



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

รหัสโครงการ PRP6505031960

การควบคุมคุณภาพและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อม
บริโภคระดับอุตสาหกรรมเพื่อการส่งออก (ต่อยอดปีที่ 2)

Control of quality and microbial contamination of fresh-cut durian in
the industry level for exporting (Phase 2)

คณะผู้วิจัย

รศ.ดร. ผ่องเพ็ญ จิตอารีรัตน์	หัวหน้าโครงการ
รศ.ดร. จตุรภัทร วาฤทธิ์	ผู้ร่วมโครงการ
รศ.ดร. สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ	ผู้ร่วมโครงการ
รศ.ดร. ณัฐฐา เลาหลกุลจิตต์	ผู้ร่วมโครงการ
รศ.ดร. อภิรดี อุทัยรัตนกิจ	ผู้ร่วมโครงการ
ดร. กัลยา ศรีพงษ์	ผู้ร่วมโครงการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ร่วมกับ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร
ปีงบประมาณ 2565

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การควบคุมคุณภาพและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคระดับอุตสาหกรรมเพื่อการส่งออก (ต่อยอดปีที่ 2) ได้รับทุนอุดหนุนการพัฒนาการวิจัยการเกษตร งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2565 ทุเรียนเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ที่มีปริมาณและมูลค่าการส่งออกเป็นอันดับที่ 1 ในบรรดาผลไม้ทั้งหมด ทุเรียนเป็นที่ต้องการของตลาดต่างประเทศโดยเฉพาะประเทศจีน ไต้หวัน เวียดนาม มาเลเซีย เป็นต้น ปัจจุบันปัญหาการส่งออกทุเรียนผลสดคือ ทุเรียนไม่สุกเมื่อไปถึงปลายทางหรือผลสุกมากเกินไปจนเน่าเสียจากเชื้อรา และมีการปนเปื้อนของแมลงศัตรูพืช นอกจากนี้ทุเรียน 1 ผล มีส่วนที่บริโภคได้ 30-35 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ต้นทุนในการขนส่งผลสดจึงสูงและหมดไปกับการขนส่งส่วนเปลือกที่บริโภคไม่ได้ ดังนั้นการส่งออกเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคจึงเป็นช่องทางการตลาดที่ลดปัญหาเหล่านี้ แต่จำเป็นต้องควบคุมคุณภาพการผลิต และการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในมนุษย์และจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการรมก๊าซโอโซนช่วยลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพัฒนาต่อยอดการวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยพัฒนาเครื่องรมก๊าซโอโซนต้นแบบสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค จำนวน 2 โมเดล คือ ตู้รมก๊าซโอโซนแบบถาดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก และเครื่องฉีดก๊าซโอโซนกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยวเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกลาง และทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรมก๊าซโอโซนต้น ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค ตลอดจนผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการวิจัยที่ได้ในโครงการนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการจำหน่ายทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคทั้งภายในประเทศและต่างประเทศต่อไป

คณะผู้วิจัย

25 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์รมก๊าซโอโซนต้นแบบสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร 2) ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์รมก๊าซโอโซน และ 3) ศึกษาผลกระทบของโอโซนที่มีต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การพัฒนาตู้รมก๊าซโอโซนแบบถาดสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร (โมเดลที่ 1) ได้ออกแบบและสร้างตู้รมก๊าซโอโซนขนาด ปริมาตรห้องรมก๊าซ $1.0 \times 0.6 \times 1.2$ ม. เท่ากับปริมาตรห้องรม 0.72 ลบ.ม. โครงสร้างทำจากเหล็กสแตนเลสเกรด 304 มีถาดวางทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร จำนวน 60 ถาด รวมได้ 30 กก. ติดตั้งเครื่องกำเนิดโอโซนขนาด 5 g/hr จำนวน 2 เครื่อง อัตรากำลังไฟฟ้าเครื่องละ 90 W สามารถสร้างความเข้มข้นของก๊าซโอโซนได้ประมาณ 2500 PPM ภายใน 12 นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซน 12 L/min ภายในตู้ออกแบบให้มีการไหลของอากาศแบบบังคับ จากซ้ายไปขวา และสร้างความดันตกคร่อมภายในพื้นที่ห้องรมก๊าซให้สามารถกระจายก๊าซได้สม่ำเสมอ อัตราการไหลของอากาศไหลผ่านผลทุเรียนตัดแต่งมีความประมาณ 0.5 m/s ซึ่งอยู่ในระดับที่ช้าเพียงพอให้ก๊าซโอโซนมีระยะเวลาสัมผัสกับเนื้อทุเรียนได้ดี ส่วนล่างของตู้รมก๊าซ มีถังบำบัดก๊าซโอโซนเหลือจ่ายติดตั้งอยู่ โครงสร้างทำจากเหล็กสแตนเลสภายในบรรจุด้วยตะแกรงบรรจุผงคาร์บอน 4 ชุด วางสลับกับผง MnO_4 อีก 4 ชุด สามารถบำบัดก๊าซโอโซนเหลือจ่ายได้ภายในเวลา 10 นาที มี PLC ควบคุมระบบสามารถปรับตั้งและควบคุมการทำงานได้จากหน้าจอ HMI และผ่านระบบ SCADA ด้วย Mobile application ตู้รมแก๊สโอโซนมีรอบการใช้งานประมาณ 40 นาทีต่อรอบ มีกำลังการผลิตเฉลี่ย 90 ถาดต่อชั่วโมง หรือเทียบเท่า 45 กก.ทุเรียนต่อชั่วโมง

ส่วนที่ 2 การพัฒนาเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยวสำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร (โมเดลที่ 2) ได้ออกแบบเครื่องฉีดโอโซนให้เป็นแบบสายพานลำเลียง โครงสร้างทำจากเหล็กสแตนเลสเกรด 304 ทั้งหมด สายพานทำงานที่ความเร็ว 1 m/min สามารถบรรจุกล่องทุเรียนได้จำนวน 32 ถาด เคลื่อนที่แบบเป็นชุด ๆ ละ 4 ถาด มีการฉีดก๊าซโอโซนเข้ากล่องบรรจุทุเรียนตัดแต่งและติดสติ๊กเกอร์ได้ครั้งละ 2 ถาด อัตราการฉีดแก๊สที่ 1 L/m ต่อกล่อง หากปรับตั้งระยะเวลาฉีดไว้ 20 วินาที จะได้ความเข้มข้นในกล่องเปล่าประมาณ 1,260 ppm มี PLC ควบคุมระบบ สามารถปรับตั้งและควบคุมการทำงานได้จากหน้าจอ HMI และผ่านระบบ SCADA ด้วย Mobile application เครื่องฉีดมีกำลังผลิต 240 ถาดต่อชั่วโมง หรือเทียบเท่า 120 กิโลกรัม ทุเรียนต่อชั่วโมง

ส่วนที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพของตูรมโอโซนแบบถาดและเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียวในการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ โดยได้แบ่งการทดสอบเป็นดังนี้

3.1) การทดสอบประสิทธิภาพของตูรมโอโซนแบบถาดในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในสภาพจานอาหารเลี้ยงเชื้อ (*in vitro*) โดยนำเชื้อ Non-pathogenic *E. coli* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ $8.19 \log \text{ CFU/mL}$ เกลี่ยบนหน้าอาหาร EMB agar แล้วนำไปรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm เป็นเวลา 3 นาที ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด พบว่าการรมโอโซนด้วยตูรมโอโซนแบบถาดสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ Non-pathogenic *E. coli* ได้อย่างสมบูรณ์ (ไม่พบโคโลนีของเชื้อบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ)

3.2) จากนั้น ศึกษาประสิทธิภาพของตูรมโอโซนแบบถาดในการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียน โดยนำทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครบรรจุลงในกล่อง PET clamshell จากนั้นแบ่งเนื้อทุเรียนตัดแต่งมาออกเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เนื้อทุเรียนที่ไม่ปลุกเชื้อและไม่รมโอโซน กลุ่มที่ 2 ทุเรียนที่ไม่ปลุกเชื้อและรมโอโซน กลุ่มที่ 3 ทุเรียนที่ปลุกเชื้อ non-pathogenic *E. coli* และไม่รมโอโซน และกลุ่มที่ 4 เนื้อทุเรียนที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* และรมโอโซน ความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้คือ 900 ppm นาน 3 นาที หลังจากนั้นย้ายตัวอย่างทุเรียน มาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน หลังจากนั้นย้ายออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน ผลการทดลองพบว่าการรมโอโซนด้วยตูรมโอโซนแบบถาดช่วยลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในเนื้อทุเรียนพร้อมบริโภคลงได้ โดยมีผลทำให้เชื้อ total bacteria ลดลง $1.84 \log$ และ *E. coli* ลดลง $2.29 \log$ และการรมโอโซนมีผลช่วยลดอัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีน ชะลอการลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระของเนื้อทุเรียน และมีคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคสูงกว่าทุเรียนในชุดควบคุม แต่ไม่มีผลต่อสีของเนื้อทุเรียน ความแน่นเนื้อ และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียน

3.3) การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว นำเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครบรรจุลงในกล่อง clamshell ที่เจาะรูขนาด 1.2 เซนติเมตร แบ่งทุเรียนออกเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เนื้อทุเรียนที่ไม่ปลุกเชื้อและไม่รมโอโซน กลุ่มที่ 2 ทุเรียนที่ไม่ปลุกเชื้อและรมโอโซน กลุ่มที่ 3 ทุเรียนที่ปลุกเชื้อ non-pathogenic *E. coli* และไม่รมโอโซน และกลุ่มที่ 4 เนื้อทุเรียนที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* และรมโอโซน กรณีเนื้อทุเรียนที่รมโอโซน จะนำกล่องทุเรียนไปวางบนสายพานและทำการฉีดก๊าซโอโซนใส่ในกล่อง เป็นเวลา 20 วินาที (ได้ความเข้มข้นโอโซนเฉลี่ยเท่ากับ 1,281 ppm) จากนั้นนำตัวอย่างทุเรียนทั้งหมดไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน ผลการทดลองพบว่าการรมโอโซนด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ได้ $2.65 \log$ และ *E. coli* ได้ $1.63 \log$ และมีผลช่วยลดการผลิตเอทิลีน ชะลอการลดลงของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ไม่มีผลต่อสี

ของเนื้อทุเรียน แต่ส่งผลให้ทุเรียนมีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อทุเรียนที่ไม่ได้รมโอโซน

ส่วนที่ 4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และประเมินความเป็นไปได้ในการลงทุน

การผลิตทุเรียนรมก๊าซโอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องขนาด 500 กรัม โดยมีสมมติฐานราคาต้นทุนทุเรียนที่บรรจุกล่องพร้อมบริโภคราคา 350 บาทต่อกล่อง และระยะเวลา 8 ชั่วโมงปฏิบัติงานต่อวัน หากเพิ่มการรมก๊าซโอโซนด้วยตูรมก๊าซโอโซนมีกำลังการผลิตประมาณ 64,800 กล่อง/ปี จะมีต้นทุนการผลิตรวมบรรจุภัณฑ์และเนื้อทุเรียนอยู่ที่ 352.05 บาท/กล่อง และต้นทุนการผลิตเฉพาะการปฏิบัติงานรมก๊าซโอโซนไม่รวมค่าวัตถุดิบทุเรียน 2.05 บาท/กล่อง เมื่อเทียบกับการผลิตด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่มีกำลังการผลิตประมาณ 172,800 กล่อง/ปี จะมีต้นทุนการผลิตรวมบรรจุภัณฑ์และทุเรียนอยู่ที่ 353.00 บาท/กล่อง และต้นทุนการผลิตไม่รวมค่าวัตถุดิบ 3.00 บาท/กล่อง ซึ่งต้นทุนการผลิตด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติแพงกว่า เนื่องมาจากการลงทุนที่แพงกว่า และมีกำลังการผลิตที่สูงกว่าการผลิตด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด ส่งผลให้การผลิตด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมีต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันสูงกว่าต้นทุนการผลิตด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด

ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เพื่อการลงทุนนั้น พบว่า ตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดที่มีกำลังการผลิต 64,800 กล่อง/ปี มีการลงทุน 300,000 บาท ในขณะที่เครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีกำลังการผลิต 172,800 กล่อง/ปี ต้องใช้เงินลงทุน 800,000 บาท ด้วยกำลังการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้การลงทุนมีความแตกต่างกัน โดยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมีการลงทุนที่สูงกว่าเนื่องจากมีกำลังการผลิตที่มากกว่าตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด การเปรียบเทียบระหว่างการผลิตทุเรียนรมก๊าซโอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทานด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดและเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยกำหนดราคาขายไว้ที่ 400 บาท/กล่อง ส่งผลให้มีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 6,257 และ 17,021 กล่อง/ปี ตามลำดับ และมีระยะเวลาคืนทุนของการลงทุนเท่ากัน คือ 36 วัน เมื่อพิจารณาถึงการลงทุนการผลิตทุเรียนรมก๊าซโอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทานด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดเทียบกับเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ พบว่าทั้งสองเครื่องมีกลุ่มเป้าหมายผู้ใช้งานที่แตกต่างกัน สำหรับตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดเหมาะสำหรับกลุ่มผู้ผลิตขนาดเล็กและการลงทุนไม่สูงมากนัก หรือการผลิตเพื่อขายเหมาะกับการขายภายในประเทศ ไม่ต้องดูแลการซ่อมบำรุงซับซ้อน ส่วนเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติเหมาะกับผู้ประกอบการระดับอุตสาหกรรมการผลิตขนาดใหญ่ และจำเป็นที่จะต้องมีการปฏิบัติงานที่เข้าใจระบบควบคุมอัตโนมัติ และมีการซ่อมบำรุงที่ซับซ้อนมากกว่าตูรมโอโซนแบบถาด

คำสำคัญ: อาหารปลอดภัย ทุเรียนตัดแต่ง การใช้โอโซน คุณภาพหลังการเก็บเกี่ยว

Abstract

The objective of this research was to 1) design and create a prototype ozone fumigation machine, 2) test the efficiency of an ozone fumigation machine for eliminating microbial contamination in fresh-cut durian, and 3) test the quality of fresh-cut durian after treatment with ozone gas. The experiments were divided into 4 parts.

Part 1: Development of ozone gas fumigation chamber with tray for small-scale industry to reduce contamination of microorganisms in fresh-cut durian (Model 1)

A gaseous ozone chamber with a dimension of 1.0x0.6x1.2 meters, equivalent to a chamber volume of 0.72 cubic meters, was designed and constructed. The structure is made of grade 304 stainless steel, featuring trays for the clamshell box of fresh-cut durians, with a capacity of 60 boxes totaling 30 kg. Two ozone generators with a capacity of 5 g/hr each were installed, with a power rating of 90 W each. They can generate an ozone concentration of approximately 2500 PPM within 12 minutes at a flow rate of 12 L/min. The chamber is designed for forced airflow from left to right, creating uniform pressure within the ozone chamber area for consistent gas distribution. The airflow rate inside the chamber is designed to be approximately 0.5 m/s, which is sufficiently slow to allow for good contact time between ozone gas and durian flesh. At the bottom of the ozone chamber, there is a residual ozone treatment tank installed. The structure is made of stainless steel and contains four sets of carbon powder-filled grids alternated with another four sets filled with MnO₄ powder. The system can treat residual ozone gas within 10 minutes. The fumigation system is controlled by a PLC, allowing for adjustment and control of operations through an HMI screen and via the remote SCADA system using a mobile application. The ozone gas chamber has an operating cycle of approximately 40 minutes per cycle, with an average production capacity of 90 boxes per hour, which is equivalent to 45 kg of durians per hour.

Part 2: Development of a semi-automatic ozone gas injection machine for single packaging in the medium-sized industry to reduce contamination of microorganisms in fresh-cut durian (Model 2).

The ozone injection system was designed as a conveyor belt with a structure made entirely of grade 304 stainless steel. The conveyor operates at a speed of 1.0 m/min. It can accommodate 32 durian boxes, with movement occurring in sets of 4 boxes. The machine injects ozone gas into the boxes containing fresh-cut durians and affixes stickers, with the capacity to process 2 boxes at a time. The gas injection rate is set at 1 L/min per box, and if the injection time is set to 20 seconds, the concentration in an empty box is approximately 1260 ppm. The system is controlled by a PLC, allowing for adjustment and control of operations through an HMI screen and via the SCADA system using a mobile application. The injection machine has a production capacity of 240 boxes per hour, which is equivalent to 120 kg of durians per hour.

Part 3 – Test the efficiency of an ozone gas fumigation chamber with a tray for small-scale industry and a semi-automatic ozone gas injection machine for single packaging to eliminate microbial contamination. The investigation was separated into 4 steps as the following.

3.1) The effectiveness of an ozone gas fumigation chamber with a tray for eliminating microorganisms was investigated in a culture medium (in vitro test). Non-pathogenic *E. coli* at the concentration of 8.19 log CFU/mL was spread on the surface of EMB agar prior to fumigating with ozone at 900 ppm for 3 min. The result revealed that a tray-type ozone gas fumigation chamber had the ability to kill non-pathogenic *E. coli* completely (no bacterial colony was found on the culture media).

3.2) After that, the efficiency of an ozone gas fumigation chamber with a tray for eliminating microorganisms and the quality of fresh-cut durian was investigated. Fresh-cut durian in the clamshell was separated into 4 groups. The first group was non-inoculated fresh-cut durian and non-ozone fumigation. The second group was non-inoculated fresh-cut durian that was treated with ozone gas. The third group was non-pathogenic *E. coli* inoculated fresh-cut durian and non-ozone fumigation. The fourth group was non-pathogenic *E. coli* inoculated fresh-cut durian that was treated with ozone gas. The ozone concentration used in this experiment was 900 ppm for 3 min. All samples were kept at 4°C for 14 days and then transferred to 10°C for 1 day. The results showed a tray-type ozone gas fumigation chamber had the efficiency to reduce the contamination of total bacteria by 1.84 log CFU and *E.coli* by 2.29 log CFU. The ozone treatment could help to retard the respiration rate and ethylene production

and delay the decrease of antioxidant capacity. Moreover, the consumer acceptance score of ozone-treated fresh-cut durian was higher than that of non-treated durian. Ozone treatment did not negatively affect the color, firmness, and total soluble solids (TSS) of fresh-cut durian.

3.3) The effectiveness of a semi-automatic ozone gas injection machine for single packaging for eliminating microorganisms and the quality of fresh-cut durian was investigated. Fresh-cut durian was packed in the clamshell with a hole ($\varnothing$ 1.2 centimeters). Fresh-cut durian in the clamshell was separated into 4 groups. The first group was non-inoculated fresh-cut durian and non-ozone fumigation. The second group was non-inoculated fresh-cut durian that was treated with ozone gas. The third group was non-pathogenic *E. coli* inoculated fresh-cut durian and non-ozone fumigation. The fourth group was non-pathogenic *E. coli* inoculated fresh-cut durian that was treated with ozone gas. In the case of ozone fumigation, the clamshells were placed in the conveyor, and the ozone gas was injected into the clamshell for 20 sec (the average ozone concentration inside the clamshell was 1,281 ppm). Afterward, all fresh-cut durian samples were kept at 4°C for 14 days and then transferred to 10°C for 1 day. The result found that a semi-automatic single-package ozone gas injection machine could reduce the contamination of total bacteria by 2.65 log CFU and *E. coli* by 1.63 log CFU. The ozone treatment reduced ethylene production, delayed the decrease in TSS, and had no effect on the color changes of fresh-cut durian. However, it promoted the respiration rate when compared to non-ozone treatment.

Part 4 – Economic analysis and investment feasibility analysis.

The economic analysis of ozonated fresh-cut durian packaged in 500-gram boxes is conducted based on hypotheses of the boxed durian cost of 350 Bahts per box and with the production rate of 8 hrs. per day. By incorporating ozone gas treatment using an ozone gas chamber (Model 1), the production capacity is estimated at approximately 64,800 boxes per year. The total production cost, including packaging and durian content, is calculated to be 352.05 Baht per box. The production cost excluding durian raw materials is 2.05 Baht per box. When compared to production using a semi-automatic ozone gas injection machine (Model 2) with a production capacity of approximately 172,800 boxes per year, the total production cost, including packaging and durian, is 353.00 Baht per box. The production cost excluding raw

materials is 3.00 Baht per box. The feasibility analysis reveals that the ozone gas chamber with a production capacity of 64,800 boxes per year requires an investment of 300,000 Bahts. In contrast, the semi-automatic ozone gas injection machine with a production capacity of 172,800 boxes per year requires an investment of 800,000 Bahts. With different production capacities, the investments differ, making the semi-automatic injection machine more costly due to higher initial investment but higher production capacity compared to the tray-based ozone gas chamber. The comparison between producing durians with ozone gas treatment using a tray-based ozone gas chamber (model 1) and a semi-automatic gas injection machine (model 2), with a selling price set at 400 Baht per box, results in a breakeven point of 6,257 and 17,021 boxes per year, respectively. The payback period for both investments is the same at 36 days. When considering the production investment in durians with ozone gas treatment using a tray-based ozone gas chamber (model 1) versus a semi-automatic injection machine (model 2), it is found that both machines suit to different user groups. The tray-based ozone gas chamber is suitable for small-scale producers with a lower investment threshold or for domestic sales without the need for complex maintenance. On the other hand, the semi-automatic gas injection machine is suitable for large-scale industrial producers, requiring operators with an understanding of automatic control systems and more complex maintenance compared to the tray-based ozone gas chamber.

