การยืดอายุผลลำไยสด (*Dimocarpus longan* Lour.) ด้วยการรมแก๊สโอโซนในระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

สุธาทิพย์ วงศ์พันธุ์เสือ

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2565

การยืดอายุผลลำไยสด (*Dimocarpus longan* Lour.) ด้วยการรมแก๊สโอโซนในระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

สุธาทิพย์ วงศ์พันธุ์เสือ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การยืดอายุผลลำไยสด (*Dimocarpus longan* Lour.) ด้วยการรมแก๊สโอโซน ในระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

สุธาทิพย์ วงศ์พันธุ์เสือ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

พิจารณาเห็นชอบโดย **อาจารย์ที่ปรึกษา**

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....
(รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรภัทร วาฤทธิ์)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว .....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)
รองอธิการบดี
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

ชื่อเรื่อง การยืดอายุผลลำไยสด (*Dimocarpus longan* Lour.) ด้วยการรมแก๊สโอโซน ในระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

ชื่อผู้เขียน นางสาวสุธาทิพย์ วงศ์พันธุ์เสือ

ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรภัทร วาฤทธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการรมแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งต่อคุณภาพของลำไยสดโดยการออกแบบการทดลองด้วย Central Composite Design หรือ CCD เพื่อนำมาศึกษาปัจจัยต้น 2 ตัวแปรคือความเข้มข้นของโอโซน และเวลาที่ใช้ในการรมโอโซน ทำการรมลำไยสดครั้งละ 10 กก. ด้วยการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบแนวตั้งด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 0.5 m/s หลังจากนั้นลำไยจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1°C และทำการประมวลผลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองของความเข้มข้นและเวลาในการรมโอโซนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสด โดยใช้ผลตอบคือ การเกิดเชื้อ และผลของการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือการรมรมลำไยที่ความเข้มข้น 3,000 ppm และเวลาในการที่ 17 นาที ทำให้ลำไยสดมีอายุการเก็บรักษา 28 วัน และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดนำมาตรวจสอบและยืนยันผล สามารถชะลอการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือกลำไยได้ ส่วนการสูญเสียน้ำหนักและความแน่นเนื้อตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาลำไยเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ค่าดัชนีสี L* และ b* ของลำไยที่รมแก๊สโอโซนมีค่าสูงกว่าลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซน สามารถยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดได้จาก 15 วันเป็น 33 วันเมื่อเทียบกับลำไยที่ไม่ได้รมแก๊สโอโซน

คำสำคัญ : ลำไย, แก๊สโอโซน, ระบบบังคับอากาศแนวตั้ง, อายุการเก็บรักษา

Title EXTENDING SHELF LIFE OF LONGAN (*Dimocarpus longan* Lour.) BY GASOUS OZONE FUMIGATION IN FORCED-AIR CIRCULATION SYSTEM

Author Miss Suthathip Wongpansuea

Degree Master of Engineering in Food Engineering

Advisory Committee Chairperson Associate Professor Dr. Jaturapatr Varith

ABSTRACT

The objective of this research was to study the effect of ozone gas fumigation with vertical air control system on quality of fresh longan. The experiments were designed with Central Composite Design or CCD was used to study 2 independents variables ozone concentration and time fumigation. The experiment was batched 10 kg longan and a force-air flow was used at average speed of 0.5 m/s. After fumigation, the longans were kept at a temperature of 4 ± 1 °C to determine the optimum condition of the longans. The ozonated longan was further analysis for its shelf life using a response surface methodology disease incidence as dependents variables. it was found that the optimal condition response was an ozone fumigation at a concentration of 3,000 ppm and fumigation time of 17 min. The optimal conditions can slow down the disease and browning on the longan peel up to 28 days. The weight loss and firmness throughout the storage period were not statistically significant differences ($p \geq 0.05$). The L* and b* color indexes of the ozonate longans were higher than the control. The ozone fumigation with vertical forced air system at a concentration of 3,000 ppm for 17 minutes can extend the shelf life of fresh longan from 15 days to 33 days.

Keywords : Longan, Ozone gas, Forced-air circulation system, shelf life extention

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่ผู้วิจัยได้ทุ่มเทตั้งใจ สติปัญญา กำลังกายและกำลังใจจนกระทั้งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือ จากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ดร.จตุรภัทร วาฤทธิ์ ซึ่งเป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา ตลอดจนให้ความดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอยย่างสูง

ขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ และท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร ที่กรุณาเป็นกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำความรู้ คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ข้าราชการและเจ้าหน้าที่ของสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ที่ให้กำลังใจและคำแนะนำดี ๆ เสมอ และที่ให้ความช่วยเหลือ เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณศรัลยภัคร์ ชำนาญ คุณพันธ์ลพ สินธุยา คุณนราธิป สุจินดา เพื่อน ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาตรีและปริญญาโท ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อธงชัย วงศ์พันธุ์เสือ และคุณแม่สายฝน วงศ์พันธุ์เสือ ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา เป็นกำลังใจที่ดี ให้การสนับสนุนทั้งในด้านการเรียนและการดำเนินชีวิต ให้คำปรึกษาจนทำให้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ประสบความสำเร็จในการศึกษา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

สุธาทิพย์ วงศ์พันธุ์เสือ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจเอกสาร 4

2.1 การตรวจเอกสาร 4

2.1.1 พื้นฐานเกี่ยวกับลำไย 4

2.1.2 ทฤษฎีของโอโซน (Ozone หรือ O_3) 8

2.1.3 ระบบการรมลำไยด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยระบบบังคับอากาศแบบแนวตั้ง 9

2.1.4 คุณภาพพื้นฐานของลำไยสด 10

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 14

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย 29

3.1 วัตถุดิบ 29

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ 29

3.3 การคำนวณความเข้มข้น O_3 30
3.4 การคำนวณการดูดซับแก๊สโอโซนในลำไยสด.....30
3.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....31
3.6 การเตรียมตัวอย่าง.....33
3.7 การทดสอบ Pre-test เพื่อหาช่วงของ Dose (Concentration x Time).....34
3.8 การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง.....35
3.9 การตรวจสอบและยืนยันผล.....38
3.10 การวิเคราะห์การดูดซับแก๊สโอโซนในลำไยสด.....38
3.11 การวิเคราะห์คุณภาพลำไยสด.....38
3.12 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ.....41
3.13 สถานที่ดำเนินการวิจัย.....42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....43
4.1 การทดสอบ Pre-test เพื่อหาช่วงของ Dose (Concentration x Time).....43
4.1.1 ผลของโอโซนต่อการเกิดเชื้อราในผลลำไย.....43
4.1.2 ผลของโอโซนต่อการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือก.....44
4.1.3 ผลของโอโซนต่อการสูญเสียน้ำหนัก.....45
4.1.4 ผลของโอโซนต่อความแน่นเนื้อ.....46
4.1.5 ผลของโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงของสี.....47
4.1.6 ผลของการรมแก๊สโอโซนต่ออายุการเก็บรักษาลำไย.....48
4.2 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองและการหาสภาวะที่เหมาะสม.....50
4.3 การตรวจสอบและการยืนยันผล.....54
4.3.1 ผลของโอโซนต่อการเกิดเชื้อราในผลลำไย.....54
4.3.2 ผลของโอโซนต่อการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือก.....55
4.3.3 ผลของโอโซนต่อการสูญเสียน้ำหนัก.....56

4.3.4 ผลของโอโซนต่อความแน่นเนื้อ 57
4.3.5 ผลของโอโซนต่อสี 58
4.3.6 ผลของการรมแก๊สโอโซนต่ออายุการเก็บรักษาลำไย 59
4.3.7 การดูดซับแก๊สโอโซนในลำไยสด 59
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 63
5.1 สรุปผลการศึกษา 63
5.2 ข้อเสนอแนะ 63
บรรณานุกรม 64
ภาคผนวก 65
ภาคผนวก ก ภาพการดำเนินงาน 66
ภาคผนวก ข ภาพอุปกรณ์ และเครื่องมือ 69
ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 72
ประวัติผู้วิจัย 84

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 คุณค่าทางโภชนาการของลำไยต่อลำไย 100 กรัม 4
ตารางที่ 2 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกลำไยสด ปี 2559-2563 6
ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 23
ตารางที่ 4 การกำหนดปัจจัยและขอบของระดับปัจจัย 35
ตารางที่ 5 จำนวนซ้ำและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 37
ตารางที่ 6 ระดับในการเกิดเชื้อมีลักษณะและระดับค่าที่กำหนด 39
ตารางที่ 7 ระดับในการเกิดสีน้ำตาลมีลักษณะและระดับค่าที่กำหนด 40
ตารางที่ 8 การกำหนดปัจจัยและขอบของระดับปัจจัย 50
ตารางที่ 9 การเกิดเชื้อราที่เปลือกนอกของลำไยสดที่รมแก๊สโอโซนที่ สภาวะต่าง ๆ 51
ตารางที่ 10 การดูดซับแก๊สโอโซนของลำไยขณะรมแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศ 62

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 การเกิดโอโซนโดยให้ผ่านสนามไฟฟ้าแบบ Corona Discharge 8

ภาพที่ 2 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระนาบ 2 มิติ: Hue บรรยายถึงเฉดสี และ Chroma 11

ภาพที่ 3 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab ในรูป 3 มิติ. 12

ภาพที่ 4 วิธีการทดสอบแบบกดทะลุ (penetration test) 14

ภาพที่ 5 การเตรียมลำไยสด 29

ภาพที่ 6 วิธีดำเนินการวิจัยการปรับปรุงระบบการรม 32

ภาพที่ 7 การตัดแต่งและจัดเรียงเพื่อเตรียมลำไยเข้าตู้รม 33

ภาพที่ 8 ตะกร้าลำไยขนาด 25x38x12 cm^3 33

ภาพที่ 9 การเตรียมลำไยจัดเรียงในตะกร้า 33

ภาพที่ 10 ผลของโอโซนต่อการเกิดเชื้อราในผลลำไย 43

ภาพที่ 11 ผลของโอโซนต่อเกิดสีน้ำตาลบนเปลือกในผลลำไย 44

ภาพที่ 12 ผลของโอโซนต่อการสูญเสียน้ำหนักในผลลำไย 45

ภาพที่ 13 ผลของโอโซนต่อความแน่นเนื้อในผลลำไย 46

ภาพที่ 14 ผลของโอโซนต่อต่อการเปลี่ยนแปลงของสี L* ในผลลำไย 47

ภาพที่ 15 ผลของโอโซนต่อต่อการเปลี่ยนแปลงของสี b* ในผลลำไย 48

ภาพที่ 16 ผลของโอโซนต่อการเกิดเชื้อราในผลลำไย 49

ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ (Contour plot) ของสภาวะการรมโอโซนกับลำไยสด ความเข้มข้นของแก๊สโอโซน และเวลาที่ใช้ในการรมต่อค่าการเกิดเชื้อรา 52

ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ (3D) ของสภาวะการรมโอโซนกับลำไยสด ความเข้มข้นของแก๊สโอโซน และเวลาที่ใช้ในการรมต่อค่าการเกิดเชื้อรา 53

ภาพที่ 19 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสด 53

ภาพที่ 20 ผลของโอโซนต่อการเกิดเชื้อราในผลลำไยสดตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา.....54
ภาพที่ 21 ผลของโอโซนต่อการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือกในผลลำไยสดตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 55
ภาพที่ 22 ผลของโอโซนต่อการสูญเสียน้ำหนักในผลลำไยสดตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 56
ภาพที่ 23 ผลของโอโซนต่อความแน่นเนื้อในผลลำไยสดตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา.....57
ภาพที่ 24 ผลของโอโซนต่อสี (L*) ในผลลำไยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา.....58
ภาพที่ 25 ผลของโอโซนต่อสี (b*) ในผลลำไยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา.....59
ภาพที่ 26 การวิเคราะห์การดูดซับแก๊สโอโซนของลำไยสดขณะรมแก๊สโอโซนร่วมกับระบบบังคับอากาศ.....60
ภาพที่ 27 ชุดอุปกรณ์รมแก๊สโอโซนระดับห้องปฏิบัติการพัฒนาโดย จาตุพงศ์ และคณะ (2555). 67
ภาพที่ 28 การเตรียมลำไยสดพันธุ์อีดอ ที่เก็บเกี่ยวและเก็บรักษามาแล้วไม่เกิน 3 วัน จำนวน คัดเลือกลำไยที่มีคุณภาพ ไม่มีการเน่าเสีย หรือมีการเกิดสีน้ำตาลบนผิวเปลือกของลำไย.....67
ภาพที่ 29 การจัดเรียงตะกร้าลำไยเข้าตู้รมก่อนรมแก๊สโอโซน 68
ภาพที่ 30 ลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซน (ซ้าย A) ลำไยหลังจากผ่านการรมโอโซน (ขวา B).....68
ภาพที่ 31 เครื่องวัดปริมาณแก๊สโอโซน Gas SENSOR HT-E-O3.....70
ภาพที่ 32 เครื่องวัดสีแบบ Hunter lab 70
ภาพที่ 33 เครื่องมือวัดลักษณะทางประสาทสัมผัส 71

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ลำไย เป็นผลไม้เศรษฐกิจสำคัญที่สร้างรายได้ให้กับไทยอย่างมาก ตลาดหลักของการส่งออกลำไย ไทยได้แก่ จีน เวียดนาม ฮ่องกง มาเลเซีย สิงค์โปร์ พม่า ซึ่งการส่งออกลำไยสดนั้นจะต้องคำนึงถึงคุณภาพของสินค้าที่ส่งออก โดยทั่วไปแล้วการควบคุมคุณภาพของลำไยสด เช่นการควบคุมการเสื่อมสภาพหลังการเก็บเกี่ยว ควบคุมสีของเปลือก จะใช้การรมด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่เมื่อไม่นานมานี้ประเทศผู้นำเข้าอย่าง มาเลเซีย แคนาดาและสาธารณรัฐประชาชนจีนได้ปรับกฎระเบียบเกี่ยวกับการนำเข้าลำไยโดยการลดระดับการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างสูงสุด 10 ppm และสาธารณรัฐประชาชนจีนได้กำหนดไว้ที่ 50 ppm เพราะซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างมีผลเสียอย่างมากต่อร่างกายของมนุษย์ (สุภโตษะ, 2562) เนื่องจากเป็นสารที่ก่อให้เกิดโรคภูมิแพ้ และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการคิดหาวิธีรมลำไยสดด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห้องรมลำไยด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้ง ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิตลำไยสด เพราะสามารถลดระดับความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้และลดลงเหลือเพียง 4,000 ppm โดยยังคงป้องกันการเกิดโรคในผลลไยสดและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลลำไยสดได้มากกว่า 20 วันหลังจากเก็บรักษาที่ 5 ºC องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์ ที่สำคัญคือสามารถช่วยทำให้ผลลำไยมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง ในเนื้อลำไยสดไม่เกิน 8 ppm ต่ำกว่าเกณฑ์สูงสุดที่ประเทศมาเลเซียและประเทศแคนาดา กำหนดไว้ที่ 10 ppm อีกทั้งยังไม่พบปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในเนื้อลำไยหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 5 วัน (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2558)

โอโซน คือ สารชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตจากแก๊สออกซิเจนซึ่งมีอยู่ทั่วไปในอากาศ โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ชื่อว่า C. F. Schonbein และได้จดลิขสิทธิ์ชื่อว่า “แก๊สโอโซน” แก๊สโอโซนมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงแต่สามมารถใช้ได้ปลอดภัยกับอาหาร (Generally Recognized As Safe) แก๊สโอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลและทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโมเลกุลของไขมัน เยื้อเมมเบรนที่มีสารอินทรีย์ของสิ่งมีชีวิตทำให้ผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิตอ่อนแอและแตกสลาย (สุรินทราพร และคณะ, 2559) จึงมีการนำโอนโซนมาใช้ประโยชน์กับอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น เช่นการนำไปใช้กำจัดเชื้อจุลินทรีย์ แบคทีเรีย เชื้อราต่าง ๆ การฆ่าเชื้อโรค และกำจัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ติดมากับผักและผลไม้ โอโซนได้ผ่านการรับรองจากกระทรวงเกษตรแห่งสหรัฐอเมริกา (USDA) ด้วยข้อกำหนดมาตรฐานที่เรียกว่า“โดยทั่วไปถือว่าปลอดภัย”หรือ GRAS

สำนักงานคณะกรรมอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. FDA) ได้ยอมรับโอโซนทั้งในสถานะแก๊สและของเหลวอย่างเป็นทางการว่ามีความปลอดภัยเมื่อใช้กับอาหาร เนื่องจากการใช้การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอนาคตอาจเป็นสิ่งต้องห้ามหรือยกเลิกเนื่องจากมีการคำนึงถึงความปลอดภัยทางอาหาร (Food Safety) มากขึ้นดังนั้นโอโซนจึงเป็นอีกทางเลือกของเทคโนโลยีในอนาคตในการรักษาคุณภาพลำไยหลังการเก็บเกี่ยว

ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในด้านการที่จะนำแก๊สโอโซนมาประยุกต์ใช้กับระบบการรมลำไยสดด้วยแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศ โดยจะศึกษาระบบการรมลำไยด้วยแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้ง ศึกษาความเข้มข้นของปริมาณโอโซนและเวลาที่มีผลกระทบต่อลำไยสดตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาในขนาดห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปปรับประยุกต์ใช้ในขนาดอุตสาหกรรม โดยคาดหวังว่าระบบการรมลำไยสดด้วยแก๊สโอโซนกับระบบบังคับอากาศแนวตั้งจะสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดได้ และยังสามารถลดการเกิดสีน้ำตาลที่ผิวเปลือก ลดการเกิดราที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสีย และมีประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมเพื่อที่จะสามารถใช้แก๊สโอโซนในการรมลำไยสดในการรักษาคุณภาพของลำไยทดแทนการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เนื่องจากการใช้การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอนาคตอาจเป็นสิ่งต้องห้ามหรือยกเลิกเนื่องจากมีการคำนึงถึงความปลอดภัยทางอาหาร (Food Safety) มากขึ้นดังนั้นโอโซนจึงเป็นอีกทางเลือกของเทคโนโลยีในอนาคตในการรักษาคุณภาพลำไยสดหลังการเก็บเกี่ยว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยและสภาวะการรมแก๊สโอโซนกับการยืดอายุผลลำไยสดด้วยระบบบังคับอากาศแบบแนวตั้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การทดลองจะใช้ลำไยสดที่ผ่านการเก็บเกี่ยวมาแล้วไม่เกิน 3 วันในการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการรมด้วยแก๊สโอโซนกับระบบบังคับอากาศแบบแนวตั้ง

1.3.2 การทดลองจะทดลองรมแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแบบแนวตั้งโดยจะใช้ลำไยสด 10 กิโลกรัมที่ห้องรมขนาดไม่เกิน 50x65x115 cm^3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.) ได้รับความรู้พื้นฐานใหม่ที่เกี่ยวกับการใช้แก๊สโอโซนในการยืดอายุการเก็บรักษาลำไยและได้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับลำไยที่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแบบแนวตั้ง

2.) เป็นการสร้างความคิดและแนวทางใหม่ ๆ ในการทำวิจัยเพื่อขยายผลในการพาณิชย์ ที่ไม่จำกัดอยู่เพียงสาขาวิชาใดวิชาหนึ่ง และยังเป็นการสร้างให้เกิดงานวิจัยที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงในปัจจุบัน และสามารถนำไปใช้ต่อยอดในอนาคต

3.) เป็นตัวอย่างงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ที่นำเอาองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์การเกษตรและอาหารมาประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ ในทั้งต่อด้านวิชาการ และการพาณิชย์ เพื่อที่จะเป็นรากฐานการนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาเพื่อใช้ในเกิดประโยชน์ในภาคธุรกิจ และนำไปต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจเอกสาร

2.1 การตรวจเอกสาร

2.1.1 พื้นฐานเกี่ยวกับลำไย

ลำไย ชื่อวิทยาศาสตร์: Dimocarpus longan เป็นผลไม้กึ่งเขตร้อนในตระกูล Sapindaceae มีลักษณะเดียวกันกับลิ้นจี่และเงาะเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญในประเทศไทย ลำไยเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในชนบทในทั้งรูปแบบของการจ้างงานและการสร้างรายได้ของภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ถือว่ามีความสำคัญทางเศรษฐกิจในเอเชียอย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์มีรับรู้เฉพาะในประเทศไทย, จีน, ไต้หวัน, จีนและเวียดนาม นอกจากนี้ยังพบการเติบโตในเวียดนาม กัมพูชาลาว ควีนส์แลนด์ (ออสเตรเลีย) อินโดนีเซียและฟลอริดาและฮาวายในสหรัฐอเมริกา การปลูกลำไยได้ ขยายไปยังอินเดียศรีลังกาและพม่า ลำไยเป็นที่รู้จักกันในชื่อต่าง ๆ คำว่า 'ลำไย' หรือ 'ลำไยนาน' หรือ ปอดปอด มาจากภาษาจีน ในประเทศไทยเรียกว่า (Lamyai) มาเลเซียและอินโดนีเซียเป็น (Lengkeng) พม่าเป็น (Kyet Mouk) กัมพูชาเป็น (Mien), ลาวเป็น (Lam Nhai) และ (Nam Nhai) เวียดนามเป็น (Nhan) ฝรั่งเศสเป็น (Longanier, Oeil de Dragon) โดยมีการส่งออกและแปรรูปแบบผลไม้ลำไยสดทั่วไป ลำไยแช่แข็ง, กระป๋องหรือ ความสามารถในการเก็บรักษารสชาติของลำไยกระป๋องดีกว่าลิ้นจี่และเงาะ คุณค่าทางโภชนาการของลำไย 100 กรัมของลำไย (Mishra et al., 2018)

ตารางที่ 1 คุณค่าทางโภชนาการของลำไยต่อลำไย 100 กรัม

คุณค่าทางโภชนาการ	ปริมาณ (100 กรัม)	คุณค่าทางโภชนาการ	ปริมาณ (100 กรัม)
Calories	60 kcal	P	6.0-7.0 mg
Moisture	72.4-83.0%	Fe	0.3-.60 mg
Protein	1.0-1.3 g	Vit. A	28.0 I.U
Fat	0.1-0.5 g	Vit. B1	0.03-0.04 mg
CHO	15.1-25.2 g	Vit. B2	0.07-0.14 mg
Fibre	0.4-1.1 g	Niacin	0.3-0.6 mg
Ca	6-10 mg	Vit. C	60.0-84.0 mg

ที่มา : Mishra et al., (2018)

สายพันธุ์ลำไย ลำไยพันธุ์ดอหรืออีดอ เป็นพันธุ์ที่เจริญเติบโตได้ดี ทนแล้งและทนน้ำได้ดีปานกลาง ทรงพุ่มกว้างพอสมควร ลำต้น แข็งแรง กิ่งไม่ฉีกหักง่าย เปลือกลำต้นสีน้ำตาลปนแดง เป็นลำไยพันธุ์เบาที่ออกดอก ติดผลง่ายและเก็บเกี่ยวได้ก่อนพันธุ์อื่น กล่าวคือ ออกดอกเดือนธันวาคมและเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ในช่วงปลายเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคม ลำไยเป็นพืชที่ต้องการอากาศหนาวเย็นช่วยกระตุ้นให้ออกดอก จึงนิยมปลูกในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ได้แก่ เชียงใหม่ ลำพูนและเชียงราย เนื่องจากมีสภาพภูมิอากาศเหมาะสม ปริมาณผลผลิตในแต่ละปีมากบ้างน้อยบางตามสภาพภูมิอากาศ เมื่อเดือนธันวาคม พ.ศ. 2540 ถึง เดือนมกราคม พ.ศ. 2541 เกิดสภาพอากาศแปรปรวนมากกว่าทุกปีที่ผ่านมาเป็นที่รู้จักกันคือปรากฏการณ์เอลนีโญ เกิดจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสน้ำอุ่นในมหาสมุทรมีผลกระทบต่อสภาพอากาศบนพื้นโลกฤดูหนาวที่เคยหนาวเย็นกลับอบอุ่นส่งผลกระทบต่อการออกดอกของพืชพันธุ์บนโลกอย่างมาก รวมถึงลำไยซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของเกษตรกรในภาคเหนือของประเทศไทยด้วย ในช่วงดังกล่าวอากาศไม่หนาวเย็นเพียงพอที่จะทำให้ลำไยออกดอกได้ อุณหภูมิต่ำสุดประมาณ 10 องศาเซลเซียส มีเพียงช่วงสั้นๆและมีอุณหภูมิสูงสอดแทรกอยู่ตลอดเวลา ขณะเดียวกันอุณหภูมิสูงสุดจะขึ้นสูงมากกว่า 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเหตุการณ์เช่นนี้ลำไยไม่สามารถถูกชักนำให้ออกดอกได้จากปัญหาดังกล่าวมีการนำสารโพแทสเซียมคลอเรต ($KCLO_3$) เข้ามาช่วยกระตุ้นให้ต้นลำไยออกดอกได้โดยไม่ต้องพึ่งพาความหนาวเย็นและใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน หลังจากใช้สารโพแทสเซียมคลอเรต แล้ว 21 วัน ลำไยจะเริ่มออกดอก จากนั้นจะใช้เวลาในการพัฒนาดอกและผลจนกระทั่งเก็บเกี่ยวได้ประมาณ 7 เดือน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อมในขณะที่ออกดอกและติดผลเช่น การใช้สารเดือนพฤศจิกายนซึ่งถือเป็นการผลิตลำไยนอกฤดูจะใช้ระยะเวลาตั้งแต่ออกดอกถึงเก็บเกี่ยวได้180-192 วัน หากให้สารช่วงเดือนพฤษภาคมใช้เวลา 165-172 วันก็เก็บเกี่ยวได้ (กรมวิชาการเกษตร, 2563) ทำให้เกษตรกรสามารถวางแผนการผลิตลำไยได้ตลอดทั้งปีเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของตลาดโดยเฉพาะการส่งออกไปยังสาธารณรัฐประชาชนจีน ในช่วงเทศกาลปีใหม่ และตรุษจีน ส่งผลให้มีการขยายพื้นที่ปลูกไปยังภาคตะวันออก ได้แก่ จันทบุรี ตราด ระยอง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ สระแก้ว เลย หนองบัวลำภู ภาคกลาง ได้แก่สมุทรสาคร นครปฐม ฉะเชิงเทรา เป็นต้น โดยผลผลิตขึ้นกับการบริหารจัดการแปลงสภาพแวดล้อม เช่น ภูมิอากาศ ปริมาณน้ำฝน แหล่งน้ำธรรมชาติ ความเชี่ยวชาญชำนาญของเกษตรกรทำให้ผลผลิตต่อไร่ของแต่ละภูมิภาคมีความแตกต่างกันสอดคล้องกับข้อมูลพื้นที่ปลูกลำไยของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร จังหวัดจันทบุรีเป็นจังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกและผลผลิตต่อไร่สูงที่สุดและส่วนใหญ่เป็นการผลิตลำไยนอกฤดูเริ่มเก็บผลผลิตในเดือนตุลาคม-เมษายน

การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวลำไยในปัจจุบัน การเก็บผลผลิตลำไยในเชิงการค้าปัจจุบันยังคงใช้แรงงานคนเป็นหลัก ส่วนใหญ่จะเริ่มเก็บเกี่ยวผลลำไยในตอนเช้ามืดจนถึงช่วงบ่าย เพื่อหลีกเลี่ยงสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง และไม่เก็บผลลำไยในวันที่มีฝนตกเนื่องจากทำให้ผลลำไยเน่าเสียได้ง่าย

และสถานประกอบการโรงรมลำไยสดด้วย SO_2 จะไม่รับซื้อผลลำไยที่เปียก ทำให้ประสิทธิภาพในการรม SO_2 ลดลงและมีโอกาสที่ SO_2 จะดูดซึมเข้าไปในผลลำไยไม่สม่ำเสมอทำให้ผลลำไยมีสีผิวเป็นลายไม่สวยงามในลักษณะที่เรียกว่า“เกิดลายแผนที่” และปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยมีความแปรปรวนและมีโอกาสเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดและอาจส่งผลกระทบได้รับการแจ้งเตือนด้านความปลอดภัยอาหารจากประเทศคู่ค้าหลังเก็บเกี่ยวแล้วต้องนำผลลำไยเข้าที่ร่ม หรือรีบขนย้ายไปยังบริเวณคัดบรรจุภายในสวนเพื่อปูองกันการคายน้ำและไม่ทำให้ผิวเปลือกแห้ง จากนั้นปลิดใบลำไยออกและตัดแต่งก้านช่อผลยาวไม่เกิน 15 เซนติเมตรคัดขนาดผล แยกผลผลิตที่มีตำหนิ เช่น ผลช้ำ ผลแตก หรือผลที่มีโรคและแมลงออก และบรรจุผลลำไยลงในตะกร้าพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมคางหมู น้ำหนักลำไยสุทธิ 3 กิโลกรัมต่อตะกร้า (ตะกร้าสีชมพูหรือเหลือง) และ 11.50 กิโลกรัมต่อตะกร้า (ตะกร้าสีขาว) แล้วนำไปจัดเรียงเพื่อรอการขนส่งไปจำหน่ายยังสถานประกอบการรับซื้อลำไยต่อไป การรับซื้อผลลำไยของสถานประกอบการรับซื้อลำไยส่วนใหญ่เป็นการรับซื้อลำไยเกรดคุณภาส่งออกเพื่อนำมารม SO_2 และส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ การรม SO_2 เป็นวิธีการยืดอายุของการเก็บรักษาได้นาน 4 - 6 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 0 - 2 องศาเซลเซียส หรือ 5 - 10 วันที่ 4 อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส และสามารถวางจำหน่ายได้ 2 - 3 วันที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส (กรมวิชาการเกษตร, 2562)

ลำไย เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของไทย เป็นผลไม้ที่มีปริมาณและมูลค่าการส่งออกสูงในลักษณะผลสดสร้างรายได้ให้กับประเทศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลา 5 ปี ระหว่างปี 2559 – 2563 เฉลี่ย 19,314 ล้านบาทต่อปีดังแสดงในตารางที่ 2 ประเทศผู้นำเข้าลำไยที่สำคัญ ได้แก่ สาธารณรัฐประชาชนจีน สาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนาม และสาธารณรัฐอินโดนีเซีย (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563)

