว้และจะลดลงเหลือประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 30 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการเก็บรักษา 10 วัน และ 20 วันตามลำดับ ที่สำคัญคือ ไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนหนึ่งของเนื้อผลทั้งหลังจากรม SO_2 ทันที และหลังจากการเก็บรักษา ส่งผลถึงการใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 ที่สามารถลดระดับความเข้มข้นได้ประมาณ 6 เท่าเมื่อเทียบกับระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมตามที่ ชิงชิง (2535) แนะนำไว้คือ 12,000-15,000 ppm โดยยังคงสามารถป้องกันการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกของผลลำไยได้หลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 20 วัน ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

2.1.4 สรุปผลการทดลองกิจกรรมที่ 2.1

2.1.4.1 กระบวนการรวม SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถันกับผลลำไยสดเชิงงานนำร่องด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 200 และ 2,000 ppm ใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 75 นาที และ 95 นาที ตามลำดับ ขณะที่การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm ใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 125 นาที

2.1.4.2 การรวม SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถันด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm สามารถป้องกันการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกของผลลำไยดีที่สุด โดยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วน of เปลือกผลหลังจากการหมักที่ประมาณ 1,260 ppm ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่สถาบันอาหารกำหนดไว้ และไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วน of เนื้อผล

2.2 การรวม SO_2 จากการเผาไหม้ถ่านหินกับผลลําไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced – air ในเชิงกึ่งการค้ำ ซึ่งใช้ผลลําไยจำนวน 126 ตะกร้า

2.2.1 กิจกรรมและระเบียบวิธีที่ปรับปรุงใหม่

ก. การเปลี่ยนแปลงระเบียบวิธี โดยเปลี่ยนวิธีวางแผนการทดลองจากเดิมคือ Completely Randomized Design และจัดสิ่งทดลองแบบ factorial มี 2 ปัจจัย ได้แก่

ปัจจัยที่ 1 ระบบการหมุนเวียนอากาศภายในห้อง 2 ระบบคือ circulating – air และ forced – air

ปัจจัยที่ 2 ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 2 ระดับคือ 200 ppm และ 2,000 ppm

มาเป็นวิธีวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) มี 4 สิ่งทดลอง ได้แก่

สิ่งทดลองที่ 1 ผลลําไยในชุดควบคุม (control)

สิ่งทดลองที่ 2 ผลลําไยที่ผ่านการรวม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีความเข้มข้น SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm (forced-air 2,000 ppm)

สิ่งทดลองที่ 3 ผลลําไยที่ผ่านการรวม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และมีความเข้มข้น SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 12,000 ppm (circulating-air 12,000 ppm)

สิ่งทดลองที่ 4 ผลลําไยที่ผ่านการรวม SO_2 จากสถานประกอบการในเขตจังหวัดลําพูนจำนวน 8 แห่ง

โดยคัดเลือกสิ่งทดลองที่ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating – air และใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 200 ppm และ 2,000 ppm รวมทั้งการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีความเข้มข้น SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 200 ppm ซึ่งไม่ประสบผลสำเร็จในเชิงงานนําร่องออกไป แต่ได้เพิ่มสิ่งทดลองที่ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ซึ่งมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 12,000-15,000 ppm ตามที่ชิงชิง (2535) แนะนำไว้ รวมถึงผลลําไยที่ผ่านกระบวนการรวม SO_2 เชิงการค้ำโดยทั่วไปของสถานประกอบการในเขตจังหวัดลําพูนจำนวน 8 แห่ง ทั้งนี้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบและช่วยยืนยันผลการทดลองให้เด่นชัดมากยิ่งขึ้นว่า กระบวนการรวม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือดีกว่ากระบวนการรวม SO_2 กับผลลําไยซึ่งมีการปฏิบัติในเชิงการค้ำโดยทั่วไปในปัจจุบันได้หรือไม่

ข. มีการเปลี่ยนแปลงการสุ่มเก็บตัวอย่างผลลําไยในตะกร้า จากเดิมที่สุ่มเก็บตะกร้าละ 1 จด (บริเวณกึ่งกลางตะกร้า) จดละ 10 ผล เป็นสุ่มเก็บตะกร้าละ 5 จดๆ ละ 2 ผล รวมเป็น 10 ผล (เหมือนการทดลองในเชิงงานนําร่อง)

2.2.2 วิธีการทดลอง

2.2.2.1 ทำการเก็บตัวอย่างผลลำไยที่ผ่านกระบวนการรม SO_2 ในเชิงการค้าโดยทั่วไปของสถานประกอบการในเขตจังหวัดลำพูนจำนวน 8 แห่ง โดยเก็บตัวอย่างแห่งละ 4 ตะกร้า เพื่อนำมาใช้เป็นผลลำไยในสิ่งทดลองที่ 4 ส่วนผลลำไยในสิ่งทดลองที่ 1, 2 และ 3 นั้น นำผลลำไยสดพันธุ์อีดอที่เก็บเกี่ยวจากสวนในจังหวัดลำพูน และจัดเรียงในตะกร้าเรียบร้อยแล้ว ตะกร้าละ 11 กิโลกรัม มายังสถานประกอบการคือ บริษัทพีชไทยฟรุต อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน

2.2.2.1 ทำการจัดวางตะกร้าบรรจุผลลำไยสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 ลงบนแท่นรอง (pallet) ภายในห้องรม SO_2 ของสถานประกอบการ ซึ่งมีขนาดของห้องเท่ากับ 38 ลูกบาศก์เมตร โดยจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยแบบ 3x3x7 ตามการทดลองในเชิงการค้าของกิจกรรมที่ 1

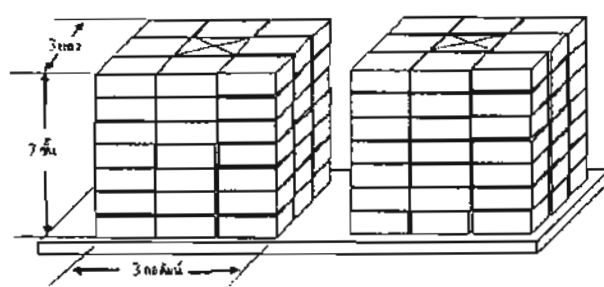
2.2.2.2 ทำการรม SO_2 ที่ได้จากการเผาฟองกำมะถันกับผลลำไยตามกรรมวิธีของแต่ละสิ่งทดลอง ซึ่งใช้ฟองกำมะถันประมาณ 660 กรัม ในกรณีที่มีระดับเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm และ 1,200 กรัม ในกรณีที่มีระดับเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 12,000 ppm

2.2.2.3 ทำการตรวจสอบปริมาณ SO_2 ภายในห้องรมด้วย dosimeter tubes สำหรับวัดปริมาณแก๊ส SO_2 เพื่อให้มีระดับเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมตามสิ่งทดลองคือ 2,000 และ 12,000 ppm

2.2.2.4 นำผลลำไยออกจากห้องรม จากนั้นจึงใช้พัดลมเป่าไปยังตะกร้าบรรจุผลลำไยเป็นเวลา 15 นาที เพื่อป้องกันการดูดแก๊สต่อเนื่อง (carry over effect)

2.2.2.5 ทำการตรวจสอบปริมาณ SO_2 ภายในตะกร้าบรรจุผลลำไยด้วย dosimeter tubes

2.2.2.6 สุ่มเก็บตัวอย่างผลลำไย โดยสุ่มเก็บจากตะกร้าที่อยู่กึ่งกลางของทุกชั้นในแต่ละกลุ่ม (ภาพที่ 23) ซึ่งจะได้ตัวอย่างผลลำไยรวมทั้งหมด 14 ตัวอย่าง



ภาพที่ 23 การสุ่มเก็บตัวอย่างผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 จากการเผาฟองกำมะถันในเชิงการค้า

2.2.2.7 ตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังจากการรม SO_2 ทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ทุก 5 วัน เป็นเวลา 20 วัน เพื่อจำลองสภาพการขนส่งผลลำไยทางเรือไปตลาดต่างประเทศ เช่นเดียวกับงานทดลองในเชิงงานนาร่อง

2.2.3 ผลการทดลองและวิจารณ์

2.2.3.1 ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการรม SO_2 จากการเผาพริกแกงกะฉันทับผลลำไยสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 ในเชิงถึงการค้า รวมทั้งระดับความเข้มข้นของ SO_2 ภายในห้องรมและภายในตะกร้าผลลำไย

กรรมวิธี	กระบวนการ	เวลาที่ใช้ (นาท)	ความเข้มข้นของ SO_2 (ppm)
1. forced-air 2,000 ppm	1.1 การเผาพริกแกงกะฉันทับ	25	8,000 ^{1'}
	1.2 การรม	120	2,000 ^{2'}
	1.3 การกำจัด SO_2	5	20 ^{3'}
	1.4 การทำ aeration	15	12.50 ^{4'}
	รวม	165	
2. circulating-air 12,000 ppm	2.1 การเผาพริกแกงกะฉันทับ	35	>8,000 ^{1'}
	2.2 การรม	60	12,000 ^{2'}
	2.3 การกำจัด SO_2	5	20 ^{3'}
	2.4 การทำ aeration	15	20 ^{4'}
	รวม	115	

หมายเหตุ ^{1'} หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในห้องรมหลังจากสิ้นสุดการเผาไหม้พริกแกงกะฉันทับ

^{2'} หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในห้องรมหลังจากสิ้นสุดกระบวนการรม

^{3'} หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในห้องรมหลังจากการกำจัด SO_2

^{4'} หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในตะกร้าผลลำไยหลังจากการทำ aeration

ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm ใช้เวลาในกระบวนการรม SO_2 ทั้งหมด 165 นาที ขณะที่ผลลำไยกลุ่ม circulating-air 12,000 ppm ใช้เวลาทั้งหมด 115 นาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในกระบวนการรม SO_2 กับผลลำไยทั้ง 2 สิ่งทดลองดังกล่าวไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากมีหลักเกณฑ์หรือข้อกำหนดในส่วนระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมที่แตกต่างกัน โดยผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm ถึงแม้จะใช้ปริมาณพริกแกงกะฉันทับน้อยกว่าคือ 660 กรัม แต่ต้องใช้เวลาในการรมนานถึง 120 นาที จึงมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมเท่ากับ 2,000 ppm แต่ในส่วนของผลลำไยกลุ่ม circulating-air 12,000 ppm ถึงแม้จะใช้ปริมาณพริกแกงกะฉันทับมากกว่าคือ 1,200 กรัม แต่ใช้เวลาในการรมเพียง 60 นาที เนื่องจากเป็นเวลาที่สอดคล้องตามคำแนะนำของชิงชิง (2535) หรือสถาบันอาหาร (2541) ที่กล่าวว่า ระยะเวลาในการรม SO_2 กับผลลำไยขึ้นอยู่กับปริมาณพริกแกงกะฉันทับที่ใช้เผา โดยทั่วไปแล้วใช้เวลาประมาณ 40-60 นาที หรือสังเกตจากควันในห้องเริ่มเจือจางลงจนสามารถมองเห็นสิ่งต่างๆ ภายในห้องได้ชัดเจน

2.2.3.2 คุณภาพของผลลำไยหลังจาการรม SO_2 ทันที และหลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