Keywords: food safety, minimally processed durian, ozone treatment, postharvest quality

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อไทย	ข-ง
บทคัดย่ออังกฤษ	จ-ช
สารบัญรวม	
สารบัญรูป	
สารบัญตาราง	
บทที่ 1 บทนำ	1-4
บทที่ 2 สํารวจเอกสาร	5-12
บทที่ 3 ดำเนินการวิจัย	13-29
บทที่ 4 ผลการทดลอง	30-114
บทที่ 5 วิจาร์ณผลการทดลอง	115- 120
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	121- 123
เอกสารอ้างอิง	124- 130
ภาคผนวก	131- 153

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะของทุเรียนที่ไม่@รมโอโซน (control) และรมโอโซน 900 ppm เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C นาน 14 และ 21 วัน	7
3.1	แนวความคิดการออกแบบตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดสำหรับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโศค (โมเดลที่ 1)	14
3.2	ลักษณะการวางซ้อนกล่องแบบ Clamshell box ซึ่งจัดเรียงบนถาดภายในตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดล 1)	15
3.3	แนวความคิดการศึกษาระบบการผลิตและหั่วฉีดย้อนก๊าซโอโซนเข้าสู่บรรจุภัณฑ์แบบมีถังสำรอง	17
3.4	แนวความคิดการศึกษาระบบการผลิตและหั่วฉีดย้อนก๊าซโอโซนเข้าสู่บรรจุภัณฑ์แบบผลิตก๊าซโอโซนโดยตรง	17
3.5	แนวความคิดการออกแบบเครื่องฉีดย้อนก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2)	18
3.6	ลักษณะการวางจานอาหารเลี้ยงเชื้อ (จำนวน 3 จานหรือซ้ำ) ในถาดขนย้ายเนื้อทุเรียนตัดแต่งบริโศค จำนวน 5 ตำแหน่งต่อถาด (ชั้น)	19
3.7	ลักษณะการจัดเรียงกล่องตัวอย่างทุเรียนภายในตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดล 1)	21
3.8	เนื้อทุเรียนส่วนสีเหลืองและสีขาวที่ใช้ในการวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์	22
3.9	Hue sequence และ Hue angle ในแผนผังของ CIELAB	23
4.1	Conceptual design ของตูรมก๊าซแบบถาด	30
4.2	ภาพรวมของตูรมก๊าซโอโซนสำหรับทุเรียนตัดแต่งพร้อมรับประทาน (หน่วยเป็น มม.)	32
4.3	รายละเอียดของการตูรมก๊าซโอโซนสำหรับทุเรียนตัดแต่งพร้อมรับประทาน	32
4.4	แสดงทิศทางการไหลในตูรมก๊าซโอโซน และตำแหน่งวัดค่าความดันตกคร่อม	33
4.5	ผลการวัดค่าความดันตกคร่อมที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อที่ทางออกเป็น a) ตะแกรง 2 รู b) ตะแกรง 4 รู และ c) ตะแกรง 6 รู	34
4.6	การคำนวณ CFD เพื่อหาค่าความดันตกคร่อมที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อที่ทางออกเป็น a) ตะแกรง 2 รู b) ตะแกรง 4 รู และ c) ตะแกรง 6 รู	35
4.7	แสดงทิศทางการไหลในตูรมก๊าซโอโซน และตำแหน่งวัดค่าความเร็วลม	36

4.8	ผลการวัดค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อที่ทางออกเป็น a) ตะแกรง 2 รู b) ตะแกรง 4 รู และ c) ตะแกรง 6 รู	37
4.9	การคำนวณ CFD เพื่อหาค่าความดันตกคร่อมที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อที่ทางออกเป็น a) ตะแกรง 2 รู b) ตะแกรง 4 รู และ c) ตะแกรง 6 รู	38
4.10	แสดงลักษณะและพื้นที่รูเจาะที่ลมไหลผ่านเข้าและออก	40
4.11	แสดงผลการพัฒนาตู้รมก๊าซไอโซนแบบภาตสำหรับระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 1)	40
4.12	การสร้างและประกอบตู้รมก๊าซไอโซน	41
4.13	การติดตั้งแผ่นกั้นลมทางลมเข้าด้านขวา (ก) และทางลมออกด้านซ้าย (ข)	42
4.14	ขอบยางซิลิโคนกว้าง 10 มม.หนา 2 มม. ติดรอบฝาช่องลมขาเข้าและออก เพื่อกันก๊าซรั่วออกสู่ภายนอก	43
4.15	ตู้รมก๊าซไอโซนสำหรับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคเมื่อประกอบและสร้างแล้วเสร็จ	43
4.16	ความเข้มข้นของก๊าซไอโซนในตู้รมก๊าซไอโซนในตู้รมเปล่า	45
4.17	แผนภูมิการออกแบบ ระบบ SCADA เพื่อควบคุมกระบวนการรมแก๊สไอโซนในตู้รมก๊าซไอโซนแบบภาต	45
4.18	ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดไอโซนภายในและภายนอกตู้รมก๊าซ	46
4.19	จอสัมผัส HMI ควบคุม PLC สำหรับการประมวลผลการทำงานของระบบ กำเนิดก๊าซไอโซน	48
4.20	Mobile application ควบคุมการทำงานของตู้รมแก๊สไอโซนผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่	49
4.21	แนวคิดการออกแบบ Catalyst scrubber concept design 2 แบบ	50
4.22	Proof of Concept อุปกรณ์บำบัดไอโซนเหลือจ่าย	51
4.23	ภาพแบบของอุปกรณ์กำจัดไอโซนเหลือจ่าย	51
4.24	การขึ้นรูปอุปกรณ์กำจัดไอโซนเหลือจ่าย	52
4.25	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บำบัดก๊าซไอโซนเหลือจ่ายส่วนล่างของตู้รมก๊าซไอโซน	53
4.26	Concept design การออกแบบหัวกระจายก๊าซไอโซน ซึ่งมีหัวฉีดก๊าซติดอยู่ที่หัวกระจาย จำนวน 4 หัว	54

4.27	แนวคิดการศึกษาหัวฉีดก๊าซที่ป้อนเข้าสู่บรรจุภัณฑ์	55
4.28	ภาพแบบรายละเอียดหัวฉีดที่ออกแบบเพื่อการจัดสร้าง	55
4.29	การทดสอบการกระจายตัวของก๊าซออกซิเจนที่หัวฉีดผ่านน้ำ	56
4.30	อัตราการเกิดฟองอากาศตามตำแหน่งหัวฉีดทั้ง 4 หัว	57
4.31	การใช้ซิลิโคนปิดรอยรั่วบริเวณภายในหัวฉีดก๊าซโอโซน	57
4.32	การทดสอบป้อนก๊าซโอโซนและออกซิเจน เข้าในกล่องบรรจุภัณฑ์	59
4.33	แบบของถังพักเพื่อใช้ในการทดสอบระบบสำรองก๊าซโอโซนสำหรับการฉีด ป้อนเข้ากล่องทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค	61
4.34	แบบของตำแหน่งชุดฉีดหัวจ่ายก๊าซโอโซนบนสายพานลำเลียง	61
4.35	การปรับตั้ง Alignment ของหัวฉีดโอโซนให้ขึ้นลงในแนวดิ่ง ตรงกับรูป้อน ก๊าซบนกล่องบรรจุ	62
4.36	ขั้นตอนการติดตั้งสติกเกอร์บนกล่องเพื่อป้องกันก๊าซโอโซนรั่วไหลออกจาก กล่องบรรจุทุเรียน	64
4.37	มิติโดยรวมของโครงสร้างสายพานลำเลียงและจุดปฏิบัติการฉีดโอโซนและ ติดตั้งสติกเกอร์	65
4.38	จุดแสดงรูปแบบการติดตั้งส่วนประกอบหลักบนสายพานลำเลียง	65
4.39	แผนภูมิการออกแบบ ระบบ SCADA เพื่อควบคุมกระบวนการฉีดก๊าซ โอโซนและติดตั้ง สติกเกอร์ในเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ	66
4.40	แสดงหน้า/จอควบคุมการทำงานระบบ Automatic สั่งการโดยการตั้ง โปรแกรม	67
4.41	แสดงหน้า/จอควบคุมการทำงานระบบ Manual เพื่อควบคุมระบบด้วย ผู้ปฏิบัติงาน	68
4.42	ตำแหน่งการติดตั้งระบบบำบัดก๊าซโอโซนเหลือจ่ายบริเวณปฏิบัติงาน	69
4.43	ภาพแบบระบบบำบัดก๊าซโอโซนเหลือของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบ กึ่งอัตโนมัติ	69
4.44	แบบประกอบเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมุมมอง Front view และ Right side view	70
4.45	แบบประกอบเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมุมมอง Back view และ Left side view	71

4.46	แบบประกอบเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมุมมอง Left และ Right Isometric view	72
4.47	ส่วนประกอบหลักของเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ	73
4.48	เครื่องฉีดก๊าซไอโซนกึ่งอัตโนมัติเมื่อประกอบแล้วเสร็จ ติดตั้ง ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้	74
4.49	เครื่องฉีดก๊าซไอโซนกึ่งอัตโนมัติเมื่อประกอบแล้วเสร็จ ติดตั้ง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	74
4.50	การเจริญของเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> ในจานอาหารเลี้ยงเชื้อ จำเพาะที่ผ่านการรมไอโซน (ก) เปรียบเทียบกับที่ไม่รมไอโซน (ข)	76
4.51	การปนเปื้อนของเชื้อ Total bacteria ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่ง พร้อมบริโคนที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคนที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> ก่อนรมไอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมไอโซน แบบถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคนที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคนที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)	77
4.52	การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งพร้อม บริโคนที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคนที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> ก่อนรมไอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมไอโซนแบบ ถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และ ย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบ กับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคนที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคนที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)	78
4.53	การปนเปื้อนของเชื้อ <i>E. coli</i> ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคนที่ ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคนที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> ก่อนรมไอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมไอโซนแบบถาด (โมเดล ที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่ อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียน ตัดแต่งพร้อมบริโคนที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคนที่ปลูกถ่าย เชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)	79

- 4.54 การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งพร้อม 80
 บริโภคที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-
 pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบ
 ถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และ
 ย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบ
 กับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค
 ที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)
- 4.55 การปนเปื้อนของเชื้อราในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ 81
 ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic
E. coli ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดล
 ที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่
 อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียน
 ตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ปลุกถ่าย
 เชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)
- 4.56 อัตราการหายใจของทุเรียนตัดแต่งพร้อมที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความ 82
 เข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บ
 รักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ
 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัด
 แต่งพร้อมที่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)
- 4.57 การผลิตเอทิลีนของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน 82
 ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่าง
 เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่
 อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับ
 ทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)
- 4.58 ลักษณะปรากฏของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน 84
 ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่าง
 เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่
 อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับ
 ทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ผ่านการรมโอโซน (control)
- 4.59 การเปลี่ยนแปลงค่า L^* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรม 85
 ก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1)
 ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมา

- เก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบ
กับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่ผ่านการรมโอโซน (control)
- 4.60 การเปลี่ยนแปลงค่า a^* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ผ่านการรม 85
ก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1)
ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมา
เก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบ
กับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่ผ่านการรมโอโซน (control)
- 4.61 การเปลี่ยนแปลงค่า b^* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ผ่านการรม 86
ก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1)
ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมา
เก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบ
กับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่ผ่านการรมโอโซน (control)
- 4.62 การเปลี่ยนแปลงค่า Hue angle ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ผ่าน 86
การรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดล
ที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และ
ย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน)
เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่ผ่านการรมโอโซน
(control)
- 4.63 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ผ่าน 87
การรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดล
ที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และ
ย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน)
เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่ผ่านการรมโอโซน
(control)
- 4.64 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนตัด 88
แต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรม
โอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศา
เซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็น
เวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่
ผ่านการรมโอโซน (control)
- 4.65 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ 89
ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด
(โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน

- และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ไม่ผ่านการรมโอโซน (control)
- 4.66 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ผ่าน 89 การรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดล ที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ไม่ผ่านการรมโอโซน (control)
- 4.67 คะแนนการยอมรับของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ผ่านการรมก๊าซ 90 โอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ไม่ผ่านการรมโอโซน (control)
- 4.68 คะแนนการยอมรับของผู้บริโภคด้านความหวานของทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่าน 91 การรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดล ที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)
- 4.69 คะแนนการยอมรับโดยรวมของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ผ่านการ 91 รมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ไม่ผ่านการรมโอโซน (control)
- 4.70 ลักษณะปรากฏของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่รมก๊าซโอโซนด้วย 98 เครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) โดยฉีดก๊าซโอโซนลงในกล่องทุเรียน นาน 0 (ก) 10 (ข) 15 (ค) และ 20 (ง) วินาที และเก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน (การทดสอบเบื้องต้น)
- 4.71 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งพร้อม 101 บริโภครวมที่ไม่ปลูก ถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน ด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที เก็บรักษาที่ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่

- อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับ
 ทูเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทูเรียนตัดแต่งพร้อม
 บริโคมที่ ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการรมก๊าซ
 โอโซน (control)
- 4.72 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีเหลืองของทูเรียนตัดแต่ง 101
 พร้อมบริโคมที่ไม่ปลูก ถ่ายเชื้อและทูเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ปลูกถ่าย
 เชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน ด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซน
 แบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที เก็บ
 รักษาที่ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่
 อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับ
 ทูเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทูเรียนตัดแต่งพร้อม
 บริโคมที่ ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการรมก๊าซ
 โอโซน (control)
- 4.73 การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ในเนื้อสีขาวของทูเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ 102
 ไม่ปลูก ถ่ายเชื้อและทูเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-
 pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน ด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบ
 กึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที เก็บรักษา
 ที่ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ
 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทูเรียนตัด
 แต่งพร้อมบริโคมที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทูเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ ปลูก
 ถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)
- 4.73 การปนเปื้อนของ *E. coli* ในเนื้อสีเหลืองของทูเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ 103
 ไม่ปลูก ถ่ายเชื้อและทูเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-
 pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน ด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบ
 กึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที เก็บรักษา
 ที่ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ
 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทูเรียนตัด
 แต่งพร้อมบริโคมที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทูเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ ปลูก
 ถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)
- 4.75 ลักษณะเนื้อทูเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ด้วยเครื่อง 104
 ฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20
 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และ
 ย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน)

- เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโศกที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)
- 4.76 การเปลี่ยนแปลงค่าสี L^* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโศกที่ผ่านการรม 105
ก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับ
บรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่
อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศา
เซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อม
บริโศกที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)
- 4.77 การเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโศกที่ผ่านการรม 106
ก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับ
บรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่
อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศา
เซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อม
บริโศกที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)
- 4.78 การเปลี่ยนแปลงค่าสี b^* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโศกที่ผ่านการรม 106
ก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับ
บรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่
อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศา
เซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อม
บริโศกที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)
- 4.79 การเปลี่ยนแปลงค่าสี Hue angle ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโศกที่ 107
ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบ
กึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่าง
เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่
อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับ
ทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโศกที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)
- 4.80 อัตราการหายใจของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโศกที่ผ่านการรมก๊าซ ด้วย 108
ตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20
วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และ
ย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน)
เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโศกที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน
(control)

- 4.81 อัตราการผลิตเอทิลีนของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโกลที่ผ่านการรม 108
 ก๊าซ ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2)
 นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14
 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1
 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโกลที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน
 (control)
- 4.82 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโกลที่ 109
 ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบ
 กึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่าง
 เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่
 อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับ
 ทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโกลที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	เกณฑ์คุณภาพอากาศด้านจุลินทรีย์ ตามมาตรฐาน The index of Microbial Air Contamination (IMA) และระดับการประเมิน 21
3.2	สภาวะการวัดอัตราการหายใจและเอทธิลีนด้วยเครื่อง Gas chromatograph (Shimadzu, Japan) รุ่น 14A 24
4.1	Logic ของการควบคุมกระบวนการรมก๊าซโอโซนที่จัดทำไว้ในระบบ SCADA 47
4.2	ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่องทุเรียนที่มีการปรับสภาพหัวฉีด 60
4.3	ตำแหน่งของเซ็นเซอร์วัดโอโซน 67
4.4	ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในกล่องเปล่าที่ใช้บรรจุทุเรียนเพื่อเปรียบเทียบ 75
	ความ สม่ำเสมอของการฉีดพ่นหัวฉีดก๊าซเข้ากล่องข้างซ้ายและขวา
4.5	ผลการทดสอบประสิทธิภาพของตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ใน 76
	การกำจัดเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> ในงานอาหารเลี้ยงเชื้อจำเพาะ
4.6	ปริมาณยีสต์และเชื้อรา (Yeast and Molds) และแบคทีเรียทั้งหมด 93
	(Total bacteria) ที่ปนเปื้อนในอากาศภายในห้อง high care and clean room ที่วางตูรมก๊าซโอโซน
4.7	ปริมาณยีสต์และเชื้อรา (Yeast and Molds) และแบคทีเรียทั้งหมด 94
	(Total bacteria) ที่ปนเปื้อนในอากาศภายในห้อง high care and clean room ของบริษัท
4.8	ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่อง clamshell ที่มีและไม่มีทุเรียน 96
	ตัดแต่งพร้อมบริโภคล หลังฉีดก๊าซโอโซนเข้ากล่องนาน 10 15 และ 20
	วินาทีโดยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนกึ่งอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดล 2)
4.9	ประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ 97
	เดี่ยว (โมเดลที่ 2) ในการกำจัดเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> และ total bacteria
4.10	การทดสอบเบื้องต้น ประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบ 99
	กึ่งอัตโนมัติสำหรับ บรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) ในการลดการปนเปื้อน
	เชื้อในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ปลูกด้วย เชื้อ Non-pathogenic
	<i>E. coli</i> โดยวิเคราะห์ปริมาณเชื้อภายหลังการรมก๊าซโอโซนทันที (day 0)
	และ หลังจากเก็บเนื้อทุเรียนไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน

4.11	การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตทุเรียนรมก๊าซโอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทาน	111
4.12	การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้เพื่อการลงทุนการผลิตทุเรียนรมก๊าซ โอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทาน	113
ค.1	การปนเปื้อนของเชื้อ Total bacteria ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบภาค (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)	143
ค.2	การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อ และทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> ก่อนรมโอโซนความเข้มข้น 900 ppm และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน หลังจากนั้นย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) ทุเรียนที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ ใช้เป็นชุดควบคุม	143
ค.3	การปนเปื้อนของเชื้อ <i>E. coli</i> ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> ก่อนรมโอโซนความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบภาค (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)	144
ค.4	การปนเปื้อนของเชื้อ <i>E. coli</i> ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบภาค (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)	144
ค.5	การปนเปื้อนของเชื้อราในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic <i>E. coli</i> ก่อนรมโอโซน ความ	145

- เข้มข้น 900 ppm ด้วยตูร์มไอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)
- ค.6 อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนของทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่านการรมก๊าซ 146
ไอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูร์มไอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)
- ค.7 การเปลี่ยนแปลงค่า L^* a^* b^* และ Hue angle ของเนื้อทุเรียนตัดแต่ง 147
ผ่านการรมก๊าซไอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูร์มไอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)
- ค.8 ความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ความสามารถในการ 148
ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่านการรมก๊าซไอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูร์มไอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)
- ค.9 คะแนนการยอมรับของผู้บริโภคด้านรสชาติ ความหวาน และความชอบ 149
โดยรวมต่อทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่านการรมก๊าซไอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูร์มไอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)
- ค.10 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ 150
ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมไอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูร์มไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน)

- เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)
- ค.11 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control) 150
- ค.12 การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control) 151
- ค.13 การปนเปื้อนของ *E. coli* ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control) 151
- ค.14 อัตราการหายใจ การผลิตเอทิลีน และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ของเนื้อทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control) 152
- ค.15 ค่าสี L^* a^* b^* และ Hue angle ของเนื้อทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็น 153

เวลา 1 วัน(14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบ
ใดๆ (control)