ตารางที่ 2 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกลำไยสด ปี 2559-2563

2559		**2560**		**2561**		**2562**		**2563**		**เฉลี่ย**	
ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
878,432	30,745	1,200,803	42,048	1,246,421	43,624	1,011,276	35,394	1,181,607	41,356	5,518,504	19,314

ปริมาณ: ตัน, มูลค่า: ล้านบาท

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2563)

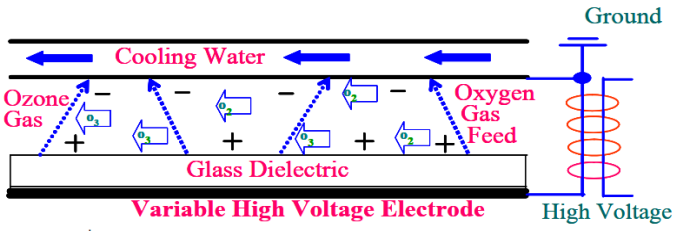
แนวโน้มการส่งออกลำไย นับตั้งแต่ปี 2547 ประเทศไทยและสาธารณรัฐประชาชนจีนได้มีการลงนามในพิธีสารว่าด้วยข้อกำหนดด้านการกักกันโรคและตรวจสอบสำหรับสินค้าผลไม้เมืองร้อนที่ส่งออกจากประเทศไทยไปสาธารณรัฐประชาชนจีน ระหว่างกระทรวงเกษตรและสหกรณ์แห่ง

ราชอาณาจักรไทยและกระทรวงควบคุมคุณภาพและตรวจสอบกักกันโรคแห่งสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัยของผลไม้เมืองร้อนส่งออกจากประเทศไทยไปสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งในพิธีสารระบุผลไม้เมืองร้อน ได้แก่ มะม่วงทุเรียน ลำไย ลิ้นจี่ และมังคุด โดยกรมวิชาการเกษตรเป็นหน่วยงานควบคุมกำกับดูแลให้การส่งออกผลไม้ทั้ง 5 ชนิดให้เป็นไปตามข้อกำหนดในพิธีสาร จากข้อมูลการตรวจสอบและออกใบรับรองสุขอนามัยพืช (Phytosanitary Certificate) แต่เดิมการขนส่งผลไม้จากประเทศไทยไปสาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นการขนส่งทางเรือโดยเฉพาะการส่งออกลำไยจะใช้เส้นทางเรือเป็นเส้นทางหลัก ต่อมากรมวิชาการเกษตรได้เจรจาทำข้อตกลงเพิ่มเติมตามพิธีสารว่าด้วยข้อกำหนดในการกักกันโรคและตรวจสอบสำหรับการขนส่งผลไม้ไทยที่ส่งออกผ่านประเทศที่สาม เข้าสู่สาธารณรัฐประชาชนจีน ลงวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2552 และได้ออกประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่องหลักเกณฑ์วิธีการ และเงื่อนไขการขอและออกใบรับรองสุขอนามัยพืชสำหรับผลไม้ที่ส่งออกผ่านประเทศที่สาม เข้าสู่สาธารณรัฐประชาชนจีน พ.ศ. 2552 และข้อตกลงเพิ่มเติมตามพิธีสารว่าด้วยข้อกำหนดในการกักกันโรคและตรวจสอบสำหรับการขนส่งออกและนำเข้าผลไม้ผ่านประเทศที่สาม ระหว่างราชอาณาจักรไทยและสาธารณรัฐประชาชนจีน ลงวันที่ 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554 และประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่องหลักเกณฑ์วิธีการและเงื่อนไขการนำเข้าและส่งออกผลไม้ระหว่างราชอาณาจักรไทยและสาธารณรัฐประชาชนจีนผ่านสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว พ.ศ. 2554 เป็นการเพิ่มช่องทางการขนส่งผลไม้ไปสาธารณรัฐประชาชนจีนทางรถยนต์ได้ทำให้การส่งออกลำไยของไทยไปยังสาธารณรัฐประชนชนจีน และสาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนามมีแนวโน้มสูงขึ้น และปัจจุบันข้อตกลงเพิ่มเติมตามพิธีสารว่าด้วยข้อกำหนดในการกักกันโรคและตรวจสอบสำหรับการขนส่งออกและนำเข้าผลไม้ผ่านประเทศที่สามระหว่างราชอาณาจักรไทยและสาธารณรัฐประชาชนจีนลงวันที่ 23 ธันวาคม 2564 ระหว่างราชอาณาจักรไทยและสาธารณรัฐประชาชนจีนได้มีการประกาศนโยบายโควิดเป็นศูนย์ (Zero Covid Policy : ZCP) ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่องหลักเกณฑ์วิธีการและเงื่อนไขการนำเข้าและส่งออกผลไม้ระหว่างราชอาณาจักรไทยและสาธารณรัฐประชาชนจีนเกี่ยวกับการส่งออกผลไม้ที่ไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อ Covid-19 ในสินค้าเกษตรไทย (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) ดังตารางที่ 2 มูลค่าการส่งออกลำไยสดไปประเทศคู่ค้าที่สำคัญ สำหรับการส่งออกลำไยจากประเทศไทยไปสาธารณรัฐอินโดนีเซีย กระทรวงเกษตรอินโดนีเซียใช้มาตรการจำกัดการนำเข้าพืชสวน โดยสามารถนำเข้าพืชสวนนั้นได้เมื่อมีความขาดแคลน ผลผลิตไม่เพียงพอกับความต้องการของผู้บริโภคภายในประเทศ (กองพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าพืช, 2562) ในแต่ละปีสาธารณรัฐอินโดนีเซียจะห้ามนำเข้าลำไยของไทยในเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคมตรงกับช่วงที่ลำไยในฤดูมีผลผลิตออกสู่ตลาด ส่งผลกระทบกับการส่งออกซึ่งผู้ประกอบการได้มีการปรับตัว ประกอบกับประเทศไทยสามารถวางแผนการผลิตลำไยได้ตลอดทั้งปี ทำให้การส่งออกลำไยไม่ตรงกับฤดูกาลผลไม้ของสาธารณรัฐอินโดนีเซีย

2.1.2 ทฤษฎีของโอโซน (Ozone หรือ O_3)

โอโซน เป็นโมเลกุลที่ประกอบไปด้วยออกซิเจนสามอะตอม มีสัญลักษณ์ทางเคมีเป็น O_3 โอโซนเป็นแก๊สที่ไม่เสถียรและสลายได้ด้วยตัวเอง โดยปกติโอโซนจะเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติจากการที่รังสีอัลตราไวโอเลตในแสงอาทิตย์ ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนในบรรยากาศชั้นสตาโตรสเฟียร์ที่ระดับความสูง 15-50 กิโลเมตรเหนือระดับน้ำทะเลแตกตัวออกเป็นอะตอมของออกซิเจนและไปทำปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นโอโซน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552) นอกจากการเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแล้วโอโซนยังสามารถเกิดขึ้นได้จากการผ่านอากาศแห้งและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมเข้าไปยังสนามไฟฟ้าแบบ Corona Discharge ทำให้ออกซิเจนในอากาศบางส่วนแตกตัวเกิดอะตอมออกซิเจน ซึ่งจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นโอโซนได้ ดังแสดงในภาพที่ 1 การใช้โอโซน (O_3) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแก๊สสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้ เกือบทุกชนิดทั้งในน้ำและในอากาศมีฤทธิ์ ในการ ฆ่าเชื้อที่รุนแรงและเร็วกว่าคลอรีนถึง 3,125 เท่า โอโซนจะเข้าไปจับโมเลกุลของสารปนเปื้อน และทำการ แยกย่อยสลาย โดยการเปลี่ยนโครงสร้างของสารนั้น โอโซนเป็นแก๊สที่มีโครงสร้างไม่เสถียรหลังทำปฏิกิริยาโอโซนจะแปรสภาพกลับเป็นแก๊สออกซิเจน (O_2) ในปัจจุบันมีการนำโอโซนไปใช้ในอุตสาหกรรม อาหารและการส่งออกผักและผลไม้ ซึ่งถือว่ามีความปลอดภัยสูงโอโซนเป็นสารที่ใช้ได้อย่างปลอดภัย (Generally recognized as safe; GRAS) นอกจากนี้การรมโอโซนมีผลในการฆ่าแมลง ทำลายสารพิษ และยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ต่างๆ ด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียมีฤทธิ์โดยซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์สูญเสียสมบัติการเป็นเยื่อเลือกผ่าน เสียสมดุลสารและส่งผลให้เซลล์แบคทีเรียแตกในที่สุด (Osmotic bursting) (ศรัณยา, 2562)

ข้อควรระมัดระวังในการใช้คือโอโซนในระดับความเข้มข้น 0.25 ppm ขึ้นไปในระยะ 0.5 เมตร จะก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อ ตา จมูก และจะทำลายเนื้อเยื่อปอด เกิดความระคายเคืองเมื่อหายใจเข้าไป ถ้าได้รับในปริมาณมากจะทำให้ตายได้ ดังนั้นในการนำมาใช้ควรระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)



ภาพที่ 1 การเกิดโอโซนโดยให้ผ่านสนามไฟฟ้าแบบ Corona Discharge
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2552)

2.1.3 ระบบการรมลำไยด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยระบบบังคับอากาศแบบแนวตั้ง

โครงการวิจัย “การออกแบบห้องรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air ในระดับอุตสาหกรรม” ปี 2550 และ โครงการวิจัย “การศึกษาร่วมกับสถานประกอบการ เพื่อนำเอาระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับแนวตั้ง และแก๊ส SO_2 จากถังอัดความอัดความดันโดยตรงมาปฏิบัติในเชิงการค้ากับผลลำไยสด” ของศูนย์เครือข่ายวิจัย และพัฒนาลำไย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยในปี 2553 ทำให้เห็นสภาพปัญหาและแนวทางแก้ปัญหาการนำไปใช้จริงในเชิงการค้า รวมทั้งเกิดแนวทางในการติดตั้งระบบหมุนเวียนอากาศภายในห้องรม SO_2 ที่มีอยู่เดิมของสถานประกอบการวิธีแก้ปัญหาการเกิดน้ำแข็งเกาะบนถังแก๊ส และชุดปล่อยแก๊ส SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรง รวมถึงการออกแบบและสร้างห้องมาตรฐานสำหรับรม SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงกับผลลำไยสด ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับแนวตั้ง ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถปฏิบัติได้ง่ายกว่าดัดแปลงห้องรม SO_2 ที่มีอยู่ของสถานประกอบการ ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับแนวตั้ง ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับแนวตั้งเป็นการดัดแปลงมาจากกระบวนการรม SO_2 กับองุ่นสดในสหรัฐอเมริกาซึ่งเป็นการใช้ SO_2 จากถังอัดความดัน โดยตรงร่วมกับระบบบังคับอากาศแบบอุโมงค์ลมหรือบังคับอากาศแบบแนวนอนวิธีดังกล่าวสามารถลดระดับความเข้มข้นของ SO_2 ที่ใช้ในการรมองุ่นได้ประมาณ 2 เท่าแต่การใช้ระบบบังคับอากาศแบบอุโมงค์ลมซึ่งเป็นการบังคับอากาศแบบแนวนอนมาใช้ในกระบวนการรมลำไยด้วย SO_2 ไม่เหมาะสมเท่าที่ควรเนื่องจากตะกร้าบรรจุลำไยเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูเมื่อเรียงซ้อนกันทำให้เกิดช่องว่างด้านข้างระหว่างตะกร้าค่อนข้างมากทำให้อากาศถูกดูดผ่านช่องว่างนั้นมากกว่าที่ผ่านตะกร้าบรรจุลำไยระบบบังคับอากาศแบบแนวตั้งจึงถูกนำมาใช้กับกระบวนการรมลำไยด้วย SO_2 โดยดัดแปลงให้มีผ้าใบครอบด้านข้างเพื่อช่วยบังคับอากาศให้ไหลตามแนวตั้งจากด้านล่างสู่ด้านบนถึงแม้ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมคางหมูจะมีช่องว่างด้านข้างระหว่างตะกร้าและมีอากาศวนผ่านได้แต่อากาศนั้นไม่สามารถไหลผ่านช่องว่างดังกล่าวได้เนื่องจากมีขอบตะกร้าด้านบนเป็นแนวกำบังไว้จึงทำให้อากาศไหลผ่านเข้าไปในตะกร้าบรรจุลำไยแทน (จักรพงษ์, 2555) ผลการดำเนินงานสามารถออกแบบและสร้างห้องมาตรฐานสำหรับรม SO_2 ด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งระดับกึ่งการค้าโดยห้องดังกล่าวสามารถบรรจุลำไยสดได้สูงสุด 360 ตะกร้า และสามารถรมลำไยได้ถึงวันละ 6 รอบการผลิต ซึ่งใกล้เคียงกับการบรรจุเต็มตู้คอนเทนเนอร์ขนาด 40 ฟุตซึ่งช่วยให้สถานประกอบการสามารถวางแผนการปฏิบัติงาน หรือคาดคะเนปริมาณผลลำไยสดที่จะนำมารม SO_2 ได้ รวมทั้งสามารถประมาณการผลลำไยสดที่ต้องการส่งออกได้ง่ายขึ้นสามารถลดระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมให้เหลือเพียง 4,000 ppm หรือประมาณ 4-5 เท่า เมื่อเทียบกับระดับความเข้มข้นของ SO_2 ตามคำแนะนำของสถาบันอาหาร หรือตามที่ผู้ประกอบการใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ 15,000–20,000 ppm โดยยังคงป้องกันการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลลำไยสดได้ไม่ต่ำกว่า 20 วัน หลังจากเก็บรักษาที่

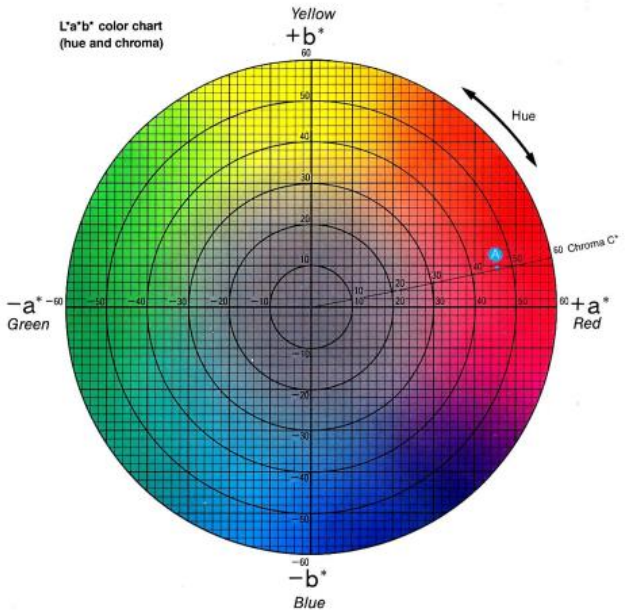
อุณหภูมิ 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อลำไยหลังจากรมทันทีไม่เกิน 15 ppm ซึ่งต่ำ กว่าการรมตามวิธีปฏิบัติของสถานประกอบการทั่วไป 6-8 เท่า การลงทุนสร้างห้องรม ดังกล่าวพบว่ามีค่าใช้จ่ายในการสร้างห้องรวมทั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ประมาณ 355,000 บาท ซึ่งคิดเป็นต้นทุนการรมเฉลี่ย 0.26 บาทต่อกิโลกรัมผลลำไยสด ทั้งนี้เมื่อนำมาคำนวณที่กำลังการผลิต 6 รอบการผลิตต่อวัน (24.84 ตัน) มาคิด เป็นการผลิต 90 วันต่อป ในราคารับจ้างรม SO_2 กับผลลำไยสด ราคา 1 บาทต่อกิโลกรัม พบว่าจะมีจุดคุ้มทุนที่ 660 ตันต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุนที่ 82 วัน โดยมีอัตราผลตอบแทนการลงทุนถึงร้อยละ 370 (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2558)

2.1.4 คุณภาพพื้นฐานของลำไยสด

1. การเปลี่ยนแปลงของสีเปลือก สี เป็นสมบัติเชิงแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของวัสดุเกษตรได้ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง สี เป็นพื้นฐานขั้นต้นของการรับรู้ของมนุษย์ เพื่อประเมินคุณภาพเบื้องต้น ตัวอย่างเช่น สีแสดงถึงความสุกแก่ของผลไม้ หากกล้วยที่เก็บเกี่ยวมาใหม่มีสีเขียว แสดงว่ายังไม่สุกเมื่อเวลาผ่านไปกล้วยเปลี่ยนไปเป็นสีเหลือง แสดงว่ากล้วยสุกแล้ว สีของเนื้อหมูที่มีสีแดงพอดี แสดงให้เห็นว่าเป็นเนื้อหมูสด หากเนื้อหมูสีแดงชีดก็สามารถประมาณได้ว่าเนื้อหมูนั้นมีอายุเก่าแล้ว เป็นต้น ในการอธิบายสีของวัตถุด้วยคำพูดอาจทำให้มาตรฐานของการบรรยายลักษณะสีแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ประสบการณ์ลักษณะทางกายภาพของตาของผู้บรรยาย ลักษณะแสงที่ตกกระทบ ดังนั้นการวัดและบรรยายสีในเชิงวิชาการจึงต้องมีการจัดมาตรฐานเพื่อเป็นการลดความไม่เป็นกลาง (bias) ของผู้บรรยายสีของวัสดุนั้น ๆ จตุรภัทร วาฤทธิ์ (2558)

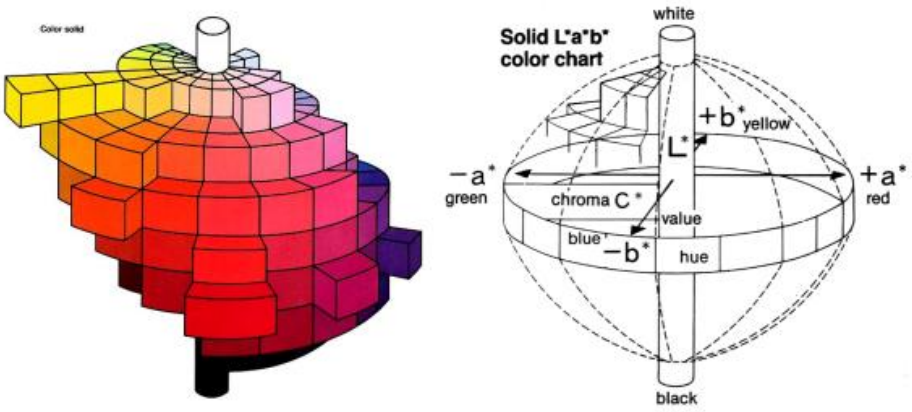
สเกลสี CIE $\bar{X}\,\bar{Y}\,\bar{Z}$ จากหลักการพื้นฐานเรื่องสีซึ่งมีองค์ประกอบ 3 อย่างข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้วัดสีที่มีมาตรฐานและลดความไม่เป็นกลางเนื่องจากปัจจัยของแหล่งกำเนิดแสงและผู้สังเกตการณ์ CIE ได้กำหนดมาตรฐานการวัดสีซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการวิชาการและการวิจัย ในระยะเริ่มแรก CIE ได้กำหนด สเกลการวัดสีเป็น $\bar{X}\,\bar{Y}\,\bar{Z}$ ซึ่งใช้บรรยายสีแดง (Red) เขียว (Green) และ น้ำเงิน (Blue) โดยการนำค่าสเปกตรัมของ 3 องค์ประกอบ คือ แหล่งแสงประดิษฐ์ วัตถุทดสอบ และ ผู้สังเกตการณ์ มาประกอบเข้าด้วยกันในสูตรคำนวณ CIE L* a* b* และ Hunter L a b เนื่องจากระบบสีดังกล่าวไม่สามารถบรรยายถึงลักษณะความมืดและสว่างของสีได้ CIE ได้พัฒนาต่อมาเป็นระบบ X-Y-L ซึ่งบรรยายถึงค่าสีแดง เขียว และความสว่าง (lightness) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังขาดส่วนที่บรรยายถึงค่าสีน้ำเงิน CIE จึงได้พัฒนาระบบสีต่อมาจนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือระบบ L*-a*-b* ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า +L* แสดงถึงสีขาว จนไปถึง -L* แสดงถึงสีดำ แกน a*จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว (-a*) ไปจนถึงแดง (+a*) ส่วนแกน b* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน (-b*) ไปเหลือง (+b*) ลักษณะการบรรยายสีของ CIE แสดงได้ดังภาพที่

1 และ 2 นอกจากนี้ บริษัท Hunter lab ในอเมริกาก็เป็นอีกองค์กรหนึ่งซึ่งทำการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสี จนในที่สุดได้ระบบของ Hunter lab เองซึ่งเรียกว่า การวัดสีระบบ Hunter lab scale ซึ่งบรรยายแกนใน 3 มิติเช่นเดียวกับระบบ CIE โดยที่ Hunter lab จะใช้สเกล L-a-b บรรยายลักษณะสีเช่นเดียวกับ L*-a*-b* ของ CIE ข้อแตกต่างระหว่าง ระบบสีของ CIE และ Hunter lab คือสูตรการคำนวณค่าสี ซึ่งทั้ง L-a-b และ L*-a*-b* ล้วนมีพื้นฐานการ คำนวณมาจากค่าจากระบบ X-Y-Z ทั้งสิ้น โดยจะมีการบรรยายค่าสีในระบบ Hunter L a b ในแบบ 2 มิติและรูปแบบ 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 2 และภาพที่ 3 ตามลำดับ



ภาพที่ 2 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระนาบ 2 มิติ: Hue บรรยายถึงเฉดสี และ Chroma บรรยายถึงความมันวาวหรือความเข้มของโทนสี.

ที่มา: Minolta (1997)



ภาพที่ 3 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab ในรูป 3 มิติ.

ที่มา: Minolta (1997)

2. การเน่าเสียของผักและผลไม้

ผักและผลไม้เป็นอาหารสดและเป็นวัตถุดิบ ซึ่งใช้เพื่อการแปรรูปอาหาร ผักและผลไม้เป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่าย (perishable food) เนื่องจาก มีปริมาณน้ำสูง มีสารอาหารที่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ และมีลักษณะอวบน้ำ เมื่อมีแรงกระแทกจากการเก็บเกี่ยว การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว จะทำให้บอบช้ำได้ง่ายการเสื่อมเสียของผัก และผลไม้สด มีสาเหตุหลักดังต่อไปนี้ การเสื่อมเสียของผักและผลไม้เนื่องจากจุลินทรีย์ จุลินทรีย์หลายชนิดที่พบมักเป็นสาเหตุสำคัญทำที่ให้ผักและผลไม้เน่าเสีย ได้แก่

- แบคทีเรียที่พบในผักและผลไม้ที่เป็นโรคพืช และเป็นสาเหตุให้ผักผลไม้เน่าเสีย ได้แก่ แบคทีเรียที่ต้องการอากาศ (aerobic bacteria) เช่น Pseudomonas, Xanthomonas, Erwinia, Bacillus, Chromobacterium

- รา (mold) ราที่มัก พบในผักผลไม้และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรค และการเน่าเสียของผักผลไม้ ได้แก่ เชื้อราในสกุลAlternaria,Botrytis, Aspergillus, Fusarium, Penicillium, Rhizopus, Geotricum เป็นต้น มีลักษณะเป็นเส้นใยปกคลุมผิวของผลไม้ เช่น ส้ม มะนาว

- ยีสต์ (yeast) การเสื่อมเสียของผักและผลไม้ เนื่องจากจุลินทรีย์มีผลทำให้เนื้อสัมผัส กลิ่น รสชาติ ของผักและผลไม้เปลี่ยนไป เช่นความเป็นกรด-ด่างลดต่ำลง เนื่องจากกรดอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้น เช่น กรดแล็กทิก (Lactic acid) กรดแอซีติก (Acetic acid)

- เนื้อสัมผัสนิ่ม เน่าเละ เนื่องจากจากแบคทีเรียมีเอนไซม์เพกทิเนส (Pectinase) แบคทีเรีย เช่น Pseudomonas ซึ่งย่อยสลายสารเพกทินมีกลิ่นหมัก จากการหมักของยีสต์ให้เกิดเอทิลแอลกอฮอล์ เป็นต้นการเน่าเสียของผักสลัดจะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Standard

Plate Count) เพิ่มขึ้น มากกว่า 7 log10 cycles การเสื่อมเสียของผักผลไม้เนื่องจากสาเหตุทางกายภาพผักและผลไม้เป็นเนื้อเยื่อพืชที่อวบน้ำ จึงการเสื่อมเสียได้ง่ายเนื่องจากแรงทางกายภาพที่มีสาเหตุมาจากแรงกล (Mechanical Damage) ได้แก่ แรงการกระแทก แรงอัด แรงเจาะ การกัดกินของแมลง และสัตว์กัดแทะที่เกิดขึ้นก่อนการเก็บเกี่ยว ระหว่างระหว่างการเก็บเกี่ยว การขนส่ง การแปรรูป และการเก็บรักษา ทำให้ผักผลไม้มีการแตกหัก ช้ำมีบาดแผล นอกจากนี้ การงอกของพืชหัว เช่น หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง ก็จัดเป็นการเสื่อมเสียทางกายภาพ เพราะสารอาหาร เช่น สตาร์ช และน้ำตาล ในหัวพืชถูกนำไปใช้ระหว่างการงอก ทำให้รสชาติและลักษณะเนื้อสัมผัสเสียไปการเสื่อมเสียของผักและผลไม้เนื่องจากสาเหตุทางกายภาพ ยังเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของผักผลไม้ต่อเนื่องจากสาเหตุทางเคมีและจุลินทรีย์ต่อไปได้อีก เนื่องจากบาดแผลจากรอยแตกหัก หรือรอยช้ำ ซึ่งอาจป้องกันได้ด้วยการใช้วัสดุป้องกันการสั่นกระแทก การเสื่อมเสียทางกายภาพยังเร่งให้สารอาหาร ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์หรือทำปฏิกิริยากันเองกับสภาพแวดล้อม เช่น ออกซิเจน หรือความชื้นในบรรยากาศได้ง่ายอีกด้วย (ชาญสงคราม, 2560)

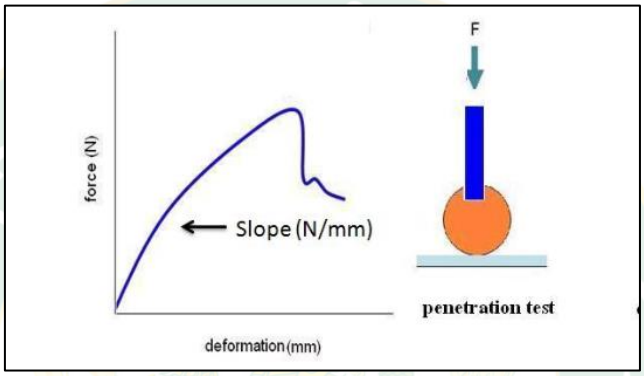
3. การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางประสาทสัมผัส

เนื้อสัมผัส (Texture) หมายถึง ลักษณะที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ด้วยการสัมผัส ผู้บริโภครับรู้เนื้อสัมผัสของอาหารได้ด้วยการสัมผัสด้วยมือ โดยการจับ แตะ บีบ บี้ ระหว่างการปอกเปลือก การสัมผัสด้วยฟัน เพดานปาก ลิ้น และอาจรับรู้ด้วยการฟังเสียงจากการดีด การเคี้ยว เนื้อสัมผัสเป็นคุณสมบัติเชิงรีโอโลยี (Rheological Properties) ของวัสดุ คำว่าเนื้อสัมผัสของอาหาร มักใช้กับอาหารแข็ง หรืออาหารกึ่งแข็ง เป็นค่าสมบัติทางเนื้อสัมผัส (Texture Properties) ด้านต่าง ๆ (ปานมนัส, 2555) สมบัติทางเนื้อสัมผัส (texture properties) ของอาหาร ได้แก่

- Hardness ความนุ่ม (Softness) ความแน่นเนื้อ (Firmness) ความแข็ง (Hardness)
- Cohesiveness Crumblyness ความกรอบ (Crispness) ความเปราะ (Brittle)
- Adhesiveness sticky, tacky, geoey
- ความฉ่ำ, มีน้ำผลไม้ (Juiciness)
- ความเนียน (Mealiness)
- ความหยาบ (Grittiness)
- ความเหนียว (Toughness)
- ความเป็นเส้นใย (Fibrousness)

Firmness/ Hardness/ Softness ความแน่นเนื้อ (Firmness) ความแข็ง (Hardness) และ นุ่ม (Softness) เป็นกลุ่มสมบัติด้านเนื้อสัมผัสประเภทเดียวกัน ซึ่งวัดค่าเป็นความ

ชันของกราฟระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลง รูปร่าง มีหน่วยเป็น แรงต่อระยะทาง เช่น นิวตันต่อมิลลิเมตร (N/mm) ผลิตภัณฑ์ที่มีความนุ่มมาก มีความแข็งน้อย หรือมีความแน่นเนื้อน้อยจะต้านทานต่อการเสีย สภาพจากแรงกระทำได้น้อย โดยมีการวัดค่าต่าง ๆ มีหลายวิธีเช่น วิธีการทดสอบแบบกดทะลุ (Penetration test) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ทดสอบเนื้อสัมผัส (Texture Anlysis) ของอาหาร โดยการใช้หัววัดขนาดเล็กกว่าชิ้นตัวอย่างกดลงไปบนเนื้อตัวอย่างจนทะลุหรือแตก ใช้สำหรับวัดค่า ความแข็ง (Hardness) ความแน่นเนื้อ (Firmness) โดยพิจารณาจากแรงกดสูงสุดของกราฟแรง -ระยะทาง (Force-deformation curve) หรือความชันของกราฟ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 วิธีการทดสอบแบบกดทะลุ (penetration test)
ที่มา: ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ (2555)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gabler et al., (2010) ศึกษาการรมแก๊สโอโซนเพื่อควบคุมการเน่าเสียหลังการเก็บเกี่ยวขององุ่น โดยได้ทำการทดลองรมแก๊สโอโซน (O_3) ที่ความเข้มข้น 10,000 ppm นาน 2 ชั่วโมงเพื่อควบคุมการเกิดเชื้อราสีเทาในองุ่นสดหลังการเก็บเกี่ยว ผลการทดลองพบว่าเชื้อราประเภท Botrytis cinerea จะถูกกำจัดด้วยการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 2,500 และ 5,000 ppm โดยใช้เวลารม 1 ชั่วโมง และการทดลองทั้งสองทรีทเมนต์สามารถยับยั้งการเกิดเชื้อราสีเทาได้เท่ากันในองุ่นสดพันธุ์ Thompson Seedless ประมาณ 50% หลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 7 วันที่อุณหภูมิ 15 °C และในการทดลองที่คล้ายกันในองุ่นพันธุ์ Redglobe โดยเก็บรักษาไว้ที่เป็นเวลา 28 วันที่อุณหภูมิ 0.5 °C หลังจากการรมด้วยโอโซนความเข้มข้น 2,500 และ 5,000 ppm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งสองการทดลองมีประสิทธิภาพเท่ากัน แต่น้อยกว่าการรมด้วยโอโซนที่ความเข้มข้น 10,000 ppm และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการรม โดยให้องุ่นได้รับการบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนจะทำการรมโอโซน และนำมาทำการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 10,000 ppm เป็นเวลา