ก. ปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกและเนื้อผลลำไย

จากการสุ่มตัวอย่างผลลำไยไปวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกและเนื้อผลด้วยวิธี Modified Monier-William Method หลังจาการรม SO_2 ทันที พบว่า ผลลำไยกลุ่ม circulating-air 12,000 ppm มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกประมาณ 2,360 ppm สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm และผลลำไยจากสถานประกอบการ ที่มีปริมาณการตกค้างของ SO_2 ในส่วนเปลือก 1,520 และ 1,400 ppm ตามลำดับ (ตารางที่ 27) สำหรับการตกค้างในส่วนเนื้อผลนั้น ผลลำไยกลุ่ม circulating-air 12,000 ppm ปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อผลเท่ากับ 38 ppm ขณะที่ผลลำไยจากสถานประกอบการมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อผลเท่ากับ 64 ppm แต่ไม่พบการตกค้างในเนื้อผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm (ตารางที่ 28) และปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา

ปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยกลุ่ม circulating-air 12,000 ppm มีลักษณะใกล้เคียงและเป็นไปในทำนองเดียวกับชิงชิง (2535) ที่กล่าวไว้ว่า การรม SO_2 กับผลลำไยสดและมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรม 12,000-15,000 ppm มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกประมาณ 1,500-2,500 ppm และในส่วนเนื้อผลประมาณ 30 ppm ขณะที่ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm ยังคงมีปริมาณ SO_2 ตกค้างเป็นไปในทำนองเดียวกับการทดลองในเชิงงานนาร่องที่ผ่านมา โดยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกต่ำกว่าเกณฑ์ที่สถาบันอาหารกำหนดไว้ และไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเนื้อผล แต่สำหรับผลลำไยที่ผ่านกระบวนการรม SO_2 ในเชิงการค้าโดยทั่วไปของสถานประกอบการแล้ว ยังคงมีปริมาณ SO_2 ตกค้างที่สูงอยู่โดยเฉพาะในส่วนเนื้อผล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการรม SO_2 กับผลลำไยในเชิงการค้าโดยทั่วไปของสถานประกอบการยังคงมีปัญหาเกี่ยวกับกระบวนการปฏิบัติอยู่

ข. การเกิดโรค

ผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 ทุกสิ่งทดลอง ไม่มีการเกิดโรคปรากฏให้เห็นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 20 วัน ขณะที่ผลลำไยชุดควบคุมเริ่มมีการเกิดโรคปรากฏให้เห็นหลังจากการเก็บรักษา 15 วัน โดยมีคะแนนการเกิดโรค 1 คะแนน และรุนแรงมากขึ้นเป็น 3 คะแนน หลังจากการเก็บรักษา 20 วัน เช่นเดียวกับงานทดลองในเชิงงานนาร่อง (ตารางที่ 29)

ตารางที่ 27 ปริมาณ SO₂ ตกค้าง (ppm) ในเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงถึงการค้าหลังรมด้วย SO₂ จากการเผาพริกามะดันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ปริมาณ SO ₂ ตกค้าง				
	หลังจากรม SO ₂ ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Forced-air 2,000 ppm	1,520 ^b	890 ^b	840 ^b	690 ^a	710 ^a
Circulating-air 12,000 ppm	2,360 ^a	1,040 ^a	880 ^a	720 ^a	700 ^a
สถานประกอบการ	1,400 ^c	755 ^c	700 ^c	600 ^b	610 ^b
F-test	*	*	*	*	*
CV(%)	15	12.4	7.7	9.3	10.7

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 28 ปริมาณ SO₂ ตกค้าง (ppm) ในเนื้อผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงถึงการค้าหลังรมด้วย SO₂ จากการเผาพริกามะดันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ปริมาณ SO ₂ ตกค้าง				
	หลังจากรม SO ₂ ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Forced-air 2,000 ppm	0	0	0	0	0
Circulating-air 12,000 ppm	38	20	10	6	3
สถานประกอบการ	64	35	28	10	10
F-test	-	-	-	-	-
CV(%)	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - ไม่ได้วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติ

ตารางที่ 29 การเกิดโรค (คะแนน) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงกึ่งการค้ำหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาฟองกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	การเกิดโรค				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	0	0	0	1.00	3.00
Forced-air 2,000 ppm	0	0	0	0	0
Circulating-air 12,000 ppm	0	0	0	0	0
สถานประกอบการ	0	0	0	0	0
F-test	-	-	-	-	-
CV(%)	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - ไม่ได้วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติ

ค. การเปลี่ยนแปลงค่า L^* ค่า h° และค่า c^* ของสีเปลือกผลลำไย

ผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 ทุกสิ่งทดลองมีการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกจากสีน้ำตาลเป็นสีน้ำตาลปนเหลือง จึงทำให้มีค่า L^* เพิ่มขึ้นสูงกว่าผลลำไยชุดควบคุม โดยหลังจากรม SO_2 ทันที ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีค่า L^* เท่ากับ 59.06 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม circulating-air 12,000 ppm และผลลำไยจากสถานประกอบการที่มีค่า L^* ใกล้เคียงกันประมาณ 56.08-57.19 และหลังจากเก็บรักษา ผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีค่า L^* ลดลง แต่ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm ยังคงมีค่า L^* สูงกว่าผลลำไยสิ่งทดลองอื่นๆ โดยหลังจากการเก็บรักษา 20 วัน ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีค่า L^* เท่ากับ 55.45 ขณะที่ผลลำไยกลุ่ม circulating-air 12,000 ppm และผลลำไยจากสถานประกอบการมีค่า L^* เท่ากับ 52.74 และ 54.65 ตามลำดับ ส่วนผลลำไยชุดควบคุมมีการเกิดโรคอย่างรุนแรงจนไม่สามารถวัดค่าได้ (ตารางที่ 30)

สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่า h° ซึ่งผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm มีค่า h° หลังจากรม SO_2 ทันทีเท่ากับ 79.81 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม circulating-air 12,000 ppm และผลลำไยจากสถานประกอบการที่มีค่า h° ใกล้เคียงกันประมาณ 78.53-78.76 รวมทั้งผลลำไยชุดควบคุมที่มีค่า h° เท่ากับ 77.03 และหลังจากเก็บรักษา ค่า h° ของผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มลดลง โดยผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ทุกสิ่งทดลองมีค่า h° ลดลงใกล้เคียงกันแต่น้อยกว่าผลลำไยชุดควบคุม ซึ่งหลังจากการเก็บรักษา 20 วัน ผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ทุกสิ่งทดลองมีค่า h° ประมาณ 74.48-75.42 (ตารางที่ 31)

เช่นเดียวกับค่า c^* ซึ่งผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 ทุกสิ่งทดลองและผลลำไยจากสถานประกอบการ มีค่า c^* หลังจากรรม SO_2 ทันทีใกล้เคียงกันประมาณ 35.15-35.70 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยชุดควบคุมที่มีค่า c^* ของสีเปลือกเท่ากับ 32.63 และหลังจากเก็บรักษา ค่า c^* ของผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มลดลง โดยหลังจากการเก็บรักษา 20 วัน ผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ทุกสิ่งทดลองมีค่า c^* ลดลงใกล้เคียงเหลือประมาณ 34.03-34.78 (ตารางที่ 32)

จากการเปลี่ยนแปลงค่า L^* ค่า h^o และค่า c^* ของสีเปลือกที่ใกล้เคียงกันของผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm กลุ่ม circulating-air 12,000 ppm รวมทั้งผลลำไยจากสถานประกอบการ ถ้านำมาพิจารณาหรือมองในแง่ของการเกิดสีน้ำตาลบริเวณผิวเปลือกของผลลำไยแล้วแสดงว่า สามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลบริเวณผิวเปลือกของผลลำไยได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่า กระบวนการรม SO_2 กับผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรม 2,000 ppm สามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลบริเวณผิวเปลือกได้ใกล้เคียงกับกระบวนการรม SO_2 ตามที่จึงชิง (2535) หรือสถาบันอาหาร (2541) แนะนำไว้ หรือตามที่สถานประกอบการปฏิบัติอยู่

ตารางที่ 30 การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงกึ่งการซ้ำหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาผงบ่มะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ค่า L^*				
	หลังจากรรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	51.67 ^c	50.73 ^c	49.96 ^c	46.69 ^c	N/A
Forced-air 2,000 ppm	59.06 ^a	57.11 ^a	57.00 ^a	56.17 ^a	55.45 ^a
Circulating-air 12,000 ppm	56.08 ^b	55.40 ^b	54.79 ^b	53.46 ^b	52.74 ^b
สถานประกอบการ	57.19 ^b	55.91 ^b	55.29 ^b	54.66 ^{ab}	54.65 ^a
F-test	*	*	*	*	*
CV(%)	1.7	2.0	1.8	2.0	2.2

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์
N/A คือ ผลลำไยมีการเกิดสีน้ำตาลและการเกิดโรคที่เปลือกผลจนไม่เป็นที่ยอมรับ

ตารางที่ 31 การเปลี่ยนแปลงค่า h° ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงถึงการค้าหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาพริกแกงมะดันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ค่า h°				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	77.03 ^c	73.09 ^b	70.01 ^b	67.72 ^b	N/A
Forced-air 2,000 ppm	79.81 ^a	77.98 ^a	76.92 ^a	76.79 ^a	75.42 ^a
Circulating-air 12,000 ppm	78.76 ^b	78.27 ^a	77.41 ^a	75.50 ^a	74.48 ^b
สถานประกอบการ	78.53 ^b	77.81 ^a	76.83 ^a	76.48 ^a	75.30 ^a
F-test	**	**	**	**	*
CV(%)	1.73	1.75	1.39	1.25	0.57

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์
N/A คือ ผลลำไยมีการเกิดสีน้ำตาลและการเกิดโรคที่เปลือกผลจนไม่เป็นที่ยอมรับ

ตารางที่ 32 การเปลี่ยนแปลงค่า c^* ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงถึงการค้าหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาพริกแกงมะดันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ค่า c^*				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	32.63 ^b	30.72 ^b	29.05 ^c	26.61 ^c	N/A
Forced-air 2,000 ppm	35.70 ^a	35.50 ^{ab}	34.99 ^a	34.93 ^a	34.55
Circulating-air 12,000 ppm	35.15 ^a	34.76 ^b	34.16 ^b	34.13 ^b	34.03
สถานประกอบการ	35.23 ^a	36.19 ^a	35.00 ^a	34.55 ^{ab}	34.78
F-test	**	**	**	**	ns
CV(%)	2.76	3.08	2.23	2.86	1.34

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ง. ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา (ตารางที่ 33) แต่ในแง่ความแตกต่างทางสถิติแล้วไม่สามารถบอกสาเหตุของความแตกต่างได้แน่ชัด เช่นเดียวกับการทดลองในเชิงงานนาร่อง ทั้งนี้เนื่องจากดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองที่นำมารม SO_2 นั้นไม่ได้นำมาจากแหล่งปลูกเดียวกัน อีกทั้งไม่ได้มีการตรวจสอบคุณภาพของผลลำไยในแต่ละสิ่งทดลองก่อนที่จะทำการรม SO_2 เช่นเดียวกับผลลำไยจากสถานประกอบการซึ่งไม่สามารถทราบแหล่งที่มาของผลลำไย แต่เท่าที่ได้ทำการทดลองชิมทั้งจากคณะผู้วิจัยและผู้ประกอบการแล้วยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ โดยเฉพาะผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm

ตารางที่ 33 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (องศาบริกซ์) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองเชิงถึงการค้าหลังรมด้วย SO_2 จากการเผาพริกกำมะถันทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	(องศาบริกซ์)				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	21.00 ^a	20.45 ^a	19.50 ^a	18.95 ^a	N/A
Forced-air 2,000 ppm	17.21 ^{bc}	17.16 ^{bc}	17.03 ^b	17.02 ^b	16.72 ^a
Circulating-air 12,000 ppm	16.47 ^c	16.24 ^c	16.20 ^b	15.76 ^b	15.63 ^b
สถานประกอบการ	17.81 ^b	17.72 ^b	17.26 ^b	17.08 ^b	16.86 ^a
F-test	*	*	*	*	*
CV(%)	4.2	3.3	5.5	5.9	1.8