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ทุเรียนเป็นผลไม้เขตร้อนที่ได้รับความนิยมทั้งในและต่างประเทศ โดยประเทศไทยผลิตทุเรียนมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก รองลงมาคือ มาเลเซีย อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์ (Subhadrabandhu and Ketsa, 2001) ปริมาณการผลิตทุเรียนของประเทศไทยในปี 2561 เท่ากับ 759,828 ตัน และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งในปี 2562 และ 2563 เท่ากับ 1,017,097 และ 1,111,928 ตัน ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความต้องการทุเรียนภายในประเทศและต่างประเทศเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับประเทศที่เป็นคู่ค้าทุเรียนสดที่สำคัญของไทย ได้แก่ ฮองกง จีน และไต้หวัน (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) พันธุ์ทุเรียนที่ได้รับความนิยมคือ พันธุ์หมอนทอง (Wisutiamonkul et al., 2017) จากปัญหาการส่งออกทุเรียนผลสดคือ ทุเรียนสุกไม่สม่ำเสมอ ทุเรียนอ่อน ทุเรียนสุกงอมเกินไปจนผลแตก และปัญหาโรคและแมลงหลังการเก็บเกี่ยวที่ปนเปื้อนไปกับทุเรียนผลสด ทำให้ผู้ประกอบการหันมาส่งออกเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคมากขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ซึ่งการส่งออกเนื้อทุเรียนสดตัดแต่งพร้อมบริโภคถือเป็นทางออกที่ดีในการแก้ไขปัญหาการส่งออกทุเรียนผลสด เนื่องจากสามารถคัดเลือกทุเรียนที่มีระยะสุกแก่ที่พอเหมาะต่อการบริโภค และลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง เพราะส่วนของเปลือกทุเรียนมีน้ำหนักมากกว่าส่วนเนื้อ อีกทั้งเป็นการเพิ่มความสะดวกสบายให้กับผู้บริโภคที่ไม่มีทักษะในการปอกทุเรียน นอกจากนี้ข้อดีของการส่งออกเนื้อทุเรียนคือ เนื้อทุเรียนมีความทนทานต่อการเกิดอาการสะท้านหนาว (chilling injury) มากกว่าเปลือก จึงสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำได้ยาวนานกว่าการเก็บทุเรียนทั้งผล (Booncherm and Siriphanich, 1991) ดังนั้นทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคจึงมีศักยภาพในการส่งออกไปจำหน่ายในตลาดที่ห่างไกลได้

อย่างไรก็ตาม ข้อพึงระวังในการทำธุรกิจผักและผลไม้ตัดแต่งพร้อมบริโภคคือ การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในระหว่างขั้นตอนการเตรียมผลผลิตที่เป็นสาเหตุที่ทำให้ผู้บริโภคเจ็บป่วยได้ โดยเฉพาะการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียก่อโรคในระบบทางเดินอาหาร เช่น *E. coli*, *Salmonella* spp. และ coliform เป็นต้น ส่งผลให้เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค ผลผลิตมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นลง และกลายเป็นอุปสรรคทางการค้าต่อไปได้ ปัจจุบันผู้ประกอบการส่งออกเนื้อทุเรียนของไทยส่วนใหญ่ไม่ได้คำนึงถึงความปลอดภัยทางด้านเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในเนื้อทุเรียนพร้อมบริโภค เหตุผลหนึ่งคือ ยังไม่เคยมีเหตุการณ์ที่ผู้บริโภคในประเทศปลายทางได้ร้องเรียน อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจให้กับผู้บริโภคและเพื่อยกระดับมาตรฐานด้านความปลอดภัยของอาหารจากการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ให้กับสินค้าไทยที่เหนือประเทศคู่แข่ง (เช่น เวียดนาม และ มาเลเซีย) ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรร่วมมือกับผู้ประกอบการในการศึกษาหาวิธีการในการควบคุมหรือลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค ทั้งนี้เพื่อเป็นการเตรียมการรองรับการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานการค้าของประเทศผู้นำเข้าและเพื่อลดความเสี่ยงจากการบริโภคสินค้าปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์

ที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากอุณหภูมิในระหว่างการขนส่งสูงขึ้นหรือมีการเก็บรักษาเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคเป็นเวลานานขึ้น จะมีผลทำให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีปริมาณเล็กน้อยในวันแรกของการบรรจุเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนมากขึ้นจนอยู่ในระดับที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้

ในอดีตที่ผ่านมาไม่พบรายงานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนอย่างจริงจัง งานวิจัยส่วนใหญ่ประเมินการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์จากลักษณะปรากฏภายนอกของเนื้อทุเรียนเท่านั้น ไม่ได้มีการตรวจสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์โดยวิธีทางจุลชีววิทยา อย่างไรก็ตาม ปี 2564 คณะผู้วิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) ได้ทำงานวิจัยเรื่อง การควบคุมคุณภาพและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค ภายใต้การสนับสนุนทุนจาก สำนักงานการวิจัยพัฒนาการเกษตร (สวก.) และภาคเอกชนคือ บริษัท วี เอส เฟรชโก้ จำกัด ซึ่งคณะผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการใช้ก๊าซโอโซนลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) โดยพบว่าการปล่อยก๊าซโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซนที่กำลังการผลิต 1,000 mg/h ใส่ในกล่องบรรจุทุเรียนปริมาตร 1,600 มิลลิลิตร นาน 1.6 และ 3 นาที (โดยภายในกล่องจะมีความเข้มข้นของก๊าซโอโซนสุดท้าย เท่ากับ 500 และ 900 ppm ตามลำดับ) จากนั้นนำมาเก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายออกมาวางไว้ที่ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน (จำลองการวางจำหน่าย) พบว่า โอโซนความเข้มข้น 900 ppm สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคได้ดีที่สุดและมีปริมาณการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดในเนื้อขาวเนื้อเมล็ดและเนื้อสีเหลืองเท่ากับ 1.49 และ 2.14 log CFU/g FW ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ได้กำหนดไว้ (ไม่เกิน 6 log CFU/g FW) นอกจากนี้ พบว่าการรมก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 900 ppm มีผลช่วยชะลอการอ่อนนุ่มของเนื้อทุเรียน เพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระให้กับเนื้อทุเรียน ลดอัตราการหายใจลดการผลิตเอทิลีน ตลอดจนไม่มีผลต่อสีของเนื้อ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณแป้ง ปริมาณไขมัน และการยอมรับของผู้บริโภคด้านรสชาติ ความหวาน และลักษณะปรากฏภายนอก (ผ่องเพี้ยน และคณะ, 2563; Sripong et al., 2022) และจากการศึกษาเพิ่มเติมของคณะผู้วิจัย มจธ. พบว่าทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่รมก๊าซโอโซน 900 ppm สามารถเก็บรักษาได้นานถึง 21 วัน โดยยังมีคุณภาพดีกว่าทุเรียนที่ไม่ได้รมก๊าซโอโซน ทั้งทางด้านความแน่นเนื้อและค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ทั้งนี้เนื่องจากการรมก๊าซโอโซนมีผลช่วยลดการหายใจและการผลิตเอทิลีนของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (unpublished data)

อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เป็นการวิจัยขนาดเล็กในระดับห้องปฏิบัติการ โดยแต่ละครั้งของการรมทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคจะทำได้เพียงครั้งละ 1 กล่อง (ขนาดบรรจุเนื้อทุเรียน 500 กรัมต่อกล่อง เป็นขนาดบรรจุที่นิยมส่งออก) ดังนั้นจึงยังไม่สามารถนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานในโรงงานระดับอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากปริมาณการส่งออกเนื้อทุเรียนในแต่ละครั้งมีปริมาณมากกว่า 500 กิโลกรัม ขึ้นไป ซึ่งในระดับอุตสาหกรรมจำเป็นต้องทำงานแข่งกับเวลาเพื่อรักษาความสดของ

สินค้าและความรวดเร็วในการขนส่งสินค้าไปประเทศปลายทาง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาหรือต่อยอดงานวิจัยเพื่อนำไปสู่การใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ ในโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเป้าในการสร้างชุดอุปกรณ์รมก๊าซโอโซนสำหรับรมเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคนได้ในระดับพาณิชย์ เพื่อให้รมได้ครั้งละจำนวนมากขึ้น (ไม่น้อยกว่า 60 กล่องหรือเท่ากับรมเนื้อทุเรียนได้ครั้งละ 30 กิโลกรัม โดยประมาณ) โดยการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์รมก๊าซโอโซน 2 ชุดอุปกรณ์ (โมเดล) คือ

ชุดอุปกรณ์ที่ (โมเดล) 1 เป็นตูรมก๊าซโอโซนชนิดถาด โดยจะเรียงกล่องทุเรียนในถาดและนำเข้าตูรม จากนั้นปิดประตูตู้ในระหว่างการรม โดยตูรมนี้ที่สามารถควบคุมระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ระยะเวลาในการรม และสามารถควบคุมการไหลเวียนของก๊าซโอโซนภายในตู้ให้สม่ำเสมอเพื่อให้เนื้อทุเรียนสัมผัสกับก๊าซโอโซนได้อย่างทั่วถึง เป็นตูรมที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ และมีระบบการกำจัดก๊าซโอโซนภายหลังการใช้งานหรือเมื่อต้องเปิดตู้เพื่อนำเอาเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคออก ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม

ชุดอุปกรณ์ที่ (โมเดล) 2 เป็นเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ สามารถฉีดก๊าซโอโซนเข้าสู่กล่องพลาสติกบรรจุเนื้อทุเรียนที่ปิดผนึกแล้ว โดยกำหนดตัวเครื่องมีหัวฉีดก๊าซโอโซนขนาดเล็กอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับรู (inlet) ข้างบนกล่องทุเรียน จากนั้นหัวฉีดจะถูกดันเข้าที่รูและปล่อยก๊าซโอโซนเข้ากล่องอย่างอัตโนมัติ จนเมื่อได้ความเข้มข้นที่ต้องการ (900 ppm) ภายในกล่อง จึงหยุดจ่ายก๊าซโอโซน จากนั้นจึงทำการปิดรูด้วยสติ๊กเกอร์เพื่อให้ก๊าซโอโซนฟุ้งกระจายอยู่ภายในกล่อง นำกล่องทุเรียนที่ได้ไปเก็บในห้องเย็นเพื่อรอการจัดจำหน่ายและขนส่งต่อไป โดยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนระบบกึ่งอัตโนมัตินี้จะสามารถควบคุมระดับความเข้มข้นของก๊าซและระยะเวลาในการจ่ายก๊าซได้ และมีระบบกำจัดก๊าซส่วนเกินภายในเครื่องเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์รมก๊าซโอโซนต้นแบบสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค และทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์รมก๊าซโอโซน ตลอดจนศึกษาผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์รมก๊าซโอโซนต้นแบบ 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ตูรมก๊าซโอโซนชนิดถาด (สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก) และ ชุดที่ 2 เครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (สำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง) ทั้งนี้เพื่อเป็นการยกระดับมาตรฐานด้านความปลอดภัยจากการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ ให้กับสินค้าไทยที่เหนือประเทศคู่แข่ง และสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภค/ประเทศคู่ค้า ทั้งด้านคุณภาพและความปลอดภัยทางอาหาร ซึ่งผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อภาคธุรกิจของไทยที่ต้องการส่งออกทุเรียนสดตัดแต่งพร้อมบริโภค อันจะนำมาสู่การสร้างรายได้ให้กับประเทศชาติตั้งแต่ระดับผู้ประกอบการจนถึงระดับรากหญ้าหรือเกษตรกรผู้ปลูกทุเรียน

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาชุดอุปกรณ์การรมก๊าซโอโซนต้นแบบสำหรับกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค จำนวน 2 ชุดอุปกรณ์ คือ ตู้รมก๊าซโอโซนแบบภาชนะขนาด 1.9 ลบ.ม. และเครื่องฉีดก๊าซโอโซนกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยวแบบ 4 หัวฉีดต่อชุด
- 1.2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของชุดอุปกรณ์รมก๊าซโอโซนต้นแบบทั้ง 2 ชุดอุปกรณ์ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคและผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

บทที่ 2 สํารวจเอกสาร

ทุเรียนเป็นผลไม้ที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เปลือกหนา มีหนามแหลมคมและแข็งอยู่รอบทรงผล การบริโภคทุเรียนจึงมีความยากลำบากกว่าผลไม้ชนิดอื่น โดยผู้ที่ปอกทุเรียนได้ต้องมีประสบการณ์และความชำนาญเพื่อไม่ให้เกิดอุบัติเหตุในระหว่างการปอกได้ ดังนั้นการซื้อขายทุเรียนในปัจจุบันจึงมีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคมากกว่าการซื้อทั้งผลแล้วนำไปปอกเองที่บ้าน ในขณะเดียวกันปัจจุบันครอบครัวมีขนาดเล็กลงและมีคนจำนวนไม่น้อยที่อาศัยอยู่ในเมืองใหญ่คนเดียวในอพาร์ทเมนต์ จึงไม่ต้องการซื้อทุเรียนทั้งผลสำหรับการบริโภคในแต่ละครั้ง สำหรับรูปแบบการส่งออกทุเรียนไปจำหน่ายในต่างประเทศ ก็มีแนวโน้มเปลี่ยนจากการซื้อขายแบบผลสด ไปเป็นเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคมากขึ้น ปัญหาที่มักพบในการส่งออกทุเรียนผลสดที่ผ่านมา คือ ทุเรียนไม่ได้คุณภาพ เช่น ทุเรียนสุกไม่สม่ำเสมอเมื่อถึงปลายทาง ทุเรียนอ่อนหรือสุกงอมเกินไปจนผลแตกทำให้เกิดปัญหาระหว่างเกษตรกร ผู้ส่งออก และผู้นำเข้ามาโดยตลอด จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีการส่งออกทุเรียนสดแช่แข็งเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตามการบริโภคทุเรียนแช่แข็งที่ผ่านการละลายน้ำแข็งแล้วก็มีเนื้อสัมผัสไม่ดีเท่ากับการบริโภคเนื้อทุเรียนสด ดังนั้นการส่งออกเนื้อทุเรียนสดตัดแต่งพร้อมบริโภค จึงเป็นทางเลือกที่ดีในการแก้ไขปัญหาการส่งออกทุเรียนทั้งแบบผลสดและแช่แข็งได้ ข้อดีของการส่งออกเนื้อทุเรียนสดตัดแต่งพร้อมบริโภค คือ 1) สามารถคัดเลือกทุเรียนที่มีระยะสุกแก่ที่พอเหมาะต่อการบริโภคได้ 2) ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งส่วนเปลือกไปได้มาก เนื่องจากทุเรียน 1 ผล มีน้ำหนักของเปลือกมากกว่าเนื้อเกินครึ่งหนึ่ง หรือสองในสามของน้ำหนักสดเป็นน้ำหนักของเปลือกทุเรียน 3) อำนวยความสะดวกให้กับผู้บริโภค เนื่องจากทุเรียนเป็นผลไม้ที่มีหนามแหลมคมและแข็งอยู่รอบทรงผล การปอกผลทุเรียนจึงมีความยากลำบากกว่าผลไม้ชนิดอื่น ต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์และความชำนาญเพื่อไม่ให้เกิดอุบัติเหตุในระหว่างการปอก 4) เนื้อทุเรียนมีความทนทานต่อการเกิดอาการสะท้านหนาว (chilling injury) มากกว่าเปลือก จึงสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำได้ยาวนานกว่าการเก็บทุเรียนทั้งผล (Booncherm and Siriphanich, 1991) ดังนั้นทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคจึงมีศักยภาพในการส่งออกไปจำหน่ายในตลาดที่ห่างไกลได้

อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่พบในผักและผลไม้ตัดแต่งพร้อมบริโภคคือ การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์จากอากาศและในระหว่างขั้นตอนการเตรียมผลผลิต เป็นผลทำให้เกิดการเน่าเสียและการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อายุการเก็บรักษาที่สั้นลง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคส่วนใหญ่ทั้งในประเทศและต่างประเทศ มักเน้นการศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษา (สุดารัตน์, 2536; สุจิตร์, 2536; ดารณี, 2544; วรภัทร และคณะ, 2556; Niponsak et al., 2015; Voon et al., 2006) ชนิดของฟิล์มและบรรจุภัณฑ์ (สนทรรศน์ และคณะ, 2544; ปรางค์ทอง และ เบญจมาศ, 2553) สารเคลือบผิว (สุธีรา, 2546; ภูริสา และคณะ, 2552; ต้นวงศ์, 2549) และสารหอมระเหยในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (กฤษณา และคณะ, 2555; Voon et al., 2007) ในขณะที่การศึกษาวิธีการควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

มีน้อยมาก เช่น การใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไอร์เรทิดของแอลกอฮอล์ และการฉายรังสีกับเนื้อทุเรียน (สุธีรา, 2546; ดารณี, 2544)

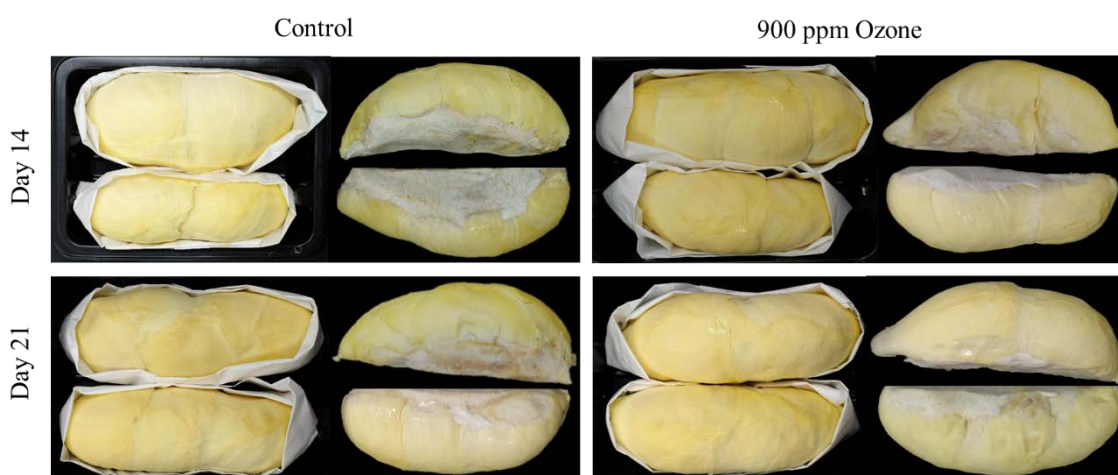
2.1 การควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

การวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการศึกษาวิธีการควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคในประเทศไทยมีเพียง 2 เรื่อง เท่านั้น ได้แก่ สุธีรา (2546) พบว่าเนื้อทุเรียนในภาตโพนที่หุ้มด้วยฟิล์ม Polyvinylchloride (PVC) ที่เคลือบด้วยสารกันเสียคือ โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 300 ppm และ 450 ppm สามารถเก็บรักษาได้ 36 วัน และพบว่ามีเปลี่ยนแปลงสีเนื้อทุเรียน ปริมาณ TA และ TSS เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดารณี (2544) ได้ศึกษาการควบคุมการเน่าเสียของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคก่อนทำการเก็บรักษาที่ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ไอร์เรทิดของแอลกอฮอล์ และการฉายรังสีกับเนื้อทุเรียน พบว่าวิธีการต่าง ๆ สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราหรือวิธีการที่ใช้ และพบว่าการใช้ไอร์เรทิดของแอลกอฮอล์เป็นวิธีการที่ง่ายต่อการจัดการและควบคุมการเน่าเสียได้มากที่สุด ซึ่งจะเห็นว่างานวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้พิจารณาถึงปริมาณการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหารและเป็นการพิจารณาประสิทธิภาพของวิธีการจากการดูด้วยตาเปล่าเท่านั้น ซึ่งหากพิจารณาตามประกาศของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ปี 2560 ได้กำหนดเกณฑ์จุลินทรีย์วิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร (ฉบับที่ 3) ด้านอาหารพร้อมบริโภค โดยเฉพาะ ผัก ผลไม้ สลัด และส้มตำ มีดังนี้คือ

จำนวนเชื้อจุลินทรีย์/กรัม	น้อยกว่า 1×10^6
จำนวนรา/กรัม	น้อยกว่า 500
จำนวนยีสต์/กรัม	น้อยกว่า 1×10^3
จำนวน <i>E. coli</i> /กรัม	น้อยกว่า 1×10^2
<i>Staphylococcus aureus</i> /กรัม	น้อยกว่า 1×10^2
<i>Salmonella</i> spp./25 กรัม	ไม่พบ
<i>Listeria monocytogenes</i> /กรัม	ไม่พบ

ในปี 2563 คณะผู้วิจัยของ มจร. ได้ศึกษาหาวิธีการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค ทำโดยการปล่อยก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 1,000 mg/hr ใส่ในกล่องบรรจุทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค นาน 1.6 และ 3 นาที (โดยภายในกล่องจะมีความเข้มข้นของก๊าซโอโซนสุดท้ายเท่ากับ 500 และ 900 ppm ตามลำดับ) จากนั้นนำมาเก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายออกมาวางไว้ที่ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน (จำลองการวางจำหน่าย) พบว่า โอโซนความเข้มข้น 900 ppm สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคได้ดีที่สุดและมี

ปริมาณการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดในเนื้อขาวเนื้อเมล็ดและเนื้อสีเหลืองเท่ากับ 1.49 และ 2.14 log CFU/g FW ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ได้กำหนดไว้ (ไม่เกิน 6 log CFU/g FW) นอกจากนี้ พบว่าการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 900 ppm มีผลช่วยลดการอ่อนนุ่มของเนื้อทุเรียน เพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระให้กับเนื้อทุเรียน ลดอัตราการหายใจ และลดการผลิตเอทิลีนของเนื้อทุเรียน และไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีเนื้อ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณแป้ง ปริมาณไขมัน และการยอมรับของผู้บริโภค (ด้านรสชาติ ความหวาน และลักษณะปรากฏภายนอก) ของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (ผ่องเพ็ญ และคณะ, 2563; Sripong et al., 2022) และจากการศึกษาเพิ่มเติมของคณะผู้วิจัย มจร. พบว่าทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่รมโอโซน 900 ppm มีคุณภาพดีกว่าทุเรียนที่ไม่ได้รมโอโซน คือการรมโอโซนช่วยรักษาคุณภาพของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยชะลอการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและอาการฉ่ำน้ำบริเวณเนื้อสีขาวติดเมล็ด ชะลอการอ่อนนุ่มของเนื้อทุเรียน ลดการผลิตเอทิลีนและการหายใจของเนื้อทุเรียน โดยที่ไม่ส่งผลเสียต่อสีเนื้อ รสชาติ และกลิ่นของทุเรียน ส่งผลให้ทุเรียนมีอายุการเก็บรักษาได้นาน 21 วัน (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของทุเรียนที่ไม่รมโอโซน (control) และรมโอโซน 900 ppm เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C นาน 14 และ 21 วัน

2.2 ประสิทธิภาพของโอโซนเพื่อการควบคุมเชื้อจุลินทรีย์

โอโซน (Ozone) เป็นสารออกซิไดซิงค์ที่แรง มีคุณสมบัติในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ (antimicrobial agent) แม้ใช้ที่ความเข้มข้นต่ำ 1-5 ppm โดยมีฤทธิ์ทำลาย เชื้อรา เชื้อแบคทีเรีย และยีสต์ (Khadre et al., 2001) นิยมนำมาใช้ในการควบคุมเชื้อในขบวนการล้างผักผลไม้ เนื่องจากให้ผลในการทำลายเชื้อเร็วกว่าการใช้คลอรีนและประสิทธิภาพการทำงานไม่ได้ขึ้นอยู่กับ pH ของน้ำที่ใช้ (Singh et al., 2002) United States Food and Drug Administration (US FDA) ได้จำแนกว่าโอโซนเป็นสารในกลุ่ม generally recognized as safe (GRAS) สามารถนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร

ได้โดยตรง ทั้งในรูปของก๊าซโอโซนหรือน้ำโอโซน (US FDA, 2012) ผักผลไม้ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำโอโซนจะมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค เนื่องจากก๊าซโอโซนไม่เสถียรและสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่เหลือสารตกค้าง (residue) อยู่บนผลผลิต (Skog and Chu, 2001) มีรายงานการใช้ก๊าซโอโซนและน้ำโอโซนในผักหลายชนิด เช่น ผักชี (Wang et al., 2004), ขึ้นฉ่าย (Zhang et al., 2005), ผักสลัด (Beltrán et al., 2005; Selma et al., 2007; Ölmez and Akbas, 2009), บร็อคโคลี่ (Forney et al., 2003), แคนตาลูป (Selma et al., 2008) เป็นต้น Kim et al. (1999) รายงานว่าการล้างผักสลัดด้วยน้ำโอโซนที่ความเข้มข้น 1.5-3.0 ppm สามารถลดปริมาณเชื้อ natural microflora ลงได้ 1.5-2.0 cycles ในขณะที่ต้องใช้น้ำคลอรีนความเข้มข้นถึง 100 ppm จึงจะสามารถลดปริมาณเชื้อได้เท่ากับการใช้น้ำโอโซน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้น้ำโอโซนความเข้มข้น 3 ppm กับผักสลัดนาน 3 นาที สามารถลดปริมาณเชื้อ *L. monocytogenes* ลงได้ถึง 2 log unit CFU/g reduction ในทางกลับกัน Yuk et al. (2006) พบว่า การใช้โอโซนที่ความเข้มข้น 5 ppm นาน 5 นาที ไม่มีผลช่วยลดเชื้อ *L. monocytogenes* ในผักกาดแก้วได้ แต่สามารถลดปริมาณเชื้อ *E. coli* O157H7 ลงได้ 1.1 log cycles Singh et al. (2002) รายงานว่า ปริมาณเชื้อ *E. coli* O15H7 ที่ปนเปื้อนในผักสลัด Romaine ลดลงได้ 0.9 log cycle เมื่อล้างด้วยโอโซนที่ความเข้มข้น 5.2 ppm นาน 5 นาที Kumar and Kim (2010) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสาร sanitizers ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ น้ำคลอรีน น้ำอิเล็กโตรไลต์ และน้ำโอโซน ในการล้างบร็อคโคลี่ตัดแต่งพร้อมบริโภค และเปรียบเทียบระยะเวลาในการแช่บร็อคโคลี่ตัดแต่งพร้อมบริโภคในสาร sanitizers เหล่านี้ (90 และ 180 วินาที) ผลการทดลองพบว่า การแช่บร็อคโคลี่ตัดแต่งพร้อมบริโภคในน้ำโอโซนนาน 180 วินาที ให้ผลดีอย่างมากในการลดปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดและเชื้อโคลิฟอร์มเมื่อเปรียบเทียบกับ sanitizers ชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้ยังไม่ทำให้สีของบร็อคโคลี่ตัดแต่งพร้อมบริโภคเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

อย่างไรก็ตามเนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซิงค์ที่แรง ดังนั้นอาจมีผลทำให้ผลผลิตเกิดความเสียหายได้ เช่น Kim et al. (2003) รายงานว่า การล้างผักสลัดในน้ำโอโซนที่ความเข้มข้น 5 ppm มีผลทำให้ใบของผักสลัดเกิดความเสียหาย Koseki and Isobe (2006) พบว่าการใช้น้ำโอโซนที่ความเข้มข้น 10 ppm กับผักกาดแก้วมีผลทำให้ผักเกิดสีน้ำตาลเกิดขึ้น แต่หากใช้โอโซนที่ความเข้มข้น 3 และ 5 ppm จะไม่มีผลต่อค่า a^* ของผัก Renumarn et al. (2014) พบว่าการล้างบร็อคโคลี่ตัดแต่งพร้อมบริโภคด้วยน้ำโอโซนที่ความเข้มข้น 1.50 ppm นาน 15 นาที สามารถลดปริมาณเชื้อโคลิฟอร์ม เชื้อแบคทีเรียทั้งหมด และ ยีสต์และรา ได้เพียง 1 วัน และการใช้น้ำโอโซนมีผลกระทบต่อน้ำบร็อคโคลี่ตัดแต่งพร้อมบริโภคเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเร็วขึ้น โดย Liew and Prange (1994) รายงานว่าประสิทธิภาพของโอโซนนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ ความเข้มข้นของโอโซน ระยะเวลาในการให้โอโซนสัมผัสกับพืช ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์สาเหตุโรคและเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสีย จำนวนประชากรของเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่บนผลผลิต และความไวของผลผลิตแต่ละชนิดต่อโอโซน Ölmez et al. (2009) กล่าวว่า โดยทั่วไปแล้วงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าการใช้โอโซนที่ความเข้มข้น 1-5 ppm ไม่มีกระทบต่อคุณค่าทางอาหารของผักต่าง ๆ เมื่อเทียบกับการใช้คลอรีน Koseki

and Isobe (2006) รายงานว่าการใช้น้ำไอโซนความเข้มข้น 5 ppm นาน 5 นาที ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอสคอบิกในผัก Zhang et al. (2005) พบว่าปริมาณวิตามินซีในขึ้นฉ่ายที่ล้างด้วยน้ำไอโซนความเข้มข้น 0.18 ppm มีค่าสูงกว่าขึ้นฉ่ายที่ไม่ได้ใช้น้ำไอโซน ส่วน Beltran et al. (2005) พบว่าการล้างผักสลัดตัดแต่งพร้อมบริโภคด้วยน้ำไอโซนที่ความเข้มข้น 10 ppm มีผลทำให้มีปริมาณวิตามินซีต่ำกว่าผักที่ล้างด้วยน้ำคลอรีน อย่างไรก็ตามการใช้อิโชนในอุตสาหกรรมจำเป็นต้องใช้อิโชนความเข้มข้นต่ำสุดเท่าที่จะทำได้ เพราะหากความเข้มข้นของอิโชนมากอาจจะมีผลทำให้อุปกรณ์ที่เป็นสแตนเลสเกิดการผุกร่อนได้ง่าย (Pascual et al., 2007) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่า Half-life time (ค่าระยะเวลาครึ่งชีวิต) ของอิโชนในน้ำที่อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 20 นาที ซึ่งอิโชนจะสลายตัวได้เป็นออกซิเจน ดังนั้นจึงไม่มีอิโชนตกค้างเหลืออยู่ในอาหาร (Graham, 1997) ส่วนค่า Half-life time ของก๊าซอิโชนในอากาศนิ่งที่อุณหภูมิห้อง (24 องศาเซลเซียส, 0% RH) เฉลี่ยเท่ากับ 1,500 นาที (25 ชั่วโมง) ทั้งนี้ค่า Half-life time ของก๊าซอิโชนขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการไหลเวียนของอากาศ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ถ้าหากอากาศมีการไหลเวียนมาก มีอุณหภูมิสูง และความชื้นสูง จะมีผลทำให้ half life ของก๊าซอิโชนลดลง 40, 800 และ 450 นาที ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อิโชนจะยังคงมีประสิทธิภาพการใช้งานได้ดีเมื่อใช้ที่อุณหภูมิและความชื้นต่ำ (McClurkin และ Maier, 2010)

แม้ว่ามีการนำก๊าซอิโชนมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งด้านการแพทย์และการเกษตร แต่อิโชนก็ได้ถูกจัดให้เป็นสารพิษทางอากาศ โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากก๊าซอิโชนมีผลทำให้เกิดโรคหืดหอบ ทำให้เกิดการอักเสบของเยื่อหลอดลม มีผลทำให้เกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ (Day et al., 2017; Schwartz, 2016) ซึ่งจากประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 135 เรื่อง ดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย ได้กำหนดชนิดของสารมลพิษทางอากาศไว้ 6 ชนิด ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซอิโชน ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และมีการแบ่งระดับการแจ้งเตือนโดยใช้สีเป็นสัญลักษณ์ (ฟ้า เขียว เหลือง ส้ม แดง) และมีการกำหนดคะแนนคุณภาพอากาศไว้ ตั้งแต่ 0 ถึงมากกว่า 200 โดยให้ดัชนีคุณภาพอากาศที่ 100 มีค่าเท่าเทียมกับค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศทั่วไป หากมีค่าเกินกว่า 100 แสดงว่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศชนิดนั้นเกินกว่าค่ามาตรฐาน ทั้งนี้ในราชกิจจานุเบกษา ได้กำหนดให้ปริมาณก๊าซอิโชนในบรรยากาศที่ได้จากการเฉลี่ยตลอด 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง ต้องไม่เกิน 70 ppb (หรือเท่ากับ 0.07 ppm) (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) ดังนั้นหากมีการใช้อิโชนร่วมกับผลผลิตสดหรือผลผลิตตัดแต่งพร้อมบริโภคในระดับอุตสาหกรรม เช่น ทูเรียน ที่ 900 ppm อย่างต่อเนื่องในโรงคัดบรรจุ ก็อาจจะมีผลทำให้เกิดมลพิษทางอากาศได้ ดังนั้นการใช้อิโชนที่ความเข้มข้นสูงในอุตสาหกรรมต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีระบบกำจัดก๊าซอิโชนส่วนเกินก่อนปล่อยสู่สภาพแวดล้อม ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม

2.3 งานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

2.3.1 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บรักษาทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อการเก็บรักษาผลผลิตสดและผลิตผลตัดแต่งพร้อมบริโภค การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บรักษาทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคมีดังนี้ สุดารัตน์ (2536) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมีของทุเรียนหมอนทองที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิห้อง พบว่าหลังการเก็บรักษานาน 6 วัน ปริมาณ TSS น้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ และเบต้าแคโรทีนเพิ่มสูงขึ้น แต่แบ่งลดลงตามอายุการเก็บรักษา โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเกิดกับทุเรียนที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเร็วกว่าที่เก็บรักษาที่ 20 องศาเซลเซียส สุจิตร์ (2536) รายงานว่าผลทุเรียนพันธุ์ชะนี ที่บ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ 83 และ 93% มีการสูญเสียน้ำหนักสดน้อย เปลือกมีสีเขียวสด และปอกเปลือกง่ายกว่าการบ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% แต่ทุกระดับความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อคุณภาพของทุเรียน ในขณะที่อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการบ่มทุเรียน คือ 39 และ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้เนื้อทุเรียนมีการพัฒนาสี ปริมาณเบต้าแคโรทีน และรสชาติดีที่สุด ดารณี (2544) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาและระยะเวลาการสุกแก่ของทุเรียนต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยนำผลทุเรียนที่มีอายุ 106, 113 และ 120 วัน หลังดอกบาน และนำมาเก็บที่อุณหภูมิ 25 และ 10 องศาเซลเซียส นาน 15 วัน พบว่าทุเรียนทั้ง 3 อายุ มีคุณภาพใกล้เคียงกัน และเมื่อการเก็บรักษาเนื้อทุเรียนที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส สามารถเก็บได้นานที่สุด โดยเนื้อมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเก็บรักษาที่ 5 หรือ 10 องศาเซลเซียส ทุเรียนจะยังสามารถพัฒนาและสุกได้ วรภัทร และคณะ (2556) ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณภาพของทุเรียนหมอนทองตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยบรรจุเนื้อทุเรียนในถาดและปิดผนึกด้วยฟิล์มหด ภายใต้สภาพปลอดเชื้อ แล้วนำไปเก็บรักษาในสภาวะที่ต่างกัน ได้แก่ 2°C 15 วัน+15°C 15 วัน, 2°C 20 วัน+15°C 10 วัน, 2°C 20 วัน+15°C 5 วัน และ 2°C 30 วัน เมื่อครบ 30 วัน พบว่า ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 1×10^6 และเชื้อราอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ น้อยกว่า 1×10^4 และ 500 CFU/g ตามลำดับ ส่วนความชอบด้านกลิ่น รส ความแน่นเนื้อ ค่าสีเหลือง ค่าโครมา ค่ามุมฮิว การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสด ปริมาณฟรุตโทส กลูโคส และซูโครส ไม่มีความแตกต่างกัน แต่พบว่าเนื้อทุเรียนที่เก็บรักษาที่ 2°C 15 วัน+15°C 15 วัน มีสีน้ำตาลเกิดขึ้นน้อยกว่าการเก็บรักษาด้วยวิธีการอื่น ๆ เมื่อทำการวิเคราะห์ชนิดขององค์ประกอบกลิ่นของเนื้อทุเรียน พบว่ามีสารในกลุ่มซัลไฟด์ แอลดีไฮด์ เอสเทอร์ แอกอฮอล์ และคีโตน เมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น พบว่าสารในกลุ่ม ไทออล เอทานอล และ แอลดีไฮด์ เพิ่มขึ้น ส่วนสารในกลุ่ม เอสเทอร์ และซัลเฟอร์บางชนิดลดลง นอกจากนี้ Niponsak et al. (2015) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่มีต่อรูปแบบของสารหอมระเหยและคุณภาพทางเคมี-สรีระวิทยาของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค พบว่าทุเรียนที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 11 วัน และที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน มีกลิ่นที่ตรวจพบได้ 26 และ 36 ชนิดตามลำดับ โดยสารหอมระเหยที่พบส่วนใหญ่ (70%) อยู่ในกลุ่มซัลเฟอร์ ได้แก่ ethanethiol, diethyl

disulphide, diethyl trisulphide, และ 3,5-dimethyl-1,2,4-trithiolane และพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสีของฟิล์มอยู่ 5 ชนิดหลัก ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมากในระหว่างการเก็บรักษาและมีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพทางเคมี-สรีระวิทยาของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยเฉพาะความแน่นเนื้อและการสูญเสียน้ำหนักสด ในระหว่างการเก็บรักษาไม่พบว่าการเปลี่ยนแปลงของสีเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค แต่พบว่าความแน่นเนื้อลดลงจาก 2.95 เหลือ 2.40 kg Force เนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคมีการสูญเสียน้ำหนักสด 3-7% ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ น้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุคโตส เพิ่มขึ้นเป็น 1.7 0.5 1.3 และ 0.9 เท่าของค่าเริ่มต้นตามลำดับ

งานวิจัยเกี่ยวกับเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคในต่างประเทศ Voon et al. (2006) ซึ่งเป็นนักวิจัยของประเทศมาเลเซียได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีระวิทยา เคมี ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ และความชอบของผู้บริโภคในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคพันธุ์ D24 โดยเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 และ 28 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 35 วัน พบว่าทุเรียนที่เก็บรักษาที่ 28 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ สีของเนื้อทุเรียนไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา แต่จะเกิดการอ่อนนุ่มของเนื้อทุเรียนอย่างรวดเร็วหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเนื้อทุเรียนจะมีสภาพเป็นกรด (pH 4.71) ภายใน 2 วัน เนื่องจากมีการสร้าง citric acid, succinic acid, acetic acid และ lactic acids เพิ่มมากขึ้น ปริมาณน้ำตาลซูโครสจะลดลงในขณะที่น้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุคโตสจะเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ส่วนทุเรียนที่เก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส ไม่พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในเนื้อทุเรียน หลังจากเก็บรักษาได้ 1 สัปดาห์ พบว่า ปริมาณน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เพิ่มสูงขึ้น และความแน่นเนื้อเพิ่มสูงขึ้นในระยะสุดท้ายของการเก็บรักษา ปริมาณกรดอินทรีย์คงที่ในระหว่างการเก็บรักษายกเว้นกรดทาทาริกมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย และพบว่าเนื้อทุเรียนที่เก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส เริ่มปรากฏกลิ่นผิดปกติในวันที่ 14 และในวันที่ 28 ของการเก็บรักษา พบว่าทุเรียนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่เก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส มีอายุการเก็บรักษา 14 วัน โดยที่ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ในขณะที่ทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่เก็บรักษาที่ 28 องศาเซลเซียส มีอายุการเก็บรักษาเพียง 1 วัน เนื่องจากเนื้อทุเรียนมีสภาพเป็นกรด

2.3.2 การใช้ฟิล์มและบรรจุภัณฑ์ในการเก็บรักษาทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

สนทรรศน์ และคณะ (2544) ได้ศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อคุณภาพของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค พบว่าการบรรจุทุเรียนในภาชนะพลาสติก polyvinyl chloride (PVC) แล้วหุ้มฟิล์ม สามารถควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count; TPC) และเชื้อ *Staphylococcus* ได้ดีกว่าการหุ้มด้วยฟิล์ม polypropylene (PP) และการหุ้มฟิล์มและฉีdk๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือมี TPC เท่ากับ 2×10^4 CFU/g ในขณะที่การบรรจุทุเรียนในภาชนะ