30 นาที, 5,000 ppm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 2,500 ppm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และความเข้มข้นคงที่คูณกับเวลา (c × t) 5,000 ppm × h ผลการทดลองของแต่ละการทดลองมีผลไม่แตกต่างกัน คือ การรมแก๊สโอโซนสามารถยับยั้งการเกิดเชื้อราสีทาในองุ่นสดลงได้ 50% ดังนั้นแก๊สโอโซนจึงเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับในการใช้กับองุ่นสด และอาจเป็นเทคโนโลยีที่สามารถเป็นทางเลือกหากการใช้ SO_2 เป็นสิ่งต้องห้ามหรือถูกยกเลิก

Ioannis et al., (2010) ศึกษาผลของการรมโอโซนกับการยับยั้งการเกิดโรคเน่าปลายที่เกิดจากเชื้อรา Botrytis ในผลกีวี (Actinidia deliciosa, cv. Hayward) ที่ถูกเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 4 เดือนในห้องเย็น (0 °C, RH 95%) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเอทิลีนเป็นตัวควบคุม และห้องเย็นที่มีแก๊สโอโซนอย่างต่อเนื่องที่ความเข้มข้น 0.3 ppm ในห้อง หลังจากรมด้วยแก๊สโอโซนสามารถลดอัตราการเกิดโรคลงถึง 56% และผลกีวีที่เป็นตัวควบคุมมีการเกิดสปอร์ของเชื้อขึ้นต่างจากผลกีวีที่รมด้วยแก๊สโอโซนไม่มีการเกิดสปอร์ของเชื้อ ดังนั้นจะสังเกตได้ว่าการรมด้วยแก๊สโอโซนกับผลกีวีทำให้ผลกีวีสามารถต้านทานกับเชื้อได้ และการรมด้วยแก๊สโอโซนสามารถยับยั้งการเกิดโรคในผลกีวีได้

Ozkan et al., (2011) ศึกษาผลของโอโซนกับเชื้อราจำพวก Penicillium digitatum, Penicillium italicum และ Botrytis cinerea ทำลายผลไม้สดและทำให้เกิดการเน่าเสียที่ขึ้นหลังการเก็บเกี่ยว จึงได้มีการพิจารณาความเป็นพิษของแก๊สโอโซน (O_3) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกันเพื่อควบคุมการเน่าเสียโดยการนำเชื้อรามาเพาะบนจานเพาะเชื้อและให้สัมผัสกับโอโซนที่ความเข้มข้น 200–350 ppm ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 35%, 75% และ 95% RH อุณหภูมิห้อง 25 °C โดยผลิตแก๊ส O_3 โดยเครื่องกำเนิดแสง UV และผ่านสารละลาย 3 ตัวที่ปริมาณ 500 ml ($MgCl_2$ อิ่มตัว 35% RH, NaCl 75%RH และ K_2SO_4 95% RH) โดยปรับความเข้มข้นของโอโซนคูณกับเวลาเป็น 1 ชั่วโมง (ppm× h) หลังจากนั้นตรวจวัดการลดจำนวนของเชื้อที่ถูกทำลายหลังจากได้รับโอโซนที่แตกต่างกันคูณกับเวลาคงที่ โดยทดสอบด้วยการนำเชื้อออกจากห้องบ่มวางบนวุ้นเดกซ์โทรสมันฝรั่งและสังเกตการเกิดของเชื้อพบว่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความชื้นสูงมากกว่าที่ความชื้นต่ำ และ P. digitatum และ P. italicum มีความทนทานต่อ O_3 มากกว่า B. cinerea ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95%, 99% ของเชื้อจำพวก P. digitatum, P. italicum และ B.cinerea ตายหลังจากได้รับการรับโอโซนที่ความเข้มข้น 817, 732 และ 702 ppm × h ตามลำดับและที่ความชื้น 75% RH มีการยับยั้งที่คล้ายกันที่ความเข้มข้นของโอโซน 1781, 1274 และ 1262 ppm × h ตามลำดับ และที่ความชื้น 35% RH ประสิทธิภาพของ O_3 ลดลงอย่างเห็นได้ชัดและการยับยั้งการเกิดเชื้อได้ต้องใช้โอโซนความเข้มข้น

11,410, 10,775 และ 7713 ppm × h ตามลำดับ ผลเหล่านี้นำไปใช้เพื่อเลือกปริมาณความเข้มข้นของแก๊สโอโซน ที่จำเป็นในการยับยั้งเชื้อราเหล่านี้ โดย B. cinerea จะถูกฉีดพ่นบนพื้นผิวขององุ่นเป็นเวลา 2 ชั่วโมงหลังจากนั้นองุ่นจะถูกรมแก๊สที่ความเข้มข้น 800–2000 ppm × h พบว่าความเข้มข้นของแก๊สโอโซนที่มากกว่า 800 ppm × h สามารถลดการเกิดเชื้อราในองุ่นสดได้ถึง 85% สำหรับองุ่น 'Autumn Seedless' และ 45% สำหรับองุ่น 'Scarlet Royal' ตามลำดับ การรมด้วย O_3 สามารถควบคุมการเกิดโรคเชื้อราขององุ่นหลังการเก็บเกี่ยวได้หรือในผลไม้ที่ทนทานต่อแก๊สโอโซน หรือสามารถนำมาใช้เพื่อฆ่าเชื้อในอุปกรณ์แปรรูปและห้องเก็บผลิตภัณฑ์ได้

Souza et al., (2018) ศึกษาโอโซน (O_3) ที่เป็นสารออกซิแดนท์รุนแรงและใช้ในการบำบัดน้ำการฆ่าเชื้อโรคและกำจัดศัตรูพืชสารพิษจากเชื้อราและสารปนเปื้อนอื่น ๆ จากผักและผลไม้ อย่างไรก็ตามเงื่อนไขการรักษาควรเป็นกำหนดเฉพาะสำหรับผลิตภัณฑ์ทุกประเภทเพื่อการใช้โอโซนอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย จุดมุ่งหมายของการศึกษาครั้งนี้ คือเพื่อประเมินผลกระทบของโอโซนที่ใช้เป็นแก๊ส (0-5 mg L^{-1}) และละลายในน้ำ (0-10 mg L^{-1}) ต่อคุณภาพของแครอท การสัมผัสของแครอทต่อโอโซนเนื่องจากแก๊สและน้ำที่ละลายในน้ำไม่ได้เปลี่ยนเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักความแน่นเนื้อและสีของผัก การบำบัดด้วย O_3 เนื่องจากแก๊สไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรดด่างของแครอทอย่างไรก็ตามในการบำบัดด้วย O_3 ที่ละลายในน้ำความเข้มข้นของโอโซนและการทำปฏิกิริยากับอุณหภูมินั้นส่งผลต่อค่าความเป็นกรดด่างของแครอทชั่วคราว นอกจากนี้ O_3 ยังเป็นแก๊สป้องกันการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในการละลายน้ำของแข็งในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลาห้าวัน (18 ± 2 ° C, 80 ± 5% RH) ซึ่งจะช่วยเพิ่มอายุการเก็บของแครอท

Sintuya et al., (2018) ศึกษาผลกระทบของการรมโอโซนต่อการตกค้างของยาฆ่าแมลง การลดลงของยาฆ่าแมลงในพริกแห้งในขณะที่ยังคงรักษาคุณภาพของพริกแห้ง โดยการรมโอโซนแก๊สด้วยอัตราแก๊ส 5.5 g/h และถูกนำไปใช้กับสารกำจัดศัตรูพืช organophosphate เวลา 5 ถึง 30 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของสารตกค้างของยาฆ่าแมลง ผลการวิจัยพบว่าแก๊สโอโซนสามารถลดระยะเวลาการสลายตัวครึ่งชีวิตของ ($t^{1/2}$) malathion, chlorpyrifos, profenofos และ ethion เหลือเพียง 17.4,27.4, 34.1 และ 18.0 นาทีคิดเป็นครึ่งชีวิตสั้นลง 99.9% เมื่อเปรียบเทียบกับโอโซนการปลด นอกจากนี้การรมควันโอโซนไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ต่อค่ากิจกรรมน้ำ สีและปริมาณแคปไซซินของพริกแห้ง

Jin et al., (1999) ศึกษาโอโซน (O_3) ที่เป็นสารต้านจุลชีพและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและศักยภาพมากมายในอุตสาหกรรมอาหาร ปฏิกิริยามีความสามารถในการแทรกซึมและการสลายตัวได้เองในผลิตภัณฑ์ปลอดสารพิษ (เช่น O_2) ทำให้โอโซนเป็นยาฆ่าเชื้อที่ใช้งานได้อย่างปลอดภัยทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์อาหาร โอโซนมีการใช้มานานหลายทศวรรษในหลายประเทศและเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่าปลอดภัย (GRAS) ทั้งในสถานะของแก๊สและน้ำนี้ โอโซนในแก๊สหรือน้ำขั้นตอนมีประสิทธิภาพต่อเชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ทดสอบโดยกลุ่มวิจัยจำนวนมาก ความเข้มข้นค่อนข้างต่ำของโอโซนและเวลาสัมผัสสั้น ๆ เพียงพอที่จะยับยั้งแบคทีเรียรายีสต์ ปรสิตและไวรัส มีการใช้โอโซนร่วมกับสิ่งอื่น ๆ ในการหยุดใช้งานจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในเนื้อสัตว์สัตว์ปีก ไข่ ปลา ผักผลไม้และอาหารแห้ง ในสถานะแก๊สยังมีประโยชน์ในการล้างพิษและกำจัดสารพิษจากเชื้อราและสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรบางชนิด อย่างไรก็ตามการใช้โอโซนมากเกินไปอาจทำให้เกิดออกซิเดชันของส่วนผสมบางอย่างบนพื้นผิวอาหาร ซึ่งมักส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีและการเสื่อมสภาพของรสชาติอาหารจำเป็นต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่ออธิบายจลนพลศาสตร์และกลไกของการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์โดยโอโซนและเพื่อปรับให้เหมาะสมใช้ในงานอาหาร

Chamnan et al., (2019) ศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของการรมโอโซนที่ความเข้มข้นระดับกลางในการรักษาคุณภาพของลำไยที่บรรจุในประเภทของบรรจุภัณฑ์ที่มีวัสดุแตกต่างกัน สำหรับการรมด้วยแก๊สโอโซนโดยใช้ลำไย 3 กิโลกรัมเวลา 5 นาทีที่ระดับความเข้มข้น 4,000 ppm และนำลำไยมาบรรจุที่มีวัสดุแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ พลาสติก (PE), โพรพิลีน (PP) โพรพิลีน (PP) และพลาสติกใส่อาหาร (WF) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสนานเป็นเวลา 36 วัน และตัวควบคุมจะเป็นตัวที่ไม่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซน โดยผลการศึกษาพบว่าเมื่อเวลาเก็บรักษานานขึ้นลำไยจะมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรค, การเกิดสีน้ำตาลบนเปลือกและมีการสูญเสียน้ำหนัก และในระหว่างการเก็บรักษาลำไยจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแม้ว่าจะมีไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ($p \geq 0.05$) ในหมู่บรรจุภัณฑ์ 3 ประเภทที่แตกต่างกันลำไยที่ผ่านการรมโอโซนระหว่างทรีตเมนต์ PE, PP, WF และตัวควบคุม แต่ลำไยที่ผ่านการรมโอโซนก็มี L^* และมากกว่าค่า b^* และอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานกว่าอายุการใช้งานของการตัวควบคุมเล็กน้อย โดยลำไยที่โอโซนรมแล้วเก็บไว้ใน PE โดยลำไยที่รมโอโซนแล้วเก็บไว้ใน PE มีระยะเวลาการเก็บรักษาสูงสุดถึง 36 วัน ซึ่งสามารถยืดอายุการเก็บได้นานขึ้น 140% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม

Aunchalee et al., (2018) ศึกษาผลของการรมโอโซนต่อการลดปริมาณของซัลเฟอร์และคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไยที่ผ่านการรมควันซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อฆ่าเชื้อ ลำไยที่ผ่านการรมควันซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม โดยกลุ่มแรกจะผลลำไยที่ผ่านการสัมผัสกับแก๊สโอโซน (O_3) ที่ความเข้มข้น 200 ppm เป็นเวลา 10 ชั่วโมงและอีกกลุ่มถูกวางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นตัวควบคุม ทั้งสองกลุ่มของผลไม้ลำไยถูกสุ่มเลือกเป็นเวลา 0 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 8 ชั่วโมง และ 10 ชั่วโมงเพื่อหาปริมาณกำมะถันตกค้างในเปลือกและก้านผลการศึกษาพบว่าซัลเฟอร์ตกค้างในเยื่อหุ้มเมล็ดลดลง 93.50% และในก้าน 81.54% หลังจากได้รับบำบัดด้วยโอโซน 10 ชม. ในการทดสอบครั้งที่สองผลกระทบของโอโซนในศึกษาการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลในเปลือกของผลลำไยที่ผ่านการบำบัดด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ผลที่ได้พบว่าผลไม้ที่ผ่านการบำบัดทั้งหมดมีดัชนีการเกิดสีน้ำตาลและกิจกรรม PPO ต่ำกว่าตัวควบคุม และไม่พบลำไยที่ได้รับการบำบัดด้วยโอโซนว่ามีการเกิดเชื้อราหรือการเพิ่มขึ้นจุลินทรีย์ทันทีหลังจากการรมควันเป็นเวลา 5 วันซึ่งการจัดเก็บที่ 25 °C นอกจากนี้การรักษาด้วยโอโซนสามารถการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไยที่ผ่านการ SO_2 หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C เป็นเวลา 35 วัน สรุปได้ว่าโอโซนเป็นวิธีทางเลือกหนึ่งในการลดปริมาณซัลเฟอร์และการเกิดเชื้อราและการรักษาคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไยที่ผ่านการรมควันโอโซน SO_2

Sripong et al., (2022) ศึกษาผลของแก๊สโอโซนที่มีผลต่อการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์และการยืดอายุการเก็บรักษาทุเรียนสด โดยศึกผลของแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้นที่ 0 (กลุ่มควบคุม), 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000 มิลกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 และ 5 นาทีต่อการกำจัดการปนเปื้อนของโคลิฟอร์ม ถูกกำหนดในการทดสอบในหลอดทดลอง ผลการวิจัยชี้ว่าประสิทธิภาพของแก๊สโอโซนเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่มากขึ้น ซึ่งตั้งแต่ 500 มิลกรัมต่อลิตร เป็นต้นไป สามารถยับยั้งโคลิฟอร์มได้อย่างสมบูรณ์ การบำบัดด้วยแก๊สโอโซนเป็นเวลา 3 และ 5 นาทีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของโคลิฟอร์ม การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับผลกระทบของโอโซนที่ 500–1,000 มิลกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 นาทีต่อลักษณะที่ปรากฏของทุเรียนสด การรมด้วยโอโซนที่ 500–900 มิลกรัมต่อลิตร ไม่ส่งผลต่อลักษณะที่ปรากฏของเนื้อและเชื้อราของทุเรียนสด แต่ที่ 1,000 มิลกรัมต่อลิตร ทำให้เกิดการช้ำน้ำและเป็นสีน้ำตาลบน ดังนั้นจึงเลือกแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 500 และ 900 มิลกรัมต่อลิตร เพื่อใช้ลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในการทดสอบ การทดลองดำเนินการโดยการรมควันทุเรียนสดที่รมควันด้วยโอโซนที่ 500 และ 900 มิลกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 นาที และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการรมเป็นกลุ่มควบคุม ตัวอย่างทั้งหมดถูกบรรจุในถุงโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) และเก็บไว้ที่ 4 °C เป็นเวลา 14 วัน จากนั้นถ่ายย้ายไปเก็บที่ 10 °C และ 25 °C เป็นเวลา 1 วัน เพื่อกระตุ้นสภาวะการเก็บรักษา ผล

การศึกษาพบว่าการรมด้วยแก๊สโอโซนที่ 500 และ 900 มิลกรัมต่อลิตร ช่วยลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม โอโซนที่ 900 มิลกรัมต่อลิตร เป็นวิธีการที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถลดแบคทีเรียและโคลิฟอร์มทั้งหมดได้ 2.72 และ 1.93 log CFU g-1 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ดังนั้น จึงมีการศึกษาผลของโอโซนที่ 900 มิลกรัมต่อลิตร ต่อการรักษาคุณภาพของทุเรียนสด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโอโซนที่ 900 มิลกรัมต่อลิตร สามารถคงความคงลักษณะของเนื้อทุเรียน ลดอัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีน ไม่ส่งผลต่อสารต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิก และไม่ส่งผลเสียต่อสีเนื้อและคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส (รสและลักษณะโดยรวม) ผลวิจัยเหล่านี้พิสูจน์ว่าแก๊สโอโซนเป็นเทคโนโลยีทางเลือกในการลดปริมาณจุลินทรีย์และรักษาคุณภาพของทุเรียนสดได้เป็นเวลา 15 วัน

Wang et al., (2019) ศึกษาผลของแก๊สโอโซนที่มีผลต่อการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ซัลโมเนลลาและจุลินทรีย์พื้นเมืองในมะเขือเทศเชอร์รี่ โดยศึกษาผลกระทบต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการของผลมะเขือเทศกับการยับยั้งการเกิดเชื้อรา Salmonella enterica serovar Typhimurium ที่เพาะเลี้ยงบนแผลบนลำต้นและผิวมะเขือเทศด้วยการรมแก๊สโอโซนความที่เข้มข้น 1.71,3.43 และ 6.85 มิลกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง โดยการศึกษามะเขือเทศที่เป็นตัวควบคุมจะได้รับการรมด้วยแก๊สโอโซนความเข้มข้นและระยะเวลาการรมเดียวกันและเก็บไว้ที่ 10 °C เป็นเวลา 21 วัน โดยจะวัดคุณภาพการเปลี่ยนแปลงทางประสาทสัมผัส (ลักษณะภายนอกและกลิ่น) จากผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นแก๊สโอโซน 6.85 มิลกรัมต่อลิตรที่เวลา 2 และ 4 ชั่วโมงสามารถลดจำนวนของเชื้อ Salmonella ลงได้ประมาณ 2 log CFU $^{-1}$ บนทั้งสองการทดลอง การรมที่ตัวอย่างอื่น ๆ ไม่ได้ลดจำนวนของเชื้อราลงได้อย่างมีนัยสำคัญ และรายงานว่าการรมแก๊สโอโซนที่ 3.43 และ 6.85 มิลกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมงส่งผลเสียต่อการลักษณะภายนอกและกลิ่นของมะเขือเทศ โดยรวมแล้วงานวิจัยได้ระบุว่าแก๊สโอโซนสามารถช่วยยับยั้งการเจริญของเชื้อราโมเนลลาลงได้อย่างมีนัยสำคัญ

Afsah et al., (2021) ศึกษาผลของการรมแก๊สโอโซน (OA) ที่ส่งผลต่อการลดลงของน้ำหนัก ปริมาตรการหดตัว และความตึงผิวของผลมะเดื่อสด และศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงในหนังชั้นนอกของมะเดื่อที่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนในการเก็บรักษา 14 วันที่อุณหภูมิ 4 °C และความชื้น 65 % RH โดยในการทดลองที่ 1 การศึกษาผลมะเดื่อสดในความสุกที่แตกต่างกันสองระดับ คือผลสุกในเชิงพาณิชย์และผลสุกงอมให้สัมผัสกับโอโซนเป็นเวลา 11 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการรมโอโซน ตัวอย่างมะเดื่อที่ผ่านการรมด้วยโอโซน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 15 ppm แสดงให้เห็นว่ามีการลดลงของน้ำหนักอยู่ที่ 10% มีหดตัวลดลง

16% และมีลักษณะภายนอกที่ดีขึ้น มีจุดสีน้ำตาลบนเปลือกน้อยลง และมีการเกิดของเชื้อราต่ำกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม และในการทดลองในระยะที่ 2 โดยทดลองรมโอโซนกับมะเดื่อสด 2 สายพันธุ์ที่ความเข้มข้นโอโซนเท่ากับ 15 ppm เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และกำหนดให้มีระดับความแก่เท่ากัน โดยผลรายงานว่าในมะเดื่อสดชุดควบคุมมีอัตราการลดลงน้ำหนักสูงสุด 25.8 % และมีปริมาตรการหดตัวลดลง 32.5 % ในมะเดื่อสายพันธุ์ Kadota มีการลดลงของน้ำหนักต่ำสุดเท่ากับ 18.8 % และปริมาตรการหดตัว 9.8 % ในการเก็บรักษา 14 วัน เนื่องจากผลการเกิดออกซิเดชันจากการถูกรมด้วยโอโซนส่งผลให้ความกระชับของผิวภายนอกลดลงอย่างมากทั้งสายพันธุ์ Kadota และ Mission figs และความกระชับของผิวเพิ่มขึ้นในตัวอย่างมะเดื่อสายพันธุ์ Kadota ในวันที่ 7 การฟื้นตัวของผิวหนังภายนอกของมะเดื่อ Kadota เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอัตราและช้าลงสิ้นสุดวันที่ 14 ดังนั้นการบำบัดด้วยโอโซนส่งผลกระทบต่อผิวหนังภายนอกของมะเดื่อ แต่โอโซนส่งผลทำให้คุณสมบัติการประกอบตัวเองของชั้นขี้ผึ้ง Epicuticular ที่บริเวณผิวชั้นนอกช่วยให้ผลไม้ฟื้นตัวจากความเสียหายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากโอโซนในวันที่ 7 รอยแตกขนาดเล็กและการหลุดของชิ้นส่วนผนังเซลล์ที่สังเกตเห็นบนผิวของผลไม้หลังจาก 14 วันในห้องเย็น เห็นได้อย่างชัดเจนในตัวอย่างควบคุมและส่งผลให้สูญเสียน้ำและน้ำหนักลดลงมาก อายุการเก็บรักษาลดลง จากการศึกษาพบว่าการรักษาด้วยการรมโอโซนกับผลมะเดื่อสดสามารถใช้เพื่อลดปริมาณและการสูญเสียน้ำหนักและปรับปรุงคุณภาพโดยรวมของมะเดื่อสดได้

Whangchai et al., (2006) ศึกษาผลของแก๊สโอโซนกับกรดซิตริก แอสคอร์บิก และออกซาลิก ต่อการเน่าเปื่อยหลังการเก็บเกี่ยวที่ผิวเปลือกนอกของผลลำไยสดโดยการศึกษาจะรมแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 200 มิลกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 0 (กลุ่มควบคุม), 15, 30, 60 และ 120 นาที กับลำไยสดแล้วเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยผลพบว่าการสัมผัสกับโอโซนเป็นเวลา 60 และ 120 นาที จะทำให้อัตราการเกิดจุลินทรีย์บนผิวลำไยสดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทันทีหลังจากการรมเป็นเวลา 3 วัน ในแต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสแก๊สโอโซนเป็น 120 นาที การเกิดเชื้อราก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในการทดลองที่สองการจุ่มผลลำไยสดลงในสารละลายกรดซิตริก แอสคอร์บิก และออกซาลิกที่ความเข้มข้น 0%, 5% และ 10% โดยน้ำหนักกรดออกซาลิกที่ 5% เป็นสารต้านการเกิดสีน้ำตาลที่มีศักยภาพมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรดอื่น ๆ หลังจากนั้นลำไยจะถูกรมด้วยโอโซนร่วมกับกรดออกซาลิกหรือซิตริกเพื่อให้มีการเกิดสีน้ำตาลน้อยลงและทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลีฟีนอลออกซิเดสลดลง ดังนั้นผลของการใช้โอโซนร่วมกับกรดออกซาลิกหรือกรดซิตริกอาจเป็นอีกทางเลือกที่จะทดแทนการรมลำไยสดด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อควบคุมคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวและการเกิดสีน้ำตาลของลำไยสดได้

Zainuri et al., (2018) ศึกษาผลของการรมแก๊สโอโซนรวมกับบรรจุภัณฑ์แบบผสมผสานต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาผลมะเขือเทศสด โดยมีการศึกษา 6 แบบได้แก่: ชุดควบคุม (ไม่มีโอโซนกับบรรจุภัณฑ์); ไม่มีโอโซนกับบรรจุในถุงโพลีเอทิลีน ไม่มีโอโซนกับโพลิเอทิลีนเทเรพทาเลต; มีโอโซนแต่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ มีโอโซนกับบรรจุด้วยถุงพลาสติกโพลีเอทิลีน และมีโอโซนกับโพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต แต่ทดลองเป็น 3 ซ้ำ เก็บตัวอย่างมะเขือเทศในระยะ ใช้โอโซนการรมเป็นเวลา 60 วินาที มะเขือเทศได้รับการรมและไม่มีบรรจุภัณฑ์จะถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องนานถึง 12 วัน พารามิเตอร์สำหรับการประเมินคุณภาพ ได้แก่ ปริมาณน้ำ สี เนื้อสัมผัส น้ำหนักที่สูญเสีย และจำนวนการเกิดเชื้อรา Escherichia coli โดยแต่ละพารามิเตอร์จะถูกประเมินในวันที่ 0, 6 และ 12 ของการระยะเวลาการเก็บรักษา และผลการวิจัยรายงานว่าการผสมผสานระหว่างการรมด้วยโอโซนร่วมกับบรรจุภัณฑ์ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางชีวเคมี (ปริมาณน้ำ สี เนื้อสัมผัส และการสูญเสียน้ำหนัก) ของผลไม้ ทั้งในด้านการยับยั้งการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ และรักษายืดอายุการเก็บรักษาความสดของมะเขือเทศสดได้นานเป็นเวลา 12 วัน การใช้โอโซนร่วมกับบรรจุภัณฑ์แบบโพลิเอทิลีนจะเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาที่ดีที่สุดในการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของมะเขือเทศเป็นเวลา 12 วันในอุณหภูมิห้อง

Chamnan et al., (2021) ศึกษาผลกระทบของการรมด้วยโอโซนความเข้มข้นสูง (HCO) ต่ออายุการเก็บรักษาลำไยสด โดยจะศึกษาความเข้มข้นของแก๊สโอโซนที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 4,000, 8,500 และ 13,000 ppm เป็นเวลา 5 และ 15 นาที ผลปรากฏว่าลำไยที่สัมผัสกับแก๊สโอโซนที่ 8,500 ppm เป็นเวลา 5 นาที ถือเป็นการรมที่เหมาะสมที่สุดในการยืดอายุลำไยอายุการเก็บรักษาทำให้ลำไยสดมีอายุนานถึง 35 วัน ซึ่งนานกว่าอายุการเก็บรักษาลำไยสดที่ไม่ได้รมด้วยโอโซน 57% และจาก SEM จะพบว่าลำไยที่ผ่านการรมโอโซนจะมีขนที่ผิวหนังชั้นนอกน้อยกว่าลำไยที่ไม่ผ่านการรมโอโซน การรมด้วยโอโซนส่งผลในทางบวกต่อคุณภาพความสดของผลลำไย และในด้านการควบคุมการผิวสีน้ำตาล การเกิดเชื้อรา การสูญเสียน้ำหนัก ปริมาณ TSS สี (L*, C*, h*), คุณภาพทางประสาทสัมผัสและอายุการเก็บรักษาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและเวลาของการรม การรมที่เหมาะสมที่สุดระหว่างการจัดเก็บ 5 °C พบว่าการรมที่ความเข้มข้น 8,500 ppm และเวลาสัมผัสโอโซนที่ 5 นาที ส่งผลให้ลำไยสดมีอายุการเก็บรักษายาวนานถึง 35 วัน จากไมโครกราฟ SEM พบว่าลำไยชุดควบคุมจะมีเซลล์รูปรังผึ้ง ขนหนังกำพร้า และมีรูพรุนที่ใหญ่กว่าผิวเปลือกชั้นนอกของลำไยที่ผ่านการรมด้วยโอโซนไม่เพียงแต่กำจัดเชื้อจุลินทรีย์เท่านั้น แต่ยังยับยั้งการเกิดใหม่ด้วยการจำกัดพื้นที่อยู่อาศัยบนขนชั้นนอกของลำไย ดังนั้นการรมแก๊สโอโซนจึงสามารถใช้เป็นอีกทางเลือกในการรมแทนแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะสามารถลดการเสื่อมสภาพของผลลำไยมีความปลอดภัยต่ออาหาร และยังให้ประโยชน์ที่สำคัญในด้านการยืดอายุลำไยสดได้

สุรินทราพร และคณะ (2559) ศึกษาผลของการรมโอโซนที่มีต่อการกำจัดแมลงศัตรูพืชที่เป็นปัญหาสำคัญในการส่งออกพริกสด เพราะแมลงวันผลไม้จะเข้าวางไข่ไว้ในพริกตั้งแต่ยังอยู่ในแปลงปลูก และหนอนแมลงจะฟักตัวเมื่ออยู่ในพริก ในการทดลองจะทำการบรรจุพริกที่ใช้ทดสอบภายในถังความดันในระบบ 12 kPa และใช้ความเข้มข้นของโอโซนที่ 41,136-83,147 ppm x เวลา และเวลาเวลาในการสัมผัสอโซนนาน 5-15 นาที ซึ่งเท่ากับค่า Dose ความเข้มข้นกับเวลา (CT) ในช่วง 389,480-1,168,440 ppm ผลการวิจัยพบว่าที่ความเข้มข้นของโอโซนและเวลาในช่วง 831,470-1,168,440 ppm สามารถใช้กำจัดหนอนแมลงวันผลไม้ในพริกได้ 100% และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq > 0.05$) ต่อค่าดัชนีสีแดงและความแน่นเนื้อของเนื้อพริกสด แต่มีผลทำให้ขั้วพริกมีสีคล้ำขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างพริกควบคุมที่ไม่ได้รับการรมแก๊สโอโซน

จากการตรวจสอบเอกสารและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเราได้พบว่าการรมแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้นและเวลาที่เหมาะสมกับผักและผลไม้จะส่งผลในทางบวก ทั้งในด้านการยับยั้งอัตราการเกิดของเชื้อราและพวกจุลินทรีย์ ทำให้ผักและผลไม้ที่ผ่านการรมด้วยแก๊สมีอายุการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นและยังสามารถรักษาคุณลักษณะทางกายภาพที่ดีขึ้นเช่น ขาวขึ้น เนื่องจากโอโซนมีการฟอกขาวให้กับผลไม้ที่ผ่านการรมแก๊สโอโซนมีอัตราการเกิดสีน้ำตาลบนผิวช้าลง และยังไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนในด้านลบ เช่น การสูญเสียน้ำหนักและการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อในผักและผลไม้ ดั้งนั้นจึงได้มีแนวคิดที่จะใช้ประโยชน์จากแก๊สโอโซนกับลำไยสดเพื่อใช้ยืดอายุการเก็บรักษาและศึกษาผลของการรมแก๊สโอโซนที่มีผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพของลำไยสด

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
1. Influence of fumigation with high concentrations of ozone gas on postharvest gray mold and fungicide residues on table grapes	องุ่นสด	อัตราการเกิดราสีเทาในองุ่นสดหลังการรมด้วยโอโซน	ทดลองรมโอโซนที่ 5,000 ppm เป็นเวลา 60 นาทีเพื่อควบคุมการเกิดราในห้องเก็บอุณหภูมิ 0.5 °C ในเชิงพาณิชย์ (Gableret al., 2010)
2. Effect of ozone application during cold storage of kiwifruit on the development of stem-end rot caused by Botrytis cinerea	กีวี	อัตราการเกิดสปอร์ของเชื้อราบนผลกีวีสดในห้องเก็บรักษา	ทดสอบการรมโอโซนที่ 0.3 ppm เป็นเวลา 0, 2, 8, 24, 72 และ 144 ชั่วโมงในห้องเก็บรักษาที่ (0 °C, RH 95%) (Ioannis et al., 2010)
3. Toxicity of ozone gas to conidia of Penicillium digitatum, Penicillium italicum, and Botrytis cinerea and control of gray mold on table grapes	องุ่นสด	อัตราการเกิดราสีเทาในองุ่นสดหลังการรมด้วยโอโซนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 35%, 75% และ 95%RH	ทดลองโดยการรมโอโซนที่ 800–2,000 ppm × h ที่ห้องความชื้นสัมพัทธ์ 35%, 75% และ 95%RH และรมโอโซนที่ 800 ppm × h เพื่อศึกษาอัตราการลดลงของเชื้อรา (Ozkan et al., 2011)

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
4. Effects of ozone treatment on postharvest carrot quality	แครอท	ผลของการรมโอโซนที่มีผลต่อความแน่นเนื้อ, น้ำหนักสูญเสีย, ปริมาณของแข็ง, การเปลี่ยนของค่า pH และสีของแครอทสด	การประยุกต์ใช้การรมแก๊สโอโซนกับแครอทที่ความเข้มข้น (0-5 mg L^{-1}) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของแครอทหลังจากรมโอโซน (Souza et al., 2018)
5. Effect of Gaseous Ozone Fumigation on Organophosphate Pesticide Degradation of Dried Chilies	พริกแห้ง	การใช้โอโซนรมกับพริกแห้งเพื่อลดยาฆ่าแมลงในพริก	รมโอโซนกับพริกแห้งที่อัตรา 5.5 g/h เพื่อลดยาฆ่าแมลงในพริกโดยใช้เวลาที่ 5 ถึง 30 นาที (Sintuya et al., 2018)
6. The Effect of packaging Materials on the quality of freshness of longan fumigated with medium concentration-ozone gas	ลำไยสด	เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการรมโอโซนที่ความเข้มข้นระดับกลางในการรักษาคุณภาพของลำไยที่บรรจุในประเภทของบรรจุภัณฑ์ที่มีวัสดุแตกต่างกัน	รมลำไยที่เข้มข้น 4,000 ppm เวลา 5 นาทีและนำมาบรรจุที่ - พลาสติก (PE), โพรพิลีน (PP) และห่อ flm (WF) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสนานเป็นเวลา 36 วัน (Chamnan et al., 2019)

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
7. Ozone Fumigation on Sulfur Dioxide treated longan for sulfur residue reduction and delaying of pericarp browning as well as disease control in longan fruit during storage	ลำไยสด	ผลของการรมควันโอโซนต่อการลดปริมาณของซัลเฟอร์และคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไย	ทดสอบรมโอโซน (O_3) ที่ความเข้มข้น 200 ppm เป็นเวลา 0 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 8 ชั่วโมงและ 10 ชั่วโมงเพื่อหาปริมาณกำมะถันตกค้างในเปลือกและก้าน (Aunchalee et al., 2018)
8. การใช้แก๊สโอโซนในการกำจัดหนอนแมลงวันผลไม้ (Bactrocera latifrons) ในพริก	พริกสด	การกำจัดหนอนแมลงวันผลไม้ด้วยการรมแก๊สโอโซน	ทดสอบที่ความเข้มข้นของโอโซนที่ 41,136-83,147 ppm x เวลา และเวลา 5-15 นาที ผลการวิจัยพบว่า ที่ CT ในช่วง 831,470-1,168,440 ppm x เวลา สามารถใช้กำจัดหนอนแมลงวันผลไม้ในพริกได้ 100% (สุรินทราพรและคณะ 2559)

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา
9. Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: A review	อาหาร	การกระทำของแอนติบอดีในโอโซน กลไกการยับยั้ง การยับยั้ง แบคทีเรีย การยับยั้ง เชื้อรา การยับยั้ง ไวรัส การยับยั้ง โปรโตซัว ข้อจำกัดของโอโซน Reactivity การเสื่อมสภาพคุณภาพอาหาร ความเป็นพิษ การใช้โอโซนในกระบวนการแปรรูปอาหาร เนื้อ Poultry ผักและผลไม้ อาหารแห้ง (Jin et al., 1999)

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
10 . Impact of gaseous ozone on microbial contamination and quality of fresh-cut durian	ทุเรียนสด	การลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์และการยืดอายุการเก็บรักษาทุเรียนสด	ทดสอบรมแก๊สแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้นที่ 0 (กลุ่มควบคุม), 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000 มิลกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 และ 5 นาทีต่อการกำจัดการปนเปื้อนของโคลิฟอร์ม (Sripong et al., 2022)
11. Quality deterioration of grape tomato fruit during storage after treatments with gaseous ozone at conditions that significantly reduced populations of Salmonella on stem scar and smooth surface	มะเขือเทศเชอร์รี่	การลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ของซัลโมเนลลาและจุลินทรีย์พื้นเมืองในมะเขือเทศเชอร์รี่	ทดสอบรมแก๊สโอโซนความเข้มข้น 1.71,3.43 และ 6.85 มิลกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 หรือ 4 ชั่วโมง และเก็บไว้ที่ 10 °C เป็นเวลา 21 วัน (Wang et al., 2019)
12. Potential of ozonated-air (OA) application to reduce the weight and volume loss in fresh figs (Ficus carica L.)	มะเดื่อสด	การเปลี่ยนแปลงในผิวหนังชั้นนอกของมะเดื่อสด	ทดสอบรมแก๊สโอโซนความเข้มข้น 15 ppm เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Afsah et al., 2021)

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
13 . Combination of ozone and packaging treatments maintained the quality and improved the shelf life of tomato fruit	มะเขือเทศ	การรมแก๊สโอโซนและบรรจุภัณฑ์แบบผสมผสานต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาผลมะเขือเทศ	ทดสอบรมแก๊สโอโซนและบรรจุภัณฑ์แบบผสมผสานโอโซนการรมเป็นเวลา 60 วินาที (Zainuri et al., 2018)
14. Effect of ozone in combination with some organic acids on the control of postharvest decay and pericarp browning of longan fruit	ลำไยสด	ผลของแก๊สโอโซนกับกรดซิตริก แอสคอร์บิก และออกซาลิก ต่อการเน่าเปื่อยหลังการเก็บเกี่ยวบนผิวเปลือกนอกของผลลำไย	ทดสอบรมแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 200 มล. ต่อ 1 เป็นเวลา 0 (กลุ่มควบคุม), 15, 30, 60 และ 120 นาที กับลำไยสดแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C (Whangchai et al., 2006)
15. Effects of High Concentration Ozone Gas Fumigation on the Quality and Shelf-life of Longan Fruit Effects of High Concentration Ozone Gas Fumigation on the Quality and Shelf-life of Longan Fruit	ลำไยสด	ผลกระทบของการรมด้วยโอโซนความเข้มข้นสูง (HCO) ต่ออายุการเก็บรักษาลำไยสด	ทดสอบรมแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 4,000, 8,500 และ 13,000 ppm เป็นเวลา 5 และ 15 นาที (Chamnan et al., 2021)

บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

ลำไยสด (เกรด 2A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 mm.) จากเกษตรกรในจังหวัดเชียงใหม่ โดยจะบรรจุใส่ตะกร้าและมีขนส่งโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการขนส่ง ลำและไยจะต้องผ่านการเก็บเกี่ยวมาแล้วไม่เกิน 3 วัน หลังจากนั้นจะลำไยสดนำมาตัดแต่งคัดแยกผลที่ติดโรคหรือมีเชื้อราออกทิ้ง จำนวน 10 กิโลกรัม ดังแสดงในภาพที่ 5

ภาพที่ 5 การเตรียมลำไยสด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
2. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
3. เครื่องวัดสี
4. เครื่องมือวัดลักษณะทางประสาทสัมผัส
5. เครื่องวัดความเข้มข้นของแก๊สโอโซน
6. ตู้แช่เย็น

3.3 การคำนวณความเข้มข้น O_3

ในการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัด O_3 ในห้องปฏิบัติการ ดำเนินการโดยปล่อย O_3 เข้าไปในห้องรม โดยทำการปรับความเข้มข้นให้อยู่ในช่วง 500 ถึง 3,500 ppm ซึ่งในการปรับระดับความเข้มข้นของ O_3 สามารถอ้างอิงได้จากการคำนวณอัตราการปล่อยแก๊สของเครื่องกำเนิด O_3 เทียบกับเวลา โดยคำนวณได้จากสมการ 1

$$t_g = \frac{0.00214 V_r C}{G} \quad (1)$$

เมื่อ.....

t_g = เวลาในการปล่อย O_3 จากเครื่องกำเนิด (นาที)

V_r = ปริมาตรของห้องรม O_3 (m^3)

C = ความเข้มข้นของ O_3 ที่ต้องการ (ppm)

G = อัตราการผลิต O_3 จากเครื่องกำเนิด (มิลลิกรัม/นาที)

3.4 การคำนวณการดูดซับแก๊สโอโซนในลำไยสด

หลังจากได้ผลของการดูดซับแก๊สออกมาเป็นค่าในหน่วยหนึ่งต่อล้านส่วน หรือ ppm จากนั้นจะนำมาคำนวณเทียบในหน่วยการดูดซับโอโซนในหน่วยมิลกรัมต่อปริมาณของลำไย 10 กิโลกรัม จากสมการการแปลงหน่วยความเข้มข้นจาก ppm เป็น mg/m^3 ดังแสดงในสมการที่ 2

$$C_{mg/m3} = \frac{C_{ppm} \times MW}{24.45} \quad (2)$$

เมื่อ.....

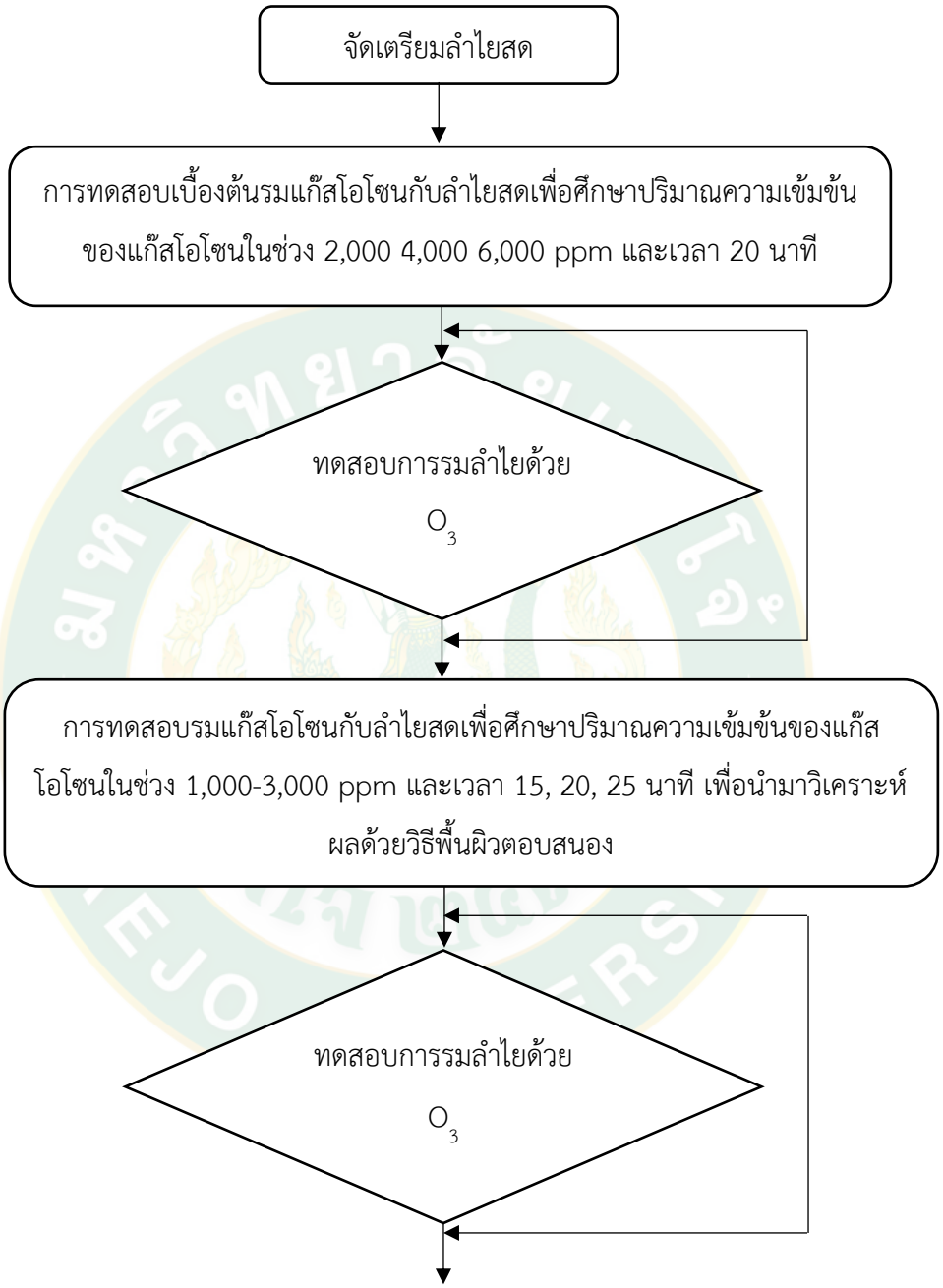
$C_{mg/m3}$ = ความเข้มข้นของแก๊สโอโซนในหน่วยน้ำหนัก (mg/m^3)

C_{ppm} = ความเข้มข้นของแก๊สโอโซนในหน่วยน้ำหนัก (ppm)

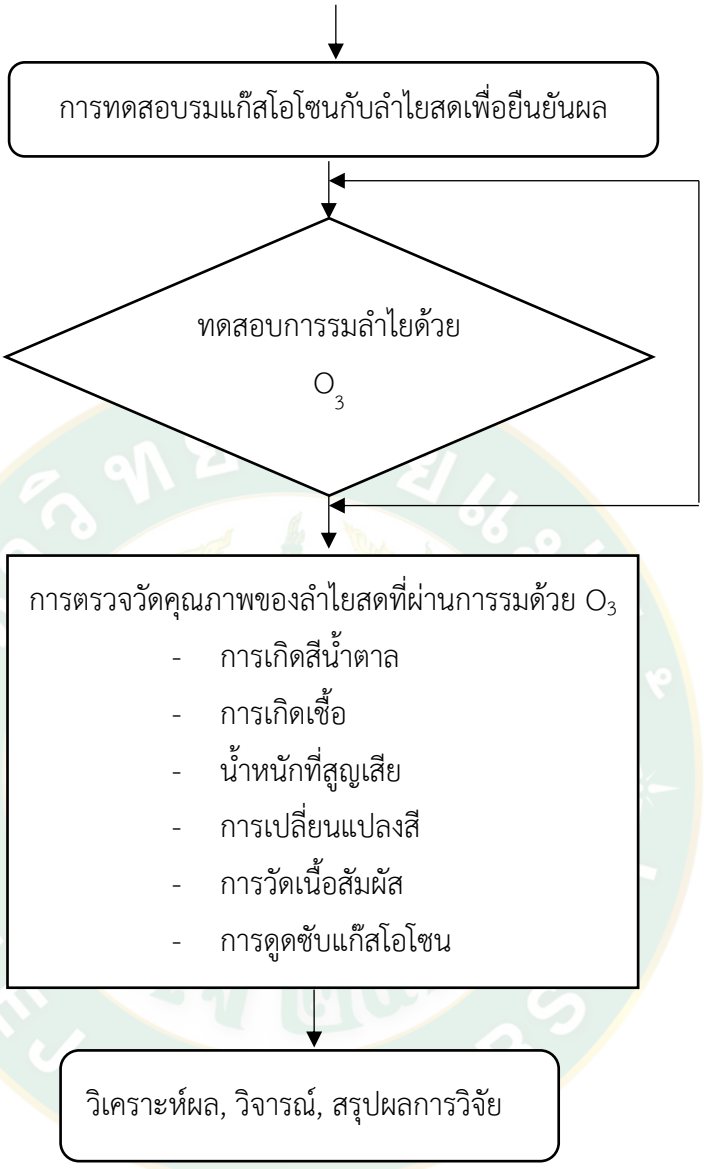
MW = น้ำหนักโมเลกุลของ O_3 (g)

24.45 = ปริมาตรของ O_3 ในหน่วยลิตร

3.5 วิธีดำเนินการวิจัย



3.5 วิธีดำเนินการวิจัย (ต่อ)



ภาพที่ 6 วิธีดำเนินการวิจัยการปรับปรุงระบบการรม

3.6 การเตรียมตัวอย่าง

คัดเลือกลำไยที่ได้คุณภาพและไม่มีการเน่าเสียหรือมีการเกิดสีน้ำตาลบนผิวเปลือกของลำไย หลังจากนั้นนำมาจัดเรียงในตะกร้าขนาด 10 กิโลกรัมก่อนนำเข้าตู้รมและทำการจัดเรียงสลับตะกร้าเปล่าและตะกร้าที่มีลำไย ก่อนที่จะทำการรมด้วยโอโซน ดังภาพที่ 7

ภาพที่ 7 การตัดแต่งและจัดเรียงเพื่อเตรียมลำไยเข้าตู้รม

ภาพที่ 8 ตะกร้าลำไยขนาด 25x38x12 cm^3

ภาพที่ 9 การเตรียมลำไยจัดเรียงในตะกร้า

3.7 การทดสอบ Pre-test เพื่อหาช่วงของ Dose (Concentration x Time)

การทดสอบ Pre-test เพื่อหาช่วงของ Dose (Concentration x Time) ที่เหมาะสมโดยวางแผนการทดลองที่มีแผนแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design ; RCBD

1. ตัวแปรคงที่ 4 ตัวแปร คือ

- ชนิดของตะกร้า 1 แบบ คือตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมคางหมู
- ขนาดลำไยสด 10 kg
- เวลาในการม 1 ระดับ ที่ 20 นาที
- ความเร็วลมผ่านตะกร้าลำไยที่ 0.5 ms^{-1}

2. ตัวแปรต้น 1 ปัจจัย คือ ความเข้มข้น 3 ระดับ ที่ 2,000 4,000 และ 6,000 ppm ทำซ้ำการทดลองละ 3 ซ้ำ

3. ตัวแปรตาม จะทำการวิเคราะห์คุณภาพผลลำไย หลังจากรมแก๊สโอโซนทันที และหลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4±1 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 95% ทุก ๆ 3 วัน

4. การวิเคราะห์ผล คือเลือกตัวอย่างที่คุณภาพดีที่สุด 1 Dose (Concentration x Time) ที่มีผลทำให้ลำไยมีอายุการเก็บรักษานาที่สุดโดยมีพื้นที่การเกิดบัตรการของโรคต่ำที่สุด

5. การรมแก๊สโอโซนกับลำไยสด โดยการรมลำไยสดด้วยแก๊สโอโซนจะทำการจัดเรียงลำไยจำนวน 3 ตะกร้าและหลังจากนั้นนำมาจัดวางเรียงเป็นแบบแนวตั้งภายในตู้รมแก๊สโอโซนถูกสร้างขึ้นที่อัตราการผลิตโอโซน 5.5 g /hr. ผ่านเครื่องกำเนิดโอโซนโดยใช้เครื่อง Corona discharger ที่มีอัตราการไหลเข้าของแก๊สออกซิเจน 7.5 L/min และระบบจะเชื่อมต่อกับห้องรมแก๊ส ภายในตู้รมจะมีระบบการหมุนเวียนอากาศแบบแนวตั้งโดยจะใช้การหมุนเวียนที่ความเร็วลม 0.5 m/s ตู้รมโอโซนจะเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องวัดความเข้มข้นของแก๊สโอโซนเมื่อทำการจัดเรียงลำไยเสร็จแล้วจะทำการปิดตู้และเริ่มเปิดแก๊สโอโซน โดยตัวอย่างลำไยสดจะถูกรมด้วยแก๊สโอโซนที่มีความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm เป็นเวลา 20 นาทีหลังจากนั้นจะทำการดูดแก๊สโอโซนออกจากตู้และนำลำไยออกมาระบายความร้อน

6.การเก็บตัวอย่างลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมด้วยโอโซนจะถูกแยกออกเป็นตัวควบคุม หลังจากการรมด้วยแก๊สโอโซนตัวอย่างลำไยสดทั้งหมดจะบรรจุในถุงพลาสติก High Density Polyethylene และเก็บรักษาในตู้ทำความเย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 1 °C และจะทำการวัดคุณภาพของลำไยสดในทุก ๆ 3 วัน ตลอดอายุการเก็บรักษา

3.8 การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

1. การกำหนดปัจจัย โดยได้กำหนดปัจจัย ตัวแปรตอบสนอง และคัดเลือกวิธีการออกแบบการทดลองในการออกแบบการทดลอง (design of experiment) เราอาจต้องการศึกษากระบวนการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (quadratic relationship) กล่าวคือ เมื่อตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งเพิ่มหรือลดค่า Response อาจเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งแทน ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ผู้ทดลองได้เลือกออกแบบการทดลองด้วย Central Composite Design หรือ CCD เพื่อนำมาศึกษา 2 ตัวแปรคือความเข้มข้นของโอโซน และเวลาที่ใช้ในการรมโอโซน ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design โดยกำหนดให้ ตัวแปร C คือความเข้มข้นของโอโซน, T คือเวลาที่ใช้ในการรมโอโซน โดยที่ขอบเขตของปัจจัย 3 ระดับ จะประกอบไปด้วยระดับสูง (+1) กลาง (0) ต่ำ (-1) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การกำหนดปัจจัยและขอบของระดับปัจจัย

สัญลักษณ์	ปัจจัย	หน่วย	ต่ำ	กลาง	สูง
C	ความเข้มข้นของโอโซน	ppm	1,000	2,000	3,000
T	เวลาที่ใช้ในการรมโอโซน	min	15	20	25

ซึ่งการกำหนดค่าปัจจัย สำหรับการศึกษานั้นจะได้ มาจากการศึกษาเอกสารข้อมูลและเอกสารที่เกี่ยวข้อง และได้จากการทาการทดลองเบื้องต้น ว่าเป็นช่วงที่สูงสุดและต่ำสุดที่สามารถทำการทดลองรมโอโซนลำไยได้โดยที่สามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษาลำไยสดได้ ซึ่งทางผู้วิจัยต้องการที่จะกำหนดช่วงระดับขอบเขตของปัจจัยให้มีค่ากว้าง เพื่อที่จะได้เห็นถึงความแตกต่างของแต่ละปัจจัยได้อย่างชัดเจน โดยดูผลที่เกิดขึ้นจากการศึกษาข้อ มูลเบื้องต้นและการทาการทดลองเบื้องต้นการกำหนดช่วงระดับปัจจัย ของแต่ละปัจจัยในระดับต่ำและระดับสูงนั้นทางผู้วิจัย ได้กำหนดช่วงขอบเขตดังนี้

- ความเข้มข้นของโอโซน จากการทดลองเบื้องต้นได้ทำการทดลองโดยทำการรมโอโซนกับลำไยสดที่ความเข้มข้น 2,000 และ 6,000 ppm พบว่าความเข้มข้นที่ 2,000 ppm สามารถยืดอายุการเก็บรักษาลำไยได้และลำไยไม่สูญเสียคุณภาพแต่ที่ความเข้มข้น 6,000 ppm ทำให้ลำไยสูญเสียคุณภาพหลังจากการรมจริงได้มีแนวคิดที่จะเลือกใช้ความเข้มข้นที่ไม่เกิน 6,000 ppm และกำหนด 2,000 ppm เป็นค่ากลางในการทดลองครั้งนี้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโอโซนที่มีผล

ต่อลำไยจึงได้เลือกค่าที่มีความห่างกันมากพอสมควรเพื่อให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน

- เวลาที่ใช้ในการรมโอโซน จากการทดลองเบื้องต้นได้ทำการทดลองโดยทำการรมโอโซนกับลำไยสด โดยใช้เวลาในการรมเท่ากับ 15 นาทีและ 25 นาทีพบว่าเวลาในการที่ลำไยสัมผัสกับแก๊สโอโซนความเข้มข้นสูงยิ่งนานยิ่งทำให้สูญเสียคุณภาพจึงเลือกกำหนดเวลาต่ำสุดในการรมโอโซนเท่ากับ 15 นาทีและมีระดับความห่าง 5 นาที

โดยในการศึกษาจะเลือกใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง Central Composite Design (หรือ box-wilson design) เป็นการทดลองที่ 3 ระดับโดยมีระดับขอบเขตของปัจจัยซึ่งประกอบด้วยระดับสูงระดับต่ำและจุดกึ่งกลางโดยจะทำการทดลองชุดควบคุมคือลำไยที่ไม่ผ่านการรมโอโซน โดยจะทำการทดลอง 1 ซ้ำและมีจำนวนการทดลอง 13 การทดลองดังแสดงในตารางที่ 5 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของรมโอโซนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดด้วยระบบบังคับอากาศแบบแนวตั้ง โดยที่ให้ผลตอบคือ การเกิดเชื้อ และเมื่อได้ผลของการตอบสนองของสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสดนำมายืนยันผลและศึกษาผลของการมรมโอโซนกับลำไยสดที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้อาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลโดย ใชวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) และการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design สำหรับ 2 ปัจจัย จำนวนทั้งสิ้น 13 การทดลอง โดยเป็นการทดลอง ที่ตำแหนงกึ่งกลาง ซึ่งทำซ้ำจำนวน 5 ซ้ำผลการทดลองที่ตำแหนงจุดกึ่งกลางจะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความเหมาะสมของรูปแบบจำลอง ทางคณิตศาสตรกับผลการทดลองโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตรที่ได้แสดงดังสมการที่ 3

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} + \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j=1}^{n} \beta_{ii} X_i X_j \qquad (3)$$

เมื่อ β_0 , β_i , β_{ii} คือค่าสัมประสิทธิ Xi คือตัวแปรอิสระปัจจัยที่ต้องการศึกษาในการรมแก๊สโอโซนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดคือค่าสัมประสิทธิ Xi คือตัวแปรอิสระปัจจัยที่ตองการศึกษาในการรมแก๊สโอโซนที่ระดับความเข้มข้น (X1) และเวลาที่ใชในการรมแก๊สโอโซน (X2) โดยกำหนดคาของตัวแปรตนดังนี้ X1 มีคาเทากับ 1,000 2,000 และ 3,000 ppm และ X2 มีคาเทากับ 15, 20 และ 25 นาทีซึ่งคาตัวแปรตนเหล่านี้ได้ทำการศึกษาเบื้องตน (preliminary) และตัวแปรตามที่ตองการศึกษาคืออัตราการเกิดเชื้อรา (Y) แสดงรายละเอียดของตัวแปรตนที่ใชในการออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 5 จำนวนซ้ำและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

	ระดับปัจจัย	
Run	C (ppm)	T (min)
1	1000 (1)	15 (1)
2	3000 (1)	15 (-1)
3	1000 (1)	25 (1)
4	3000 (1)	25 (1)
5	600 (+1)	20 (1)
6	3500 (-1)	20 (+1)
7	2000 (-1)	13 (-1)
8	2000 (+1)	27 (+1)
9	2000 (+1)	20 (1)
10	2000 (1)	20 (+1)
11	2000 (1)	20 (1)
12	2000 (1)	20 (1)
13	2000 (+1)	20 (+1)

2. การรมแก๊สโอโซนกับลำไยสด โดยการรมลำไยสดด้วยแก๊สโอโซนจะทำการจัดเรียงลำไยจำนวน 3 ตะกร้าและหลังจากนั้นนำมาจัดวางเรียงเป็นแบบแนวตั้งภายในตู้รมแก๊สโอโซนถูกสร้างขึ้นที่อัตราการผลิตโอโซน 5.5 g /hr. ผ่านเครื่องกำเนิดโอโซนโดยใช้เครื่อง Corona discharger ที่มีอัตราการไหลเข้าของแก๊สออกซิเจน 7.5 L/min ภายในตู้รมจะมีระบบการหมุนเวียนอากาศแบบแนวตั้งโดยจะใช้การหมุนเวียนที่ความเร็วลม 0.5 m/s เมื่อทำการจัดเรียงลำไยเสร็จแล้วจะทำการปิดตู้และเริ่มเปิดแก๊สโอโซน โดยตัวอย่างลำไยสดจะถูกรมด้วยแก๊สโอโซนที่มีความเข้มข้นในช่วง 1,000 ถึง 3,000 ppm เป็นในช่วงเวลา 15-25 นาทีดังตารางที่ 4