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ

Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

N/A คือ ผลลำไยมีการเกิดสีน้ำตาลและการเกิดโรคที่เปลือกผลจนไม่เป็นที่ยอมรับ

2.2.4 สรุปผลการทดลองกิจกรรมที่ 2.2

2.2.4.1 กระบวนการรวม SO_2 จากการเผาผลาญไขมันกับผลล้าไฮสคเริงกึ่งการค้ำด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm ใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 162 นาที ขณะที่การใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 12,000 ppm ใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 115 นาที

2.2.4.2 การรวม SO_2 จากการเผาผลาญไขมันด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm สามารถป้องกันการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลได้ใกล้เคียงกับกระบวนการรวม SO_2 ตามที่มีการปฏิบัติในเชิงการค้าทั่วไปได้ โดยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนของเปลือกผลหลังจาการรวมทันที 1,520 ppm ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่สถาบันอาหารกำหนดไว้ และไม่พบการตกค้างในส่วนเนื้อของผล

กิจกรรมที่ 3 การรม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรง (directly SO_2 gas) กับผลลำไย
สดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced – air ในเชิงงานนาร่องและ
กิ่งการค้า

3.1 กิจกรรมและระเบียบวิจัยที่ปรับปรุงใหม่

ก. การเปลี่ยนแปลงกิจกรรมการวิจัย โดยได้มีการลดจำนวนตะกร้าผลลำไยที่ใช้ในการทดลองทั้งใน
เชิงงานนาร่องและกิ่งการค้าจากเดิม 32 ตะกร้า และ 126 ตะกร้า มาเป็น 16 ตะกร้า และ 56 ตะกร้า ตามลำดับ
ทั้งนี้เนื่องจากห้องรม SO_2 ของสถานประกอบการซึ่งใช้ในการทดลองกิจกรรมที่ 1 และ 2 นั้น เมื่อนำมา
คำนวณหาปริมาณแก๊ส SO_2 แล้วจำเป็นต้องใช้ปริมาณแก๊ส SO_2 ที่สูงถึง 175 ลิตร และ 470 ลิตร สำหรับการ
ทดลองในเชิงงานนาร่องและกิ่งการค้าตามลำดับ ประกอบกับชุดควบคุมอัตราการไหล (flow meter) ของ
แก๊ส SO_2 ที่มีอยู่นั้น มีอัตราการไหลสูงสุดเพียง 1.676 ลิตรต่อนาที ทำให้ต้องใช้เวลาในการปล่อยแก๊สนาน
ถึง 104 นาที (ประมาณ 2 ชั่วโมง) สำหรับงานนาร่อง และ 280 นาที (ประมาณ 4.5 ชั่วโมง) สำหรับงานกิ่ง
การค้า ซึ่งถือว่าเป็นเวลานานมากและเกรงว่าอาจจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลลำไยได้ ดังนั้นคณะ
ผู้วิจัยจึงได้แก้ปัญหาโดยเปลี่ยนมาใช้ตู้ที่มีขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร (ภาพที่ 24) ทำให้ต้องมีการลดจำนวน
ตะกร้าผลลำไยที่จะใช้ในการทดลองตามไปด้วย



ภาพที่ 24 ตู้รม SO_2 ผลลำไยสดขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร

3.2 วิธีการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) มี 3 สิ่งทดลอง ได้แก่

สิ่งทดลองที่ 1 ผลลำไยชุดควบคุม (control)

สิ่งทดลองที่ 2 ผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm เชิงงานนาร่อง

สิ่งทดลองที่ 3 ผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้า

โดยสิ่งทดลองที่ 2 ใช้ผลลำไยสดพันธุ์อีดอซึ่งเป็นผลลำไยนอกฤดูและเก็บเกี่ยวจากฟาร์มทดลองของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ส่วนสิ่งทดลองที่ 3 เป็นผลลำไยสดในฤดูและเก็บเกี่ยวจากสวนในตำบลอุโมงค์ จังหวัดลำพูน ซึ่งจัดเรียงในตะกร้าเรียบร้อยแล้ว ตะกร้าละ 11 กิโลกรัม มายังอาคารคัดบรรจุผลผลิตเกษตรภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จากนั้นจึงดำเนินการทดลองตามขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ

3.2.1 ทำการจัดวางตะกร้าบรรจุผลลงบนแท่นรอง (pallet) ภายในตูรม SO_2 โดยจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยคล้ายกับการทดลองในเชิงงานนาร่องของกิจกรรมที่ 1 แต่มีจำนวนชั้นของตะกร้าในแต่ละกลุ่ม 2 ชั้นสำหรับผลลำไยสิ่งทดลองที่ 2 รวมเป็นผลลำไยทั้งหมด 16 ตะกร้า (ภาพที่ 25) ส่วนสิ่งทดลองที่ 3 มีจำนวนชั้นของตะกร้าในแต่ละกลุ่ม 7 ชั้น รวมเป็นผลลำไยทั้งหมด 56 ตะกร้า (ภาพที่ 26)



ภาพที่ 25 การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยในเชิงงานนาร่องซึ่งใช้ผลลำไยจำนวน 16 ตะกร้า



ภาพที่ 26 การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลล้าโยในเชิงกึ่งการค้ำซึ่งใช้ผลล้าโยจำนวน 56 ตะกร้า

3.2.2 ทำการปล่อยแก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงผ่านชุดควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส SO_2 ที่มีอัตราการไหล 1.676 ลิตรต่อวินาที เข้าไปในตู้อรม (ภาพที่ 27) และให้มีระดับเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมเท่ากับคือ 2,000 ppm โดยสิ่งทดลองที่ 2 (เชิงงานนำร่อง) ใช้ปริมาณแก๊ส SO_2 ประมาณ 72 ลิตร และใช้เวลาในการปล่อยแก๊สทั้งหมด 42 นาที ขณะที่สิ่งทดลองที่ 3 (เชิงกึ่งการค้ำ) ใช้ปริมาณแก๊ส SO_2 ประมาณ 195 ลิตร และใช้เวลาในการปล่อยแก๊สทั้งหมด 116 นาที



ภาพที่ 27 การนำแก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงผ่านชุดควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส SO_2 เข้าสู่ตู้อรม

3.2.3 ทำการตรวจสอบปริมาณ SO_2 ภายในตูรมด้วย dosimeter tubes สำหรับวัดปริมาณแก๊ส SO_2 เพื่อให้มีระดับเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมเท่ากับ 2,000 ppm เช่นเดียวกับการทดลองในกิจกรรมที่ 2

3.2.4 นำผลล้าใบออกจากตูรม จากนั้นจึงใช้พัดลมเป่าไปยังตะกร้าบรรจุผลล้าใบเป็นเวลา 15 นาที เพื่อป้องกันการดูดแก๊สต่อเนื่อง (carry over effect) เช่นเดียวกับการทดลองในกิจกรรมที่ 2

3.2.5 ทำการตรวจสอบปริมาณ SO_2 ภายในตะกร้าบรรจุผลล้าใบด้วย dosimeter tubes เช่นเดียวกับการทดลองในกิจกรรมที่ 2

3.2.6 สุ่มเก็บตัวอย่างผลล้าใบ โดยสิ่งทดลองที่ 2 สุ่มเก็บตัวอย่างทุกๆ ตะกร้าทั้งกลุ่มซ้ายและกลุ่มขวา รวมเป็นตัวอย่างผลล้าใบทั้งหมด 16 ตัวอย่าง ส่วนสิ่งทดลองที่ 3 สุ่มเก็บตัวอย่างทุกชั้นของตะกร้ากลุ่มซ้ายและกลุ่มขวา ชั้นละ 1 ตะกร้า รวมเป็นตัวอย่างผลล้าใบทั้งหมด 14 ตัวอย่าง โดยตำแหน่งและจำนวนการเก็บตัวอย่างผลล้าใบในแต่ละตะกร้านั้นเหมือนกับการทดลองในกิจกรรมที่ 2

3.2.7 ตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างผลล้าใบในด้านต่างๆ หลังจากการรม SO_2 ทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ทุก 5 วัน เป็นเวลา 20 วัน เพื่อจำลองสภาพการขนส่งผลล้าใบทางเรือไปตลาดต่างประเทศ เช่นเดียวกับการทดลองในกิจกรรมที่ 2

3.3 ผลการทดลองและวิจารณ์

3.3.1 ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการรวม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงกับผลลำไยแต่ละกรรมวิธีตามสิ่งทดลอง รวมทั้งระดับความเข้มข้นของ SO_2 ภายในห้องรวมและภายในตะกร้าผลลำไย

กรรมวิธี	กระบวนการ	เวลาที่ใช้ (นาท)	ความเข้มข้นของ SO_2 (ppm)
1. forced-air 2,000 ppm เจริ่งงานนำร่อง	1.1 การปล่อยแก๊ส SO_2	42	3,500-4,000 ¹
	1.2 การรวม	25	2,000 ²
	1.3 การกำจัด SO_2	20	10 ³
	1.4 การทำ aeration	15	10 ⁴
	รวม	102	
2. forced-air 2,000 ppm เจริ่งการค้า	2.1 การปล่อยแก๊ส SO_2	116	4,500-5,000 ¹
	2.2 การรวม	25	2,000 ²
	2.3 การกำจัด SO_2	20	10 ³
	2.4 การทำ aeration	15	10 ⁴
	รวม	176	

หมายเหตุ ¹ หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในห้องรวมหลังจากสิ้นสุดการปล่อยแก๊ส SO_2

² หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในห้องรวมหลังจากสิ้นสุดกระบวนการรวม

³ หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในห้องรวมหลังจากการกำจัด SO_2

⁴ หมายถึง ระดับความเข้มข้นของ SO_2 เฉลี่ยภายในตะกร้าผลลำไยหลังจากการทำ aeration

จากการทดลองเห็นได้ว่า กระบวนการรวม SO_2 จากถังอัดความดันกับผลลำไยสดสำหรับสิ่งทดลองในเชิงงานนำร่องใช้เวลาทั้งสิ้น 102 นาท หรือประมาณ 1 ชั่วโมง 40 นาท ส่วนสิ่งทดลองในเชิงการค้าใช้เวลาทั้งสิ้น 176 นาท หรือประมาณ 3 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนแล้วสามารถกล่าวได้ว่า เวลาที่ใช้ในกระบวนการรวม SO_2 จากถังอัดความดันกับผลลำไยสดจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการปล่อยแก๊ส ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของชุดควบคุมการไหลของแก๊สเป็นสำคัญ โดยชุดควบคุมการไหลของแก๊ส SO_2 สำหรับการทดลองครั้งนี้มีอัตราการไหลสูงสุดเพียง 1.676 ลิตรต่อนาท ถือว่าค่อนข้างต่ำทำให้ต้องใช้เวลานานมากเมื่อเทียบกับกระบวนการรวม SO_2 จากการเผาพวงกำมะถัน อย่างไรก็ตามข้อจำกัดดังกล่าวนี้อาจแก้ไขได้ด้วยการเปลี่ยนมาใช้ชุดควบคุมการไหลของแก๊สที่มีอัตราการไหลสูงขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่ต้องเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

3.3.2 คุณภาพของผลลำไยหลังจากรม SO_2 ทันที และหลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