พลาสติก PCV ปิดฝาแล้วหุ้มด้วยฟิล์ม PP สามารถควบคุมการเจริญของยีสต์ได้ดี มีการเจริญเพียง 2.33×10 CFU/g ส่วนการบรรจุทุเรียนในภาชนะพลาสติก PVC หุ้มฟิล์มและฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 20 มิลลิลิตรต่อถาด มีการเจริญของ TPC และเชื้อ *Staphylococcus* มากที่สุด แต่ไม่เกินมาตรฐานที่กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์กำหนด และคุณภาพการชิมเป็นที่ยอมรับ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิเริ่มต้น 20 องศาเซลเซียส แล้วย้ายไปเก็บที่ 15 10 5 และ 2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ก่อนการวิเคราะห์ย้ายมาเก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียส สามารถควบคุมการเจริญของเชื้อ TPC และยีสต์ได้ดีที่สุด ส่วนการเก็บรักษาที่อุณหภูมิเริ่มต้น 15 องศาเซลเซียส แล้วย้ายไปเก็บที่ 5 และ 2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สามารถควบคุมการเจริญของเชื้อ *Staphylococcus* ได้ดีที่สุด การประเมินคุณภาพโดยการชิมเป็นที่ยอมรับ ต้นวงศ์ และคณะ (2549) ศึกษาผลของฟิล์ม PVC และ LLDPE ต่ออายุการเก็บรักษาทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่อุณหภูมิ 4 และ 8 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิการเก็บรักษาและชนิดของฟิล์มไม่มีผลต่อความแน่นเนื้อของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค แต่ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักและปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส และพบว่าเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่หุ้มด้วยฟิล์ม PVC และ LLDPE มีอายุการวางจำหน่ายได้นาน 36 และ 28 วัน ที่อุณหภูมิ 4 และ 8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ปรารักษ์ทอง และเบญจมาศ (2553) ได้ศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ ต่อการยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยบรรจุเนื้อทุเรียนในถาดพลาสติกชนิด polypropylene (PP) แล้วบรรจุลงในถุงชนิด low density polyethylene (LDPE), linear low density polyethylene (LLDPE) active M4 หรือ active M5 แล้วปิดปากถุง เปรียบเทียบกับการบรรจุในถาดพลาสติก polyvinyl chloride (PVC) พร้อมปิดฝา (ชุดควบคุม) และนำไปเก็บรักษาที่ 10 องศาเซลเซียส จากนั้นตรวจวัดคุณภาพในวันที่ 0 10 15 20 และ 25 ของการเก็บรักษา พบว่าเนื้อทุเรียนในทุกกรรมวิธีมีคุณภาพทางเคมีใกล้เคียงกัน (การสูญเสียน้ำหนัก ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ปริมาณวิตามินซี และค่าความเป็นกรดต่าง) โดยคุณภาพของเนื้อทุเรียนจะลดลงเมื่อเก็บรักษานานขึ้น เนื้อทุเรียนที่เก็บในถุง active M4 สามารถเก็บได้นาน 25 วัน แต่ทุเรียนในกรรมวิธีอื่น ๆ เก็บได้นาน 20 วัน โดยที่คุณภาพการรับประทานยังเป็นที่ยอมรับ

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 4 ส่วน ดังนี้ คือ

ส่วนที่ 1 - การพัฒนาตูรมีก๊าซไอโซนแบบถาดสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 1)

ส่วนที่ 2 - การพัฒนาเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยวสำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 2)

ส่วนที่ 3 - การทดสอบประสิทธิภาพของตูรมีไอโซนแบบถาดและเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยวเพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

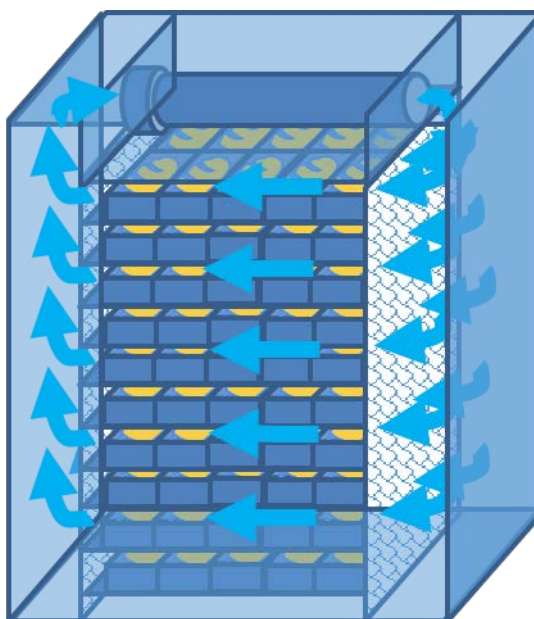
ส่วนที่ 4 - การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และประเมินความเป็นไปได้ในการลงทุนการใช้งานระบบ

ส่วนที่ 1 - การพัฒนาตูรมีก๊าซไอโซนแบบถาดสำหรับระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 1)

การสร้างตูรมีก๊าซไอโซน เป็นการพัฒนาต่อยอดชุดอุปกรณ์กำเนิดก๊าซไอโซนความเข้มข้นสูง จากงานวิจัยเดิม โดยจาดุพงศ์ (2555) และงานวิจัยโดย จตุรภัทร (2563) ซึ่งเป็นระบบที่สร้างไอโซนโดยใช้แหล่งกำเนิดก๊าซไอโซนจากก๊าซออกซิเจน ทำให้ได้ความเข้มข้นระดับปานกลาง ในระดับความเข้มข้นไม่เกิน 600 ppm ขนาดกำลังการผลิตโดยจะมีการพัฒนาเพื่อให้มีการหมุนเวียนก๊าซภายในตู้ที่เหมาะสม สามารถบรรจุทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคได้ 30 กก. โดยประมาณ จำนวน 2 ตู้ (1 ตู้สำหรับใช้งาน ณ สถานประกอบการ หรือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และอีก 1 ตู้สำหรับทดสอบคู่นานเพื่อปรับแต่งเพิ่มประสิทธิภาพตู้ ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้) พร้อมทั้งมีการบำบัดก๊าซไอโซนที่เหลือจ่ายที่เป็นพิษต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม

กิจกรรมที่ 1.1 การออกแบบและคำนวณระบบการไหลของก๊าซ

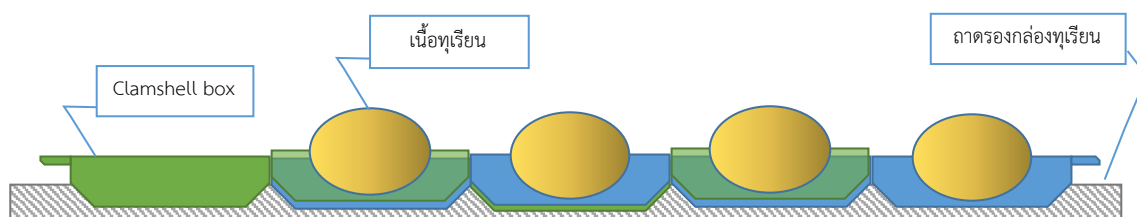
การออกแบบตูรมีก๊าซไอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) มีการคำนวณเพื่อการออกแบบอยู่ 2 ส่วน คือ การออกแบบระบบหมุนเวียนการไหลของอากาศด้วยการคำนวณเชิงพลศาสตร์ Computational Fluid Dynamic (CFD) เพื่อให้มีการกระจายก๊าซได้ทั่วถึง สัมผัสกับผลทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคได้อย่างสม่ำเสมอ (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 แนวคิดการออกแบบตู้รมก๊าซไอโซนแบบถาดสำหรับตู้เรียนตัดแต่งพร้อมบริโกล (โมเดลที่ 1)

การออกแบบและสร้างโครงสร้างตู้รมก๊าซไอโซน ขนาดบรรจุ 30 กก. ตู้เรียนตัดแต่งพร้อมบริโกล มิติเบื้องต้น ประมาณ กว้xสูง 1.6 x 0.6 x 2.0 ม. โครงสร้างผนังภายในของห้องแก๊สไอโซนเป็นเหล็กสแตนเลส พร้อมถาดสแตนเลสจำนวน 10 ชั้น เพื่อทนการกัดกร่อนของไอโซนความเข้มข้นสูง โดยมีคุณสมบัติเฉพาะเบื้องต้นดังนี้

- ภายในออกแบบด้วยหลัก Hygiene Design ที่สามารถทำความสะอาดได้ง่ายและลบมุมเพื่อให้ลดการสะสมของเชื้อจุลินทรีย์
- ด้านข้างของผนัง มีช่องสำหรับให้ก๊าซไอโซนไหลผ่านตู้เรียนที่วางอยู่ในแนวนอน พร้อมช่องก๊าซไอโซนเพื่อหมุนเวียนกลับเข้าห้อง
- มีระบบกำเนิดไอโซนอยู่ด้านบน พร้อมระบบระบายอากาศ ทำให้ห้องรมแก๊สสามารถหมุนเวียนอากาศแบบปิด
- มีการคำนวณพัดลมให้มีความสามารถในการดันอากาศในระบบปิดหมุนเวียนได้
- โครงสร้างของตู้ สามารถป้องกันการรั่วไหลของก๊าซไอโซนออกสู่ภายนอก
- มีการจัดเรียงแต่ละถาดโดยใช้การซ้อนกล่อง clamshell box ดังรูปที่ 3.2
- นอกจากนี้ ยังมีอุปกรณ์ช่วยในการขนถ่ายถาดตู้เรียน เพื่อช่วยในการขนย้ายถาดตู้เรียน จากภายนอกตู้ เข้าและออกตู้รมก๊าซไอโซน



รูปที่ 3.2 ลักษณะการวางซ้อนกล่องแบบ Clamshell box ซึ่งจัดเรียงบนถาดภายในตู้รมก๊าซโอโซน แบบถาด (โมเดล 1)

กิจกรรมที่ 1.2 การออกแบบระบบกำเนิดก๊าซโอโซน ระบบควบคุม และตรวจวัด

ในการออกแบบระบบกำเนิดก๊าซโอโซนจะมีการคำนวณปริมาณความเข้มข้นที่ต้องการใช้ร่วมกับเวลาในการรมแก๊สโอโซน (Cxt) เครื่องกำเนิดโอโซน มีกำลังเพียงพอที่สามารถจะสร้างโอโซนให้อยู่ในระดับที่ต้องการ เบื้องต้นออกแบบไว้ที่ระดับความเข้มข้นภายในห้องไม่เกิน 1,000 ppm ภายในไม่เกิน 5 นาที

ระบบกำเนิดก๊าซโอโซน จะใช้ออกซิเจนความเข้มข้นสูงเพื่อเป็นแหล่งสร้างก๊าซโอโซน พร้อมกับมีระบบควบคุมต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- Timer ควบคุมเวลาในการปฏิบัติงาน
- ระบบตรวจสอบความผิดปกติของการผลิตแก๊สโอโซน
- ระบบ Safety เพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ
- ระบบ Safety สำหรับป้องกันการเปิดประตูตู้โดยก่อนระยะเวลากำหนด
- ระบบตรวจวัดความเข้มข้นของโอโซนในตู้รมก๊าซ (แบบ Off-line)
- ระบบควบคุมการทำงานของระบบบำบัดก๊าซโอโซนเหลือทิ้ง
- ส่วนระบบควบคุมนั้น จะมีการพัฒนาโดยใช้ PLC หรือ Microcontroller เป็นตัวควบคุมขั้นตอนการปฏิบัติงานแบบอัตโนมัติทดแทนการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม พร้อมทั้งมีการพัฒนาระบบควบคุมผ่านเครือข่ายไร้สาย ให้สามารถบันทึกข้อมูลเข้า Database ส่วนกลางด้วยระบบ IOT สำหรับการตรวจสอบย้อนกลับขั้นตอนการรมแก๊สที่เป็นระบบ traceability

กิจกรรม 1.3 ระบบบำบัดก๊าซโอโซนเหลือจ่าย

ระบบบำบัดก๊าซโอโซนเหลือทิ้ง มีวัตถุประสงค์เพื่อบำบัดปริมาณก๊าซโอโซนที่เหลือจากการรมให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย โดยปกติแล้วก๊าซโอโซนจะดูดซับในวัสดุเกษตรได้เพียงประมาณ 20-30% เท่านั้น ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดก๊าซตกค้างในตู้ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยก่อนจะเปิดตู้ การออกแบบและสร้างระบบบำบัดเหลือจ่าย จะใช้วิธีการทาง Catalyst โดยให้โอโซนทำปฏิกิริยากับ KMgO_4 ในปริมาณและเวลาที่กำหนด เบื้องต้นกำหนดเวลาการบำบัดไว้ไม่เกิน 10 นาที ส่วนระบบควบคุม

นั้น จะมีการพัฒนาโดยใช้การควบคุม PLC หรือ Microcontroller จากส่วนกลาง เป็นตัวควบคุม ขั้นตอนการปฏิบัติงานแบบอัตโนมัติทดแทนการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม พร้อมทั้งสามารถเก็บบันทึกข้อมูลเข้า Database ส่วนกลางด้วยระบบ IOT สำหรับการตรวจสอบย้อนกลับขั้นตอนการรวมแก๊สที่เป็นระบบ traceability

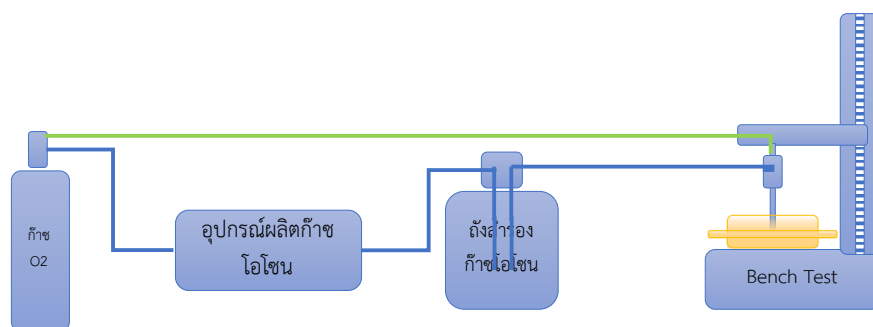
ส่วนที่ 2 – การพัฒนาเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์เดียวสำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 2)

ในการพัฒนาเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียวนี้ (โมเดลที่ 2) จะทำการออกแบบและพัฒนาตัวเครื่องให้มีขนาดติดตั้งประมาณ 2x0.80x0.8 ม. (กxยxส) มีแนวคิดการออกแบบโดยใช้กลไกการเคลื่อนที่ของหัวฉีดจำนวน 4 หัวเคลื่อนขึ้นลงในแนวดิ่ง ให้มีความสอดคล้องกับกล่องบรรจุทุเรียนที่เคลื่อนที่ในแนวนอน ในจังหวะที่เหมาะสม สามารถปฏิบัติงานได้ครั้งละ 4 กล่อง และคาดว่าจะใช้ระยะเวลาในการป้อนก๊าซโอโซนเข้าสู่กล่องในเวลาไม่เกิน 5 วินาทีต่อครั้ง โดยมีขั้นตอนการออกแบบและพัฒนา ดังนี้

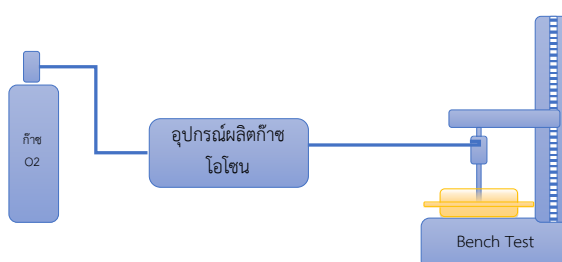
กิจกรรมที่ 2.1 การออกแบบและพัฒนาระบบหัวฉีดและระบบสำรองก๊าซโอโซน

กิจกรรมนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบหัวฉีดและระบบสำรองก๊าซโอโซนเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ต้องการฉีดป้อนเข้าสู่กล่องบรรจุทุเรียนที่เหมาะสม โดยจะมีการศึกษาเปรียบเทียบระบบหัวฉีด 2 แบบ คือแบบที่มีถังสำรองก๊าซโอโซน (รูปที่ 3.3) และ แบบผลิตก๊าซโอโซนโดยตรงผ่านอุปกรณ์สร้างก๊าซโอโซน (รูปที่ 3.4) ขั้นตอนการออกแบบและพัฒนา มีการดำเนินการดังนี้

- ออกแบบหัวฉีดก๊าซโอโซนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-3 มม. ด้วยท่อสแตนเลส
- ออกแบบท่อนำก๊าซออกซิเจน เพื่อเชื่อมต่อกับหัวฉีดก๊าซโอโซน
- ออกแบบถังสำรองก๊าซโอโซน (Ozone Reservoir) เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนสำหรับฉีดเข้าสู่กล่องทุเรียน
- เชื่อมต่ออุปกรณ์กำเนิดก๊าซโอโซนเข้ากับระบบ
- ศึกษากระบวนการผลิตและหัวฉีดป้อนก๊าซโอโซนเข้าสู่บรรจุภัณฑ์ 2 แบบ คือแบบมีถังสำรองก๊าซโอโซน และ แบบผลิตก๊าซโอโซนโดยตรง
- เลือกกระบวนการผลิตการฉีดป้อนก๊าซโอโซนที่เหมาะสมที่ได้ความเข้มข้นโอโซนที่หัวฉีดมีความสม่ำเสมอและคงที่ตลอดช่วงการใช้งาน ประมาณ 30 นาที
- ทดสอบปรับแต่งอัตราการไหลและความดันของก๊าซออกซิเจนและก๊าซโอโซนที่เหมาะสม
- พัฒนาวิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในบรรจุภัณฑ์



รูปที่ 3.3 แนวคิดการศึกษาระบบการผลิตและหัวฉีดป้อนก๊าซโอโซนเข้าสู่บรรจุภัณฑ์ แบบมีถังสำรองก๊าซโอโซน



รูปที่ 3.4 แนวคิดการศึกษาระบบการผลิตและหัวฉีดป้อนก๊าซโอโซนเข้าสู่บรรจุภัณฑ์ แบบผลิตก๊าซโอโซนโดยตรง

กิจกรรมที่ 2.2 การออกแบบและพัฒนาระบบและกลไกการเคลื่อนที่ของหัวฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ

- ศึกษาอัตราเร็วและระยะทางของการเคลื่อนที่ของหัวฉีดก๊าซโอโซนที่เหมาะสม
จำนวน 4 หัวฉีด

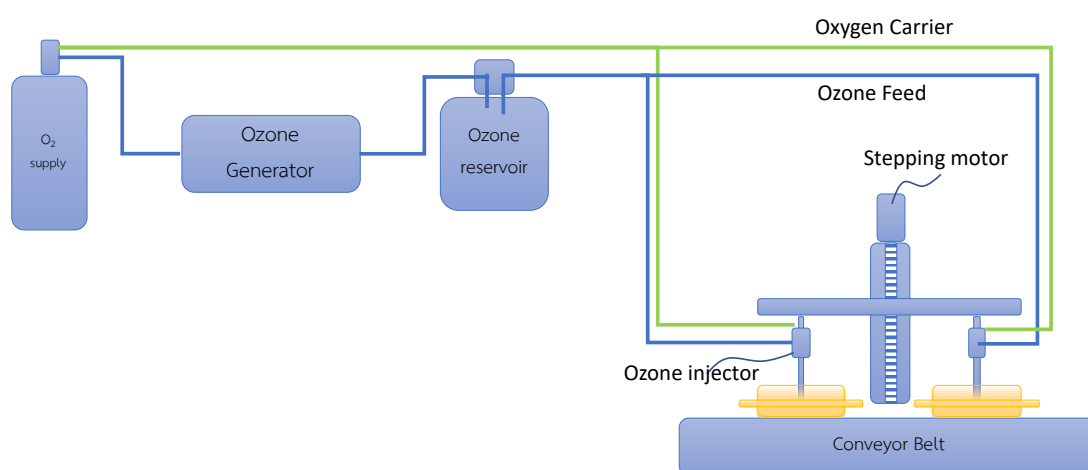
- ออกแบบกลไกช่วยในการเคลื่อนย้ายหัวฉีดเพื่อเลื่อนขึ้นลงในแนวดิ่ง
- พัฒนาระบบควบคุมทางไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานการเคลื่อนที่ของหัวฉีดแบบกึ่งอัตโนมัติ

3.2.3 กิจกรรมที่ 2.3 การออกแบบและพัฒนาระบบการติดสติ๊กเกอร์ซีลป้องกันการรั่วไหลของก๊าซโอโซน

- ออกแบบหัวจับและปล่อยสติ๊กเกอร์ด้วยระบบนิวเมติกส์
- ศึกษาอัตราเร็วและระยะทางของการเคลื่อนที่ของหัวจับสติ๊กเกอร์
- ออกแบบกลไกช่วยในการเคลื่อนย้ายหัวจับสติ๊กเกอร์
- พัฒนาระบบควบคุมทางไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานการเคลื่อนที่ของหัวจับสติ๊กเกอร์แบบกึ่งอัตโนมัติ

กิจกรรมที่ 2.4 การออกแบบระบบสายพานลำเลียง โครงสร้างภายนอก และระบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

- ออกแบบระบบสายพานลำเลียง พร้อมทั้งเซ็นเซอร์เชิงแสงเพื่อกำหนดจังหวะการเคลื่อนที่ของบรรจุภัณฑ์ทุเรียนบนสายพาน (รูปที่ 3.5)
- ออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมทางไฟฟ้าและทางกลของระบบสายพานลำเลียง
- ออกแบบโครงสร้าง ฝาครอบ และถาดรองกำกับตำแหน่งถาดวางรองบรรจุภัณฑ์ทุเรียน
- ออกแบบระบบดูดก๊าซโอโซนเหลือทิ้งบริเวณปฏิบัติงาน
- ออกแบบระบบบำบัดก๊าซโอโซนเหลือทิ้งก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ



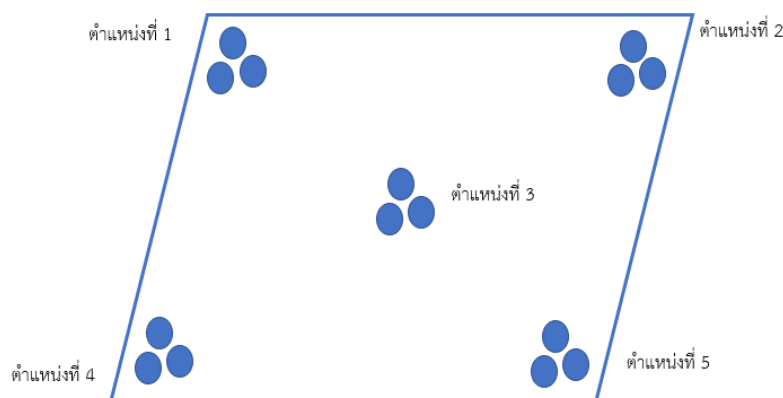
รูปที่ 3.5 แนวคิดการออกแบบเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2)

ส่วนที่ 3 – การทดสอบประสิทธิภาพของตูรมีโอโซนแบบถาดและเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

กิจกรรม 3.1 ประสิทธิภาพของตูรมีโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในการกำจัดเชื้อ Non-pathogenic *E. coli* ในจานอาหารเลี้ยงเชื้อจำเพาะ (*in vitro* test)

นำ Single colony ของเชื้อ non-pathogenic *E. coli* (TISTR 780, MERCEN) สายพันธุ์ที่ไม่ก่อโรคกับมนุษย์จากกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ มาเลี้ยงในหลอดอาหาร Nutrient broth ปริมาตร 9 มิลลิลิตร และนำไปวางบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที นาน 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาทำเจือจางด้วยน้ำนิ่งฆ่าเชื้อในอัตรา 1:1000 เท่า แล้วนำ 0.1 มิลลิลิตรของตัวอย่างที่เตรียมได้ มาเกลี่ยบนหน้าอาหาร EMB agar จากนั้นนำจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมได้ไปวางในตูรมีโอโซน เปิดฝาจานอาหารเลี้ยงเชื้อ ปิดตู้ แล้วเปิดสวิทซ์ตู้ จนกระทั่งภายในตูรมีโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm

จากนั้นปิดสวิทช์ตู้ และปล่อยให้จานอาหารเลี้ยงเชื้ออยู่ในตู้ นาน 3 นาที (ผ่องเพ็ญ และคณะ, 2562) จึงนำออกมาและปิดฝาจานอาหารเลี้ยงเชื้อและทำการปิดผนึกฝาให้สนิทด้วยพาราฟิล์ม บ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 24-48 ชั่วโมง จากนั้นนับจำนวนโคโลนีของเชื้อที่เจริญบนหน้าอาหารและรายงานผลในหน่วย log CFU/ mL โดยวางจานอาหารเลี้ยงเชื้อในภาชนะที่อยู๋ภายใต้ จำนวน 5 ตำแหน่งต่อถาด ตำแหน่งละ 3 จาน (ซ้ำ) (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 ลักษณะการวางจานอาหารเลี้ยงเชื้อ (จำนวน 3 จานหรือซ้ำ) ในถาดขนย้ายเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน จำนวน 5 ตำแหน่งต่อถาด (ชั้น)

กิจกรรม 3.2 ประสิทธิภาพของตูรมีโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคและผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียน

นำผลทุเรียนพันธุ์หมอนทอง ที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 2,500 - 3,000 กรัมต่อผล และมีระยะการสุกแก่ประมาณ 105-110 วัน หลังดอกบาน มาทำการเร่งให้สุกอย่างสม่ำเสมอทุกๆ ด้วยการป้ายผิวผลด้วยเอทิลพอน ความเข้มข้น 26-52% (พีระพงษ์ และคณะ, 2560) และบ่มที่อุณหภูมิห้องนาน 2-3 วัน จากนั้นปอกเปลือกทุเรียน ในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 18-20 องศาเซลเซียส คัดเลือกทุเรียนที่มีความสุกและขนาดใกล้เคียงกัน ไม่มีตำหนิที่เกิดจากบาดแผล รอยขีด จากการปฏิบัติงาน (ปอก) มาใช้ในการทดสอบ

นำทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่เตรียมได้จากข้างต้น จำนวน 500 ± 10 กรัม บรรจุลงในกล่อง polyethylene terephthalate (PET) clamshell ขนาด 1,600 มิลลิลิตร จากนั้นแบ่งเนื้อทุเรียนตัดแต่งมาออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เนื้อทุเรียนที่ไม่ปลุกเชื้อ และกลุ่มที่ 2 เนื้อทุเรียนที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* (TISTR 780, MERCEN) ที่ความเข้มข้น 10^6 CFU/ml (หรือมีค่า OD₆₀₀ เท่ากับ 0.5) โดยการใช้ปิเปตดูดเซลล์แขวนลอยของเชื้อ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร นำไปหยดบนเนื้อทุเรียนส่วนสีเหลืองและสีขาว แล้วผึ่งให้แห้งในตู้อบเชื้อ นาน 20 นาที ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

นำเนื้อทุเรียนทั้ง 2 กลุ่ม ไปเรียงใส่ในถาดและนำถาดไปวางในตู้รมก๊าซโอโซน โดยกล่องตัวอย่างทุเรียนจะวางเรียงซ้อนทับลงบนฝากล่องของทุเรียนอีกกล่องหนึ่ง (รูปที่ 3.7) ปิดฝาตู้ และเริ่มปล่อยโอโซนเข้าตู้ จนกระทั่งภายในตู้มีความเข้มข้นของก๊าซโอโซน เท่ากับ 900 ppm จึงทำการปิดสวิทช์และปล่อยให้ทุเรียนสัมผัสกับก๊าซโอโซนต่ออีก 3 นาที เมื่อครบกำหนดเวลา จึงทำการดูดก๊าซโอโซนออกเพื่อไปกำจัดก่อนเปิดตู้ และนำทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคมารับรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน สำหรับเนื้อทุเรียนที่ไม่ได้รมจะใช้เป็นชุดควบคุม บันทึกผลการทดลองในวันที่ 0, 7 และ 14 วัน (เพื่อจำลองการเก็บรักษา) และหลังจาก 14 วัน จึงย้ายออกมาวางที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน (เพื่อจำลองการวางจำหน่ายในซูเปอร์มาเก็ต) ซึ่งสามารถสรุปออกเป็นทริตเมนต์ต่างๆ ได้ดังนี้

ทริตเมนต์ที่ 1 เนื้อทุเรียนไม่ปลูกเชื้อจุลินทรีย์

ทริตเมนต์ที่ 2 เนื้อทุเรียนไม่ปลูกเชื้อจุลินทรีย์ และรมด้วยโอโซน 900 ppm

ทริตเมนต์ที่ 3 เนื้อทุเรียนปลูกเชื้อ non-pathogenic *E. coli*

ทริตเมนต์ที่ 4 เนื้อทุเรียนปลูกเชื้อ non-pathogenic *E. coli* และรมด้วยโอโซน 900 ppm

วางแผนการทดลองแบบ Factorial in Complete Randomized Design แต่ละทริตเมนต์มี 5 ซ้ำ (กล่อง) โดยเก็บตัวอย่างเนื้อทุเรียนจากถาดวางทุเรียน จำนวน 5 ซ้ำ (ชั้นละ 1 กล่อง) และวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SAS statistical software

หมายเหตุ - ตู้รมก๊าซโอโซนนี้วางไว้ในห้อง high care and clean room ซึ่งเป็นห้องที่สะอาดและฆ่าเชื้อที่ผนังและพื้นผิวภายในห้องก่อนการใช้งานด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 250 ppm เพื่อป้องกันการ recontamination ของเนื้อทุเรียนในระหว่างการปิดฝากล่องทุเรียนที่ผ่านการรมโอโซนแล้ว ซึ่งผู้ปฏิบัติงานต้องผ่านการอบรมวิธีการปิดกล่องที่ถูกต้อง และต้องสวมชุด Food factory uniform ที่สะอาดและสวมใส่อย่างถูกวิธี เช่น รองเท้าปิดมิดชิด shoe cover, หน้ากาก, หมวกคลุมผม, ถุงมือ เป็นต้น ทั้งนี้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศภายในห้องนี้ จะต้องไม่เกินเกณฑ์คุณภาพอากาศด้านจุลินทรีย์ ตามมาตรฐาน The index of Microbial Air Contamination (IMA) นั่นคือ ในสถานประกอบการอุตสาหกรรมอาหารจะต้องมีเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศไม่เกิน 40-48 CFU/dm²/h (ตารางที่ 3.1)



รูปที่ 3.7 ลักษณะการจัดเรียงกล่องตัวอย่างทุเรียนภายในตูรมีก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดล 1)

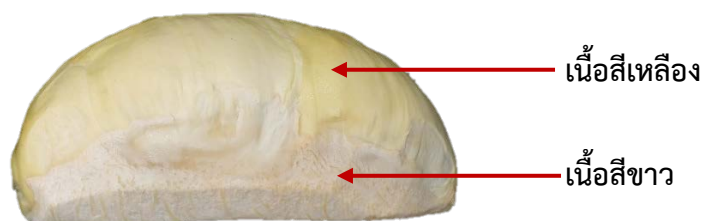
ตารางที่ 3.1 เกณฑ์คุณภาพอากาศด้านจุลินทรีย์ ตามมาตรฐาน The index of Microbial Air Contamination (IMA) และระดับการประเมิน (Pasquarella et al., 2000)

IMA value	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (CFU/dm ² /h)	ระดับ (class)	สถานที่เสี่ยง (In place at risk)
0-5	0-9	Very good	Ultra clean room, reverse isolation, operating room, joint replacement, some procedures of electronics and pharmaceutical industries
6-25	10-39	Good	Clean room, conventional operating theatres, continuous care unit, dialysis unit
26-50	40-48	Fair	Day hospitals, hospital wards, food industries, kitchens
51-75	85-124	Poor	Facilities
≥76	≥125	Very poor	-

การบันทึกผลการทดลอง

1) ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

การแยกเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมจากเนื้อทุเรียนส่วนสีเหลืองและเนื้อสีขาว (funiculus) ที่อยู่เหนือเมล็ดทุเรียน (รูปที่ 3.8) โดยทำสุ่มเก็บตัวอย่างเนื้อทุเรียนพร้อมบริโภครวมจำนวน 25 กรัม ใส่ในถุง Stomacher แล้วเติม Peptone water ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 225 มิลลิลิตร จากนั้นตีปั่นตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Stomacher นาน 1 นาที ตัวอย่างที่ได้จะมีความเจือจางเท่ากับ 1:10 จากนั้นนำมาเจือจางต่อด้วย Peptone water ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ ให้ได้ระดับความเจือจางที่ต้องการ แล้วนำไปวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในแต่ละระดับความเข้มข้นจำนวน 3 ซ้ำ จากนั้นนำสารแขวนลอยที่เจือจางมาเกลี่ยลงบนหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดต่างๆ ได้แก่ อาหาร Plate Count Agar (PCA) สำหรับวิเคราะห์แบคทีเรียทั้งหมด (Total bacteria), อาหาร Potato Dextrose Agar (PDA) สำหรับวิเคราะห์ยีสต์และเชื้อรา และอาหาร Eosin Methylene Blue (EMB) Agar สำหรับวิเคราะห์ *E. coli* จากนั้นบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1-2 วัน และนับจำนวน Colony ของเชื้อที่เจริญบนหน้าอาหารแต่ละชนิดและรายงานผลในหน่วย log CFU/g fresh weight



รูปที่ 3.8 เนื้อทุเรียนส่วนสีเหลืองและสีขาวที่ใช้ในการวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์

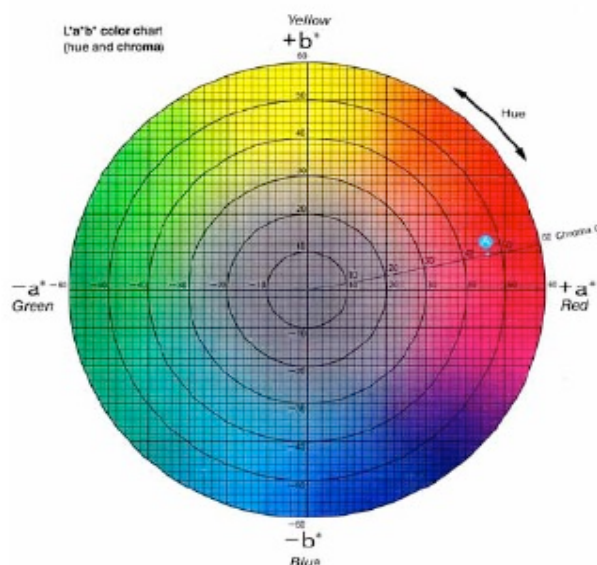
2) การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและคุณภาพของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (วิเคราะห์เฉพาะตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่ไม่มีการปลูกเชื้อ non-pathogenic *E. coli*)

2.1) การเปลี่ยนแปลงค่าสีเนื้อ (L^* , a^* , b^* และ Hue angle)

การเปลี่ยนแปลงค่าสีเนื้อของทุเรียนวัดโดยเครื่องวัดสี Minolta Colorimeter r400 โดยใช้หัววัดแนบสัมผัสกับผิวของทุเรียนให้มากที่สุด โดยทุเรียน 1 พู ทำการวัด 3 จุด และหาค่าเฉลี่ย รายงานผลเป็นค่า Hunter scale ซึ่งประกอบไปด้วยค่าต่าง ๆ ดังนี้

- ค่า L^* เป็นค่าที่รายงานถึงความสว่างของสี มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 ถ้าค่า L^* สูง หมายถึง มีค่าความสว่างมาก แต่ถ้าค่า L^* ต่ำ หมายถึง มีสีเข้มมาก
- ค่า a^* เป็นค่าที่รายงานถึงการเปลี่ยนแปลงของสีในช่วงสีแดง ในกรณีที่ a^* มีค่าเป็นบวก และช่วงสีเขียวในกรณีที่ค่า a^* มีค่าเป็นลบ

- ค่า b^* เป็นค่าที่รายงานถึงการเปลี่ยนแปลงของสีในช่วงสีเหลือง ในกรณีที่ค่า b^* มีค่าเป็นบวก และช่วงสีน้ำเงินในกรณีที่ค่า b^* มีค่าเป็นลบ
- ค่า Hue angle เป็นค่าที่รายงานถึงการเปลี่ยนแปลงของโทนสีในระดับต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไปตามค่ามุม ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Hue sequence และ Hue angle ในแผนผังของ CIELAB

2.2) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solids; TSS)

ปั่นเนื้อทุเรียนในน้ำกลั่นอัตราส่วน 1:5 ด้วยเครื่อง Homogenizer (Polytron i6jo PT-MR 2500E) เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นใช้น้ำจากการปั่นเนื้อทุเรียนที่ได้มาวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้เครื่อง ATAGO Hand Refractometer (N 10-32%) รายงานผลที่ได้เป็นองศาบริกซ์ ($^{\circ}$ Brix)

2.3) ปริมาณน้ำตาล (Total sugar)

ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยวิธี colorimetric phenol (Dubois et al, 1956) โดยชั่งเนื้อทุเรียน 5 กรัม จากนั้นเติม Methanol ความเข้มข้น 85% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร นำไปปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่อง Homogenizer (Polytron i6jo PT-MR 2500E) เป็นเวลา 30 วินาที แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ยี่ห้อ Sorvall โดยใช้แรงเหวี่ยง $12,000 \times g$ ที่ 4 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที จากนั้นนำส่วนใสที่ได้ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาผสมกับสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 5% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟิวริก ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ 490 นาโนเมตร และเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคส รายงานผลในหน่วย mg/ 100 g FW

2.4) ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) โดย DPPH method (ดัดแปลงจาก Pothitirat et al., 2009)

ซึ่งเนื้อทุเรียน 1 กรัม แล้วเติม Methanol ความเข้มข้น 80% ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่อง Homogenizer (Polytron i6jo PT-MR 2500E) เป็นเวลา 30 วินาที แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ยี่ห้อ Sorvall โดยใช้แรงเหวี่ยง $12,000 \times g$ ที่ 4 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที จากนั้นดูดส่วนใสที่ได้ ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl scavenging capacity (DPPH) (ที่เตรียมจาก Stock solution 10 มิลลิลิตร เติม Methanol ความเข้มข้น 95% ปริมาตร 45 มิลลิลิตร) ปริมาตร 2,850 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง นาน 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร โดยใช้ Methanol เป็น Blank คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกำจัดอนุมูลอิสระของ DPPH จากสมการ

$$\text{DPPH Scavenging Activity (\%)} = (\text{AC} - \text{AE} / \text{AC}) \times 100$$

AC = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร DPPH ผสม Blank

AE = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร DPPH ผสม Sample

2.5) อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีน

นำทุเรียนมาเก็บก๊าซในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิของการเก็บรักษาทุเรียนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างก๊าซภายในภาชนะด้วยกระบอกฉีดยา ขนาด 1 มิลลิลิตร โดยดูดอากาศจากช่องว่างของภาชนะนำไปวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเอทิลีนด้วยเครื่อง Gas chromatograph (Shimadzu, Japan) รุ่น 14A (ตารางที่ 3.2) นำค่าที่วัดได้มาคำนวณอัตราการหายใจ ($\text{mg CO}_2/\text{kg/hr}$) และอัตราการผลิตเอทิลีน ($\mu\text{l C}_2\text{H}_4/\text{kg/hr}$)

ตารางที่ 3.2 สภาวะการวัดอัตราการหายใจและเอทิลีนด้วยเครื่อง Gas chromatograph (Shimadzu, Japan) รุ่น 14A

	อัตราการหายใจ (CO_2)	การผลิตเอทิลีน (C_2H_4)
Column	Porapak Q (Mesh 80/100)	Porapak Q (Mesh 60/80)
Column temperature	55°C	80°C
Inject temperature	100°C	120°C
Detector	TCD	FID
Carrier gas	He	N_2

หมายเหตุ: TCD = Thermal conductivity detector

FID = Flame ionization detector

2.6) ความแน่นเนื้อ

ทำการวัดค่าความแน่นเนื้อของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค ด้วยเครื่อง TA-XT2 texture analyzer ใช้หัววัดขนาด P/6 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตร ตั้งค่าความลึกที่หัววัดเข้าไปในเนื้อทุเรียน 5 มิลลิเมตร ความเร็วในการกด เท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที รายงานผลในหน่วยนิวตัน (N)

2.7) คะแนนการยอมรับด้านคุณภาพการรับประทานของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค ได้แก่ กลิ่นและรส ความหวาน และการยอมรับโดยรวม

ทำโดยให้คะแนนด้วยระบบ hedonic scale ใช้เกณฑ์ของ ศิริกาญจน์ (2554) และการยอมรับโดยระบบ Dichotomous scale โดยใช้เกณฑ์ของ ศิริพร (2558) ตามลำดับ และรายงานผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยของผู้ชิมจำนวน 15 คน ที่ได้รับการฝึกอบรมแล้ว ดังต่อไปนี้

กลิ่นและรส คะแนน 1-5

1 = หวานชม กลิ่นจืด	2 = หวานชม กลิ่นผิดปกติ	3 = หวาน กลิ่นรสปานกลาง
4 = หวานหอม รสชาติดี	5 = หวานหอมรสชาติดีมาก	

รสหวาน คะแนน 1-5

1 = จืด ไม่หวาน	2 = ไม่ค่อยหวาน	3 = หวานเล็กน้อย
4 = หวานปานกลาง	5 = หวานมาก	

การยอมรับโดยรวม คะแนน 1-5

1 = ไม่พอใจ	2 = พอใจเล็กน้อย	3 = พอใจปานกลาง
4 = พอใจ	5 = พอใจมาก	

2.8) การวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่องทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคหลังการรมโอโซนแล้วเป็นเวลา 0, 1, 3, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง โดยใช้เครื่อง Ozone detector ร่วมกับการใช้ ozone gas detector tube

กิจกรรมที่ 3.3 การวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอากาศภายในห้อง high care and clean room ที่วางตู้รมก๊าซโอโซน

ทำการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่ปนเปื้อนในอากาศภายในห้อง high care and clean room ที่ใช้สำหรับวางตู้รมก๊าซโอโซน โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrien agar (NA) สำหรับตรวจเชื้อแบคทีเรีย และอาหาร Potato dextrose agar (PDA) สำหรับตรวจเชื้อรา ทำการทดสอบตามวิธี settle plate (passive air sampling) โดยการวางจานอาหารเลี้ยงเชื้อแต่ละชนิดที่เปิดฝาไว้ในรูปแบบ 1 / 1 / 1 scheme ตามข้อกำหนดของ Index of Microbial Air Contamination (IMA) (Pasquarella et al., 2000) คือ จานอาหารอยู่ห่างจากผนัง 1 เมตร และวางจานอาหารสูงจากพื้น