3. ศึกษาอายุการเก็บรักษาหลังจากรมเสร็จจะทำการดูดแก๊สโอโซนออกจากตู้และนำลำไยที่ผ่านการรมโอโซนแล้วออกมาระบายความร้อน และเก็บตัวอย่างส่วนลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมด้วยโอโซนจะถูกแยกออกเป็นตัวควบคุม หลังจากการรมด้วยแก๊สโอโซนตัวอย่างลำไยสดทั้งหมดจะบรรจุในถุงพลาสติก High Density Polyethylene ที่เจาะรูจำนวน 6 รูรอบถุงและเก็บรักษาในตู้ทำความเย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 1 °C โดยคุณภาพของลำไยสดจะถูกตรวจวัดในทุก ๆ 3 วัน ตลอดอายุการเก็บรักษา

3.9 การตรวจสอบและยืนยันผล

หลังจากการนำผลการทดลองไปทำการวิเคราะห์ผลเพื่อศึกษา 2 ปัจจัยคือความเข้มข้นของแก๊สโอโซนและเวลาในการรมที่ส่งผลต่อการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสดที่ส่งผลต่อคุณภาพอายุการเก็บรักษาลำไยสดด้วยการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยเราจะได้ช่วงในการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสดจากการทำนายด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อนำมาทดสอบและยืนยันผลเพื่อพิสูจน์ผลของการทำนายจากโปรแกรม โดยเราจะนำผลการทำนายที่ได้มาทำการทดลองรมแก๊สโอโซนกับลำไยสดซ้ำอีกจำนวน 3 ครั้งและนำมาตรวจสอบผลของการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสดเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา

3.10 การวิเคราะห์การดูดซับแก๊สโอโซนในลำไยสด

การตรวจสอบการดูดซับแก๊สโอโซนของลำไยสดขณะรมแก๊สโอโซนร่วมกับระบบบังคับอากาศเพื่อศึกษาปริมาณการใช้แก๊สโอโซนขณะที่รมลำไยที่ส่งผลต่อการยืดอายุการเก็บรักษาลำไย ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาปริมาณการดูดซับแก๊สโอโซนกับลำไยสดขณะรมโอโซนโดยเลือกจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในรมคือความเข้มข้นแก๊สเพื่อหาปริมาณแก๊สที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการรมลำไยโดยจะทำการปล่อยแก๊สเข้าไปภายในตู้รม หลังจากนั้นทำการตรวจวัดการลดลงของแก๊สโอโซนขณะรมแก๊สโดยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบกันทั้งในกระบวนการรมตู้เปล่าที่ไม่มีลำไย ลำไยแห้ง และลำไยสด หลังจากได้ผลของการลดลงของแก๊สโอโซนในหน่วย ppm หลังจากนั้นจะนำมาคำนวณเทียบในหน่วยการดูดซับโอโซนในหน่วยมิลกรัมต่อปริมาณของลำไย 10 กิโลกรัม

3.11 การวิเคราะห์คุณภาพลำไยสด

1. การวิเคราะห์ค่าสี การวิเคราะห์คุณภาพด้านสีของเปลือกนอกและเปลือกด้านในของลำไยโดยใช้เครื่องวัดสีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น Mini Scan XE Plus การวิเคราะห์สีจะวิเคราะห์ด้วย 37 ระบบ CIE โดยการวิเคราะห์วัดสีในเทอมของค่าความสว่าง (L*) ค่าสีแดงและสีเขียว (a*) และค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (b*) เพื่อเปรียบเทียบค่าสีของลำไยที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนและลำไยสดที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนของลำไยในระยะเวลาการรักษาที่แตกต่างกัน และระดับโอโซนที่ต่างกัน

2. การวิเคราะห์การเกิดเชื้อ การวิเคราะห์การเกิดเชื้อบริเวณเปลือกจะใช้หลักการเปรียบเทียบและประมาณค่าโดยจะกำหนดระดับในการเกิดเชื้อเป็น 6 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 6 (Chamnan et al., 2019)

- ระดับที่ 1 L0 = ไม่มีการเกิดเชื้อ
- ระดับที่ 2 L1 = มีการเกิดเชื้อ 1-20%
- ระดับที่ 3 L2 = มีการเกิดเชื้อ 21-40%
- ระดับที่ 4 L3 = มีการเกิดเชื้อ 41-60%
- ระดับที่ 5 L4 = มีการเกิดเชื้อ 61-80%
- ระดับที่ 6 L5 = มีการเกิดเชื้อ 81-100%

ตารางที่ 6 ระดับในการเกิดเชื้อมีลักษณะและระดับค่าที่กำหนด

L0	L1	L2	L3	L4	L5
ไม่มีการเกิดเชื้อ	1-20%	21-40%	41-60%	61-80%	81-100%

ที่มา: Chamnan et al. (2019)

3. การวิเคราะห์การเกิดสีน้ำตาล การวิเคราะห์การเกิดสีน้ำตาลบริเวณเปลือกจะใช้หลักการเปรียบเทียบและประมาณค่าโดยจะกำหนดระดับในการเกิดสีน้ำตาลในลำไยเป็น 5 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 7

- ระดับที่ 1 L1 = มีการเกิดสีน้ำตาล 1-20%
- ระดับที่ 2 L2 = มีการเกิดสีน้ำตาล 21-40%
- ระดับที่ 3 L3 = มีการเกิดสีน้ำตาล 41-60%
- ระดับที่ 4 L4 = มีการเกิดสีน้ำตาล 61-80%
- ระดับที่ 5 L5 = มีการเกิดสีน้ำตาล 81-100

ตารางที่ 7 ระดับในการเกิดสีน้ำตาลมีลักษณะและระดับค่าที่กำหนด

L1	L2	L3	L4	L5
1-20%	21-40%	41-60%	61-80%	81-100%

ที่มา: Chamnan et al. (2019)

4. การวิเคราะห์น้ำหนักสูญเสีย การประเมินการสูญเสียน้ำหนักของลำไยในระหว่างเก็บรักษาที่ตู้แช่หลังจากผ่านการรมโอโซน การประเมินเปอร์เซ็นต์การสูญเสียผลลำไยคำนวณจากน้ำหนักผลลำไยเริ่มต้นคือ 300 g และนำเข้าไปคำนวณดังสมการที่ 4

$$\%Weight\ loss = \frac{Weigth\ loss}{Initial\ weight} x100 \quad (4)$$

เมื่อ.....

Weight loss = น้ำหนักที่สูญเสียในระยะเวลาการเก็บทุก ๆ 3 วัน

Initial weight = น้ำหนักเริ่มต้นของลำไยในวันที่ 0

5. การประเมินและวิเคราะห์เนื้อสัมผัส การประเมินและวิเคราะห์เนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่อง (Texture Analyser) รุ่น TA.XT.plus โดยการใช้โปรแกรม Texture Exponent 32 และใช้หัววัด (2ms-P/2) กำหนดค่าแรงกด (Strain) 20% เป็นการทดสอบด้วยวิธี Penetration Test กำหนดค่าทดสอบดังนี้

Pre-test = 3 mm/s

Test = 3 mm/s

Post-test = 10 mm/s

โดยจะทำการทดสอบกับลำไยสดตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนและตัวอย่างลำไยสดที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนเพื่อหาค่าความแน่นเนื้อของลำไยในระยะเวลาการรักษาที่แตกต่างกัน

3.12 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์โดยอาศัยหลักวิชาการทางสถิติของคุณภาพทางกายภาพของลำไยสดโดยใช้วิธีการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ปัจจัยโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองในการออกแบบการทดลอง (design of experiment) และนำค่าการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบ (ANOVA) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS 26.0 (Statistical Package for the Social Sciences) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างแต่ละชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ซึ่งพิจารณาค่าที่ความเชื่อมั่น 95% และค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ $p<0.05$

3.13 สถานที่ดำเนินการวิจัย

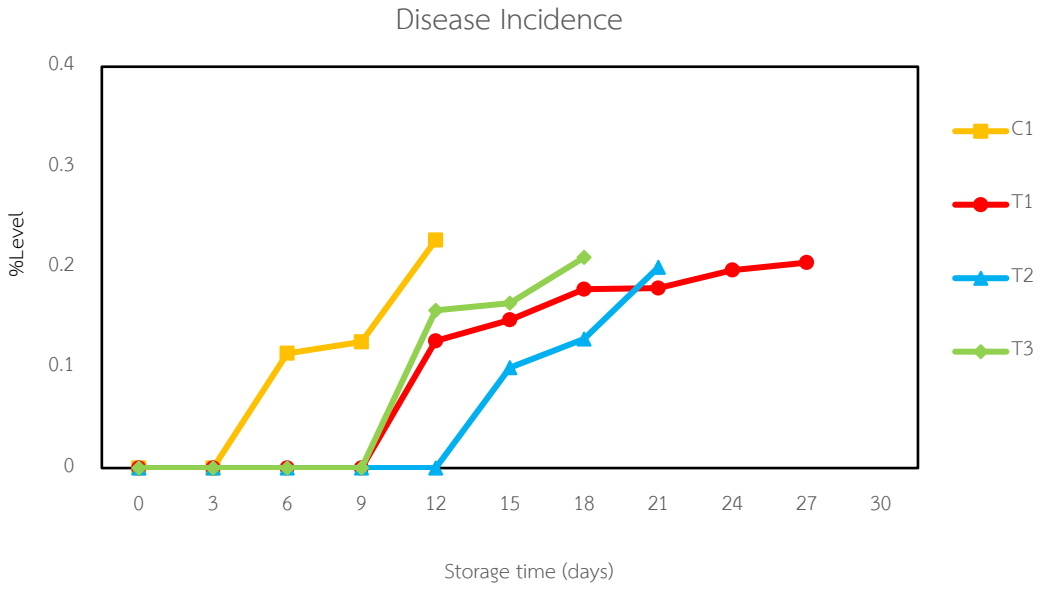
ดำเนินการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการคุณลักษณะทางกายภาพ 1 อาคารเรียนรวมสาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การทดสอบ Pre-test เพื่อหาช่วงของ Dose (Concentration x Time)

4.1.1 ผลของโอโซนต่อการเกิดเชื้อราในผลลำไย

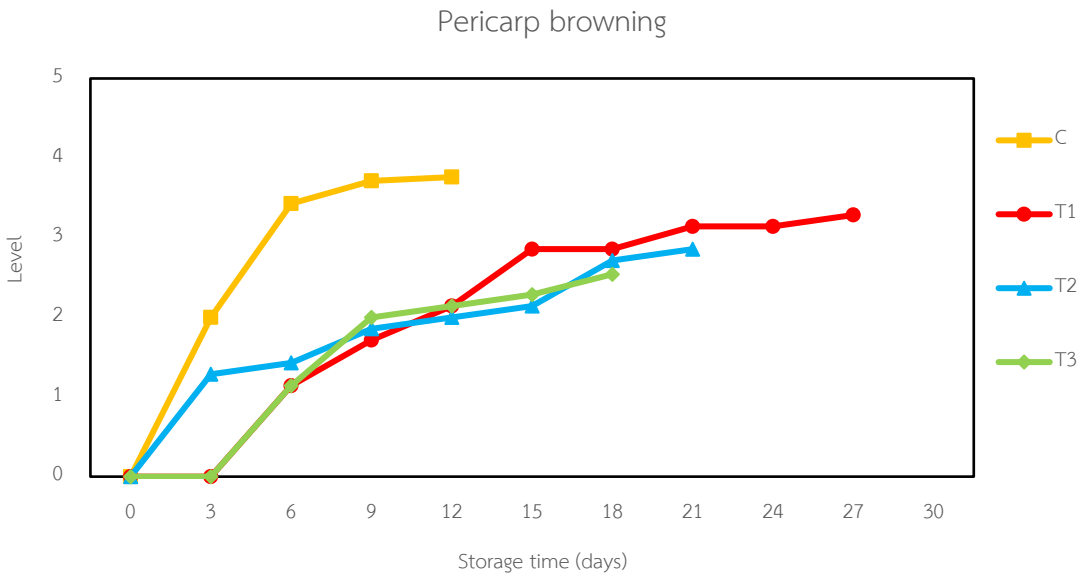
พารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับอายุการเก็บรักษาลำไยสด เพราะการเกิดเชื้อราสามารถกำหนดระยะเวลารักษาคุณภาพของลำไยได้เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แสดงดังในภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่าการเกิดเชื้อราในตัวอย่างควบคุมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 12 วัน และตัวอย่างลำไยที่ได้รับการรมด้วยโอโซน มีการเกิดเชื้อราน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการบำบัดเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 ± 1 °C สิ่งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Gabler et al., 2010) ที่พบว่าการมด้วยโอโซนช่วยลดการเกิดเชื้อราได้ถึง 65% ในองุ่น และนักวิจัยอื่น ก็ได้รายงานด้วยว่าการรมโอโซนช่วยลดจำนวนจุลินทรีย์ในผลไม้ลงได้ เช่น ผลไม้กีวี (Ioannis et al., 2010) แอปเปิ้ลฟูจิ (Sheng et al., 2018) เนื่องจาก โอโซนเข้าไปทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ ในการศึกษาผลลำไยเมื่อเปรียบเทียบกับโอโซนที่ผ่านการรมแก๊สโอโซนและที่ไม่ไม่ผ่านการรมแก๊สโอโซน ส่งผลให้ลำไยที่ผ่านการรมโอโซนแล้วมีการเกิดเชื้อราน้อยกว่า



ภาพที่ 10 ผลของโอโซนต่อการเกิดเชื้อราในผลลำไย
เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิเก็บรักษา 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)

4.1.2 ผลของโอโซนต่อการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือก

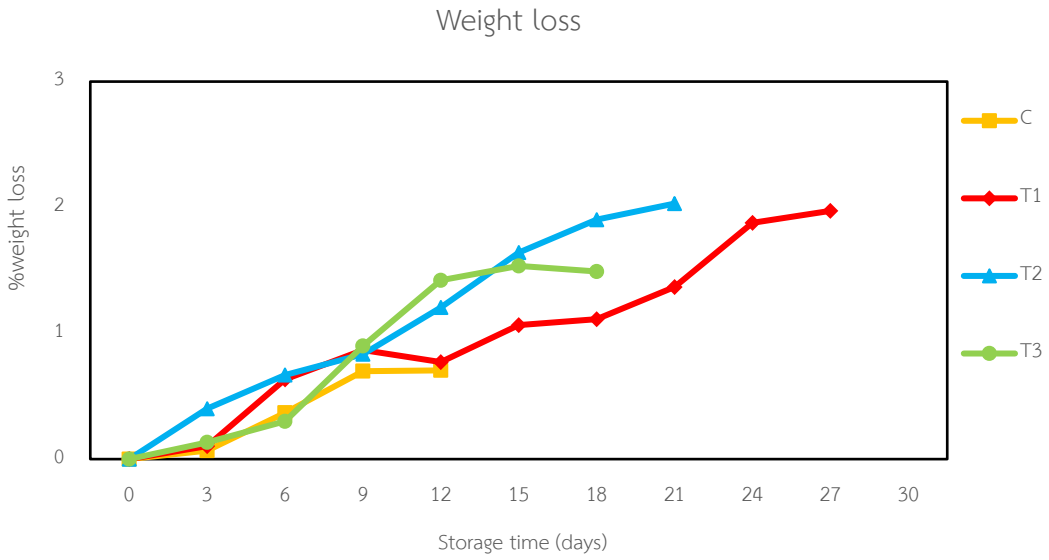
การเกิดสีน้ำตาลบนเปลือก แสดงด้วยดัชนีการเกิดสีน้ำตาล แสดงดังในภาพที่ 11 การรมโอโซนผลลำไยสดจะช่วยลดดัชนีการเกิดสีน้ำตาลได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนจะเห็นได้ว่าลำไยที่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนที่ 2,000 4,000 และ 6,000 ppm มีการเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 ± 1 ℃ ในวันที่ 0 ผลลำไยสดที่รมด้วยแก๊สโอโซนที่ความเข้ม 6,000 ppm แสดงให้เห็นว่ามีสีน้ำตาลในบนเปลือกน้อยกว่าผลลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนแต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเห็นได้ว่ามีการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นการรมโอโซนที่ความเข้มข้นสูงทำให้ลำไยมีการสูญเสียคุณภาพจึงทำให้มีการเกิดสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วเมื่อเก็บไว้เป็นเวลา 12 วันสอดคล้องกันกับ (Whangchai et al., 2006) ลำไยสดที่ได้รับโอโซนร่วมกับกรดออกซาลิกจะมีการเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมแก๊สโอโซน



ภาพที่ 11 ผลของโอโซนต่อเกิดสีน้ำตาลบนเปลือกในผลลำไย เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิเก็บรักษา 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)

4.1.3 ผลของโอโซนต่อการสูญเสียน้ำหนัก

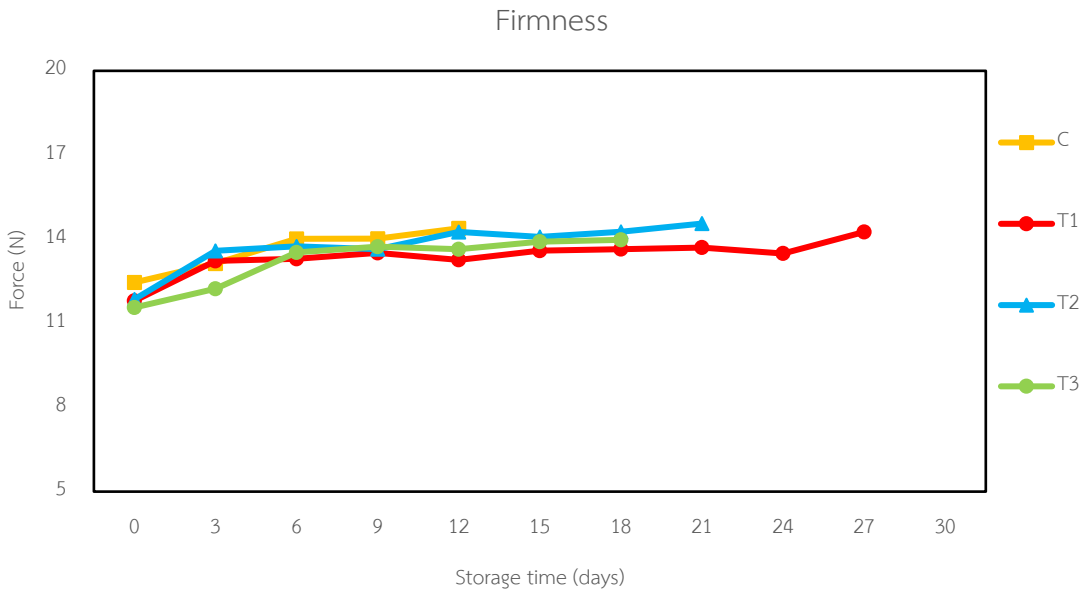
การรมด้วยแก๊สโอโซนไม่ได้ส่งผลอย่างชัดเจน ต่อการสูญเสียน้ำหนักของผลลำไยสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ถูกรมด้วยแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm เป็นเวลา 20 นาที ในช่วง 18 วันในการเก็บรักษาผลลำไยที่ได้รับโอโซนจะมีน้ำหนักลดลงมากกว่าผลไม้ที่ไม่ได้รับการรมด้วยโอโซน ตัวอย่างผลไม้ที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน 6,000 ppm มีน้ำหนักลดลงสูงสุด 1.42% ใน 18 วัน แสดงดังในภาพที่ 12 ผลการทดลองเหล่านี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ (Chamnan et al., 2021) ที่ว่าการรมด้วยแก๊สโอโซนในสภาวะความดันเหนือบรรยากาศเล็กน้อยไม่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของผลลำไยสด และ (Whangchai et al., 2006) ลำไยสดที่ได้รับโอโซนจะไม่มีการสูญเสียน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



ภาพที่ 12 ผลของโอโซนต่อการสูญเสียน้ำหนักในผลลำไย
เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิเก็บรักษา 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)

4.1.4 ผลของโอโซนต่อความแน่นเนื้อ

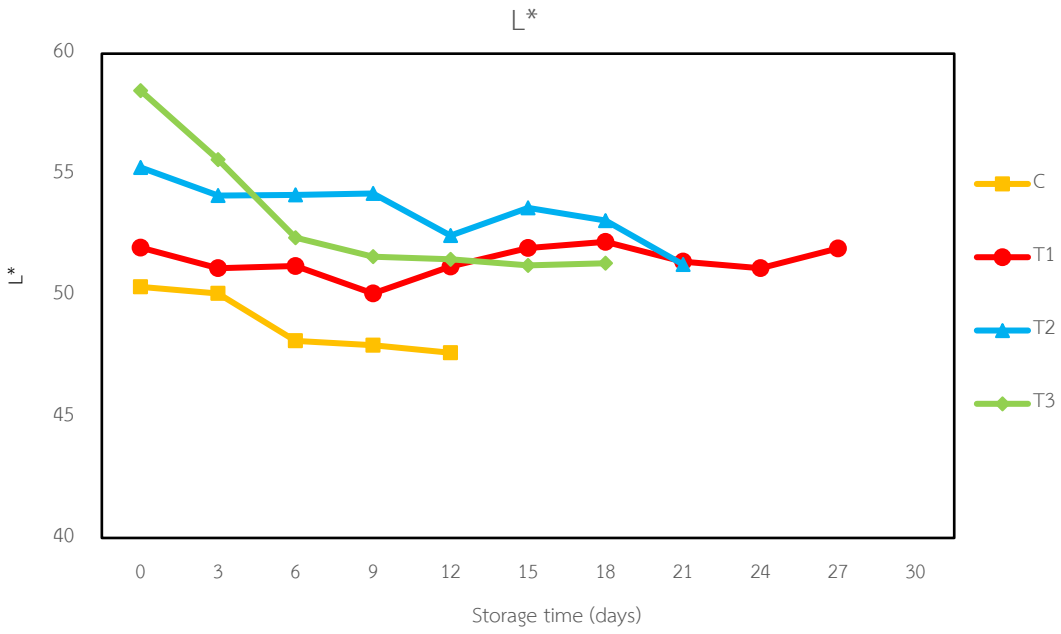
ความแน่นเนื้อสามารถกำหนดเป็นพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับความแข็งแรงของผนังเซลล์ของผลลำไยซึ่งอาจมีผลต่อการรมด้วยแก๊สโอโซน พบว่าการรมด้วยแก๊สโอโซนไม่ได้ส่งผลต่อความแน่นเนื้อลำไยสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1 ° C ความแน่นเนื้อของลำไยอยู่ในช่วง 11.56 ถึง 14.55 N แสดงดังในภาพที่ 13 ผลลำไยสดมีเปลี่ยนความแน่นเนื้อเพียงเล็กน้อย แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ผลการทดของสอดคล้องกับ(Sripong et al., 2022) รายงานว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในค่าความแน่นเนื้อระหว่างทุเรียนที่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนและไม่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนไม่ส่งผลต่อคุณภาพความแน่นเนื้อ เช่นเดียวกับ (Souza et al., 2018) ที่สรุปว่าผลของการรมโอโซนไม่ได้ส่งผลอย่างต่อคุณภาพความแน่นของผักและผลไม้



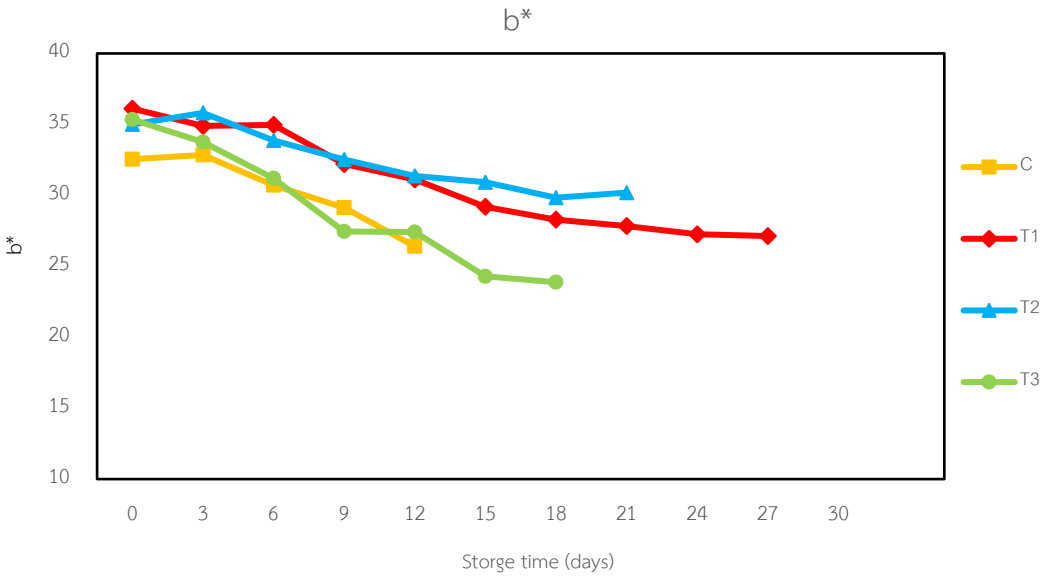
ภาพที่ 13 ผลของโอโซนต่อความแน่นเนื้อในผลลำไย
เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิเก็บรักษา 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)

4.1.5 ผลของโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงของสี

สีเป็นปัจจัยหนึ่งในการตัดสินคุณลักษณะทางกายภาพสำหรับการซื้อขายผลลำไยสดพบว่าทันทีหลังจากการรมโอโซน (วันที่ 0) ผลลำไยที่ควบคุมมีค่า L * และ b * เพิ่มขึ้นจาก 50.37 และ 32.54 เพิ่มขึ้นเป็น 58.47 และ 36.11 สาเหตุที่ค่า L * ของลำไยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เนื่องจากผลจากฤทธิ์การฟอกขาวของโอโซนที่มีความเข้มข้นสูง ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1 ° C ลำไยที่รมแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm มีค่า L * และ b * สูงกว่าลำไยควบคุม และมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานกว่าลำไยคบคุมที่มีสีน้ำตาลเข้มโดยจะเห็นได้ว่าลำไยที่ผ่านการรมที่ความเข้ม 6,000 ppm จะมีค่า L* สูงที่สุดแต่มีค่า b* ต่ำสุด ผลเนื่องจากเกิดจากเนื่องจากผลจากฤทธิ์การฟอกขาวของโอโซนที่มีความเข้มข้นสูง แสดงดังในภาพที่ 14 ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chamnan et al., 2019) ซึ่งรมแก๊สโอโซนกับลำไยภายใต้สภาวะความดันสูงกว่าบรรยากาศและเก็บในบรรจุภัณฑ์มี L * และ b * (สีเหลืองน้ำตาลอ่อน) สูงกว่าลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซนและอายุการเก็บรักษานานกว่าลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซนเช่นเดียวกัน และผลของสีการฟอกขาวของโอโซนเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากฤทธิ์ของโอโซนส่งผลให้เปลือกของลำไยสว่างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 14 และภาพที่ 15 เมื่อเปรียบเทียบกับลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซน



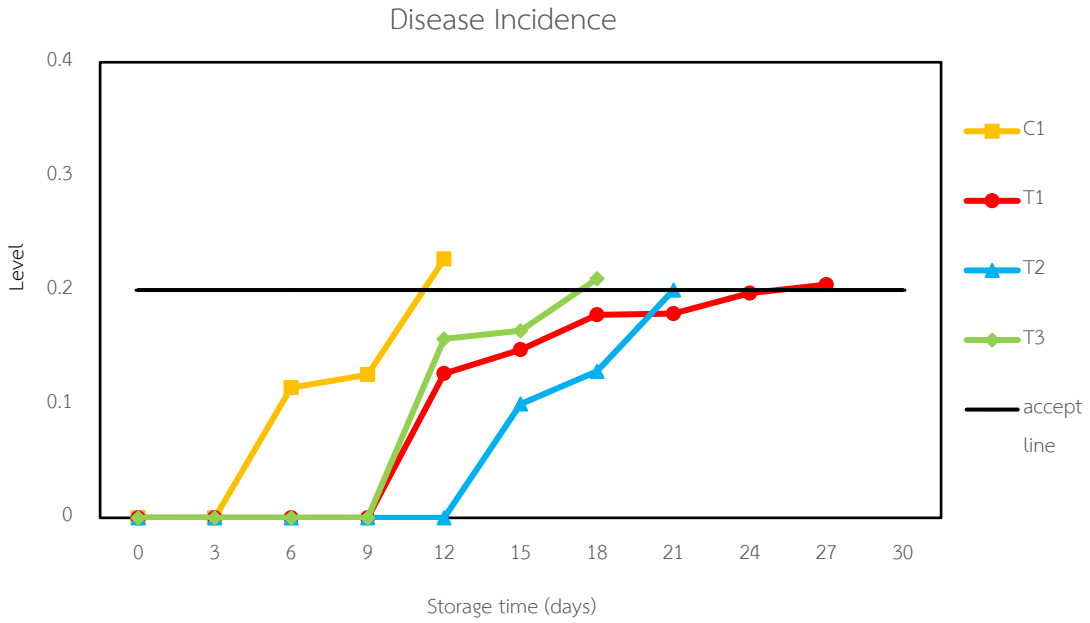
ภาพที่ 14 ผลของโอโซนต่อต่อการเปลี่ยนแปลงของสี L* ในผลลำไย เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิเก็บรักษา 4±1℃ (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)



ภาพที่ 15 ผลของโอโซนต่อต่อการเปลี่ยนแปลงของสี b* ในผลลำไย เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิเก็บรักษา 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)