ก. ปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกและเนื้อผลลำไย

จากการสุ่มตัวอย่างผลลำไยไปวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกและเนื้อผลด้วยวิธี Modified Monier-William Method หลังจากรม SO_2 ทันที พบว่า ผลลำไยทั้งสองสิ่งทดลองมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกใกล้เคียงกันประมาณ 1,390-1,470 ppm (ตารางที่ 34) โดยไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเนื้อผล ซึ่งปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลดังกล่าวยังต่ำกว่าเกณฑ์ตามที่สถาบันอาหารกำหนดไว้ และมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ด้วยการเผาพวงก้ามะดันในกิจกรรมที่ 2 (ตารางที่ 21) และหลังจากการเก็บรักษา ผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกลดลงเช่นกัน โดยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างลดลงเหลือ 115-160 ppm หลังจากการเก็บรักษา 20 วัน (ตารางที่ 34)

ตารางที่ 34 ปริมาณ SO_2 ตกค้าง (ppm) ในเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ปริมาณ SO_2 ตกค้าง				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Forced-air 2,000 ppm เชิงนำร่อง	1,390	440	410	215	160
Forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้า	1,470	890	700	505	115

หมายเหตุ ไม่ได้วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติ

ข. การเกิดโรค

ผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 ทั้งสองสิ่งทดลอง ไม่มีการเกิดโรคปรากฏให้เห็นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 15 วัน แต่เริ่มมีการเกิดโรคปรากฏให้เห็นเพียงเล็กน้อยประมาณ 0.19-0.50 คะแนน หลังจากเก็บรักษา 20 วัน ขณะที่ผลลำไยชุดควบคุมเริ่มมีการเกิดโรคปรากฏให้เห็นหลังจากการเก็บรักษา 10 วัน โดยมีคะแนนการเกิดโรค 2 คะแนน และรุนแรงมากขึ้นเป็น 4 คะแนน หลังจากการเก็บรักษา 15-20 วัน (ตารางที่ 35)

ตารางที่ 35 การเกิดโรค (คะแนน) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	การเกิดโรค				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	0	0	2.00	4.00	4.00
Forced-air 2,000 ppm เชิงนำร่อง	0	0	0	0	0.19
Forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้า	0	0	0	0	0.50

หมายเหตุ - ไม่ได้วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติ

ค. การเปลี่ยนแปลงค่า L^* ค่า h° และค่า c^* ของสีเปลือกผลลำไย

ผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 ทุกสิ่งทดลองมีการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกจากสีน้ำตาลเป็นสีน้ำตาลปนเหลือง จึงทำให้มีค่า L^* เพิ่มขึ้นสูงกว่าผลลำไยชุดควบคุม โดยหลังจากรม SO_2 ทันที ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้า มีค่า L^* เท่ากับ 55.97 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงงานนำร่อง และผลลำไยชุดควบคุมที่มีค่า L^* เท่ากับ 54.37 และ 50.30 ตามลำดับ (ตารางที่ 36) และหลังจากเก็บรักษา ค่า L^* ของผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มลดลง แต่ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงงานกึ่งการค้ามีค่า L^* ลดลงน้อยกว่าผลลำไยสิ่งทดลองอื่นๆ ซึ่งหลังจากการเก็บรักษา 20 วัน ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้ามีค่า L^* เท่ากับ 53.84 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงงานนำร่อง และผลลำไยชุดควบคุมที่มีค่า L^* เท่ากับ 52.79 และ 50.10 ตามลำดับ

สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่า h° ซึ่งผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 มีค่า h° ของสีเปลือกสูงกว่าผลลำไยชุดควบคุม โดยผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้ามีค่า h° หลังจากรม SO_2 ทันทีเท่ากับ 77.97 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงงานนำร่อง และผลลำไยชุดควบคุมที่มีค่า h° เท่ากับ 75.10 และ 72.69 ตามลำดับ (ตารางที่ 37) และหลังจากเก็บรักษา ค่า h° ของผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มลดลง แต่ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงงานกึ่งการค้ามีค่า h° ลดลงน้อยกว่าผลลำไยสิ่งทดลองอื่นๆ ซึ่งหลังจากการเก็บรักษา 20 วัน ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้ามีค่า h° เท่ากับ 75.13 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงงานนำร่อง และผลลำไยชุดควบคุมที่มีค่า h° เท่ากับ 73.26 และ 67.50 ตามลำดับ

เช่นเดียวกับกับค่า c^* ซึ่งผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้ามีค่า c^* ของสีเปลือกหลังจากรม SO_2 ทันทีเท่ากับ 37.01 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm

เชิงงานนำร่อง และผลลำไยชุดควบคุมที่มีค่า c^* 35.73 และ 31.39 ตามลำดับ (ตารางที่ 38) และหลังจากเก็บรักษาค่า c^* ของผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มลดลง แต่ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงงานถึงการค้ำมีค่า c^* ลดลงน้อยกว่าผลลำไยสิ่งทดลองอื่นๆ ซึ่งหลังจากการเก็บรักษา 20 วัน ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงงานถึงการค้ำมีค่า c^* เท่ากับ 36.41 สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงงานนำร่อง และผลลำไยชุดควบคุมที่มีค่า c^* เท่ากับ 35.61 และ 27.22 ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงค่า L^* ค่า h^o และค่า c^* ของสีเปลือกผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 ทั้งสองสิ่งทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลลำไยชุดควบคุมแล้วเป็นไปในทำนองเดียวกับผลการทดลองในกิจกรรมที่ 2 เนื่องจากคุณสมบัติของ SO_2 ซึ่งสามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลบริเวณผิวเปลือกผลลำไยได้ แต่ในส่วนของผลลำไยในสิ่งทดลองถึงการค้ำมีทั้งค่า L^* ค่า h^o และค่า c^* สูงกว่าผลลำไยในสิ่งทดลองเชิงงานนำร่องถึงแม้จะใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรมเท่ากันคือ 2,000 ppm สาเหตุอาจเป็นไปได้ว่าผลลำไยในสิ่งทดลองเชิงงานนำร่องนั้นเป็นผลลำไยที่ติดผลนอกฤดูซึ่งเก็บเกี่ยวในเดือนมีนาคม แต่สำหรับผลลำไยในสิ่งทดลองเชิงงานนำร่องแล้วเป็นผลลำไยที่ติดผลในฤดูซึ่งเก็บเกี่ยวในเดือนกรกฎาคม และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าแล้วคณะผู้วิจัยฯ มีความเห็นตรงกันว่า ผลลำไยที่ติดผลในฤดูมีสีผิวที่สวบางกว่าผลลำไยที่ติดผลนอกฤดู (ภาพที่ 28) เช่นเดียวกับผู้ประกอบการรม SO_2 และนักวิชาการบางท่าน (ติดต่อส่วนตัว) ซึ่งได้ให้ความเห็นในทำนองเดียวกันว่า ผลลำไยที่ติดผลในฤดูมีสีผิวที่สวบางกว่าผลลำไยที่ติดผลนอกฤดู หรือแม้ว่าจะเป็นผลลำไยในฤดูเช่นเดียวกัน แต่ถ้ามมีการเจริญเติบโตในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ทำให้ผลลำไยมีสีผิวที่แตกต่างกันได้



ภาพที่ 28 ผลลำไยที่ติดผลนอกฤดูซึ่งเก็บเกี่ยวในเดือนมีนาคม (ซ้าย) และผลลำไยที่ติดผลในฤดูซึ่งเก็บเกี่ยวในเดือนกรกฎาคม (ขวา)

ตารางที่ 36 การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ค่า L^*				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	50.30 ^c	47.31 ^c	46.71 ^c	45.79 ^c	50.10 ^c
Forced-air 2,000 ppm เชิงนำร่อง	54.37 ^b	52.82 ^b	52.60 ^b	51.50 ^b	52.79 ^b
Forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้า	55.97 ^a	54.68 ^a	54.27 ^a	54.02 ^a	53.84 ^a
F-test	**	**	**	**	**
CV(%)	1.90	1.61	1.56	1.30	1.25

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 37 การเปลี่ยนแปลงค่า h° ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ค่า h°				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	72.69 ^c	68.67 ^c	68.38 ^c	67.07 ^c	67.50 ^c
Forced-air 2,000 ppm เชิงนำร่อง	75.10 ^b	74.21 ^b	73.75 ^b	73.30 ^b	73.26 ^b
Forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้า	77.97 ^a	76.80 ^a	76.49 ^a	75.89 ^a	75.13 ^a
F-test	**	**	**	**	**
CV(%)	1.07	1.24	0.95	1.20	0.45

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 38 การเปลี่ยนแปลงค่า c^* ของเปลือกผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดัน โดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	ค่า c^*				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	31.39 ^c	29.53 ^c	28.76 ^c	28.12 ^c	27.22 ^c
Forced-air 2,000 ppm เชิงนำร่อง	35.73 ^b	35.47 ^b	35.03 ^b	35.01 ^b	35.61 ^b
Forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้า	37.01 ^a	36.90 ^a	36.55 ^a	36.45 ^a	36.41 ^a
F-test	**	**	**	**	**
CV(%)	2.17	2.55	2.78	2.66	1.69

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ง. ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของผลลำไยที่ผ่านการรมด้วย SO_2 ทุกสิ่งทดลอง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลลำไยชุดควบคุมพบว่า ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้า มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ใกล้เคียงกับผลลำไยชุดควบคุมคือ 18.66-19.23 องศาบริกซ์ สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงงานนำร่อง ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 17.32 องศาบริกซ์ (ตารางที่ 39) และหลังจากเก็บรักษาผลลำไยทุกสิ่งทดลองมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยหลังจากการเก็บรักษา 20 วัน ผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้า มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ใกล้เคียงกับผลลำไยชุดควบคุมคือ 18.56-18.98 องศาบริกซ์ สูงกว่าและมีความแตกต่างทางสถิติกับผลลำไยกลุ่ม forced-air 2,000 ppm เชิงงานนำร่อง ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 16.43 องศาบริกซ์

ตารางที่ 39 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (องศาบริกซ์) ของผลลำไยแต่ละสิ่งทดลองหลังรมด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงทันที และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์

สิ่งทดลอง	องศาบริกซ์				
	หลังจากรม SO_2 ทันที	เวลาเก็บรักษา (วัน)			
		5	10	15	20
Control	18.66 ^a	18.18 ^b	17.71 ^b	18.02 ^b	18.56 ^a
Forced-air 2,000 ppm เชิงนำร่อง	17.32 ^b	17.60 ^b	16.51 ^c	16.86 ^c	16.43 ^b
Forced-air 2,000 ppm เชิงกึ่งการค้า	19.23 ^a	19.42 ^a	19.94 ^a	19.43 ^a	18.98 ^a
F-test	*	**	**	**	**
CV(%)	4.04	3.44	3.22	2.98	3.34

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยแนวตั้งที่มีตัวอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแบบ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3.4 สรุปผลการทดลองกิจกรรมที่ 3

3.4.1 ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการรม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงกับผลลำไยสดในเชิงงานนำร่องด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm ใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 102 นาที และสำหรับงานเชิงกึ่งการค้าใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 176 นาที

3.4.2 การรม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงกับผลลำไยสดทั้งในเชิงงานนำร่องและเชิงกึ่งการค้าด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรม 2,000 ppm สามารถป้องกันการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลลำไยได้เช่นเดียวกับการใช้ SO_2 จากการเผาฟองกำมะถัน โดยมีปริมาณ SO_2 ตกค้างภายในส่วนของเปลือกผลหลังจากรมทันทีประมาณ 1,390-1,470 ppm ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่สถาบันอาหารกำหนดไว้ และไม่พบปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วน of เนื้อผล