1 เมตร และให้ผิวหน้าอาหารสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมนานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จำนวนจานอาหารเลี้ยงเชื้อต่อพื้นที่ห้อง คำนวณได้จาก พื้นที่ห้อง 100 ตารางฟุตต่อ 1 จานอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยทำในขณะที่เปิดตู้รมก๊าซโอโซนเพื่อเอาเนื้อทุเรียนตัดแต่งออกจากตู้ ซึ่งหลังจากวางจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่เปิดฝาทิ้งไว้จนครบ 1 ชั่วโมงแล้ว จึงทำการปิดฝาและนำจานอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย Nutrient agar ไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ส่วนอาหารเลี้ยงเชื้อรา potato dextrose agar ไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3-5 วัน จากนั้นนับจำนวนโคโลนีของเชื้อที่เจริญบนอาหาร และรายงานผลในหน่วย CFU/dm²/hr และนำค่าที่ได้ไปเทียบกับเกณฑ์คุณภาพอากาศด้านจุลินทรีย์ ตามมาตรฐานของ IMA (ตารางที่ 3.1) นอกจากนี้ ทำการจดบันทึกอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องขณะที่ทำการเปิดฝาจานอาหารไว้ด้วย

หมายเหตุ - จานอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร หรือมีพื้นที่ภายในจานเท่ากับ 64 ตารางเซนติเมตร

กิจกรรมที่ 3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว (โมเดลที่ 2) ในการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

กิจกรรมที่ 3.4 ได้แบ่งการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติออกเป็น 3 กิจกรรมย่อย ดังนี้

กิจกรรมที่ 3.4a การตรวจวัดปริมาณก๊าซโอโซนภายในกล่อง clamshell ที่บรรจุและไม่บรรจุเนื้อทุเรียนตัดแต่ง (กิจกรรมนี้ทำเพิ่มเติม โดยไม่ได้ระบุในข้อเสนอโครงการ)

นำทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคเช่นเดียวกับกิจกรรมที่ 3.3.2 น้ำหนัก 500 กรัม บรรจุลงในกล่อง polyethylene terephthalate (PET) clamshell ขนาด 1,600 มิลลิลิตร ที่มีการเจาะรูที่ฝาด้านบนของกล่องจำนวน 1 รูต่อกล่อง (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูประมาณ 10 มิลลิเมตร) เพื่อเป็นช่องสำหรับฉีดก๊าซโอโซนเข้าไป (gas inlet) นำกล่อง Clamshell ที่ปิดฝากล่องให้สนิทด้วยพาราฟินนำไปวางในสายพายของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนอัตโนมัติ และเปิดสวิตช์เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน โดยกล่อง clamshell จะเลื่อนเข้าไปให้ระบบเพื่อฉีดก๊าซโอโซนเข้าไปในกล่องนาน 10, 15 และ 20 วินาที หลังจากนั้นรูที่ฝากล่องจะถูกปิดด้วยสติ๊กเกอร์โดยอัตโนมัติ และเลื่อนออกมาด้านนอกตัวเครื่อง จากนั้นทำการวัดความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่องทันทีด้วย ozone detector รุ่น WASP-XM-E-O3-5000 ppm ประเทศจีน และดำเนินการในรูปแบบเดียวกันนี้กับกล่อง clamshell ที่ไม่ได้บรรจุเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค เพื่อใช้เป็นชุดเปรียบเทียบ และรายงานผลความเข้มข้นโอโซนภายในกล่องเป็นค่าเฉลี่ยในหน่วย ppm ซึ่งแต่ละทริตเมนต์ทำ 4 ซ้ำ

กิจกรรมที่ 3.4b การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว (โมเดลที่ 2) ในการกำจัดเชื้อ *Non-pathogenic E. coli* และ *total bacteria* ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (กิจกรรมนี้ทำเพิ่มเติม โดยไม่ได้ระบุในข้อเสนอโครงการ)

นำ cell suspension ของเชื้อ *Non-pathogenic E. coli* และ *total bacteria* ที่แยกได้จากทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำ ที่ความเข้มข้น 10^8 CFU/mL มาเกลี่ยลงบนผิวหน้าของจานอาหารเลี้ยงเชื้อ EMB และ PCA ตามลำดับ จากนั้นนำไปวางไว้ในกล่อง clamshell ที่ไว้ใช้สำหรับบรรจุเนื้อทุเรียนตัดแต่ง และนำกล่องไปวางในสายพายของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนอัตโนมัติ และเปิดสวิทช์เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน โดยกล่อง clamshell จะเลื่อนเข้าไปในระบบเพื่อฉีดก๊าซโอโซนเข้าไปในกล่องนาน 10, 15 และ 20 วินาที หลังจากนั้นรูที่ฝากล่องจะถูกปิดด้วยสติ๊กเกอร์โดยอัตโนมัติ และเลื่อนออกมาด้านนอกตัวเครื่อง จากนั้นนำจานอาหารเลี้ยงเชื้อไปบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง แต่ละทริตเมนต์ทำ 4 ซ้ำ และทำการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย และรายงานผลในหน่วย CFU/mL, Log CFU และ Log reduction

กิจกรรมที่ 3.4c การทดสอบเบื้องต้น ประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว (โมเดลที่ 2) ในการลดการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งที่ปลูกด้วยเชื้อ *Non-pathogenic E. coli* และลักษณะปรากฏของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำ (กิจกรรมนี้ทำเพิ่มเติม โดยไม่ได้ระบุในข้อเสนอโครงการ)

ผลการศึกษาในปี 2564 พบว่าความเข้มข้นของโอโซนที่เหมาะสมในการรมเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำเพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ คือ 900 ppm ซึ่งการศึกษาในครั้งนั้นใช้เครื่องวัดความเข้มข้นของโอโซนในระดับห้องปฏิบัติการ (Gastec ozone gas detector, Japan) ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้กับการวัดค่าโอโซนกับเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติได้ ผู้วิจัยจึงเปลี่ยนเป็นมาใช้เครื่องวัดโอโซนรุ่น WASP-XM-E-O3-5000 ppm (Hunan Gri Instrument Co. Ltd., China) ที่สามารถวัดความเข้มข้นของโอโซนได้สูงสุด 5,000 ppm ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดสอบว่า ก๊าซโอโซนฉีดลงในกล่องทุเรียน เป็นเวลา 10 15 และ 20 วินาที (ความเข้มข้นของโอโซนเฉลี่ยเท่ากับ 201.5 986.5 และ 1,281.5 ppm) สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์บนเนื้อทุเรียนได้หรือไม่ และเนื้อทุเรียนที่ได้รับก๊าซโอโซน เป็นเวลา 10 15 และ 20 วินาที นี้จะเกิดความเสียหายของเนื้อเยื่อทุเรียนหรือไม่ โดยหลังจากฉีดก๊าซโอโซนใส่ในกล่องทุเรียนจึงทำการเก็บรักษาไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน ทำการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในวันที่ 0 และ 7 ของการเก็บรักษา และรายงานผลให้หน่วย CFU/g, Log CFU/g และ Log reduction

กิจกรรมที่ 3.4d การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว (โมเดลที่ 2) ในการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำ

เตรียมทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคนั้นเดียวกับกิจกรรมที่ 3.3.2 บรรจุลงในกล่อง polyethylene terephthalate (PET) clamshell ขนาด 1,600 มิลลิลิตร ที่มีการเจาะรูที่ผาด้านบนของกล่องจำนวน 1 รูต่อกล่อง (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูประมาณ 5 มิลลิเมตร) เพื่อเป็นช่องสำหรับฉีดก๊าซโอโซนเข้าไป (gas inlet) จากนั้นแบ่งเนื้อทุเรียนตัดแต่งมาออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เนื้อทุเรียนที่ไม่ปลุกเชื้อ และกลุ่มที่ 2 เนื้อทุเรียนที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* (TISTR 780, MERCEN) ที่ความเข้มข้น 10^6 cfu/ml (หรือมีค่า OD₆₀₀ เท่ากับ 0.5) โดยการใช้ปิเปตดูดเซลล์แขวนลอยของเชื้อ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร นำไปหยดบนเนื้อทุเรียนส่วนสีเหลืองและสีขาว แล้วผึ่งให้แห้งในตู้ปลอดเชื้อ นาน 20 นาที ทำการปิดฝากล่องให้สนิทและซีลทับด้วยพาราฟิล์ม นำกล่องทุเรียนไปวางบนสายพาน และกดสวิทช์เพื่อให้สายพานเคลื่อนตัวอัตโนมัติและมาหยุดที่ท่อนสแตนเลสที่ทำหน้าที่ฉีดก๊าซโอโซนลงกล่องทุเรียนโดยตรง (รูปที่ 3.5) ระบบจะเริ่มอัดก๊าซโอโซนเข้ากล่องทุเรียนเป็นเวลา 20 วินาที ระบบจึงจะสั่งการให้ดึงท่ออัดก๊าซโอโซนออก แล้วระบบจะทำการปิดผนึกทางด้านบนด้วยแผ่นสติ๊กเกอร์ด้วยกลไกกึ่งอัตโนมัติ สำหรับเนื้อทุเรียนที่ไม่ได้รมโอโซนจะใช้เป็นชุดควบคุม จากนั้นนำทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคมารักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน บันทึกผลการทดลองในวันที่ 0, 7 และ 14 วัน (เพื่อจำลองการเก็บรักษา) และหลังจาก 14 วัน จึงย้ายออกมาวางที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน (เพื่อจำลองการวางจำหน่ายในซูเปอร์มาร์เกต) ซึ่งสามารถสรุปออกเป็นทริตเมนต์ต่างๆ ได้ดังนี้

ทริตเมนต์ที่ 1 เนื้อทุเรียนไม่ปลุกเชื้อจุลินทรีย์

ทริตเมนต์ที่ 2 เนื้อทุเรียนไม่ปลุกเชื้อจุลินทรีย์ และอัดก๊าซโอโซนเข้ากล่องโดยระบบกึ่งอัตโนมัติ

ทริตเมนต์ที่ 3 เนื้อทุเรียนปลุกเชื้อ non-pathogenic *E. coli*

ทริตเมนต์ที่ 4 เนื้อทุเรียนปลุกเชื้อ non-pathogenic *E. coli* และอัดก๊าซโอโซนเข้ากล่องโดยระบบกึ่งอัตโนมัติ

วางแผนการทดลองแบบ Factorial in Complete Randomized Design แต่ละทริตเมนต์มี 4 ซ้ำ (กล่อง) ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SAS statistical software ทำการบันทึกผลการทดลอง ดังนี้

1) ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

การแยกเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคจากเนื้อทุเรียนส่วนสีเหลืองและเนื้อสีขาว (funiculus) ที่อยู่เหนือเมล็ดทุเรียน (รูปที่ 3.8) โดยทำสุ่มเก็บตัวอย่างเนื้อทุเรียนพร้อมบริโภคนั้นจำนวน 25 กรัม ใส่ในถุง Stomacher แล้วเติม Peptone water ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 225 มิลลิลิตร จากนั้นตีปนตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Stomacher นาน 1 นาที ตัวอย่างที่ได้จะมีความเจือจางเท่ากับ 1:10 จากนั้นนำมาเจือจางต่อด้วย Peptone water ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์

ให้ได้ระดับความเจือจางที่ต้องการ แล้วนำไปวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในแต่ละระดับความเข้มข้นจำนวน 3 ซ้ำ จากนั้นนำสารแขวนลอยที่เจือจางมาเกลี่ยลงบนหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดต่าง ๆ ได้แก่ อาหาร Plate Count Agar (PCA) สำหรับวิเคราะห์แบคทีเรียทั้งหมด (Total bacteria), อาหาร Potato Dextrose Agar (PDA) สำหรับวิเคราะห์ยีสต์และเชื้อรา และอาหาร Eosin Methylene Blue (EMB) Agar สำหรับวิเคราะห์ *E. coli* จากนั้นบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1-2 วัน และนับจำนวน Colony ของเชื้อที่เจริญบนหน้าอาหารแต่ละชนิดและรายงานผลในหน่วย log CFU/g fresh weight

2) การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและคุณภาพของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร (วิเคราะห์เฉพาะตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่ไม่มีการปลูกเชื้อ non-pathogenic *E. coli*)

2.1) การเปลี่ยนแปลงค่าสีเนื้อ (L^* , a^* , b^* และ Hue angle) (การวัดสีเนื้อทุเรียนทำเช่นเดียวกับกิจกรรมที่ 3.2)

2.2) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solids; TSS) (การวิเคราะห์ปริมาณ TSS ทำเช่นเดียวกับกิจกรรมที่ 3.2)

2.3) อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีน (การวิเคราะห์อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีน ทำเช่นเดียวกับกิจกรรมที่ 3.2)

3) การวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่องทุเรียนตัดแต่ง หลังการรมแล้วเป็นเวลา 0, 1, 3, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง โดยใช้เครื่อง Ozone detect และ ozone gas detector tube ทำ 3 ซ้ำ

ส่วนที่ 4 – การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และประเมินความเป็นไปได้ในการลงทุน

การศึกษาความเป็นไปได้ของชุดอุปกรณ์รมก๊าซโอโซนทั้งสองรูปแบบเพื่อใช้กับอุตสาหกรรม การผลิตทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร แบ่งออกเป็นกิจกรรมย่อยดังนี้

3.5.1 การวิเคราะห์ต้นทุน และเปรียบเทียบการลงทุนชุดอุปกรณ์รมก๊าซโอโซนสำหรับทุเรียน ตัดแต่งสด

3.5.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการปฏิบัติงานและกำลังการผลิต การรมก๊าซโอโซนด้วยชุดอุปกรณ์ รมก๊าซโอโซนทั้งสองประเภท

3.5.3 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้ เพื่อการลงทุนสำหรับอุตสาหกรรม ระดับเล็กและระดับกลาง และการใช้งานที่เหมาะสมของชุดอุปกรณ์ทั้งสองประเภท

3.5.4 การวิเคราะห์ความพึงพอใจ ในการใช้งานของผู้ประกอบการและแนวทางพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

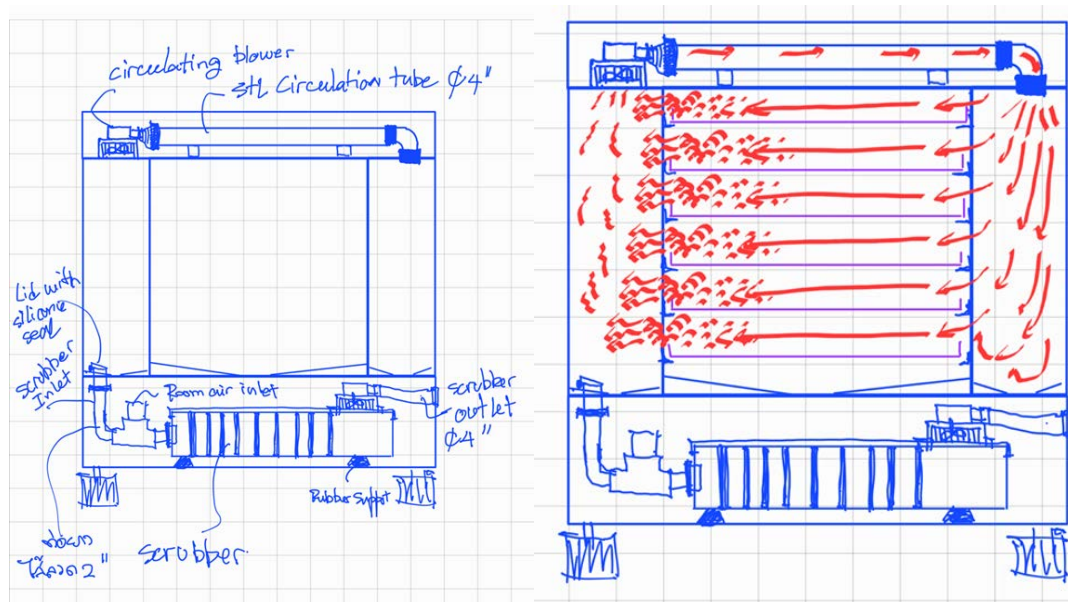
บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 การพัฒนาตู้รมก๊าซไอโซนแบบภาตสำหรับระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 1)

4.1.1 การออกแบบและคำนวณระบบการไหลของก๊าซ

การสร้างตู้รมก๊าซไอโซน เป็นการพัฒนาต่อยอดชุดอุปกรณ์กำเนิดก๊าซไอโซนความเข้มข้นสูง จากงานวิจัยเดิม โดยจาตุพจน์ (2555) และงานวิจัยโดย จตุรภัทร (2563) ซึ่งเป็นระบบที่สร้างไอโซนโดยใช้แหล่งกำเนิดก๊าซไอโซนจากก๊าซออกซิเจน ทำให้ได้ความเข้มข้นระดับปานกลาง ในระดับความเข้มข้นไม่เกิน 600 ppm ขนาดกำลังการผลิตโดยจะมีการพัฒนาเพื่อให้มีการหมุนเวียนก๊าซภายในตู้ที่เหมาะสม สามารถบรรจุทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคได้ 30 กก. โดยประมาณ จำนวน 2 ตู้ (1 ตู้สำหรับใช้งาน ณ สถานประกอบการ หรือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และอีก 1 ตู้สำหรับทดสอบคู่ขนานเพื่อปรับแต่งเพิ่มประสิทธิภาพตู้ ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้) พร้อมทั้งมีการบำบัดก๊าซไอโซนที่เหลือจ่ายที่เป็นพิษต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม

Conceptual design



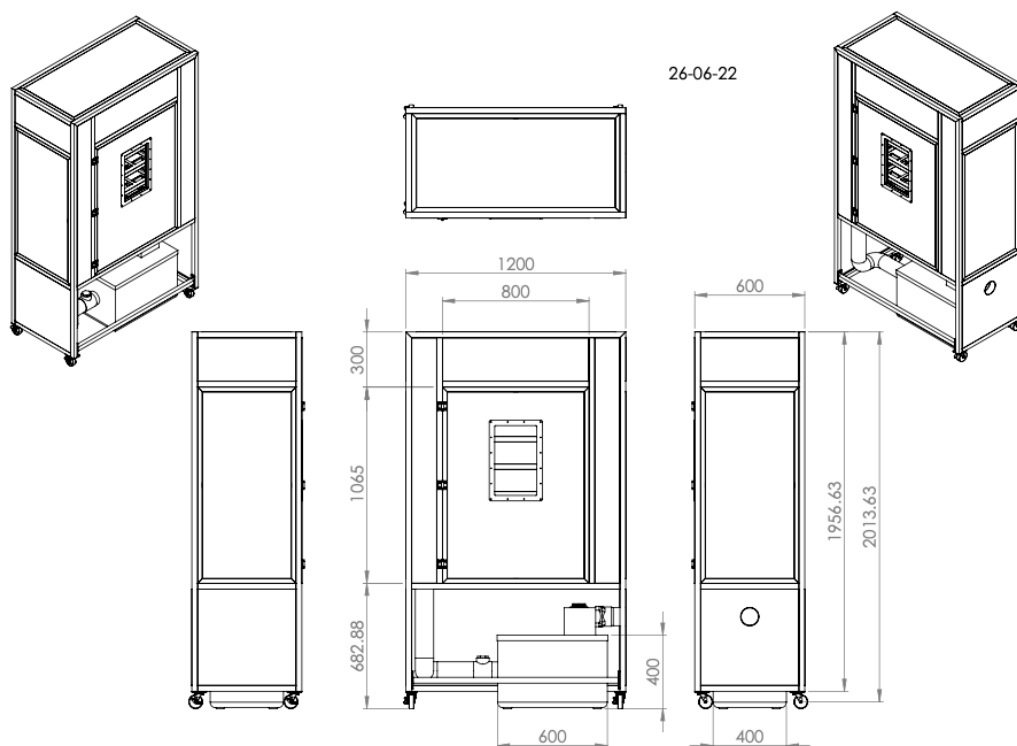
รูปที่ 4.1 Conceptual design ของตู้รมก๊าซแบบภาต

ผู้วิจัยได้ดำเนินการร่าง Conceptual design ของตู้รมก๊าซแบบภาตไว้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นสัดส่วนของตู้รมก๊าซโดยประมาณ พร้อมกับส่วนประกอบต่าง ๆ ของตู้รมก๊าซ โดยสังเขปดังนี้