4.1.6 ผลของการรมแก๊สโอโซนต่ออายุการเก็บรักษาลำไย

แก๊สโอโซนสามารถยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดได้และผลของการรมโอโซนที่ความเข้มต่างกันส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาและคุณภาพของลำไย จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาของลำไยต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 ppm เป็นเวลา 20 นาทีหรือเทียบเท่าที่โดสความเข้มข้น CT (Concentration x Time) เท่ากับ 40,000 ppm.min สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ยาวนานที่สุดถึง 27 วัน เพราะคุณสมบัติของโอโซนมีฤทธิ์ทำลายเนื้อเยื่อผนังเซลล์ที่มีน้ำโอโซนไปทำลายเนื้อเยื่อบริเวณเปลือกของลำไย ทำให้มีการเกิดเชื้อราได้ยากมากกว่าลำไยที่รมด้วยความเข้มข้นสูงกว่าที่จะส่งผลต่อเนื้อเยื้อเปลือกของลำไย ทำให้การรมลำไยที่ความเข้มข้น 2,000 ยืดอายุได้สูงสุด เพราะไม่ส่งผลทำลายคุณภาพด้านเปลือกนอกของลำไยสดดังแสดงในภาพที่ 16 สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chamnan et al., 2019) ซึ่งรมแก๊สที่โดสความเข้มข้น CT เท่ากับ 40,000 ppm.min สามารถยืดอายุของลำไยสดได้นานที่สุด



ภาพที่ 16 ผลของโอโซนต่อการเกิดเชื้อราในผลลำไย

เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิเก็บรักษา 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)

4.2 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองและการหาสภาวะที่เหมาะสม

ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design โดยกำหนดให้ ตัวแปร C คือความเข้มข้นของโอโซน T คือเวลาที่ใช้ในการรมโอโซน โดยที่ขอบเขตของปัจจัย 3 ระดับ จะประกอบไปด้วยระดับสูง (+1) กลาง (1) ต่ำ (-1) ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การกำหนดปัจจัยและขอบของระดับปัจจัย

สัญลักษณ์	ปัจจัย	หน่วย	ต่ำ	กลาง	สูง
C	ความเข้มข้นของโอโซน	ppm	1,000	2,000	3,000
T	เวลาที่ใช้ในการรมโอโซน	min	15	20	25

ซึ่งการกำหนดค่าปัจจัย สำหรับการศึกษานั้นจะได้ มาจากการศึกษาเอกสารข้อมูลและเอกสารที่เกี่ยวข้อง และได้จากการทาการทดลองเบื้องต้น ว่าเป็นช่วงที่สูงสุดและต่ำสุดที่สามารถทำการทดลองรมโอโซนลำไยได้โดยที่สามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษาลำไยสดได้ ซึ่งทางผู้วิจัยต้องการที่จะกำหนดช่วงระดับขอบเขตของปัจจัยให้มีค่ากว้าง เพื่อที่จะได้เห็นถึงความแตกต่างของแต่ละปัจจัยได้อย่างชัดเจน โดยดูผลที่เกิดขึ้นจากการศึกษาข้อ มูลเบื้องต้น และการทาการทดลองเบื้องต้นการกำหนดช่วงระดับปัจจัย ของแต่ละปัจจัยในระดับต่ำและระดับสูงนั้นทางผู้วิจัย

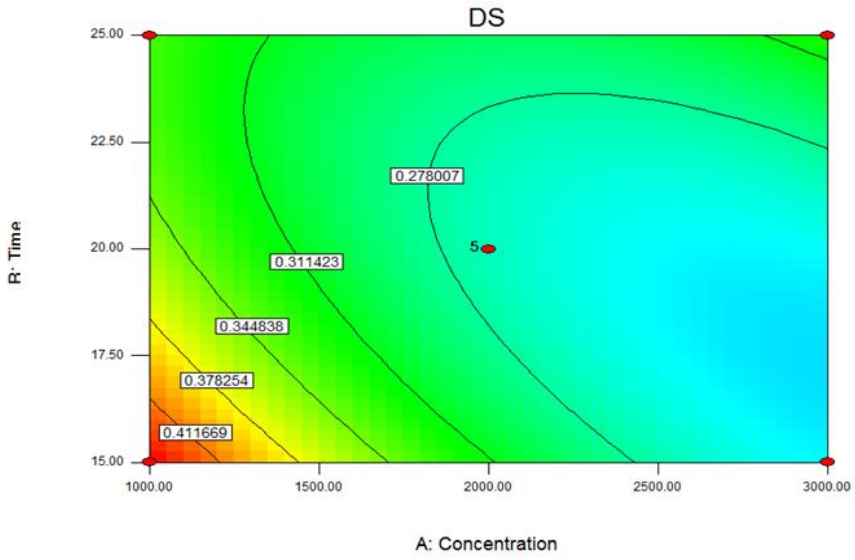
การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมด้วย วิธีการ RSM โดยใชการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อเลือกความเข้มข้นของแก๊สโอโซน และเวลาที่ใชในการรมที่เหมาะสมในการรมลำไยด้วยแก๊สโอโซนร่วมกับระบบบังคับอากาศแบบแนวตั้งทำใหมีคาการเกิดเชื้อราน้อยที่สุดเมื่อระยะเวลาเก็บรักษาลำไยสด 30 วัน ดังในตารางที่ 9 แสดงผลการวัดค่าการเกิดเชื้อราที่เปลือกนอกของลำไยสด สภาวะการเตรียมและการรมแก๊สโอโซนที่ สภาวะต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่าลำไยสดมีค่าการเกิดเชื้อราต่อพื้นที่เปลือกนอก (DS) อยู่ในช่วง 0.448-0.200 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ต้องการศึกษากับค่าการตอบสนองของปัจจัยสามารถวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย ที่ระดับนัยสำคัญ α = 0.05 พบว่าแบบจำลอง quadratic มีความเหมาะสมโดยพิจารณาจากค่า p-value (p ($p<0.5$) lack of fit ($p\geq0.05$) และคาทางสถิติ (SD และ PRESS มีค่าต่ำในขณะที่คา R^2 มีคาสูง) กันเมื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่จะศึกษาคือความเข้มข้นของแก๊สโอโซน และเวลาที่ใชในการรมกับคาการตอบสนองของค่าการเกิดเชื้อราต่อพื้นที่เปลือกนอกโดยรวม (DS = Disease incidence) ดังแสดงในภาพที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ของสภาวะการรมโอโซนกับลำไยสด ความเข้มข้นของแก๊สโอโซน และเวลาที่ใชในการรมต่อค่าการเกิดเชื้อรา (DS = Disease incidence) ในรูปแบบของภาพ 3มิติ (3D) และ ภาพ contour ดังภาพที่ 18 แสดงภาพ 3 มิติ (3D)

ที่ได้มาจากการทดลองและพบวาเมื่อเพิ่มหรือลดระดับความเข้มข้นของแก๊สโอโซน และเวลาที่ใชในการรมจะส่งผลให้ค่าการเกิดเชื้อรา (DS = Disease incidence)

ตารางที่ 9 การเกิดเชื้อราที่เปลือกนอกของลำไยสดที่รมแก๊สโอโซนที่ สภาวะต่าง ๆ

	ปัจจัย		ผลการทดลอง
Run	C (ppm)	T (min)	ผลการเกิดโรค (วันที่ 30)
1	1000 (1)	15 (1)	0.38
2	3000 (1)	15 (-1)	0.21
3	1000 (1)	25 (1)	0.34
4	3000 (1)	25 (1)	0.35
5	600 (+1)	20 (1)	0.45
6	3500 (-1)	20 (+1)	0.28
7	2000 (-1)	12 (-1)	0.44
8	2000 (+1)	27 (+1)	0.28
9	2000 (+1)	20 (1)	0.22
10	2000 (1)	20 (+1)	0.28
11	2000 (1)	20 (1)	0.25
12	2000 (1)	20 (1)	0.29
13	2000 (+1)	20 (+1)	0.31

แสดงความสัมพันธ์ของสภาวะการรมโอโซน ความเข้มข้นของแก๊สโอโซนและเวลาที่ใชในการรม ที่ส่งผลต่อค่าการเกิดเชื้อรา (คา DS) ในรูปแบบของภาพ 3 มิติ (3D) ภาพที่ 18 และภาพ contour ภาพที่ 17 จากภาพพบวาเมื่อเพิ่มหรือลดระดับความเข้มข้นของแก๊สโอโซนและเวลาที่ใชในการรมกับลำไยสดจะส่งผลทำให้ค่าการเกิดเชื้อราเพิ่มมากขึ้น และผลของระดับความเข้มข้นของแก๊สโอโซนที่ระดับ 3500 และ 600 ppm ที่เวลาสัมผัสโอโซน 20 นาทีซึ่งเป็นระดับความเข้มข้น X เวลา (CT) ที่สูงสุดและต่ำที่สุดจะใหคาการเกิดเชื้อราเพิ่มขึ้นสูง เนื่องจากที่ระดับ CT สูงมากส่งผลต่อการทำลายเนื้อเยื่อเซลล์ของลำไยทำให้เกิดการเสียหายของผนังเซลล์ทำให้มีการเกิดเชื้อราที่รวดเร็วมากยิ่งขึ้น (Wang et al., 2019)



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ (Contour plot) ของสภาวะการรมโอโซนกับลำไยสด ความเข้มข้นของแก๊สโอโซน และเวลาที่ใช้ในการรมต่อค่าการเกิดเชื้อรา

ในขณะที่การรมแก๊สที่ความเข้มข้นโอโซนที่ระดับ 600 ppm เป็นระดับความเข้มข้นและเวลา (CT) ที่ต่ำเกินไปทำให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยับยั้งการเกิดเชื้อราทำให้มีการเกิดเชื้อราที่รวดเร็วเช่นกัน ดังนั้นการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสดจึงจำเป็นต้องมีระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม จากการกำหนดเงื่อนไขเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าที่ระดับ 3,000 ppm เวลา 17 นาที สามารถลดอัตราการเกิดเชื้อรา (DS) ในผลลำไยสดได้เหมาะสมและจะสามารถลดการเกิดเชื้อราได้ดี เนื่องจากเป็นความเข้มข้นและเวลาที่เหมาะสมในการรมลำไย ซึ่งจะช่วยยับยั้งการและจำกัดพื้นที่อยู่อาศัยของเชื้อราบนผลลำไยสดได้ (Chamnan et al., 2021)

จากการทดลองข้างต้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับคาการตอบสนองของปัจจัยเป็นสมการการถดถอยได้โดยแสดงสมการเป็น คา DS ดังแสดงในสมการ (5)

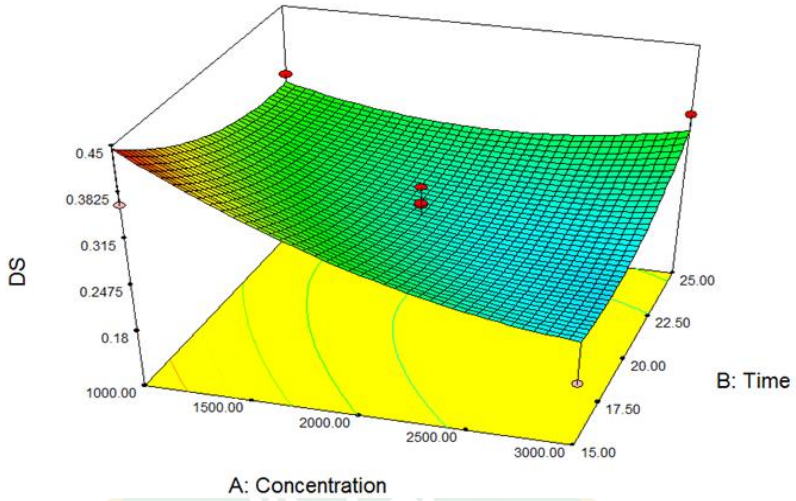
$$\mathrm{DS} = 1.44550 - 3.74015\mathrm{E}-004 * \mathrm{C} - 0.073001 * \mathrm{T} + 9.10612\mathrm{E}-006 * \mathrm{CT} + 3.51760\mathrm{E}-008 * C^2 + 1.31929\mathrm{E}-003 * T^2 \quad (5)$$

เมื่อ.....

DS คือ คาการเกิดอุบัติการของโรค

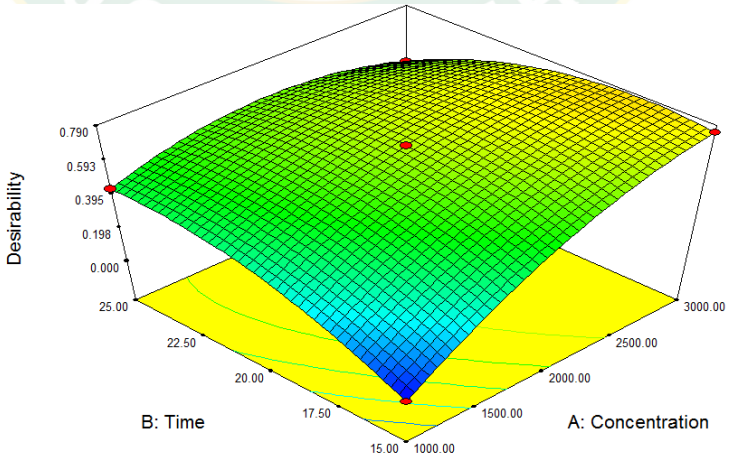
C คือ ระดับความเข้มข้นของแก๊สโอโซน (ppm)

T คือ เวลาในการสัมผัสโอโซน (นาที)



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ (3D) ของสภาวะการรมโอโซนกับลำไยสด ความเข้มข้นของแก๊สโอโซน และเวลาที่ใช้ในการรมต่อค่าการเกิดเชื้อรา

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการ กำหนดเงื่อนไขการทดลองโดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป พบว่าความเข้มข้นของแก๊สโอโซนที่เหมาะสมคือ 3,000 ppm ซึ่งสามารถลดอัตราการเกิดเชื้อราได้ต่ำสุด ทั้งนี้จากการกำหนดเงื่อนไขการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม พบว่าเวลาที่ใช้ในการรมที่เหมาะสม คือ 17 นาที ดังแสดงในภาพที่ 19 โดยทำการเลือกวิเคราะห์ที่ค่าผลตอบสนองที่ส่งผลให้ค่า Y ที่ต่ำที่สุดและทำการกำหนดค่าการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสด คือแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 3,000 ppm และเวลารมที่ 17 นาที



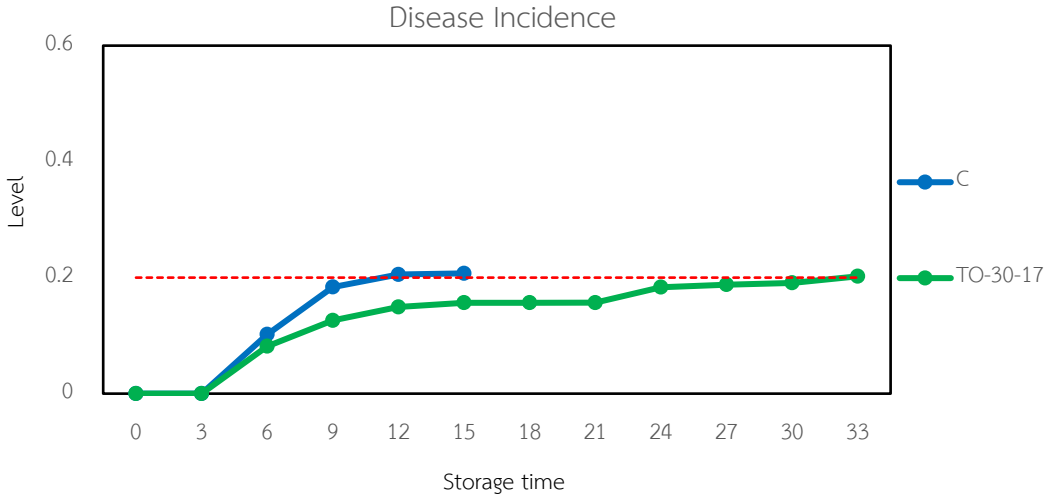
ภาพที่ 19 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสด

4.3 การตรวจสอบและการยืนยันผล

จากการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design-Expert 7.0 (Informer Technologies Inc; USA) เพื่อนำมาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสด จึงได้มีนำค่าความเข้มของโอโซนและเวลาที่ใช้รมที่ได้จากการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดนำมายืนยันผล โดยจะทำการรมโอโซนกับลำไยสดตามค่าที่ได้เพื่อศึกษาผลของการรมโอโซนกับลำไยสดที่สภาวะที่ดีที่สุดเพื่อคงคุณภาพของลำไยสดและยืดอายุการเก็บรักษาของลำไย โดยทำการรมแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 3,000 ppm และเวลารมที่ 17 นาทีกับลำไยสด 10 กิโลกรัมและศึกษาผลการรมโอโซนที่เกิดขึ้นกับลำไยสดดังนี้

4.3.1 ผลของโอโซนต่อการเกิดเชื้อราในผลลำไย

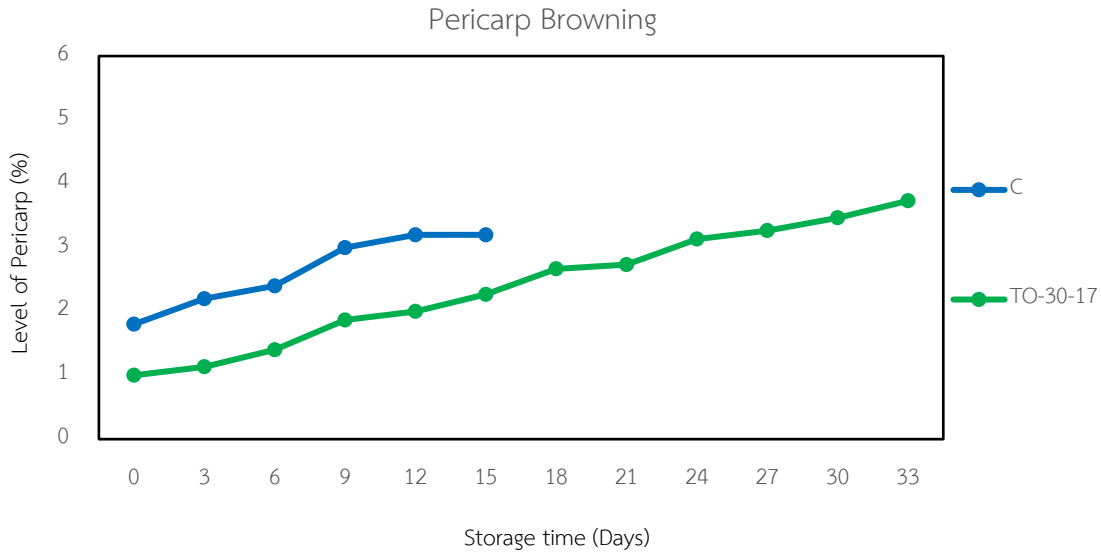
การเกิดเชื้อราเป็นตัวบงชี้อายุการเก็บรักษาของลำไยสด เพราะการเกิดเชื้อราเป็นตัวกำหนดคุณภาพของลำไยสดเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 20 จะเห็นว่าการเกิดเชื้อราในตัวอย่างที่ไม่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในระยะเวลาเพียง 15 วัน และตัวอย่างลำไยที่ได้รับการรมด้วยโอโซนที่ความเข้มข้น 3,000 ppm เวลา 17 นาที (TO-30-17) จะเห็นได้ว่ามีเกิดการเกิดเชื้อราน้อยและช้ากว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการบำบัดเมื่อเก็บไว้ที่ 4±1 °C และผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Ozkan et al., 2011) ที่พบว่าการมด้วยโอโซนกับองุ่นจะช่วยยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ถึง 85% และงานวิจัยอื่นก็ได้มีการกล่าวไว้ด้วยว่าการรมโอโซนจะช่วยลดจำนวนการเกิดจุลินทรีย์ได้ อย่างเช่นกับมะเขือเทศ (Wang et al., 2019) ที่กล่าวไว้ว่าเนื่องจากแก๊สโอโซนเข้าไปทำลายผนังเซลล์ของตัวจุลินทรีย์ทำให้มีการแตกสลาย (Afsah et al., 2021) ที่ทำการศึกษาในผลมะเดื่อสดเมื่อเปรียบเทียบกับมะเดื่อที่ไม่ผ่านการรมแก๊สโอโซนไว้ว่าการรมด้วยแก๊สโอโซนกับผลมะเดื่อจะส่งผลทำให้สามารถยับยั้งการเกิดเชื้อราได้มากขึ้น



ภาพที่ 20 ผลของโอโซนต่อการเกิดเชื้อราในผลลำไยสดตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

4.3.2 ผลของโอโซนต่อการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือก

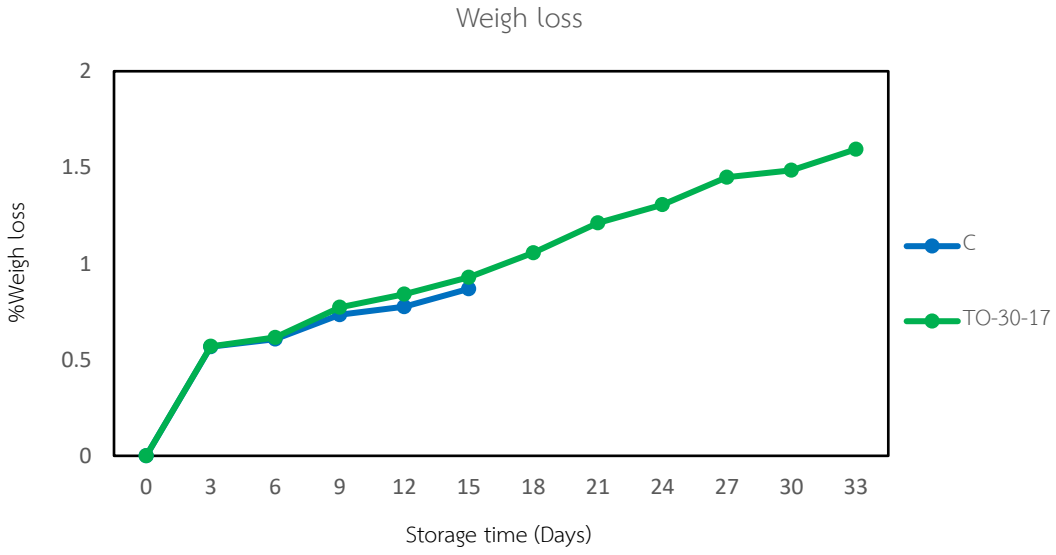
การเกิดสีน้ำตาลบนเปลือก ดังแสดงในภาพที่ 21 พบว่าการรมโอโซนผลลำไยสดรมแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 3,000 ppm เวลา 17 นาทีจะช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกลำไยได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อนำมาเทียบกับลำไยสดที่ไม่ได้ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซน และตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าลำไยสดที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4±1 °C ในวันที่ 0 ผลลำไยสดที่รมด้วยแก๊สโอโซนมีสีน้ำตาลบนผิวเปลือกน้อยกว่าผลลำไยสดที่ไม่ได้ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซน และลำไยที่ไม่ผ่านการรมแก๊สโอโซนมีการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มขึ้นเป็นเวลา 15 วันสอดคล้องกันกับการศึกษาวิจัยของ (Chamnan et al., 2019) ที่ทำการทดสอบการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสด และได้กล่าวไว้ว่าลำไยสดที่ผ่านการรมแก๊สโอโซนจะมีอัตราการเกิดสีน้ำตาลที่ช้าและมีการสีน้ำตาลที่เปลือกน้อยกว่าลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมแก๊สโอโซน



ภาพที่ 21 ผลของโอโซนต่อการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือกในผลลำไยสดตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

4.3.3 ผลของโอโซนต่อการสูญเสียน้ำหนัก

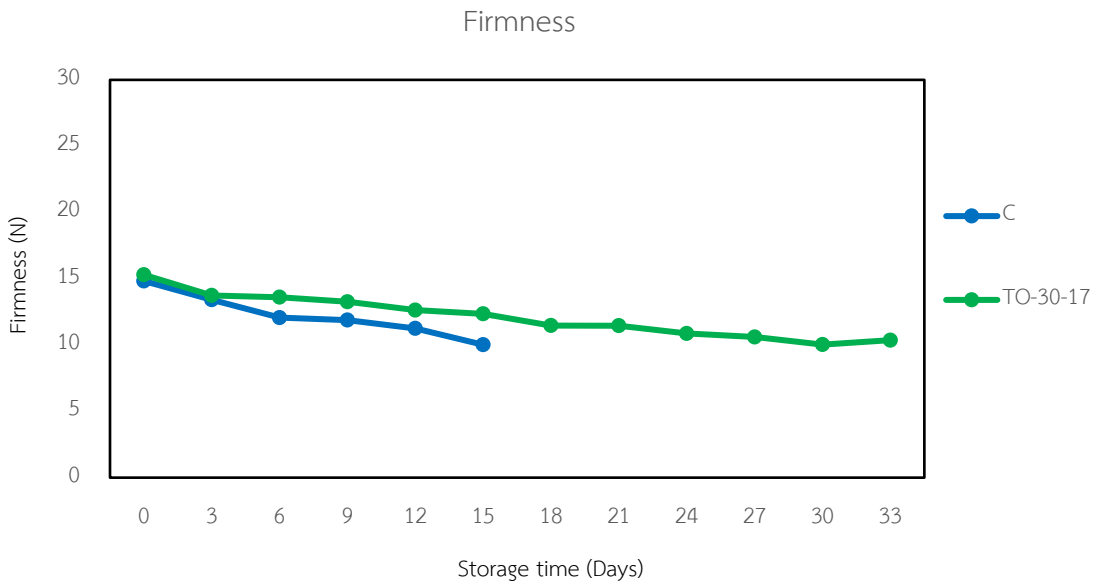
การรมด้วยแก๊สโอโซนไม่ได้มีผลที่เห็นได้ชัดในเรื่องของการสูญเสียน้ำหนักของผลลำไยสดอย่างนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามตัวอย่างลำไยที่ผ่านรมด้วยแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 3,000 ppm ในช่วง 18 วันจะมีอัตราการลดของน้ำหนักมากกว่าผลลำไยที่ไม่ได้รับการรมด้วยโอโซนเพียงเล็กน้อยและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ลำไยที่ผ่านการรมแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 3,000 ppm เวลา 17 นาทีมีการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดเพียง 1.52% ใน 33 วันเมื่อเปรียบเทียบกับลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซนที่การสูญเสียสูงสุดในวันที่ 15 เท่ากับ 0.93% แสดงดังภาพที่ 22 ผลการทดลองเหล่านี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ (Chamnan et al., 2021) ที่ว่าการรมด้วยแก๊สโอโซนในสภาวะความดันเหนือบรรยากาศเล็กน้อยไม่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของผลลำไยสดอย่างมีนัยสำคัญ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Sripong et al., 2022) ที่รมแก๊สโอโซนในทุเรียนสดและได้รายงานว่าผลของการรมแก๊สโอโซนไม่ส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำหนักในทุเรียน



ภาพที่ 22 ผลของโอโซนต่อการสูญเสียน้ำหนักในผลลำไยสดตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

4.3.4 ผลของโอโซนต่อความแน่นเนื้อ

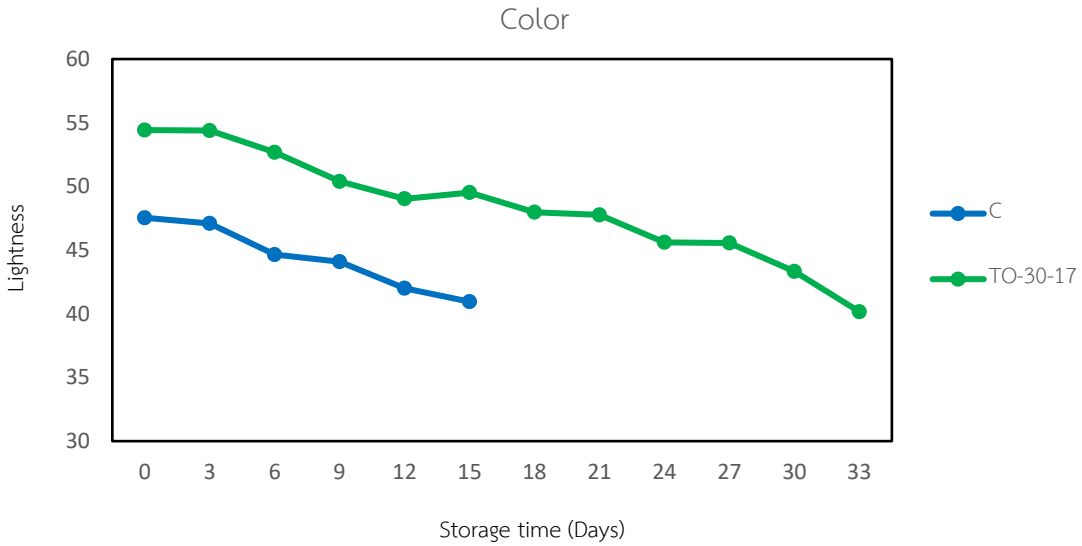
ค่าความแน่นเนื้อเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรงของผนังเซลล์และการยึดเกาะระหว่างเซลล์ (Toivonen and Brummell 2008) จากภาพที่ 23 จะพบว่าลำไยสดทั้งสองตัวอย่างมีค่าความแน่นเนื้อไม่แตกต่างกัน และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น จะพบว่าค่าความแน่นเนื้อของลำไยทุกตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และพบว่าการรมด้วยแก๊สโอโซนไม่ได้ส่งผลต่อความแน่นเนื้อลำไยสดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4±1 °C ความแน่นเนื้อของลำไยรมแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 3,000 ppm เวลา 17 นาทีอยู่ในช่วง 11.56 ถึง 14.55 N ผลลำไยสดมีเปลี่ยนความแน่นเนื้อเพียงเล็กน้อยอาจเกิดจากการสูญเสียความชื้นที่พื้นผิวของลำไย ซึ่งให้ผลตรงกันข้ามกับงานวิจัยของ (Afsah et al., 2021) ที่ได้รายงานโอโซนไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของมะเดื่อสดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ผลเห็นด้วยกับ (Zambre et al., 2010) รายงานว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในค่าความแน่นเนื้อของมะเขือเทศที่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนเมื่อเทียบกับมะเขือเทศที่ไม่ได้ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซน



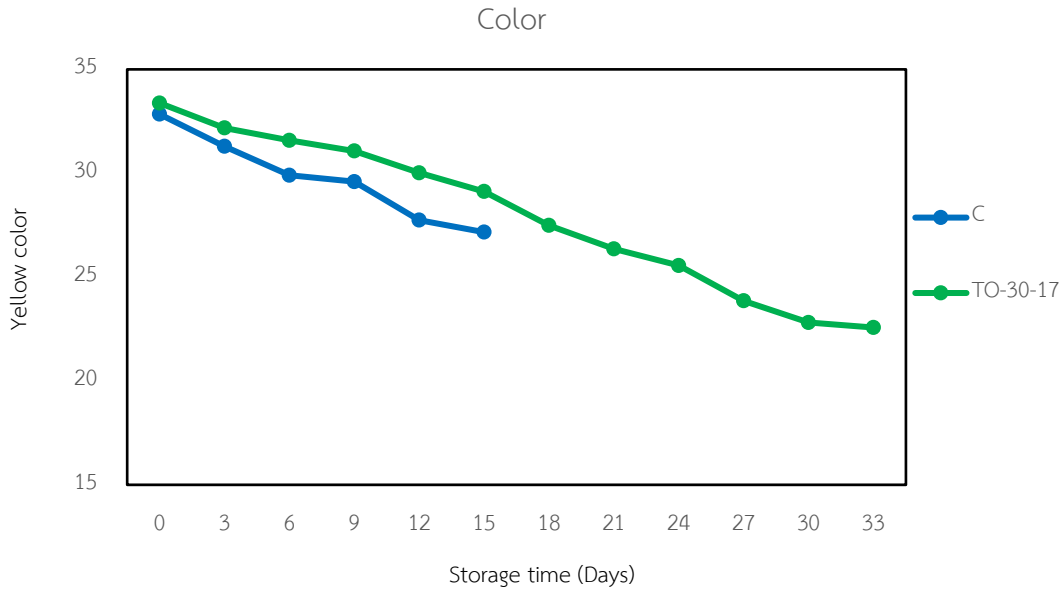
ภาพที่ 23 ผลของโอโซนต่อความแน่นเนื้อในผลลำไยสดตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

4.3.5 ผลของโอโซนต่อสี

สีเป็นปัจจัยหนึ่งในการตัดสินคุณลักษณะทางกายภาพสำหรับการซื้อขายพบว่าผลลำไยสดหลังจากการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 3,000 ppm เวลา 17 นาที (วันที่ 0) ผลลำไยที่ควบคุมมีค่า L* และ b* เพิ่มขึ้นจาก 50.37 และ 32.54 เพิ่มขึ้นเป็น 58.47 และ 36.11 สาเหตุที่ค่า L* ของลำไยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลจากฤทธิ์การฟอกขาวของโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4±1 °C ลำไยที่รมแก๊สโอโซนมีค่า L* และ b* สูงกว่าลำไยควบคุม และมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานกว่าลำไยควบคุมที่มีสีน้ำตาลเข้ม แสดงดังภาพที่ 21 และ 22 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chamnan et al., 2019) ซึ่งรมแก๊สโอโซนกับลำไยภายใต้สภาวะความดันสูงกว่าบรรยากาศและเก็บในบรรจุภัณฑ์ มี L* และ b* (สีเหลืองน้ำตาลอ่อน) สูงกว่าลำไยที่ไม่ได้ผ่ายการรมแก๊สโอโซนและอายุการเก็บรักษานานกว่าลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซนเช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 24 และภาพที่ 25 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Whangchai et al., 2006) ที่รายงานไว้ว่าลำไยที่ผ่านการรมแก๊สโอโซนจะมีค่าความสว่าง L* สูงกว่าลำไยที่ได้ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซน



ภาพที่ 24 ผลของโอโซนต่อสี (L*) ในผลลำไยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา



ภาพที่ 25 ผลของโอโซนต่อสี (b*) ในผลลำไยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

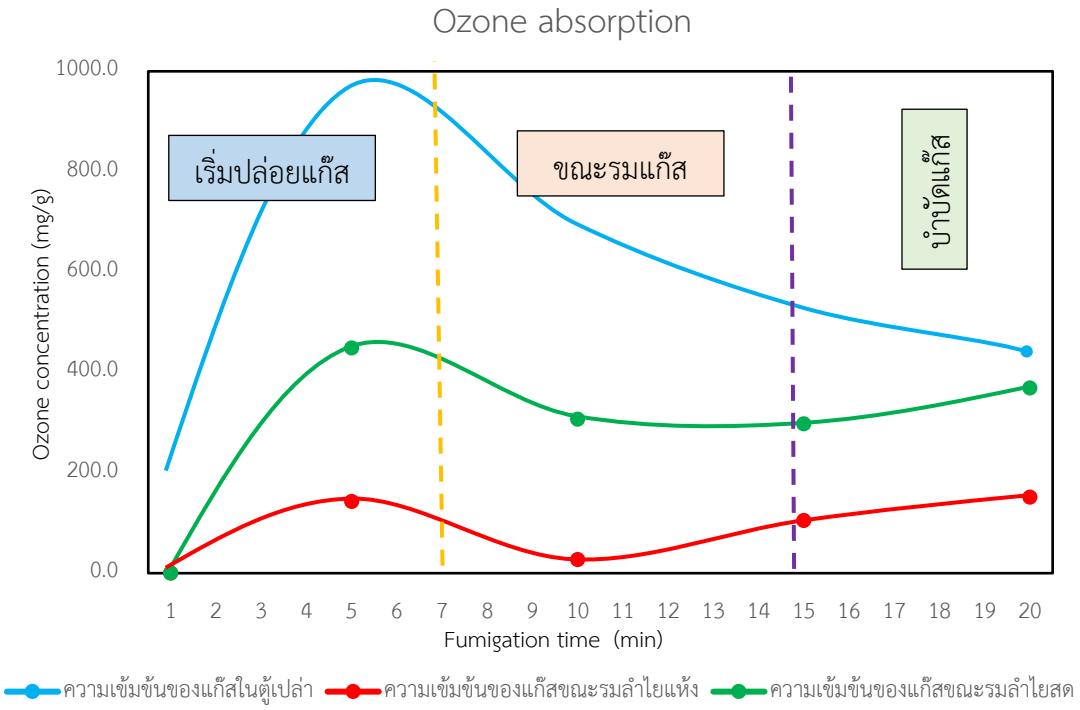
4.3.6 ผลของการรมแก๊สโอโซนต่ออายุการเก็บรักษาลำไย

แก๊สโอโซนสามารถยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดได้และผลของการรมโอโซนที่ความเข้มต่างกันส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาและคุณภาพของลำไย จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 3,000 ppm เวลา 17 นาทีส่งผลทำให้ลำไยมีอายุการเก็บรักษาของลำไยนานขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 3,000 ppm เป็นเวลา 17 นาทีหรือเทียบเท่าที่โดสความเข้มข้น CT (Concentration x Time) เท่ากับ 51,000 ppm.min สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ยาวนานที่สุดถึง 33 วัน เพราะคุณสมบัติของโอโซนมีฤทธิ์ทำลายเนื้อเยื่อผนังเซลล์ที่มีน้ำโอโซนไปทำลายเนื้อเยื่อของจุลินทรีย์บริเวณเปลือกของลำไย (Ozkan et al., 2011) ทำให้มีการเกิดเชื้อราได้น้อยกว่าลำไยที่ไม่ได้รมด้วยโอโซน ทำให้การรมลำไยที่ความเข้มข้น 3,000 ที่เวลา 17 นาทีสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของลำไยสดได้สูงสุดเพราะมีการเกิดเชื้อราน้อยและเน่าเสียได้ช้า สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Ioannis et al., 2010) ซึ่งรมแก๊สโอโซนกับผลกีวีเพื่อลดการเกิดโรคเน่าผลกีวีและพบว่าโอโซนสามารถยับยั้งการเกิดการเน่าเสียของผลไม้ได้และมีอายุรักษาเพิ่มขึ้น

4.3.7 การดูดซับแก๊สโอโซนในลำไยสด

การตรวจสอบการดูดซับแก๊สโอโซนของลำไยสดขณะรมแก๊สโอโซนร่วมกับระบบบังคับอากาศเพื่อดูปริมาณการใช้แก๊สขณะที่รมลำไยเพื่อดูปริมาณการดูดซับแก๊สที่ส่งผลต่อการคงสภาพลักษณะทางกายภาพที่ดีและยืดอายุการเก็บรักษาลำไย ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาปริมาณการดูดซับ

แก๊สโอโซนกับลำไยสดขณะรมโอโซนโดยเลือกจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในรมคือความเข้มข้นแก๊ส 3,000 ppm เวลา 17 นาทีเพื่อหาปริมาณแก๊สที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการรมลำไยใน โดยจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มต้นเปิดพัดลมบังคับอากาศหลังจากที่ได้ปล่อยแก๊สเข้าไปภายในตู้รมเท่ากับ 3,000 ppm เราจะเห็นได้ว่าที่ลำไยแห้งมีการดูดซับแก๊สที่มากกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการใช้โอโซนขณะรมลำไยสดพบมามีการลดของแก๊สมากที่สุดเท่ากับ 2,300 ppm จากเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเท่ากันในเวลาที่เท่ากันและปริมาตรที่เท่ากันจะเห็นได้ว่าลำไยสดมีการลดลงของปริมาณโอโซนภายในตู้ดังแสดงในภาพที่ 26 เหตุเนื่องจากลำไยสดมีความชื้นที่เปลือกมากกว่าทำให้สามารถดูดซับโอโซนได้มากกว่าและการดูดซับโอโซนปริมาณดังกล่าวส่งผลทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาลำไยยาวนานมากขึ้นจาก 15 วันเป็น 33 วันและยังสามารถคงคุณลักษณะทางกายภาพที่ดีให้กับลำไยได้ด้วย โดยลักษณะการใช้ปริมาณแก๊สโอโซนนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chamnan et al., 2021) ที่ทำศึกษาผลกระทบของการรมควันด้วยโอโซนความเข้มข้นสูง (HCO) ต่ออายุการเก็บรักษาลำไยสดผลปรากฏว่าลำไยที่สัมผัสกับแก๊สโอโซนที่ 8,500 ppm เป็นเวลา 5 นาที ถือเป็นการบำบัดที่เหมาะสมในการยืดอายุลำไยอายุการเก็บรักษานานถึง 35 วัน ซึ่งนานกว่าอายุการเก็บรักษาลำไยที่ไม่ได้รมโอโซน 57%



ภาพที่ 26 การวิเคราะห์การดูดซับแก๊สโอโซนของลำไยสดขณะรมแก๊สโอโซนร่วมกับระบบบังคับอากาศ

การตรวจสอบการดูดซับแก๊สโอโซนของลำไยสดพบสามารถตรวจสอบได้จากการวัดแก๊สโอโซนเมื่อทำการรมแก๊สโอโซนที่มีความเข้มข้น 3,000 ppm และเวลารมที่เท่ากับ 17 นาที โดยเราจะเห็นได้ว่าจากภาพที่ 26 การตรวจสอบการดูดซับแก๊สโอโซนของลำไยที่การดูดซับแก๊สภายในตู้ที่ไม่มีลำไย (REF) จะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มมีการปล่อยแก๊สโอโซนที่ก่อนถึงนาทีที่ 7 มีการเพิ่มขึ้นของแก๊สโอโซนอย่างรวดเร็วภายในตู้เนื่องจากภายในตู้ไม่มีวัสดุที่สามารถดูดซับแก๊สโอโซนได้และเมื่อทำการปิดแก๊สโอโซนที่หลังจากนาทีที่ 7 และเริ่มทำการรมแก๊สจะเห็นได้ว่ามีการลดลงของแก๊สโอโซนโดยคาดว่าเนื่องจากทำการรมแก๊สด้วยระบบบังคับอากาศซึ่งมีความแปรปรวนของความดันอากาศภายในตู้ทำให้มีการสูญเสียแก๊สโอโซนออกจากระบบทำให้มีความเข้มข้นของแก๊สโอโซนลดลงเมื่อเริ่มเข้าสู่กระบวนการรมแก๊ส และผลการรมแก๊สโอโซนกับลำไยแห้ง (สีแดง) โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเริ่มต้นปล่อยแก๊สโอโซนเข้าตู้เราจะเห็นได้ว่ามีการเพิ่มขึ้นของแก๊สโอโซนอย่างรวดเร็วเนื่องจากภายในตู้มีพื้นที่ช่องว่างลดลงและลำไยแห้งไม่มีการดูดซับโอโซนไว้จึงทำให้เห็นว่ามีความเข้มข้นของแก๊สโอโซนอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการรมโอโซนกับตู้เปล่า (สีฟ้า) โดยจะเห็นได้จากการดูดซับแก๊สโอโซนได้จากความเข้มข้นโอโซนในเปล่าต่อลำไยแห้ง (สีแดง) และเมื่อได้ทำการปิดแก๊สโอโซนในกระบวนการรมแก๊สจะเห็นได้ว่ามีการลดลงของแก๊สโอโซนลงอย่างรวดเร็วและมีการลดลงมากกว่าตู้เปล่าโดยคาดว่าเนื่องจากทำการรมแก๊สด้วยระบบบังคับอากาศในตู้ที่มีลำไยแห้งมีความแปรปรวนของความดันอากาศภายในตู้สูงกว่าทำให้มีการลดลงของความเข้มข้นของแก๊สโอโซนมากกว่า ผลการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสด (สีเขียว) โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเริ่มต้นปล่อยแก๊สโอโซนเข้าตู้จะเห็นได้ว่ามีการลดลงของแก๊สโอโซนอย่างรวดเร็วเนื่องจากภายในตู้มีลำไยสดที่มีการดูดซับโอโซนไว้มากจึงทำให้เห็นว่ามีความเข้มข้นของแก๊สโอโซนลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการรมโอโซนกับตู้ที่มีลำแห้ง (สีแดง) และเมื่อได้ทำการปิดแก๊สโอโซนในกระบวนการรมแก๊สจะเห็นได้ว่ามีการลดลงของแก๊สโอโซนลงอย่างรวดเร็วโดยจะเห็นได้จากการดูดซับแก๊สโอโซนได้จากความเข้มข้นโอโซนในขณะที่รมลำไยสดสูงสุด 86% เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นแก๊สโอโซนคงเหลือกับตู้เปล่าดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การดูดซับแก๊สโอโซนของลำไยขณะรมแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นโอโซนในตู้เปล่า (mg/kg)	ความเข้มข้นโอโซนขณะรมในลำไยแห้ง (mg/kg)	ความเข้มข้นโอโซนขณะรมลำไยสด (mg/kg)	%การดูดแก๊สซับในลำไยแห้ง (mg/kg)	%การดูดแก๊สซับใน ลำไยสด (mg/kg)
1	207.2±46.3	N/A	N/A	0	0
5	961.2±0.0	142.5±0.0	448.6±52.0	14.8	46.7
10	696.9±28.4	26.8±11.9	306.7±14.5	3.8	44.0
15	530.8±67.0	104.7±52.0	297.4±23.6	19.7	56.0
20	428.4±60.0	151±171.1	368.9±50.7	35.3	86.1

หมายเหตุ* N/A ในตารางแสดงถึงค่าคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดเนื่องจาก Sensibility ของเครื่องมือวัดไม่เพียงพอจึงทำให้เกิดค่าที่ไม่สามารถอ่านได้จากการใช้เครื่องมือวัด

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการรมแก๊สโอโซนกับลำไยสดร่วมกับนะบบบังคับอากาศแบบแนวตั้งเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาลำไยโดยทำการออกแบบการทดลองโดยการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองและการหาสภาวะที่เหมาะสมและเลือกใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design

จากศึกษาผลของการรมแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งต่อคุณภาพของลำไยสด โดยทำการรมลำไยสดครั้งละ 10 กิโลกรัม ด้วยแก๊สโอโซนความเข้มข้นจากการทดลอง 1,000-3,000 ppm เป็นเวลา 15-25 นาที หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยพบว่าลำไยที่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนความเข้มข้น 3,000 ppm เป็นเวลา 17 นาที จะเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการยืดอายุของลำไยสดด้วยแก๊สโอโซนร่วมกับระบบบังคับอากาศแบบแนวตั้ง

โดยจากการศึกษาเบื้องต้นได้ทำการทดลองรมลำไยกับแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอาการแบบแนวตั้งที่สภาวะที่สมที่สุดเพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้น โดยพบว่าลำไยถูกลำไยที่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนความเข้มข้น 3,000 ppm เป็นเวลา 17 นาทีและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4±1°C ผลการศึกษาพบว่าการรมแก๊สโอโซน สามารถชะลอการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือกลำไยได้ มีการสูญเสียน้ำหนักและการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาลำไยเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยและไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) มีค่าดัชนีสี L* และ b* ของลำไยที่รมแก๊สโอโซนเพิ่มขึ้น และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดได้จาก 15 เป็น 33 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลการศึกษาของการรมแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งต่อคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาควรนำมาประยุกต์ใช้กับผลผลิตทางการเกษตรชนิดอื่นได้

2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการรมแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งในส่วนของการหาความเร็วลมที่ใช้ในการรมแก๊สโอโซนที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

บรรณานุกรม

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 2552. **การบำบัดและปรับสภาพน้ำด้วยโอโซน**.

กรมวิชาการเกษตร. 2562. **การทดสอบประสิทธิภาพห้องรมผลไม้สดด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.doa.go.th/psco/wp-content/pdf. (20 มกราคม 2565)

กรมวิชาการเกษตร. 2563. **การผลิตลำไย**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.doa.go.th/psco/wp-content. (20 มกราคม 2565)

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2558. **ห้องรมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.mhesi.go.th/main/th/442-news/nstfair2558/5207-nstf2015_5207. (20 มกราคม 2565)

กองพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าพืช. 2562. **ลำไย**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา) https://www.doa.go.th/psco. (20 มกราคม 2565

เกรียงไกร สุภโตษะ. 2562. **ระบบควบคุมการส่งออกลำไยสดไปสาธารณรัฐประชาชนจีน**.[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา.https://www.doa.go.th/psco/pdf. (20 มกราคม 2565)

จตุรภัทร วาฤทธิ์. 2558. คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตเกษตรและอาหาร.

ธานี กุลแพทย์. 2555. ห้องรมลำไยด้วยซัลเฟอร์นวัตกรรมยืดความสด-ลดสาร โดย ผศ.จักรพงษ์ พิมพ์พิมล(คม ชัด ลึก). คม ชัด ลึก.

ปานมนัส ศิริสมบูรณ์. 2555. Penetration test. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.foodnetworksolution.com. (20 มกราคม 2565)

วิชิตชัย ชาญสงคราม. 2560. **การวิเคราะห์การเน่าเสียของลองกองโดยเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์**, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์: 18-23.

ศรัณยา เพ่งผล, ยุพาพร กล้ากสิกรรม, และกมลชนก บุญชื่น. 2562. ผลของโอโซนความเข้มข้นสูงต่อการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพและโภชนาการหลังการหุงต้มของข้าวเจ้าขาวผสมข้าวหอมมะลิ. **แก่นเกษตร**. 47(1): 33-38.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2563. **ผลผลิตลำไย**.[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.doa.go.th/psco/wp-content/pdf. (20 มกราคม 2565)

สุรินทราพร ชั่งไชย, จตุรภัทร วาฤทธิ์, สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ และคณะ 2559. การใช้แก๊สโอโซนในการกำจัดหนอนแมลงวันผลไม้ (Bactrocera latifrons) ในพริก. **วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร** 33(2): 13-23.

Aunchalee Taimaneerak, Uthaibutra Jamnong, Sugaya Sumiko, Warapan KumKhun and Kanda Whangchai. 2018. Ozone Fumigation on Sulfur Dioxide Treated Longan for Sulfur Residue Reduction and Delaying of Pericarp Browning as well as Disease Control in Longan Fruit during Storage. **Food and Applied Bioscience Journal** 6(Special): 240-252.

Gabler Franka Mlikota, Smilanick Joseph L., Mansour Monir F., Karaca, and Hakan. 2010. Influence of fumigation with high concentrations of ozone gas on postharvest gray mold and fungicide residues on table grapes. **Postharvest Biology and Technology** 55(2): 85-90.

Ioannis S. Minas, George S. Karaoglanidis, George A. Manganaris, and Miltiadis Vasilakkis. 2010. Effect of ozone application during cold storage of kiwifruit on the development of stem-end rot caused by Botrytis cinerea. **Postharvest Biology and Technology**.

J. G. Kim, A. Yousef, and S. Dave. 1999. Application of Ozone for Enhancing the Microbiological Safety and Quality of Foods: A Review. **Journal of Food Protection** 62(9): 1071-1087.

Kanlay Sripong, Apiradee Uthairatankij, and Pongphen Jitareerat. 2022. Impact of gaseous ozone on microbial contamination and quality of fresh-cut durian. **Scientia Horticulturae** 294: 110799.

Lauana Pelland deSouza, Lêd Rita D'Antonino Faroni, Fernanda Fernandes Heleno, Paulo Roberto Cecon, and Thamiris Danielle Carvalho Gonçalves. 2018. Effects of ozone treatment on postharvest carrot quality. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie** 90: 53-60.

Leili Afsah-Hejri, Arash Toudeshki, Taymaz Homayouuni, Shirin Mehrazi, and Akram Gholami. 2021. Potential of ozonated-air (OA) application to reduce the weight and volume loss in fresh figs (Ficus carica L.). **Postharvest Biology and Technology** 180: 111631.

Lin Shengalnes, Hanrahan Xiaofei, Suna Michael H.,Taylor, and Manoell Mendoza. 2018. Survival of Listeria innocua on Fuji apples under commercial cold

storage with or without low dose continuous ozone gaseous. **Food Microbiology** 76.

Lin Wang, Xuetong Fan, Kimberly Sokorai, and Joseph Sites. 2019. Quality deterioration of grape tomato fruit during storage after treatments with gaseous ozone at conditions that significantly reduced populations of Salmonella on stem scar and smooth surface. **Food Control** 103.

Likhittragulrung, S., Pankasemsuk, T., and Whangchai, K. 2006. Effect of ozone in combination with some organic acids on the control of postharvest decay and pericarp browning of longan fruit. **Crop Protection** 25(8): 821-825.

Minolta. 1997. Color Measurement. from https://color+measurement&sxsrf.

D.S. Mishra, Binayak Chakraborty, Heiplanmi Rymbai, and Nishant Deshmukh.2018. LONGAN (Dimocarpus longan Lour). **Breeding of underutilized fruit crops.** part II 255-272.

Panlop Sintuya, Kanjana Narkprasom, Somkiat Jaturonglumlert, Niwooti Whangchai, and Jaturapatr Varith. 2018. Effect of gaseous ozone fumigation on organophosphate pesticide degradation of dried chilies. **Ozone Science and Engineering**.

Ragip Ozkan, Joseph L.Smilanick, and Ozgur Akgun Karbulut. 2011. Toxicity of ozone gas to conidia of Penicillium digitatum, Penicillium italicum, and Botrytis cinerea and control of gray mold on table grapes. **Postharvest Biology and Technology** 60(1): 47-51.

Saranyapak Chamnan, Jaturapatr Varith, Somkiat Jaturonglumlert, Jakraphong Phimphimol, and Narathip Sujinda. 2021. Effects of High Concentration Ozone Gas Fumigation on the Quality and Shelf-life of Longan Fruit Effects of High Concentration Ozone Gas Fumigation on the Quality and Shelf-life of Longan Fruit. Ozone: **Science and Engineering**.

Saranyapak Chamnan, Jaturapatr Varith, Somkiat Jaturonglumlert, Jakraphong Phimphimol, and Pisuthi Klinkajorn. 2019. "The Effect of Packaging Materials on the Quality of Freshness of Longan Fumigated with Medium Concentration-ozone Gas." Pertanika **Journal of Science and**

Technology 27: 159-168.

Suhas S. Zambre, Venkatesh Kareenhalli, and Narendra Shah. 2010. Tomato redness for assessing ozone treatment to extend the shelf life. **Journal of Food Engineering** 96: 463-468.

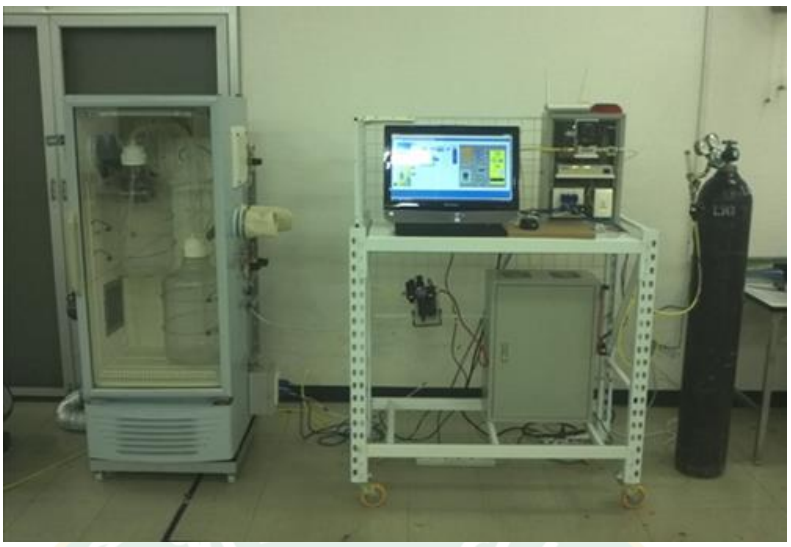
T Peter M.A. Toivonen and David A. Brummell. 2008. Biochemical bases of appearance and texture changes fresh-cut fruit and vegetables. **Postharvest Biology and Technology** 48: 1-14.

Zainuri Zainuri, Jayaputra, A. Sauqi, and Taslim Sjah. 2018. Combination of ozone and packaging treatments maintained the quality and improved the shelf life of tomato fruit. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science** 102: 012027.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาพการดำเนินงาน



ภาพที่ 27 ชุดอุปกรณ์รมแก๊สโอโซนระดับห้องปฏิบัติการพัฒนาโดย จาตุพงศ์ และคณะ (2555). 1: ถังแก๊สออกซิเจน 2: ระบบควบคุมอัตราการไหลและถ่ายโอนข้อมูล 3: คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุม 4: อุปกรณ์กำเนิดแก๊สโอโซน 5: ตู้บรรจุผลไม้เพื่อรมแก๊สโอโซน

ภาพที่ 28 การเตรียมลำไยสดพันธุ์อีดอ ที่เก็บเกี่ยวและเก็บรักษามาแล้วไม่เกิน 3 วัน จำนวนคัดเลือกลำไยที่มีคุณภาพ ไม่มีการเน่าเสีย หรือมีการเกิดสีน้ำตาลบนผิวเปลือกของลำไย

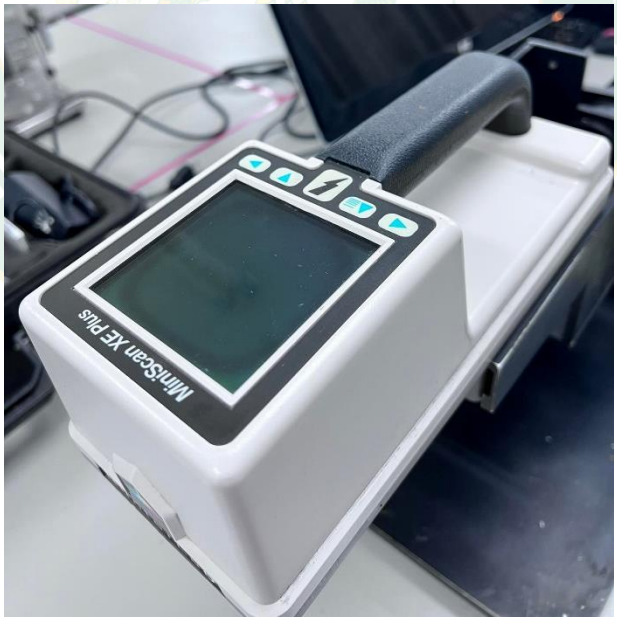
ภาพที่ 29 การจัดเรียงตะกร้าลำไยเข้าตู้รมก่อนรมแก๊สโอโซน

ภาพที่ 30 ลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซน (ซ้าย A) ลำไยหลังจากผ่านการรมโอโซน (ขวา B)

ภาคผนวก ข

ภาพอุปกรณ์ และเครื่องมือ

ภาพที่ 31 เครื่องวัดปริมาณแก๊สโอโซน Gas SENSOR HT-E-O3 (Wide-application; สาธารณรัฐประชาชนจีน)



ภาพที่ 32 เครื่องวัดสีแบบ Hunter lab

ภาพที่ 33 เครื่องมือวัดลักษณะทางประสาทสัมผัส

MAEJO UNIVERSITY

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

KU
KASETSART UNIVERSITY
Proceedings of
The 59th KU Annual Conference
การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59
วันที่ 10-12 มีนาคม 2564
"New Normal KASETSART for
Sustainable Development Goals (SDGs)"
"เกษตรศาสตร์วิถีใหม่
เพื่อเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน"
Proceedings No. 2
SCIENCE TECHNOLOGY
AND ENVIRONMENT
สาขาวิทยาศาสตร์
Science
สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
Engineering and Architecture
สาขาอุตสาหกรรมเกษตร
Agro-Industry
สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
Natural Resources
and Environment
Cisco webex

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Oral Presentation)			
ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	อก.66/O231	ผลของการรมโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไยสด (*Dimocarpus longan* Lour.) สุธาทิพย์ วงศ์พันธุ์เสือ, จตุรภัทร วาฤทธิ์, สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ, ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร, ศรัลยภัคร์ ชำนาญ, พิสุทธิ์ กลิ่นขจร, จักรพงษ์ พิมพ์พิมล	638
2	อก.24/O67	คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันรำข้าวสเตียรีน น้ำมันเมล็ดปาล์ม น้ำมันมะพร้าวและผลของการใช้กลีเซอริลโมโนสเตียเรทต่อคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกของน้ำมัน รัชชดา ลตวรรณ์, ปาริฉัตร หงสประภาส	646
3	อก.16/O60	Ultrasound-assisted extraction for the recovery of proteins from duckweed (*Wolffia globosa*) using response surface methodology Natchaya Duangjarus, Weerachai Chaiworapuek, Pitiporn Ritthiruangdej, Sudathip Sae-tan, Suvimol Charoensiddhi	655
4	อก.40/O117	Isolation and identification of potential emerging foodborne bacteria in raw chicken and pork ground meats Than Than Htay, Sudsai Trevanich	663
5	อก.44/O134	Possible household washing procedure to reduce nitrate content in fresh vegetables from supermarket Karnjana Vachpanich, Kanithaporn Vangnai, Pariyanuj Chulaka, Kullanart Tongkhao	671
6	อก.17/O62	Effect of *Lactobacillus brevis* TISTR 860 and *Lactobacillus plantarum* TISTR 951 on gamma-aminobutyric acid content in fermented rice flour: feasibility study Chonnipa Chittrakhani, Sirichai Songsermpong, Sudsai Trevanich, Rashidah Sukor	677
7	อก.7/O47	การยอมรับและความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อหน้ากากผ้าที่มีแผ่นกรองกลิ่นหอมชนิดถอดเปลี่ยนได้ พรรณภัทร พรหมเพ็ญ, ธัญกร กรุงทองจันทร์, กันต์กนิษฐ์ ไทยงามศิลป์, ศิรินันท์ แก่นทอง, จิตต์โสภา เฉลียวศักดิ์	685
8	อก.46/O135	การสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของสีผิวของขนมปังระหว่างการอบ ธนชาติ มนต์ภัสสร, วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์, มาศอุบล ทองงาม	694

ผลของการรมโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไยสด (*Dimocarpus longan* Lour.)