กิจกรรมที่ 4 การศึกษาค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการรรมผลล่ำไยด้วย SO₂ จากการเผาผง กำมะถันและการใช้แก๊ส SO₂ จากถังอัดความดันโดยตรง

การศึกษาค่าใช้จ่ายในการรรม SO₂ กับผลล่ำไยสำหรับกิจกรรมที่ 4 เป็นการพิจารณาเฉพาะต้นทุนของสารเคมีหรือวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาผงกำมะถัน ได้แก่ ผงกำมะถัน แก๊สหุงต้ม แก๊สออกซิเจน และที่ใช้แก๊ส SO₂ จากถังอัดความดันโดยตรง ได้แก่ ชุดอุปกรณ์ควบคุมแรงดันแก๊ส (pressure regulator) ชุดควบคุมการไหลของแก๊ส SO₂ (flow meter) และค่าเช่าถังแก๊ส แต่ไม่รวมถึงค่าใช้จ่ายดำเนินงาน เช่น ค่าแรง และค่าต้นทุนการกำจัดแก๊ส SO₂ ที่เหลือจากการรรม เป็นต้น

4.1 การศึกษาค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการรรมผลล่ำไยด้วย SO₂ จากการเผาผงกำมะถัน

4.1.1 รายละเอียดค่าใช้จ่ายในแต่ละส่วน

ก. ผงกำมะถัน (กระสอบละ 25 กิโลกรัม) ราคา 250 บาท (1 กิโลกรัมราคา 10 บาท)

ปริมาณการใช้ในเชิงการค้าของผู้ประกอบการ

จำนวน 1 กระสอบต่อ 1 วัน หรือประมาณ 3.5 กิโลกรัมต่อครั้ง

ข. แก๊สหุงต้ม 1 ถัง (ขนาด 15 กิโลกรัม) ราคา 256 บาท

ปริมาณการใช้ในเชิงการค้าของผู้ประกอบการ

จำนวน 1 ถังต่อ 4 วัน

ค. แก๊สออกซิเจน (O₂) (ขนาด 7 ลูกบาศก์) ราคา 140 บาท

ปริมาณการใช้ในเชิงการค้าของผู้ประกอบการ

จำนวน 1 ถังต่อ 1 วัน (หรือต่อผลล่ำไยประมาณ 6,000 ตะกร้า x 11 กิโลกรัม เท่ากับ 66,000 กิโลกรัม) ซึ่งเมื่อคิดเทียบเป็นราคาต่อกิโลกรัมผงกำมะถันแล้วมีค่าเท่ากับ 5.6 บาทต่อกิโลกรัมผงกำมะถัน (140 บาท / 25 กิโลกรัมผงกำมะถัน)

- หมายเหตุ 1. ข้อมูลในข้อ ก., ข. และ ค. เป็นข้อมูลที่ใช้โดยทั่วไปของสถานประกอบการ
2. สถานประกอบการมีจำนวนห้องรรม SO₂ ทั้งหมด 3 ห้อง โดยแต่ละห้องรรมสามารถรรม SO₂ ได้ห้องละ 3 ครั้งต่อวัน

4.1.2 ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยสำหรับการรวม SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถันในการวิจัยเชิงงานนำร่องซึ่งใช้ผลล่ำไยจำนวน 32 ตะกร้า และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm

ปริมาณ ผงกำมะถันที่ใช้ในการวิจัย

250 กรัมต่อผลล่ำไย 352 กิโลกรัม (11 กิโลกรัม x 32 ตะกร้า) ต่อขนาดห้อง 38 ลูกบาศก์เมตร

ค่าใช้จ่ายในส่วนต่างๆ

ก. ผงกำมะถัน (250 กิโลกรัม x 10 บาท) เป็นเงิน 2.50 บาท

ข. แก๊ส O_2 (250 กิโลกรัม x 5.60 บาท) เป็นเงิน 1.40 บาท

ค่าใช้จ่ายโดยประมาณต่อหน่วยผลล่ำไย

0.011 บาทต่อกิโลกรัมผลล่ำไย $[(2.50+1.40)/352]$

หรือ 11.07 บาท/ตันผลล่ำไย $[(2.50+1.40)/352 \times 1,000]$

4.1.3 ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยสำหรับการรวม SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถันในการวิจัยเชิงงานถึงการค้าซึ่งใช้ผลล่ำไยจำนวน 126 ตะกร้า และมีระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังจากสิ้นสุดการรวม 2,000 ppm

ปริมาณ ผงกำมะถันที่ใช้ในการวิจัย

660 กรัมต่อผลล่ำไย 1,386 กิโลกรัม (11 กิโลกรัม x 126 ตะกร้า) ต่อขนาดห้อง 38 ลูกบาศก์เมตร

ค่าใช้จ่ายในส่วนต่างๆ

ก. ผงกำมะถัน (0.66 กิโลกรัม x 10 บาท) เป็นเงิน 6.6 บาท

ข. แก๊ส O_2 (0.66 กิโลกรัม x 5.60 บาท) เป็นเงิน 3.7 บาท

ค่าใช้จ่ายโดยประมาณต่อหน่วยผลล่ำไย

0.00743 บาทต่อกิโลกรัมผลล่ำไย $[(6.6+3.7)/1,386]$

หรือ 7.43 บาท/ตันผลล่ำไย $[(6.6+3.7)/1,386 \times 1,000]$

4.1.4 ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยสำหรับการรวม SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถันในเชิงการค้าของผู้ประกอบการ รายละเอียดค่าใช้จ่ายในแต่ละส่วน

ก. ผงกำมะถัน (กระสอบละ 25 กิโลกรัม) ราคา 250 บาท (1 กิโลกรัมราคา 10 บาท)

ปริมาณการใช้ในเชิงการค้าของผู้ประกอบการ

จำนวน 1 กระสอบต่อ 1 วัน หรือประมาณ 3.5 กิโลกรัมต่อครั้ง

ข. แก๊สหุงต้ม 1 ถัง (ขนาด 15 กิโลกรัม) ราคา 256 บาท

ปริมาณการใช้ในเชิงการค้าของผู้ประกอบการ

จำนวน 1 ถังต่อ 4 วัน (256 บาท / 4 วัน) เป็นเงิน 64 บาทต่อวัน

ค. แก๊สออกซิเจน (O_2) (ขนาด 7 ลูกบาศก์) ราคา 140 บาทต่อวัน

ปริมาณการใช้ในเชิงการค้าของผู้ประกอบการ

จำนวน 1 ถังต่อ 1 วัน (หรือต่อผลลำไยประมาณ 6,000 ตะกร้า x 11 กิโลกรัม เท่ากับ 66,000 กิโลกรัม) ซึ่งเมื่อคิดเทียบเป็นราคาต่อกิโลกรัมผลลำไยแล้วมีค่าเท่ากับ 5.6 บาทต่อกิโลกรัมผลลำไย (140 บาท / 25 กิโลกรัมผลลำไย)

ค่าใช้จ่ายโดยประมาณต่อหน่วยผลลำไย

0.006879 บาทต่อกิโลกรัมผลลำไย $[(250+64+140)/66,000]$

หรือ 6.879 บาท/ตันผลลำไย $[(250+64+140)/66,000 \times 1,000]$

4.2 การศึกษาค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการรวมผลลำไยด้วย SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรง

4.2.1 รายละเอียดค่าใช้จ่ายในแต่ละส่วน

ก. ชุดอุปกรณ์ควบคุมแรงดันแก๊ส (pressure regulator) ราคา 25,000 บาท

ข. ชุดควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส SO_2 (flow meter) ราคา 26,500 บาท

ค. แก๊ส SO_2 (99.9%) ขนาด 65 กิโลกรัม จำนวน 1 ถัง ราคา 29,250 บาท

โดย แก๊ส SO_2 2.575 กรัม ที่อุณหภูมิ 30 °ซ มีปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร

แก๊ส SO_2 65 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 30 °ซ มีปริมาตรเท่ากับ 25,242.72 ลิตร

ดังนั้น แก๊ส SO_2 จำนวน 1 ลิตร ราคา 1.159 บาท

ง. ค่าเช่าถังแก๊ส ราคา 350 บาทต่อเดือน

4.2.2 สมมติฐานค่าเสื่อมราคา

ก. ค่าเสื่อมราคาของชุดอุปกรณ์ควบคุมแรงดันแก๊สและชุดควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส SO_2 คิดเป็นเส้นตรง เป็นเวลา 4 ปี

ข. มูลค่าซาก คิดเป็น 0 บาท

ค. ความถี่ในการใช้งาน เท่ากับ 8 ครั้งต่อ 1 วัน (ครั้งละ 1.50 ชั่วโมง)

ดังนั้น

ค่าเสื่อมราคาชุดอุปกรณ์ควบคุมแรงดันแก๊ส เท่ากับ 96.15 บาทต่อวัน (25,000 บาท/365 วัน/4 ปี)

ค่าเสื่อมราคาชุดควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส SO_2 เท่ากับ 18.15 บาทต่อวัน (26,500 บาท/365 วัน/4 ปี)

ค่าเช่าถังแก๊ส เท่ากับ 11.67 บาทต่อวัน (350 บาท/30 วัน)

รวมต้นทุนคงที่ เท่ากับ 125.97 บาทต่อวัน (18.15+96.15+11.67)

ต้นทุนคงที่ต่อครั้งการรวม เท่ากับ 15.74 บาทต่อครั้ง (125.97 บาท/8 ครั้ง)

4.2.3 ปริมาณแก๊ส SO₂ ที่ใช้ในการวิจัย

ความเข้มข้น 2,000 ppm/ห้อง 10 ลบ.เมตร/ผลลำไย 16 ตะกร้า ใช้แก๊ส SO₂ 72 ลิตร

ความเข้มข้น 2,000 ppm/ห้อง 10 ลบ.เมตร/ผลลำไย 56 ตะกร้า ใช้แก๊ส SO₂ 195 ลิตร

4.2.4 ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยสำหรับการรม SO₂ จากถังอัดความดันโดยตรงในการวิจัยเชิงงานนำร่อง ซึ่งใช้ผลลำไยจำนวน 16 ตะกร้า และมีระดับความเข้มข้นของ SO₂ หลังจากสิ้นสุดการรม 2,000 ppm

ปริมาณแก๊ส SO₂ ที่ใช้ในการวิจัย

72 ลิตรต่อผลลำไย 176 กิโลกรัม (11 กิโลกรัม x 16 ตะกร้า) ต่อห้อง 10 ลูกบาศก์เมตร

ค่าใช้จ่ายในส่วนต่างๆ

แก๊ส SO₂ (72 ลิตร x 1.159 บาท) เป็นเงิน 83.45 บาท

ค่าใช้จ่ายโดยประมาณต่อหน่วยผลลำไย

0.564 บาทต่อกิโลกรัมผลลำไย [(83.45+15.74)/176]

หรือ 563.58 บาท/ตันผลลำไย [(83.45+15.74)/176 x 1,000]

4.2.5 ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยสำหรับการรม SO₂ จากถังอัดความดันโดยตรงในการวิจัยเชิงถึงการค้าซึ่ง ใช้ผลลำไยจำนวน 56 ตะกร้า และมีระดับความเข้มข้นของ SO₂ หลังจากสิ้นสุดการรม 2,000 ppm

ปริมาณแก๊ส SO₂ ที่ใช้ในการวิจัย

195 ลิตรต่อผลลำไย 616 กิโลกรัม (11 กิโลกรัม x 56 ตะกร้า) ต่อห้อง 10 ลูกบาศก์เมตร

ค่าใช้จ่ายในส่วนต่างๆ

แก๊ส SO₂ (195 ลิตร x 1.159 บาท) เป็นเงิน 226.00 บาท

ค่าใช้จ่ายโดยประมาณต่อหน่วยผลลำไย

0.392 บาทต่อกิโลกรัมผลลำไย [(226+15.74)/616]

หรือ 392.43 บาท/ตันผลลำไย [(226+15.74)/616 x 1,000]

ตารางที่ 40 สรุปค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการรวมผลกำไสด้วย SO_2 จากการเผาไหม้ถ่านหินและจากถังอัดความดันโดยตรงที่ระดับความเข้มข้นหลังสิ้นสุดการรวม 12,000 ppm สำหรับระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air และ 2,000 ppm สำหรับระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air

ระบบหมุนเวียนอากาศ	แหล่งของ SO_2	ขนาดการทดลอง	จำนวนตะกรั้ว	จำนวนผลกำไ (กก)	ขนาดห้อง (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่าย (บาท/ตัน)
Circulating-air	ผงถ่านหิน	ผู้ประกอบการ	633	6,963	38	6.87
Forced-air	ผงถ่านหิน	เชิงนำร่อง	32	352	38	5.08
Forced-air	ผงถ่านหิน	กิจการค้า	126	1,386	38	7.43
Forced-air	directly gas	เชิงนำร่อง	16	176	10	563.58
Forced-air	directly gas	กิจการค้า	56	616	10	392.43

4.3 สรุปผลการทดลองกิจกรรมที่ 4

4.3.1 การรวม SO_2 จากการเผาไหม้ถ่านหินด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air เปรียบเทียบกับการรวม SO_2 ของสถานประกอบการซึ่งใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating air พบว่า มีค่าใช้จ่ายไม่แตกต่างกัน ซึ่งเฉลี่ยแล้วประมาณ 5.00-7.50 บาท/ตันกำไ หรือ 0.50-0.75 สตางค์ต่อกิโลกรัมผลกำไ

4.3.2 การรวม SO_2 โดยใช้แก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรง (directly SO_2 gas) ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยประมาณ 400-560 บาทต่อตันกำไ หรือ 40-56 สตางค์ต่อกิโลกรัมผลกำไ

ปัญหาและข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

1. ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air สำหรับการศึกษาครั้งนี้เป็นการใช้พัดลมดูดอากาศที่มีใบพัดแบบตรง (propeller fan) ซึ่งใช้กันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการลดอุณหภูมิผักและผลไม้ (cooling) ตามปกติแล้วคุณสมบัติของพัดลมดังกล่าวสามารถทำงานได้ดีเมื่อสภาวะใช้งานมีค่าความดันสถิตย์ (static pressure) ไม่สูงมาก (ประมาณ 1.5 นิ้วน้ำ) แต่ถ้าต้องการใช้งานในสภาวะที่มีค่าความดันสถิตย์สูงๆ สามารถเปลี่ยนมาใช้พัดลมชนิดแกนท่อ (tube axial fan) หรือพัดลมแบบหมุนเหวี่ยง (centrifugal) ที่มีค่าความดันสถิตย์สูงกว่าได้ ซึ่งหมายความว่า เมื่อมีค่าความดันสถิตย์สูงขึ้นจะทำให้ความดันตกคร่อมระหว่างบรรยากาศภายนอกกับตะกร้าบรรจุผลลำไยมีมากขึ้น จึงสามารถดึงอากาศให้ไหลผ่านตะกร้ามากขึ้นตามไปด้วย

2. ภาพจำลองการไหลของอากาศภายในตะกร้าบรรจุผลลำไย อาจยังไม่สามารถแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับทิศทางการไหลของอากาศได้มากเท่าที่ควร เนื่องจากการกำหนดค่าสัดส่วนช่องว่าง (volume void factor) แทนการสร้างแบบจำลองจริงคือ สร้างลูกลำไยจำนวนมากลงในตะกร้า ทั้งนี้เพราะการทำแบบจำลองจริงที่มีความละเอียดสูงจะต้องใช้เวลาในการสร้างและประมวลผลนานมาก อย่างไรก็ตามเมื่อได้ทำการตรวจสอบค่าความเร็วการไหลของอากาศที่กระจายภายในห้องเปรียบเทียบกับค่าความเร็วที่ได้จากการจำลองการไหลของอากาศภายในห้อง ณ ตำแหน่งต่างๆ แล้วพบว่า มีค่าผิดพลาดประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นในการวิจัยครั้งต่อไปคณะผู้วิจัยมีแนวคิดว่าจะต้องนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาแบบจำลองอื่นๆ เช่น การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent model) ซึ่งอาจจะเหมาะสมกว่าแบบจำลองที่ใช้ในปัจจุบัน รวมไปถึงการศึกษาเพื่อหาค่าความดันตกผ่านตะกร้าที่บรรจุผลลำไยจากห้องปฏิบัติการ แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณในแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำขึ้น

3. ตะกร้าบรรจุผลลำไยสำหรับการวิจัยครั้งนี้เป็นตะกร้าที่สามารถวางซ้อนกันและวางชิดกันได้โดยไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น (ตะกร้าแดง) เพื่อให้ตรงกับหลักการของระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งเป็นการบังคับอากาศที่อยู่รอบๆ ภาชนะบรรจุหรือในที่นี้คือ แก๊ส SO_2 ให้ไหลผ่านภาชนะบรรจุเข้ามาสัมผัสกับผลลำไยได้มากขึ้น แตกต่างจากตะกร้าบรรจุผลลำไยที่ใช้ในทางการค้าโดยทั่วไป (ตะกร้าขาว) ซึ่งเมื่อวางซ้อนและวางชิดกันแล้วมีช่องว่างเกิดขึ้น ทำให้อากาศที่อยู่รอบๆ ภาชนะบรรจุไหลผ่านช่องว่างนั้นมากกว่าที่จะเข้าไปสัมผัสกับผลลำไย และจากการทดสอบเบื้องต้นโดยนำตะกร้าบรรจุผลลำไยที่ใช้ในทางการค้ามาจัดเรียงแบบ 2x2x4 พร้อมทั้งให้มีระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ซึ่งเหมือนกับการทดลองในเชิงงานนำร่องของกิจกรรมที่ 1 (ภาพที่ 29) จากนั้นจึงวัดความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าเปล่าพบว่ามีความเร็วการไหลของอากาศลดลงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตะกร้าที่ใช้ในการวิจัย



ภาพที่ 29 การจัดเรียงตะกร้าบรรจุผลลำไยที่ใช้ในทางการค้าแบบ 2x2x4

นอกจากช่องว่างดังกล่าวแล้วสิ่งที่สังเกตได้อีกอย่างหนึ่งสำหรับตะกร้าบรรจุผลลำไยในเชิงการค้า คือ มีลักษณะของช่องระบายอากาศในแต่ละตะกร้าไม่เหมือนกัน (ภาพที่ 30) ซึ่งย่อมมีผลต่อความเร็วการไหลของอากาศหรือการสัมผัสแก๊ส SO_2 แตกต่างกันไปด้วย



ภาพที่ 30 ลักษณะช่องระบายอากาศแบบต่างๆ ของตะกร้าบรรจุผลลำไยเชิงการค้าในปัจจุบัน

จากสิ่งที่แตกต่างกันในส่วนองตะกร้าดังกล่าวจึงอาจจะเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งสำหรับการนำเอา ระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air มาใช้ในกระบวนการรม SO_2 กับผลลำไยสดในปัจจุบัน เว้นแต่จะมี วิธีการที่จะช่วยให้มีความเร็วการไหลของอากาศภายในตะกร้าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นโจทย์ที่คณะผู้วิจัยจะ ได้ดำเนินการศึกษาต่อไป อย่างไรก็ตามจากข้อมูลการส่งออกผลลำไยไปยังประเทศอื่นๆ นอกเหนือจาก ประเทศจีน เช่น ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ ของผู้ประกอบการส่งออกผลไม้ (สอบถามส่วนบุคคล) พบว่า มีลักษณะที่แตกต่างออกไป โดยผลลำไยที่ส่งออกไปยังประเทศออสเตรเลียหรือนิวซีแลนด์ ไม่ได้เป็นลำไย ช่อที่บรรจุลงในตะกร้า แล้วรม SO_2 ทั้งตะกร้าเหมือนกับการส่งออกไปยังประเทศจีน ส่วนใหญ่แล้วเป็น ลำไยผลเดี่ยวและบรรจุลงในกล่องกระดาษลูกฟูก ซึ่งน่าจะเหมาะสมอย่างมากสำหรับการใช้ระบบหมุน เวียนอากาศแบบ forced-air เนื่องจากการรม SO_2 ก่อนที่จะนำมาตัดแต่งและบรรจุลงในกล่องกระดาษ ลูกฟูก ทำให้ลดข้อจำกัดในส่วนองตะกร้าได้

4. คุณภาพของผลลำไยก่อนที่จะนำมารมด้วย SO_2 โดยเฉพาะในส่วนองสีผิว ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ สังเกตและพบว่า ผลลำไยที่นำมารมด้วย SO_2 มีลักษณะของสีผิวที่ไม่ค่อยเหมือนกันในแต่ละการทดลอง สาเหตุเนื่องจากผลลำไยที่นำมาใช้ในแต่ละการทดลองไม่ได้มาจากแหล่งปลูกเดียวกัน นอกจากนี้ยังไม่ สามารถทราบที่มาของผลลำไยได้ทั้งในเรื่องของสภาพแวดล้อมและการดูแล เช่น การให้น้ำหรือให้ปุ๋ยใน ระหว่างที่ผลลำไยมีการเจริญเติบโต จึงอาจทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนไปบ้างในส่วนองคุณภาพผลลำไยทั้ง หลังจากกรรม SO_2 ทันที และหลังจากการเก็บรักษา ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในกิจกรรมที่ 3 ของการศึกษาวิจัย ครั้งนี้ สอดคล้องกับข้อมูลของผู้ประกอบการรม SO_2 กับผลลำไยสด (ติดต่อส่วนตัว) ที่กล่าวว่า ผลลำไยที่มี คุณภาพของสีผิวของผลลำไยก่อนที่จะนำมารมด้วย SO_2 ไม่เหมือนกัน ย่อมมีคุณภาพหลังจากการรมแตก ต่างกันไปด้วย ดังนั้นผู้ประกอบการจึงต้องมีการใช้ปริมาณผงกำมะถันที่แตกต่างกันสำหรับการรมแต่ละครั้ง ขึ้นอยู่กับสีผิวของผลลำไยก่อนที่จะทำการรม SO_2 ทำให้ส่งผลกระทบต่อที่สำคัญตามมาก็คือ ผลลำไยอาจมี ปริมาณ SO_2 ตกค้างที่ไม่สม่ำเสมอหรือสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ จากปัญหาหรือข้อจำกัดดังกล่าวคณะผู้วิจัย จึงได้มีแนวคิดว่า ควรจะต้องหารูปแบบหรือกระบวนการรม SO_2 กับผลลำไยสดซึ่งมีสีผิวที่แตกต่างกันให้ เหมาะสมหรือเป็นมาตรฐานขึ้นมา เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ประกอบการสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับ คุณภาพหรือสีผิวของผลลำไยก่อนที่จะทำการรม SO_2

5. การเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการรม SO_2 จากการเผาผงกำมะถันกับการใช้แก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงสำหรับการวิจัยครั้งนี้ไม่สามารถเปรียบเทียบได้ชัดเจนมากนัก เนื่องจากมีขนาด ของห้องที่แตกต่างกัน โดยห้องที่ใช้ในการรม SO_2 จากการเผาผงกำมะถันซึ่งเป็นของสถานประกอบการมี ขนาด 38 ลูกบาศก์เมตร ส่วนกรรม SO_2 จากถังอัดความดันใช้ตู้ที่มีขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร ทำให้ต้องมีการ ใช้ปริมาณผลลำไย ปริมาณผงกำมะถัน และแก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันแตกต่างกันไปด้วย สาเหตุที่สำคัญ เนื่องจาก ชุดอุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันสำหรับการวิจัยครั้งนี้มีอัตราการไหล สูงสุดเพียง 1.676 ลิตรต่อวินาที ถ้าหากนำมาใช้กับห้องที่มีขนาด 38 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้เวลาในการปล่อย แก๊สสำหรับงานนำร่องประมาณ 2 ชั่วโมง และสำหรับงานในเชิงกึ่งการค้าประมาณ 4.5 ชั่วโมง ซึ่งถือว่า

เป็นเวลานานมากและอาจมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลลำไยได้ นอกจากข้อจำกัดในเรื่องขนาดของห้องแล้วยังมีข้อจำกัดในส่วนของการกำจัดแก๊ส SO_2 ด้วย โดยการใช้แก๊สในการรม SO_2 จากการเผาผลาญกำมะถันซึ่งเป็นของสถานประกอบการมีขนาดใหญ่กว่าการใช้แก๊สในการรม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรง ดังนั้นจึงส่งผลให้ใช้เวลาในการกำจัดแก๊ส SO_2 ที่แตกต่างกันไปด้วย

การใช้ประโยชน์จากงานวิจัย

การนำระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ที่มีความเร็วการไหลของอากาศไม่น้อยกว่า 0.50 เมตรต่อวินาที เข้ามาใช้ในกระบวนการรม SO_2 ทั้งที่ได้จากการเผาผลาญกำมะถันและจากถังอัดความดันโดยตรงกับผลล้าไลสค์ ช่วยให้สามารถลดระดับความเข้มข้นของแก๊ส SO_2 หลังสิ้นสุดการรมให้เหลือเพียง 2,000 ppm หรือประมาณ 6 เท่า เมื่อเทียบกับระดับความเข้มข้นของแก๊ส SO_2 ตามคำแนะนำที่ถูกต้องซึ่งใช้กันในปัจจุบัน โดยยังคงสามารถป้องกันการเกิดโรคและการเกิดสัณฐานที่เปลือกผลล้าไลได้เป็นเวลา 20 วัน ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์ ที่สำคัญคือ มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในส่วนเปลือกผลต่ำกว่าเกณฑ์ที่สถาบันอาหารกำหนดไว้ และไม่พบการตกค้างในส่วนของเนื้อผล

ผลการวิจัยดังกล่าวจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดปัญหาการส่งออกผลล้าไลได้โดยเฉพาะการมีปริมาณ SO_2 ตกค้างต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด นอกจากนี้ยังส่งผลดีถึงค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนต่างๆ ที่สามารถลดลงได้ทั้งในส่วนของการเผาผลาญกำมะถันหรือการใช้แก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรง รวมถึงการกำจัดแก๊ส SO_2 หลังสิ้นสุดการรม โดยเฉพาะในส่วนของการใช้แก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงมีแนวโน้มที่น่ามาใช้ได้ในเชิงการค้าได้ ถึงแม้ว่าต้นทุนค่าอุปกรณ์และสารเคมีจะสูงกว่าการเผาผลาญกำมะถัน แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับผู้ประกอบการ อีกทั้งยังมีความสะดวก ปลอดภัย และมีความแม่นยำในการควบคุมระดับความเข้มข้นของ SO_2 ได้ดีกว่าการเผาผลาญกำมะถัน

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

1. การนำเสนอผลงานวิจัยจำนวน 3 ครั้ง ได้แก่

- 1.1 การประชุมเสนอความก้าวหน้างานวิจัยเครือข่ายวิจัยและพัฒนาพืชสวน ณ โรงแรม เชียงใหม่ฮิลล์ 2000 จังหวัดเชียงใหม่ วันที่ 18-19 ตุลาคม 2547
- 1.2 งานแถลงข่าว “วิจัยล้าไล : ปัญหาและทางออก” ณ ห้องประชุมสถานบริการเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วันที่ 8-9 กรกฎาคม 2548
- 1.3 งานสัมมนาวิชาการ “แม่โจ้ : ศาสตร์แห่งล้าไล” ในส่วนภาคบรรยาย 1 เรื่อง และภาคโปสเตอร์1 เรื่อง วันที่ 25-27 พฤศจิกายน 2548

2. มีผู้ประกอบการรม SO_2 กับผลล้าไลสค์ให้ความสนใจและได้นำผลงานวิจัยไปทดลองใช้ในการปฏิบัติงานเชิงการค้า เช่น บริษัทพืชไทยฟรุต ได้นำเอาระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air มาทดลองใช้ในการรม SO_2 จากการการเผาผลาญกำมะถันกับผลล้าไลสค์ โดยเปรียบเทียบกับระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air ซึ่งเป็นระบบหมุนเวียนอากาศที่สถานประกอบการใช้อยู่ (ภาพที่ 31) ผลจากการทดลองพบว่า ผลล้าไลที่ผ่านการรมด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ได้รับการยอมรับในส่วนคุณภาพผล โดยเฉพาะสีของผิวเปลือกผลล้าไลหลังจากการรมมากกว่าระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air



ภาพที่ 31 การทดลองรรม SO_2 จากการการเผาพวงำมะถันกับผลล่ำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air (ซ้าย) เปรียบเทียบกับระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air (ขวา) ของบริษัท พีชไทยฟรุต จ. ลำพูน

หรือในส่วนของการใช้แก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงมีสถานประกอบให้ความสนใจและได้ให้ผลล่ำไยมาใช้ทดลองเช่นกัน (ภาพที่ 32) ผลจากการทดลอง ยังไม่ได้รับการยอมรับเท่าที่ควรในส่วนข้อสืผิวผลล่ำไยหลังจากการรรม ซึ่งส่วนหนึ่งอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดเกี่ยวกับตะกร่ำบรรจุผลล่ำไยดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ตะกร่ำบรรจุผลล่ำไยที่ใช้ในทางการค้าในปัจจุบัน (ตะกร่ำขาว) ทำให้มีความเร็วการไหลของอากาศลดลงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตะกร่ำที่ใช้ในการวิจัย (ตะกร่ำแดง) ดังนั้นจึงทำให้แก๊ส SO_2 สัมผัสกับผลล่ำไยได้น้อยลงตามไปด้วย



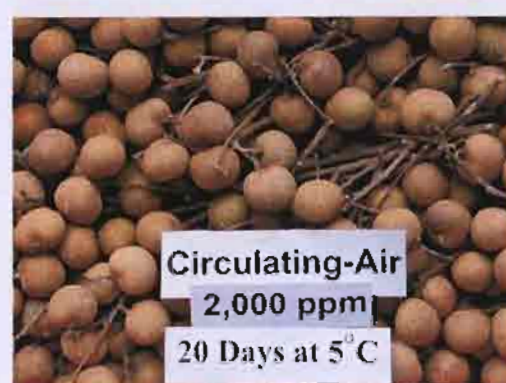
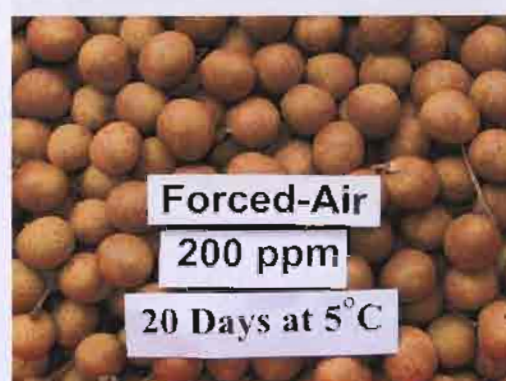
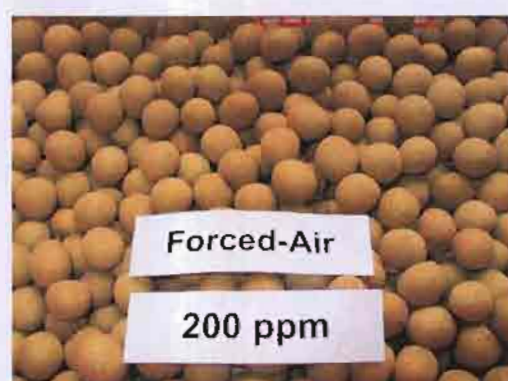
ภาพที่ 32 การทดลองรรม SO_2 จากถังอัดความดัน โดยตรงกับผลล่ำไยสดที่บรรจุในตะกร่ำขาวด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air

เอกสารอ้างอิง

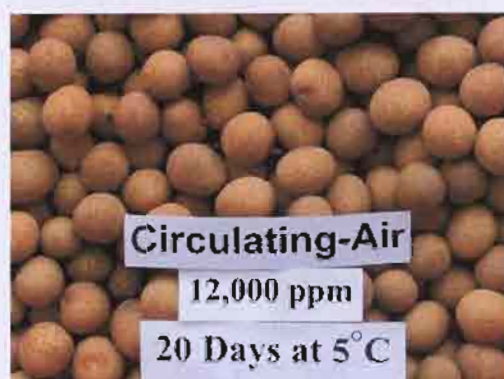
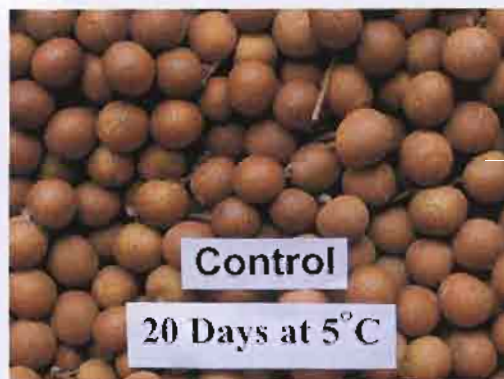
- จริงแท้ ศิริพานิช. 2538. ศรีวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ ศูนย์ส่งเสริมการฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม. 396 หน้า.
- จักรพงษ์ พิมพ์พิมล. 2542. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่. 206 หน้า.
- ชิงชิง ทองดี. 2535. การปฏิบัติการที่ถูกต้อง (GMP) ในการรมควันลำไยด้วย SO_2 , น. 71-80. ใน เอกสาร การฝึกอบรม การรมควันซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับลำไยสดหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อการส่งออก 18 มีนาคม 2535 ณ โรงแรมรามาร์คเด้นส์, กรุงเทพฯ.
- ธีรนาถ เจริญกิจ จักรพงษ์ พิมพ์พิมล และสุชาดา ทองศรี. 2548. สถานการณ์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างใน ผลลำไยสดของจังหวัดเชียงใหม่และลำพูน, น. 228. ใน รายงานการประชุมวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 5. 26-29 พฤษภาคม 2548. โรงแรมเวลคัมจอมเทียนบีช พัทยา, ชลบุรี.
- พรรัตน์ สีนชัยพานิช และจันทร์ฉาย แจ้งสว่าง. 2540. การสำรวจปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในลำไย. วารสารอาหาร 27(2) : 100-107.
- ฤทธิ์ ศักดิ์ศรีสัตยกุล. 2546. ปริมาณการตกค้างของสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในส่วนต่างๆ ของผล ลำไย. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- ภูมิพัฒน์ นาสีสะท้าน. 2547. แนวทางการปรับปรุงรูปแบบการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับผลลำไยสด. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- สถาบันอาหาร. 2541. คู่มือการอบรมควัน-อบแห้งลำไยพร้อมกรรมวิธีและแบบแปลน. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท อินโนมิเดีย จำกัด, กรุงเทพฯ. 74 หน้า
- สัมพันธ์ ศรีสุริยวงษ์. 2535. กระบวนการควบคุมการรมควันลำไยด้วย SO_2 และการกำจัดแก๊ส SO_2 ที่เหลือ จากห้องอบ, น. 160-169. ใน เอกสารการฝึกอบรม การรมควันซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับลำไยสดหลัง การเก็บเกี่ยวเพื่อการส่งออก 18 มีนาคม 2535 ณ โรงแรมรามาร์คเด้นส์, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2549. สารพิษตกค้าง : ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด. (ระบบออนไลน์).
- แหล่งข้อมูล: http://www.acfs.go.th/standard/general/download/max_residue_limits.pdf (26 มิถุนายน 2549).

- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร โดยความร่วมมือของกรมศุลกากร. 2549. ปริมาณและมูลค่าการส่งออกรายเดือน พ.ศ. 2545-2549 (เดือนมกราคม-พฤษภาคม) : ลำไยสด, แฉะแห้ง. (ระบบออนไลน์). แหล่งข้อมูล: <http://www.oae.go.th/statistic/export/1301LO.xls> (26 มิถุนายน 2549).
- อนวัช สุวรรณกุล. 2540. การจัดการต่อผลลึ้นจีและลำไยหลังการเก็บเกี่ยว. น.105-119. ใน เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรเทคโนโลยียุคใหม่ในการผลิตลึ้นจีและลำไย. สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม ศูนย์วิจัยพัฒนาไม้ผลเขตร้อนและกิ่งร้อน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อาทิตย์ ลิณาต. 2545. การสำรวจปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ตกค้างในผลลำไย. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- Jiang, Y., Z. Zhang, D.C. Joyce and S. Ketsa. 2002. Postharvest biology and handling of longan fruit (*Dimocarpus longan* Lour.). *Postharvest Biology and Technology* 26(3): 241-252.
- Pan, X.C. 1994. Study on relationship between preservation and microstructure of longan fruit. *J. Guangxi Agric. Univ.* 13: 185-188. *Cited by* Lin, H.T., S.J. Chen, J.Q. Chen and Q.Z. Hong. 2001. Current situation and advances in post-harvest storage and transportation technologies of longan fruit. *Proceeding of The First International Symposium on Litchi and Longan. Acta Hort.* 558: 343-351.
- Paull, R.E. and N.J.Chen. 1987. Change in longan and rambutan during post-harvest storage. *Hortscience* 22: 1303-1304.
- Luvisi, D.A., H.H. Shorey, J.L. Smilanick, J.F. Thompson, B.H. Gump and J.Knuton. 1992. Sulfur Dioxide Fumigation of Table Grapes. *Bulletin* 1932. Division of Agriculture and Natural Resources. University of California, Oakland. 21 p.

ภาคผนวก



ภาพผนวกที่ 1 ผลลำไยชุดควบคุมเปรียบเทียบกับผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 จากการเผาผงกำมะถันในแต่ละ
 สิ่งทดลองเข่งงานนำร่องหลังจากรรม SO_2 ทันที (คอสมันซ์ซ้าย) และหลังจากเก็บรักษาที่
 อุณหภูมิ 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 95เปอร์เซ็นต์ (คอสมันซ์ขวา)



ภาพผนวกที่ 2 ผลลำไยชุดควบคุมเปรียบเทียบกับผลลำไยที่ผ่านการรม SO_2 จากการเผาผงกำมะถันในแต่ละ
 สิ่งทดลองเชิงกึ่งการค้ำหลังจากรม SO_2 ทันที (คอตมันน์ซ้าย) และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ
 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 95เปอร์เซ็นต์ (คอตมันน์ขวา)



ภาพผนวกที่ 3 ผลลำไยชุดควบคุมเปรียบเทียบกับผลลำไยที่ผ่านการรม SO₂ จากถังอัดความดันโดยตรง (directly SO₂ gas) ในเชิงงานนำร่องหลังจากรม SO₂ ทันที (คอลัมน์ซ้าย) และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 95เปอร์เซ็นต์ (คอลัมน์ขวา)



ภาพผนวกที่ 4 ผลลำไยชุดควบคุมเปรียบเทียบกับผลลำไยที่ผ่านการรม SO₂ จากถังอัดความดันโดยตรง (directly SO₂ gas) ในเชิงการค้าหลังจากรม SO₂ ทันที (คอลัมน์ซ้าย) และหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 95เปอร์เซ็นต์ (คอลัมน์ขวา)

การวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกและเนื้อผลลำไย

ด้วยวิธี Modified Monier-William Method

การเตรียมตัวอย่างผลลำไย

1. ทำการแยกส่วนเปลือกและเนื้อผลลำไยออกจากกัน โดยต้องระวังไม่ให้อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ได้สัมผัสกับเปลือกแล้วไปสัมผัสกับเนื้อของผลลำไย เพราะอาจทำให้ปริมาณ SO_2 ตกค้างที่ได้ผิดพลาดเนื่องจากการปนเปื้อน

2. ชั่งน้ำหนักส่วนเปลือกและเนื้อผลลำไย แล้วนำไปใส่กระป๋องพลาสติกแยกกัน จากนั้นจึงเติมน้ำกลั่นให้ท่วมเปลือกและเนื้อผลลำไย

การเตรียมสารเคมี

1. อินดิเคเตอร์ จำนวน 100 มิลลิลิตร

- ชั่ง methylene blue 0.05 กรัม
- ชั่ง methyl red 0.10 กรัม

นำไปละลายในเอทานอล (ethanol) 95 เปอร์เซ็นต์ จนได้ปริมาตรครบ 100 มิลลิลิตร

2. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 1,000 มิลลิลิตร

ตวง H_2O_2 ที่มีความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วหยดอินดิเคเตอร์ลงไปจนสารละลายกลายเป็นสีม่วง จากนั้นจึงหยดสารละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ลงไปจนสารละลาย H_2O_2 เปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อนๆ

3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 และ 0.01 นอร์มัล

ถ้าต้องการเตรียม NaOH ความเข้มข้น 0.1 และ 0.01 นอร์มัล ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ต้องชั่ง NaOH จำนวน 4 กรัม และ 0.4 กรัม มาละลายในน้ำกลั่นจนมีปริมาตรครบ 1,000 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นจึงนำสารละลาย NaOH ทั้งสองความเข้มข้นไปหาความเข้มข้นที่แน่นอน (standardization) โดยไทเทรตกับสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล และใช้ฟีนอล์ฟทาเลอินเป็นอินดิเคเตอร์จนถึงจุดยุติซึ่งสังเกตจากสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีใสเป็นสีชมพูอ่อน จากนั้นจึงนำไปคำนวณโดยใช้สูตรดังนี้

$$N_1 V_1 = N_2 V_2$$

กำหนดให้	N_1	= ความเข้มข้นของ NaOH (นอร์มัล)
	N_2	= ความเข้มข้นของ HCl (นอร์มัล)
	V_1	= ปริมาณของ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)
	V_2	= ปริมาณของ HCl ที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ตกค้าง

ใช้คีมจับตัวอย่างเปลือกและเนื้อผลลำไยลงในขวดก้นกลมชนิด 2 คอ

แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปให้ได้ประมาณครึ่งหนึ่งของขวดก้นกลม



ใส่กรด HCl เข้มข้น (36 – 38 เปอร์เซ็นต์) ประมาณ 20 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลม

แล้วประกอบเข้ากับชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในการสกัด



เท H_2O_2 3 เปอร์เซ็นต์ ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

ประมาณ 100 มิลลิลิตร และใส่ลงใน boiling tube ประมาณครึ่งหลอด



นำไปประกอบเข้ากับชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในการสกัด



สวมท่อนำแก๊สในโตรเจนเข้ากับขวดก้นกลม

โดยให้มีอัตราการไหลของฟองแก๊ส 1 ฟอง/คด ต่อ 1 วินาที



เปิดน้ำให้ไหลเข้าไปในท่อคอนเดนเซอร์



เปิดเตาไฟฟ้าให้ความร้อน



รอจนตัวอย่างในขวดก้นกลมเดือด

แล้วจึงทำการจับเวลาประมาณ 50 – 60 นาที



ปิดเตาสำหรับให้ความร้อน ถอดท่อนำแก๊สในโตรเจนออก



นำสารละลาย H_2O_2 ที่อยู่ใน boiling tube มารวมกับสารละลาย H_2O_2 ที่อยู่ในขวดรูปชมพู่

(สารละลาย H_2O_2 จะเปลี่ยนเป็นสีชมพูถ้ามีปริมาณ SO_2 ตกค้างในตัวอย่าง)



นำสารละลาย H_2O_2 ไปไตเตรทกับ NaOH

โดยส่วนเปลือกผลใช้ NaOH 0.1 นอร์มัล และส่วนเนื้อใช้ NaOH 0.01 นอร์มัล

จนถึงจุดยุติซึ่งจะได้สารละลายที่มีสีเขียวอ่อน



นำผลการไตเตรทที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณ SO_2 ตกค้าง ตามสูตรการคำนวณ

สูตรการคำนวณปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไย

$$\text{ปริมาณ } \text{SO}_2 \text{ ตกค้าง (ppm)} = \frac{N \text{ NaOH} \times \text{ml NaOH} \times 32 \times 1,000}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างเปลือกหรือเนื้อผลลำไย (กรัม)}}$$

โดย $N \text{ NaOH}$ = นอร์มัล ของ NaOH

ml NaOH = จำนวนมิลลิลิตรของ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต

วิธีการคำนวณปริมาณผงกำมะถันที่ใช้สำหรับการรม SO_2

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

$$\text{และ } M = W \times A$$

$$S = C \times F \times D$$

โดย M = ปริมาณ SO_2 ตกค้างสูงสุด เป็นกรัม

S = ความเข้มข้นของ SO_2 ภายในห้องเมื่อสิ้นสุดการรม เป็นกรัม

กำหนดให้ W = น้ำหนักของลำไยที่เข้ารมควัน เป็นกิโลกรัม

A = ปริมาณการดูดซึมของ SO_2 ในลำไย เป็นกรัม/กิโลกรัม
(0.66 - 0.8 กรัม/กิโลกรัม)

C = ความเข้มข้นของ SO_2 ในอากาศเมื่อสิ้นสุดการรมเป็น
เปอร์เซ็นต์ (1.2-1.5 เปอร์เซ็นต์)

F = ปริมาตรช่องว่างในห้องเป็นลิตรคือ ปริมาตรทั้งหมดของห้อง
(ลิตร) ลบปริมาตรของลำไยที่เข้ารมควัน (ลิตร) ซึ่งเทียบกับ
ปริมาตรของน้ำ โดยน้ำ 1 ลิตรหนัก 1 กิโลกรัม

D = ความถ่วงจำเพาะของ SO_2 ขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิเฉลี่ย
ภายในห้องรมควัน

โดย ที่ 25 องศาเซลเซียส $D = 2.618$ กรัม/ลิตร

ที่ 27 องศาเซลเซียส $D = 2.601$ กรัม/ลิตร

ที่ 30 องศาเซลเซียส $D = 2.575$ กรัม/ลิตร

$$\text{ดังนั้นปริมาณผงกำมะถันที่จะต้องนำมาเผา} = \frac{\text{น้ำหนักของ } \text{SO}_2 \text{ (กรัม)}}{2}$$

2

จากนั้นจึงเพิ่มปริมาณผงกำมะถันที่ใช้เผ่อีก 10-20 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าปรับปรุงความเข้มข้นของ SO_2 ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วผ่านรูต่างๆ ของห้องและประตูห้อง รวมไปถึงความบริสุทธิ์ของผงกำมะถันที่ใช้