Effect of ozone-vertical forced air fumigation on postharvest quality of fresh longan (*Dimocarpus longan* Lour.)

สุธาทิพย์ วงศ์พันธุ์เสือ[a], จตุรภัทร วาฤทธิ์[a]*, สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ[a], ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร[a], ศรัณยภัคร์ ชำนาญ[a], พิสุทธิ์ กลิ่นขจร[b], จักรพงษ์ พิมพ์พิมล[c]

Suthathip Wongphansuea[a], Jaturapatr Varith[a]*, Somkiat Jaturonglumlert[a], Chanawat Nitatwichit[a], Saranyapak Chamnan[a], Pisuthi Klinkajorn[b], Jakraphong Phimpimol[c]

[a]หลักสูตรวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

[b]หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

[c]หลักสูตรเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

[a]Food Engineering Program, Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University, Chiangmai 50290, Thailand.

[b]Agricultural Engineering Program, Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University, Chiangmai 50290, Thailand.

[c]Postharvest Technology Program, Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University, Chiangmai 50290, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: varithj@gmaejo.mju.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการรมแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งต่อคุณภาพของลำไยสด โดยทำการรมลำไยสดครั้งละ 9 กก. ด้วยแก๊สโอโซนความเข้มข้น 2000, 4000, 6000 ppm เป็นเวลา 20 นาที ไหลผ่านตะกร้าในแนวตั้งด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 0.5 m/s หลังจากนั้นลำไยจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4±1°C ผลการศึกษาพบว่าการรมแก๊สโอโซนทุกตัวอย่าง สามารถชะลอการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือกลำไยได้ การสูญเสียน้ำหนักและความแน่นเนื้อตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาลำไยเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ค่าดัชนีสี L* และ b* ของลำไยที่รมแก๊สโอโซนมีค่าสูงกว่าลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซน การรมแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งที่ความเข้มข้น 2000 ppm เป็นเวลา 20 นาที สามารถยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดได้จาก 12 เป็น 27 วัน

คำสำคัญ: การยืดอายุการเก็บรักษา, แก๊สโอโซน, ระบบบังคับอากาศแนวตั้ง, ลำไยสด

Abstract

The objective of this work was to study the effects of ozone-vertical forced air fumigation on quality of fresh longan. Gaseous ozone with concentrations of 2000, 4000, 6000 ppm for 20 min was applied on a 9 kg-batch of longan with flow velocity of 0.5 m/s and then stored at 4±1°C. Results indicated that the sample of all ozone fumigation was able to retard the disease incidence and pericarp browning of longan. The weight loss and firmness of longan during shelf storage slightly changed but not significantly different ($p > 0.05$). The L* and b* of ozonated longans were higher than that of the non-ozone. The ozone-vertical forced air fumigation at 2000 ppm for 20 min was able to extend the shelf life of longan from 12 up to 27 days

Keywords: fresh longan, gaseous ozone, shelf-life extension, vertical forced-air fumigation

คำนำ

ลำไยเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่มีสำคัญมากมีปริมาณการส่งออกต่อปีสูงถึง 70,000 ตัน ตลาดหลักของการส่งออกลำไยสด ได้แก่ จีน เวียดนาม ฮ่องกง มาเลเซีย และสิงค์โปร์ ซึ่งการส่งออกลำไยสดนั้นจะต้องคำนึงถึงคุณภาพของลำไยที่ส่งออก โดยทั่วไปแล้วการควบคุมคุณภาพของลำไยสด จะมีการควบคุมการเสื่อมสภาพหลังการเก็บเกี่ยวควบคุมคุณภาพของลำไยสด คือการรมด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่เมื่อไม่นานมานี้ประเทศผู้นำเข้าอย่างเช่น สาธารณรัฐประชาชนจีนได้ทำการกำหนดระดับการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไว้ 50 ppm มาเลเซียและแคนาดาได้ปรับกฎระเบียบเกี่ยวกับการนำเข้าลำไยโดยการลดระดับการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เหลือเพียง 10 ppm เพราะซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างส่งผลเสียอย่างมากต่อร่างกายของผู้บริโภค สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ (2559) จากการศึกษาวิธีการรมลำไยสดด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห้องรมลำไยด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งนั้น มีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้ในกระบวนการรมผลลำไยสด เพราะสามารถลดระดับความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้เหลือเพียง 4,000 ppm โดยยังคงป้องกันการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลลำไยได้ไม่ต่ำกว่า 20 วัน ระหว่างเก็บรักษาและช่วยให้ผลลำไยมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในเนื้อลำไยไม่เกิน 8 ppm ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์สูงสุดที่ประเทศแคนาดาได้กำหนดไว้ที่ 10 ppm และ สาธารณรัฐประชาชนจีนกำหนดไว้ที่ 50 ppm อีกทั้งยังไม่พบการตกค้างในเนื้อลำไยหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 5 วัน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2558)

โอโซน คือสารชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตจากออกซิเจนซึ่งมีอยู่ทั่วไปในอากาศ แก๊สโอโซนมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงแต่สามารถใช้ได้ปลอดภัยกับอาหาร (Generally Recognized As Safe) แก๊สโอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลและทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโมเลกุลของไขมัน เยื่อเมมเบรนที่มีสารอินทรีย์ของสิ่งมีชีวิตทำให้ผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิตอ่อนแอและแตกสลาย (สุรินทราพร และคณะ, 2559) จึงมีการนำโอนโซนมาใช้ประโยชน์ เช่นการนำไปใช้กำจัดเชื้อจุลินทรีย์ แบคทีเรีย เชื้อราต่าง ๆ การฆ่าเชื้อโรค และกำจัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ติดมากับผักและผลไม้ โอโซนผ่านการรับรองจากกระทรวงเกษตรแห่งสหรัฐอเมริกา (USDA) ด้วยข้อกำหนดมาตรฐานที่เรียกว่า “โดยทั่วไปถือว่าปลอดภัย” (GRAS) จนกระทั่งเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน 2544 สำนักงานคณะกรรมอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. FDA) ได้ยอมรับโอโซนทั้งในสถานะแก๊ส และของเหลวอย่างเป็นทางการ ดังนั้นจึงเห็นถึงการนำโอโซนมาประยุกต์ใช้กับระบบดังกล่าวเนื่องจากการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอนาคตอาจเป็นสิ่งต้องห้ามหรือยกเลิกเนื่องจากมีการคำนึงถึงความปลอดภัยทางอาหาร (Food Safety) มากขึ้น ดังนั้นโอโซนจึงเป็นอีกทางเลือกของเทคโนโลยีในอนาคตในการรักษาคุณภาพลำไยหลังการเก็บเกี่ยว

ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในด้านการนำแก๊สโอโซนมาประยุกต์ใช้กับระบบการรมลำไยสดด้วยแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศ โดยจะศึกษาระบบการรมลำไยด้วยแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้ง ศึกษาความเข้มข้นของปริมาณโอโซนและเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในขนาดห้องทดลองเพื่อนำไปปรับประยุกต์ใช้ในขนาดอุตสาหกรรม โดยหวังว่าระบบการรมลำไยสดด้วยแก๊สโอโซนร่วมกับระบบบังคับอากาศแนวตั้งจะช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษาลำไยสด และมีประโยชน์ต่อการใช้แก๊สโอโซนในการรมลำไยสดเพื่อรักษาคุณภาพของลำไยทดแทนการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในขนาดอุตสาหกรรมเพื่อตลาดการส่งออกลำไยสดในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

ลำไยสด (เกรด AA ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 mm.) จากเกษตรกรในจังหวัดเชียงใหม่ โดยจะบรรจุใส่ตะกร้าและมีขนส่งโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการขนส่ง ลำและไยจะต้องผ่านการเก็บเกี่ยวมาแล้วไม่เกิน 3 วัน จากนั้นจะลำไยสดนำมาตัดแต่งคัดแยกผลที่ติดโรคหรือมีเชื้อราออกทิ้ง จำนวน 9 kg

ระบบการรมแก๊สโอโซน

แก๊สโอโซนถูกสร้างขึ้นที่อัตราการผลิตโอโซน 5.5 g /hr. ผ่านเครื่องกำเนิดโอโซนโดยใช้เครื่อง Corona discharger ที่มีอัตราการไหลเข้าของแก๊สออกซิเจน 7.5 L/min (Sintuya et al., 2018). และระบบจะเชื่อมต่อกับห้องรมแก๊สที่มีขนาด 100 m^3 ภายในตู้รมจะมีระบบการหมุนเวียนอากาศแบบแนวตั้งโดยจะใช้การหมุนเวียนที่ความเร็วลม 0.5 m/s ดังแสดงใน Fig. 1

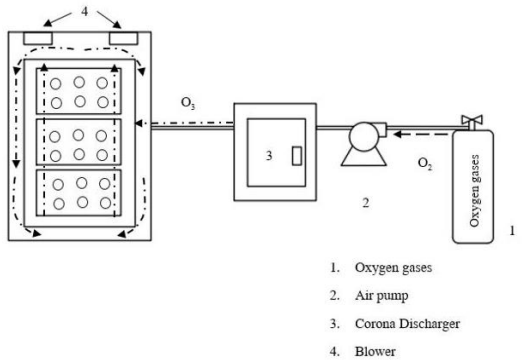


Fig. 1 Ozone-vertical forced air fumigation system

การรมด้วยแก๊สโอโซน

โดยการรมลำไยสดด้วยแก๊สโอโซนจะทำการจัดเรียงลำไยลงในตะกร้าขนาดตะกร้าละ 3 กิโลกรัมจำนวน 3 ตะกร้าและหลังจากนั้นนำมาจัดวางเรียงเป็นแบบแนวตั้งภายในตู้รม ตู้รมโอโซนจะเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องวัดความเข้มข้นของแก๊สโอโซนเมื่อทำการจัดเรียงลำไยเสร็จแล้วจะทำการปิดตู้และเริ่มเปิดแก๊สโอโซน โดยตัวอย่างลำไยสดจะถูกรมด้วยแก๊สโอโซนที่มีความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm เป็นเวลา 20 นาทีหลังจากนั้นจะทำการดูดแก๊สโอโซนออกจากตู้และนำลำไยออกมาระบายความร้อน และตัวอย่างลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมด้วยโอโซนจะถูกแยกออกเป็นตัวควบคุม หลังจากการรมด้วยแก๊สโอโซนตัวอย่างลำไยสดทั้งหมดจะบรรจุในถุงพลาสติก High Density Polyethylene (Chamnan et al., 2019) และเก็บรักษาในตู้ทำความเย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 1° C และจะทำการวัดคุณภาพของลำไยสดในทุก ๆ 3 วัน ตลอดอายุการเก็บรักษา

การตรวจสอบอุบัติการณ์ของโรค

การกำหนดอัตราการเกิดโรคโดยจะทำการวัดพื้นที่ของเชื้อราบนผิวผลลำไยตัวอย่างละ 10 ลูกจำนวน 3 ซ้ำ และจะให้คะแนนเป็น 6 ระดับคือ ระดับ 0 = ไม่มีการเกิดโรคระดับ 1 = 1-20% ระดับ 2 = 21-40% ระดับ

3 = 41-60% ระดับ 4 = 61-80% และระดับ 5 = 81-100% และหากค่าที่ประเมินมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.20 จะถือว่าไม่เป็นที่ยอมรับสำหรับตลาด

การเกิดสีน้ำตาลที่เปลือก

การเกิดผิวสีน้ำตาลบนเปลือกลำไยสด จะการวัดพื้นที่สีน้ำตาลที่ปรากฏบนเปลือกลำไยจากการเสื่อมสภาพของลำไยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาตัวอย่างละ 10 ลูกจำนวน 3 ซ้ำ โดยจะให้คะแนนเป็น 5 ระดับ คือ ระดับ 1 = 0 -20% ระดับ 2 = 21-40% ระดับ 3 = 41 - 60%, ระดับ 4 = 61- 80% และ ระดับ 5 = 81- 100%

การสูญเสียน้ำหนัก

ตัวอย่างลำไยจะมีค่าน้ำหนักเริ่มต้นที่ 300 g สำหรับการวัดการสูญเสียน้ำหนักจะใช้เครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่งที่มีความแม่นยำ ± 0.1 กรัม (รุ่น SF-400A, Micro Precision, China) หลังจากชั่งน้ำหนักลำไยจะถูกเก็บรักษาที่ตู้เก็บอุณหภูมิ 4 ± 1° C ลำไยที่ผ่านการรมชุดเดียวกันจะถูกชั่งน้ำหนักซ้ำ ๆ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาจำนวน 3 ซ้ำ และนำค่ามาวัดการสูญเสียน้ำหนัก ตาม Equation 1

$$\text{Weight loss}\,(\%) = \frac{(\text{Initial weight} - \text{final weight})}{\text{Initial weight}} \times 100 \qquad (1)$$

การวิเคราะห์คุณภาพสี

การวิเคราะห์คุณภาพด้านสีลำไย 10 ลูกจากตัวอย่างจะถูกเลือกแบบสุ่มโดยที่แต่ละผลจะถูกทดสอบของเปลือกนอกของลำไยโดยใช้เครื่องวัดสีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น Mini Scan XE Plus การ วิเคราะห์สีจะวิเคราะห์ด้วย 37 ระบบ CIE โดยการวิเคราะห์วัดสีในเทอมของค่าความสว่าง (L*) และค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (b*) จำนวน 3 ซ้ำ

การวัดความแน่นเนื้อ

การวิเคราะห์ความแน่นเนื้อ ผลลำไย 10 ลูกจากตัวอย่างจะถูกเลือกแบบสุ่มโดยที่แต่ละผลจะถูกทดสอบแบบแทงทะลุด้านแก้มผลจำนวน 3 ซ้ำโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer with ± 0.1 g Accuracy (model TA.XT-PLUS, Stable Micro Systems, UK) การทดสอบความแน่นเนื้อจะใช้หัววัดแบบ Cylinder Plunger SMS-P/2 probe (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm) ด้วยอัตราแรงกด 20%strain ความเร็ว Pre-test, Test, และ Post-test เท่ากับ 3 mm/s 3 mm/s และ 10 mm/s ตามลำดับความแน่นเนื้อหาได้จากค่าแรงสูงสุดที่หัวกดทะลุผ่านเปลือกและเนื้อลำไย

การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลในการออกแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (RCBD) และผลการทดลองถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และ Duncan's Multiple Range Tests. (DMRT) กำหนดค่าความเชื่อมั่นไว้ที่ 95% และความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของโอโซนต่ออุบัติการณ์ของโรคในผลลำไย

พารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับอายุการเก็บรักษาลำไยสด เพราะการอุบัติการณ์ของโรคสามารถกำหนดระยะเวลารักษาคุณภาพของลำไยได้เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แสดงดัง Fig. 2. ให้เห็นว่าอุบัติการณ์ของโรคในตัวอย่างควบคุมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 12 วัน และตัวอย่างลำไยที่ได้รับการรมด้วยโอโซน มีการอุบัติการณ์ของโรคน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการบำบัดเมื่อเก็บไว้ที่ 4 ± 1° C สิ่งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gabler et al. (2010) ที่พบว่าการมด้วยโอโซนช่วยลดการเกิดอุบัติการณ์ของโรคได้ถึง 65% ในองุ่น และนักวิจัยอื่นก็ได้รายงานด้วยว่าการรมโอโซนช่วยลดจำนวนจุลินทรีย์ในผลไม้ลงได้ เช่น ผลไม้กีวี Minas et al. (2010) แอปเปิ้ล ฟูจิ Sheng (2018) เนื่องจาก โอโซนเข้าไปทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ Victorin (1992) ในการศึกษาผลลำไยเมื่อเปรียบเทียบกับโอโซนที่ผ่านการรมแก๊สโอโซนและที่ไม่ไม่ผ่านการรมแก๊สโอโซน ส่งผลให้ลำไยที่ผ่านการรมโอโซนแล้วมีการเกิดอุบัติการณ์ของโรคน้อยกว่า

ผลของโอโซนต่อการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือก

การเกิดสีน้ำตาลบนเปลือก แสดงด้วยดัชนีการเกิดสีน้ำตาล แสดงดัง Fig. 2 การรมโอโซนผลลำไยสดจะช่วยลดดัชนีการเกิดสีน้ำตาลได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนจะเห็นได้ว่าลำไยที่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนที่ 2,000 4,000 และ 6,000 ppm มีการเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1°C ในวันที่ 0 ผลลำไยสดที่รมด้วยแก๊สโอโซนที่ความเข้ม 6,000 ppm แสดงให้เห็นว่ามีสีน้ำตาลในบนเปลือกน้อยกว่าผลลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนแต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเห็นได้ว่ามีการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นการรมโอโซนที่ความเข้มข้นสูงทำให้ลำไยมีการสูญเสียคุณภาพจึงทำให้มีการเกิดสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วเมื่อเก็บไว้เป็นเวลา 12 วันสอดคล้องกันกับ Whangchai et al. (2006) ลำไยสดที่ได้รับโอโซนร่วมกับกรดออกซาลิกจะมีการเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมแก๊สโอโซน

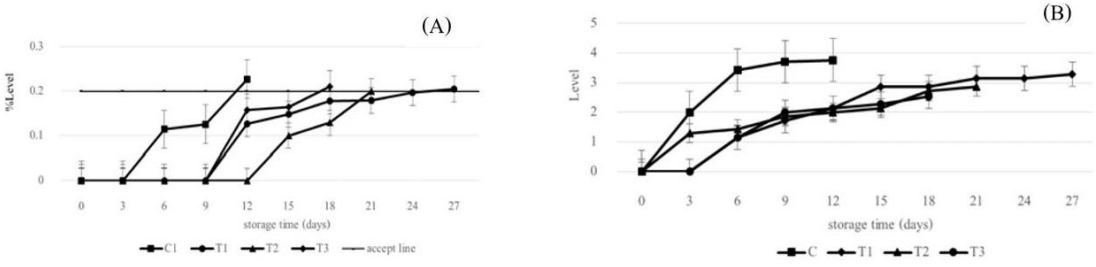


Fig. 2 Effect of ozone on Disease incidence (A), Pericarp browning (B) of longan fruit during storage at 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)

ผลของโอโซนต่อการสูญเสียน้ำหนัก

การรมด้วยแก๊สโอโซนไม่ได้ส่งผลอย่างชัดเจน ต่อการสูญเสียน้ำหนักของผลลำไยสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ถูกรมด้วยแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm เป็นเวลา

20 นาที ในช่วง 18 วันในการเก็บรักษาผลลำไยที่ได้รับโอโซนจะมีน้ำหนักลดลงมากกว่าผลไม้ที่ไม่ได้รับการรม ด้วยโอโซน ตัวอย่างผลไม้ที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน 6,000 ppm มีน้ำหนักลดลงสูงสุด 1.42% ใน 18 วัน แสดงดัง Fig. 3 ผลการทดลองเหล่านี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Chamnan (2019) ที่ว่าการรมด้วยแก๊สโอโซนในสภาวะความดันเหนือบรรยากาศเล็กน้อยไม่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของผลลำไยสด และ Whangchai et al. (2006) ลำไยสดที่ได้รับโอโซนจะไม่มีการสูญเสียน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

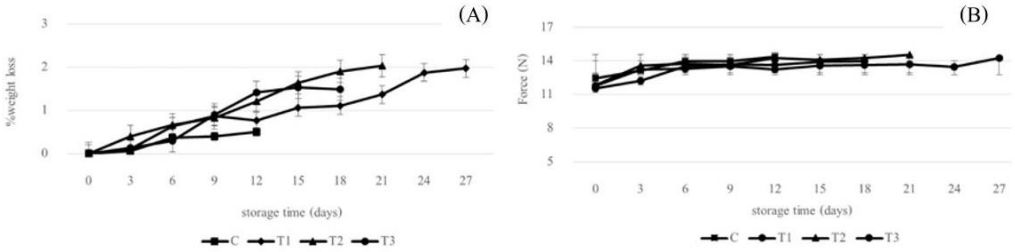


Fig. 3 Effect of ozone on Weight loss (A), Firmness (B) of longan fruit during storage at 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)

ผลของโอโซนต่อความแน่นเนื้อ

ความแน่นเนื้อสามารถกำหนดเป็นพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับความแข็งแรงของผนังเซลล์ของผลลำไยซึ่งอาจมีผลต่อการรมด้วยแก๊สโอโซน พบว่าการรมด้วยแก๊สโอโซนไม่ได้ส่งผลต่อความแน่นเนื้อลำไยสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1°C ความแน่นเนื้อของลำไยอยู่ในช่วง 11.56 ถึง 14.55 N แสดงดัง Fig. 4 ผลลำไยสดมีเปลี่ยนความแน่นเนื้อเพียงเล็กน้อย แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการทดฃองสอดคล้องกับ Martín et al. (2018) รายงานว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในค่าความแน่นเนื้อระหว่างส้มที่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนและการรมด้วยแก๊สโอโซนไม่ส่งผลต่อคุณภาพความแน่นเนื้อของผลส้ม เช่นเดียวกับ ผลไม้กีวี Minas et al. (2010) แอปเปิ้ลฟูจิ Sheng (2018) ที่สรุปว่าผลของการรมโอโซนไม่ได้ส่งผลอย่างต่อความแน่นของผลไม้

ผลของโอโซนต่อสี

สีเป็นปัจจัยหนึ่งในการตัดสินคุณลักษณะทางกายภาพสำหรับการซื้อขายผลลำไยสดพบว่าทันทีหลังจากการรมโอโซน (วันที่ 0) ผลลำไยที่ควบคุมมีค่า L* และ b* เพิ่มขึ้นจาก 50.37 และ 32.54 เพิ่มขึ้นเป็น 58.47 และ 36.11 สาเหตุที่ค่า L* ของลำไยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากผลจากฤทธิ์การฟอกขาวของโอโซนที่มีความเข้มข้นสูง Forney (2003) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1°C ลำไยที่รมแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm มีค่า L* และ b* สูงกว่าลำไยควบคุม และมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานกว่าลำไยคบคุมที่มีสีน้ำตาลเข้มโดยจะเห็นได้ว่าลำไยที่ผ่านการรมที่ความเข้ม 6,000 ppm จะมีค่า L* สูงที่สุดแต่มีค่า b* ต่ำสุด ผลเนื่องจากเกิดจากเนื่องจากผลจากฤทธิ์การฟอกขาวของโอโซนที่มีความเข้มข้นสูง แสดงดัง Fig. 4 ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chamnan (2019) ซึ่งรมแก๊สโอโซนกับลำไยภายใต้สภาวะความดันสูงกว่าบรรยากาศและเก็บในบรรจุภัณฑ์มี L* และ b* (สีเหลืองน้ำตาลอ่อน) สูงกว่าลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซนและอายุการเก็บรักษานานกว่าลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซนเช่นเดียวกัน และผลของสีการฟอกขาวของ

โอโซนเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากฤทธิ์ของโอโซนส่งผลให้เปลือกของลำไยสว่างขึ้น ดังแสดง Fig. 5 เมื่อเปรียบเทียบกับลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซน

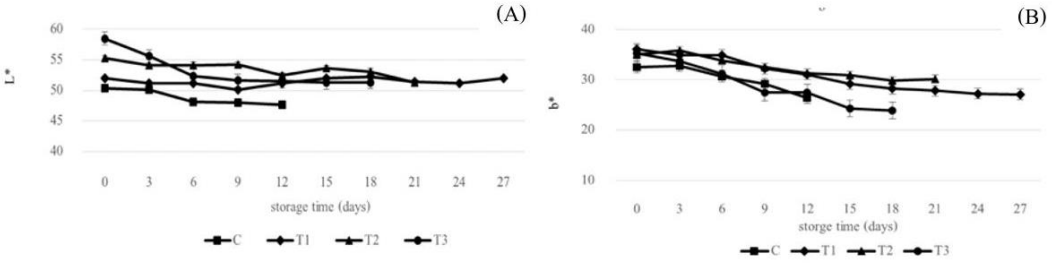


Fig. 4 Effect of gaseous ozone and on color L* value (A), b* value (B) of longan fruit during storage at 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)

A B C D

Fig. 5 Effect of gaseous ozone and on color (A = Non, B = 2,000, C = 4,000, D = 6,000 ppm)

ผลของการรมแก๊สโอโซนต่ออายุการเก็บรักษาลำไย

แก๊สโอโซนสามารถยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดได้และผลของการรมโอโซนที่ความเข้มต่างกันส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาและคุณภาพของลำไย จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาของลำไยต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 ppm เป็นเวลา 20 นาทีหรือเทียบเท่าที่โดสความเข้มข้น CT (Concentration x Time) เท่ากับ 40,000 ppm.min สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ยาวนานที่สุดถึง 27 วัน เพราะคุณสมบัติของโอโซนมีฤทธิ์ทำลายเนื้อเยื่อผนังเซลล์ที่มีน้ำ โอโซนไปทำลายเนื้อเยื่อบริเวณเปลือกของลำไย ทำให้มีการเกิดเชื้อราได้ยากมากกว่าลำไยที่รมด้วยความเข้มข้นสูงกว่าที่จะส่งผลต่อเนื้อเยื้อเปลือกของลำไย ทำให้การรมลำไยที่ความเข้มข้น 2,000 ยืดอายุได้สูงสุดเพราะไม่ส่งผลทำลายคุณภาพด้านเปลือกนอกของลำไยสด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chamnan (2019) ซึ่งรมแก๊สโอโซนกับลำไยภายใต้สภาวะความดันสูงกว่าบรรยากาศ ที่โดสความเข้มข้น CT คือ 40,000 ppm.min สามารถยืดอายุของลำไยสดได้นานที่สุด

สรุป

แก๊สโอโซนสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและไม่ส่งผลต่อคุณภาพความสดของลำไยสด เช่น การเกิดอุบัติการณ์ของโรค การเกิดสีน้ำตาล และสีเปลือกของผลลำไยสด โดยผลลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมโอโซนมีอุบัติการณ์ของโรคอย่างเร็ว และเกิดสีน้ำตาลบนเปลือกมากกว่าลำไยที่ผ่านการรมแก๊สโอโซน ลำไยที่ผ่านการรมแก๊สโอโซนไม่มีการสูญเสียน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ มี L * และ b * น้อยกว่าเมื่อการเก็บรักษาเป็นเวลา 12 วัน ลำไย

ที่ผ่านการรมด้วยโอโซนที่ความเข้ม 2,000 ppm จะมีการเกิดอุบัติการณ์ของโรคช้ากว่า ทำให้ยืดอายุการเก็บรักษาของผลลำไยได้นานขึ้น สูงสุดถึง 27 วัน และควรจะต้องศึกษาเกี่ยวกับความเร็วลมในระบบเพิ่มเติมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2558. ห้องรมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์. https://www.mhesi.go.th/8 กุมภาพันธ์ 2563.

สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ. 2559. รายงานการส่งออกระหว่างประเทศ (ลำไย). https://www.ditp.go.th/, 8 กุมภาพันธ์ 2563.

สุรินทราพร ชั่งไชย, จตุรภัทร วาฤทธิ์, สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ, กาญจนา นาคประสม, ณัฏฐ์พัชร เถียรวรกานต์, พิสุทธิ์ กลิ่นขจร. 2559. การใช้แก๊สโอโซนในการกำจัดหนอนแมลงวันผลไม้ (Bactrocera latifrons) ในพริก. วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร. 33: 13–23.

Chamnan, S., Varith, J., Jaturonglumlert, S., Klinkajorn, P., Phimphimol, J. 2019. The effect of packaging materials on the quality of freshness of longan fumigated with medium concentration-ozone gas. Pertanika Journal of Science and Technology 27: 159–168.

Forney, C.F. 2003. Postharvest response of horticultural products to ozone. In: Hodges, D.M. (Ed.). Postharvest oxidative stress in horticultural crops. Food Products Press. Binghamton, NY, USA. pp. 13–54.

Gabler, F.M., Smilanick, J.L., Mansour, M.F., Karaca, H. 2010. Influence of fumigation with high concentrations of ozone gas on postharvest gray mold and fungicide residues on table grapes. Postharvest Biology and Technology 55: 85–90.

Minas, I.S., Karaoglanidis, G.S., Manganaris, G.A., Vasilakakis, M. 2010. Effect of ozone application during cold storage of kiwifruit on the development of stem-end rot caused by Botrytis cinerea. Postharvest Biology and Technology 58: 203–210.

Martín, J., Olmo, M., García, J. 2018. Effect of ozone treatment on postharvest disease and quality of different citrus varieties at laboratory and at industrial facility. Postharvest Biology and Technology 137: 77–85.

Sintuya, P., Narkprasom, K., Jaturonglumlert, S., Whangchai, N., Peng-Ont, D., Varith, J. 2018. Effect of gaseous ozone fumigation on organophosphate pesticide degradation of dried chilies. Ozone Science and Engineering 6: 473–481.

Victorin, K. 1992. Review of genotoxicity of ozone. Mutation Research 277: 221–238

Whangchai, K., Saengnil, K., Uthaibutra, J. 2006. Effect of ozone in combination with some organic acids on the control of postharvest decay and pericarp browning of longan fruit. Crop Protection 25: 821–825.

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวสุธาทิพย์ วงศ์พันธุ์เสือ

เกิดเมื่อ 25 มกราคม 2539

ประวัติการศึกษา 2557 วิทย์-คณิต โรงเรียนนิยมศิลป์อนุสรณ์ จ.เพชรบูรณ์

2561 สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จ.พิษณุโลก