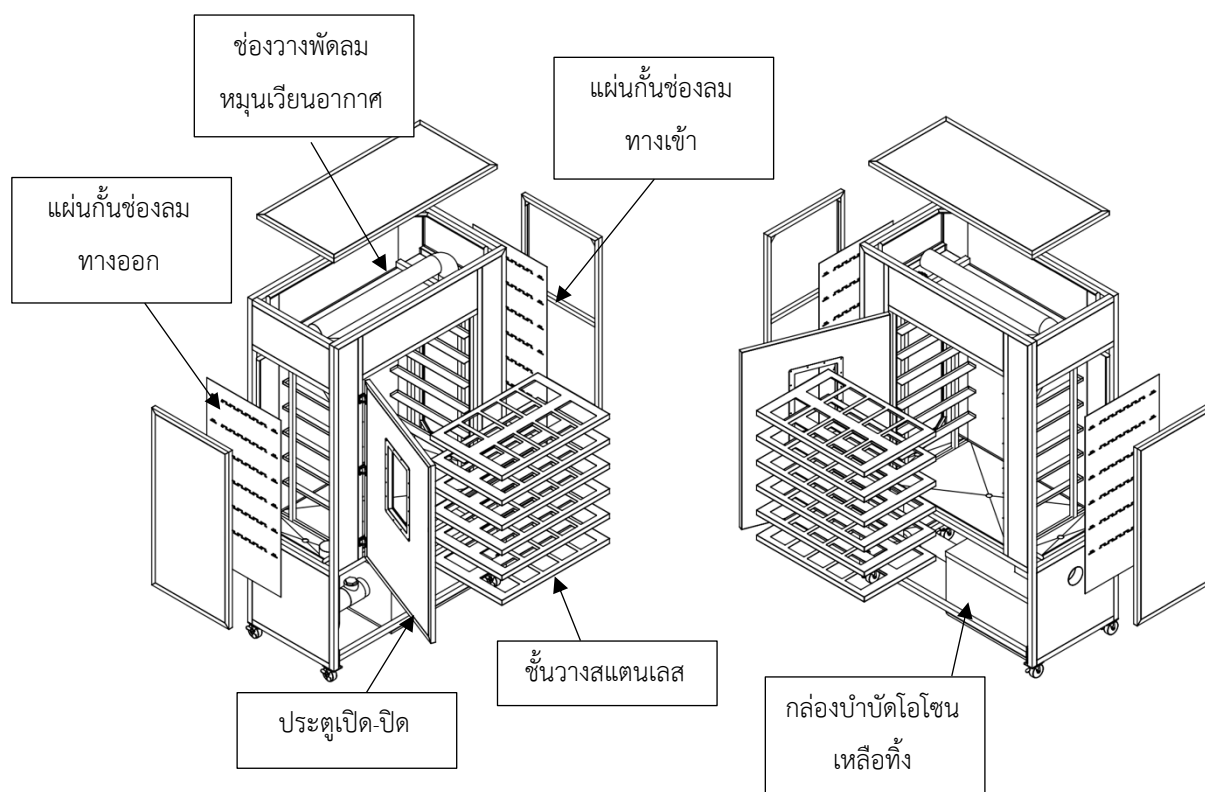
- โครงสร้างภายนอก เป็นเหล็กแผ่นสแตนเลส ออกแบบเป็นลักษณะแผ่นปิดสามารถถอดประกอบเพื่อทำความสะอาดภายในได้
- โครงสร้าง Chassis ออกแบบให้เป็นเหล็กสแตนเลสกล่องขนาด 1 นิ้ว เพื่อใช้เป็นโครงสร้างประกอบเข้ากับแผ่นสแตนเลส
- โครงสร้างภายใน แบ่งส่วนประกอบเป็นช่องวางถาด ช่องกระจายก๊าซหมุนเวียนด้านซ้าย-ขวา ช่องวางพัดลมและอุปกรณ์ไฟฟ้าด้านบน และช่องวางกล่องบำบัดอากาศข้างล่าง
- ช่องวางถาด ออกแบบโดยใช้แผ่นสแตนเลส เจาะรูสำหรับวางกล่องทุเรียนแกะเนื้อจำนวน 10 รู ต่อ 1 ชั้น สำหรับวางทุเรียนถาดละ 10 พู รวมน้ำหนัก 5 กก.ต่อ 1 ถาด จำนวน 6 ถาด รวมทั้งสิ้นวางได้สูงสุด 30 กก.ต่อรอบการรมก๊าซ
- ช่องวางอุปกรณ์ด้านบน สำหรับวางเครื่องกำเนิดโอโซน ระบบไฟฟ้า และพัดลมหมุนเวียนก๊าซ
- ช่องวางอุปกรณ์ด้านล่าง สำหรับวางอุปกรณ์บำบัดแก๊สโอโซน
- ช่องกระจายก๊าซหมุนเวียนซ้าย-ขวา ออกแบบไว้สำหรับเป็นกล่องความดันบวกเพื่อกระจายก๊าซเข้าสู่ห้องรมก๊าซแต่ละถาดอย่างทั่วถึง

4.1.2 การออกแบบรายละเอียด

จากรูปที่ 4.2 แสดงภาพการออกแบบรายละเอียดในการจัดทำแบบเพื่อสร้างตูรมก๊าซโอโซนสำหรับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค ได้ดำเนินการออกแบบโดยให้เครื่องมีขนาดกว้างxยาวxสูงโดยรวม $1.2 \times 2.0 \times 0.6$ ม. โดยมีชั้นวางสแตนเลส จำนวน 6 ชั้น บรรจุกล่องทุเรียนได้ชั้นละ 10 กล่อง รวมทั้งสิ้น 60 กล่องต่อรอบการผลิต หรือเทียบเท่ากับ 30 กก. ของเนื้อทุเรียน ด้านหน้ามีประตูเปิด-ปิดสำหรับนำถาดบรรจุทุเรียนเข้าและออกจากตัวตู้ มีขนาด 0.8×1.0 ม. ภายในตูรมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1. ส่วนบรรจุผลไม้ 2. ช่องลมเข้า (ขวา) และ 3. และช่องลมออก (ซ้าย) ด้านบนเป็นช่องเปิดสำหรับวางพัดลมดูดอากาศเพื่อหมุนเวียนภายในห้องรมก๊าซ ด้านล่างเป็นช่องเปิดสำหรับวางถังบำบัดก๊าซโอโซนเหลือจ่าย โครงสร้างทั้งหมดทำขึ้นจากเหล็กสแตนเลสเกรด 304 ช่องลมเข้าด้านขวาทำหน้าที่กระจายลมเข้าสู่ห้องรมทุเรียน และออกทางด้านซ้าย โดยให้ด้านซ้ายมีแผ่นกั้นทางลมออกที่เจาะรูเป็นช่องเปิดที่มีขนาดรูน้อยกว่าแผ่นกั้นทางลมเข้า ทำให้เกิด Pressure drop ก๊าซโอโซนจึงกระจายตัวได้ทั่วถึงภายในตูรมก๊าซ รายละเอียดของชิ้นส่วนการออกแบบ แสดงดังรูปที่ 4.3 รายละเอียดมิติของส่วนประกอบตูรมก๊าซโอโซนกับผลไม้ แสดงในภาคผนวก ก



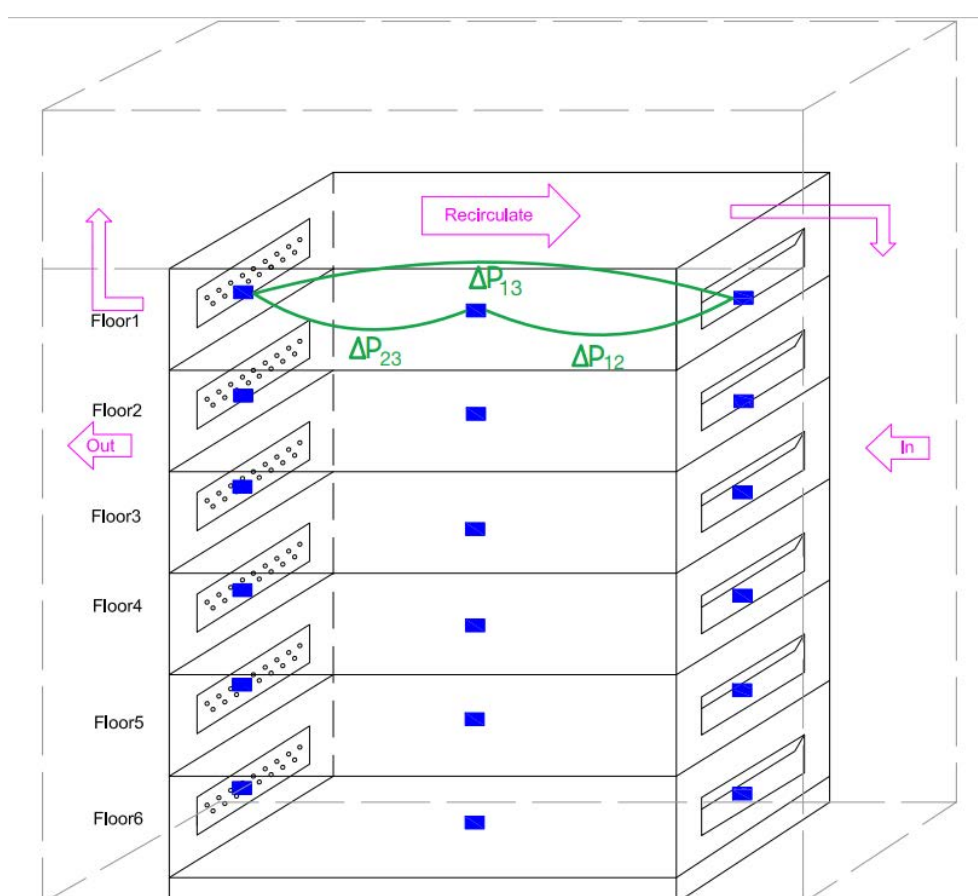
รูปที่ 4.2 ภาพรวมของตูรมีก๊าซไอโซนสำหรับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน (หน่วยเป็น มม.)



รูปที่ 4.3 รายละเอียดของการตูรมีก๊าซไอโซนสำหรับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน

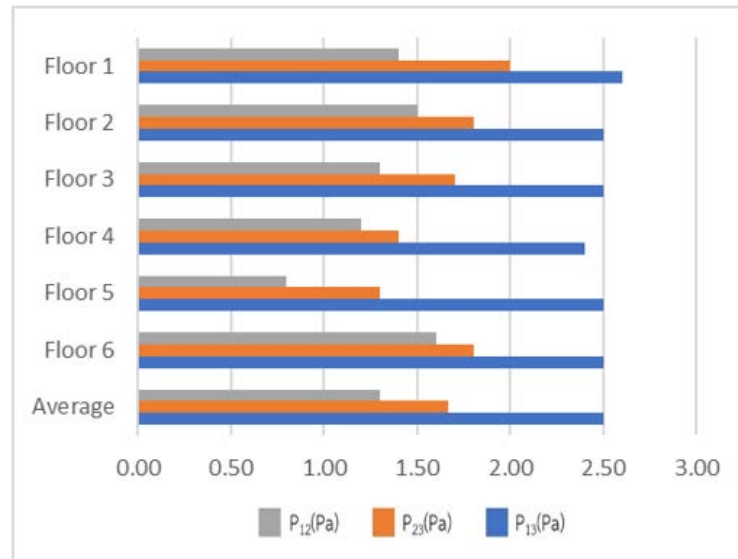
4.1.3 การคำนวณการไหลของอากาศ

การออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อคำนวณหารูปแบบของระบบหมุนเวียนการไหลของอากาศนั้นได้ประยุกต์ใช้หลักการคำนวณทาง Computational Fluid Dynamic (CFD) มาจำลองการไหลของอากาศ โดยใช้สมมติฐานการจำลองรูปแบบการไหลของอากาศเทียบเท่ากับรูปแบบการจำลองการไหลของก๊าซไอโซนในห้องรมก๊าซ การคำนวณการไหลของอากาศด้วย CFD ประกอบด้วยปัจจัยหลัก 2 ส่วน การหาปริมาณความเร็วที่ไหลผ่านผิวสัมผัสด้านบนผิวทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวม ซึ่งต้องการควบคุมค่าความดันตกคร่อมระหว่างช่องทางลมเข้าและออกให้เหมาะสม เพื่อให้ได้อัตราเร็วที่เหมาะสมกับการใช้ก๊าซไอโซน โดยมีการกระจายที่สม่ำเสมอทั่วตลอดหน้าตัดตู้รม และมีเวลาหน่วงเพียงพอให้ก๊าซไอโซนทำปฏิกิริยากับผิวทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคด้วย โดยผลการทดลองส่วนแรก จะทำการศึกษาผลของความดันตกคร่อมแตกต่างระหว่างช่องทางลมเข้าและออก ด้วยเครื่องวัดความแตกต่างของแรงดัน (Differential Pressure Measuring Instrument) ยี่ห้อ Testo model 510 ซึ่งเลือกใช้ช่องทางลมเข้าเป็นแบบเปิดตลอดแนว (Open Louver) และช่องทางลมออกเป็นแบบตะแกรงรู 2 4 และ 6 แถว (Perforated Sieves) ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.4

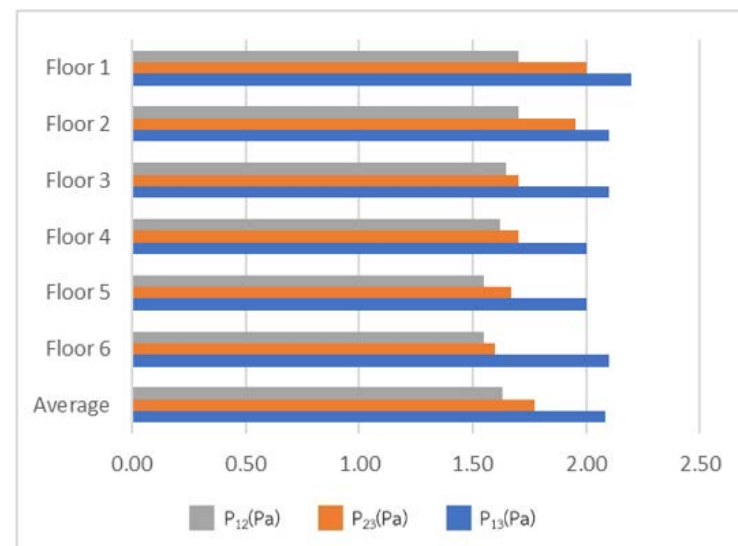


รูปที่ 4.4 แสดงทิศทางการไหลในตู้รมก๊าซไอโซน และตำแหน่งวัดค่าความดันตกคร่อม

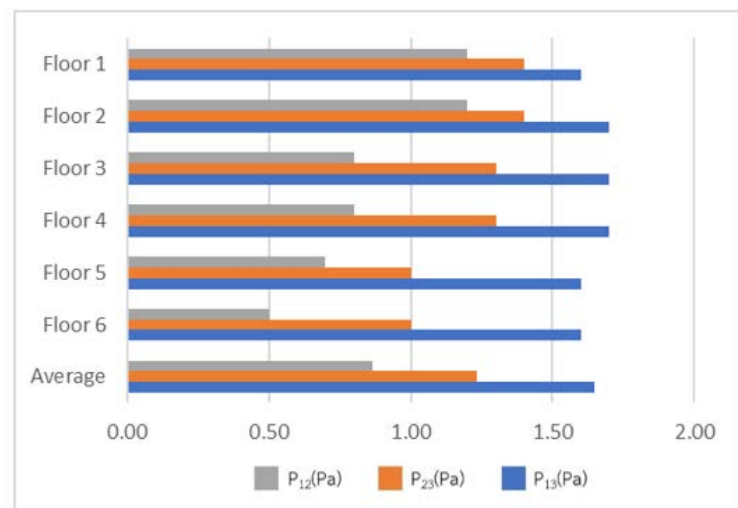
ก)



ข)

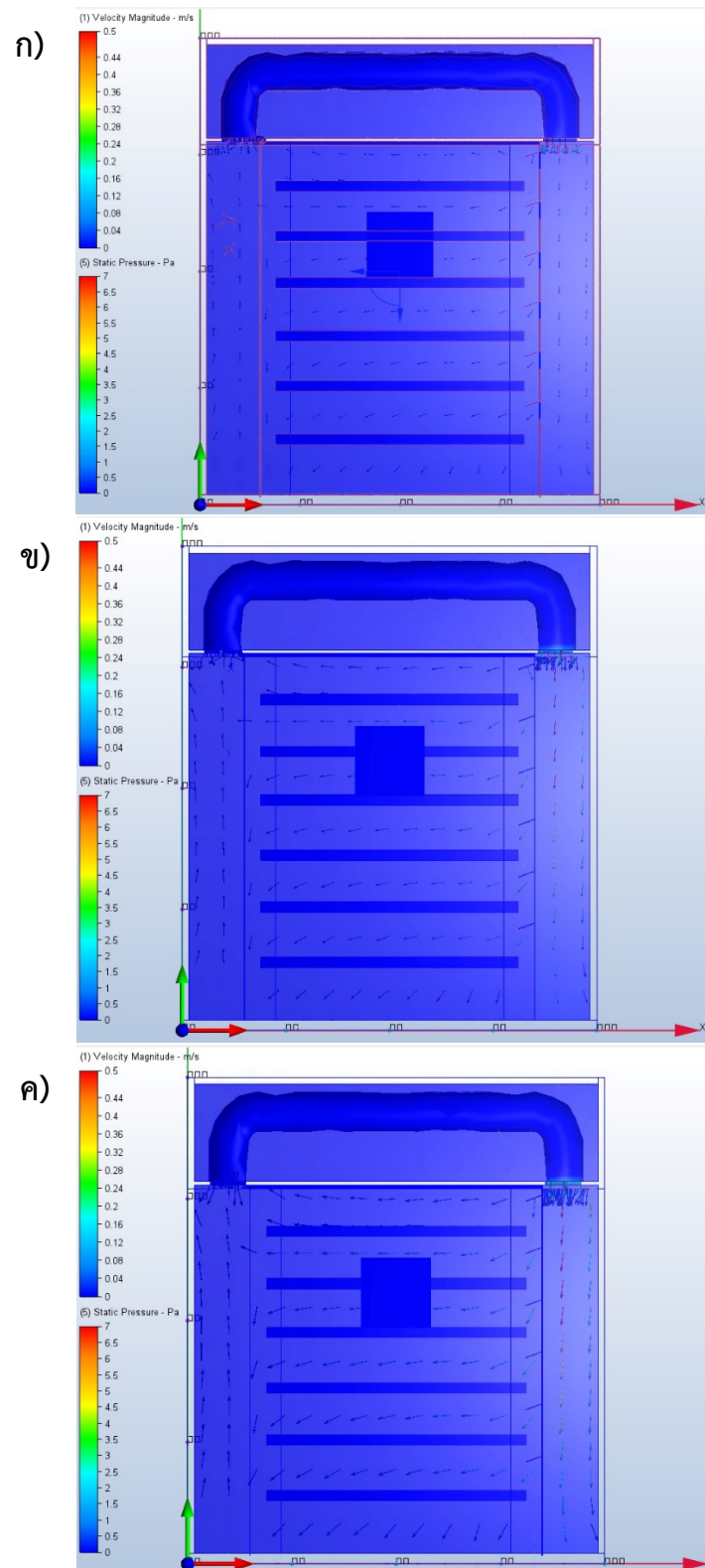


ค)



รูปที่ 4.5 ผลการวัดค่าความดันตกคร่อมที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อที่ทางออกเป็น

ก) ตะแกรง 2 รู ข) ตะแกรง 4 รู และ ค) ตะแกรง 6 รู

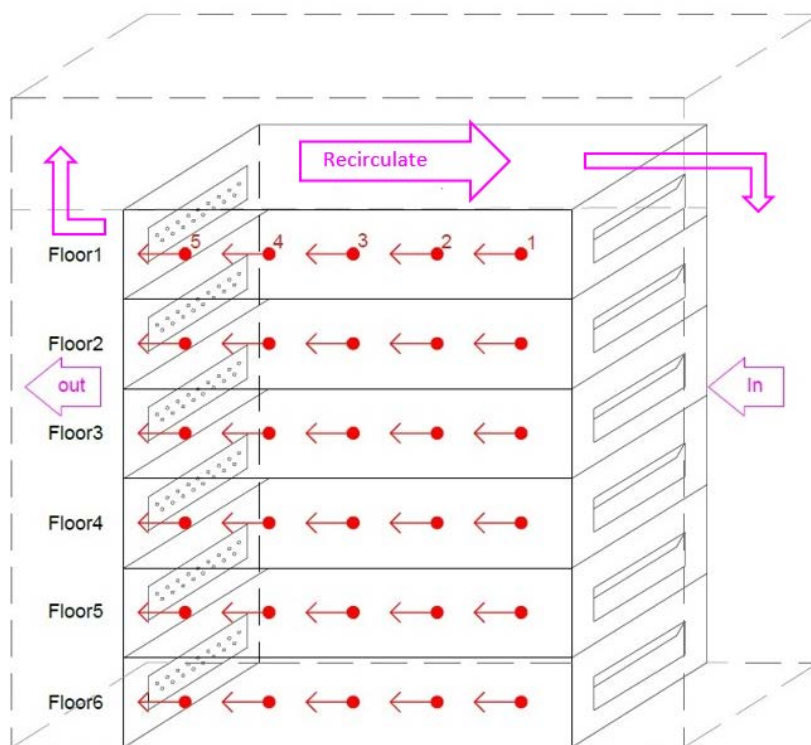


รูปที่ 4.6 การคำนวณ CFD เพื่อหาค่าความดันตกคร่อมที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อที่ทางออกเป็น

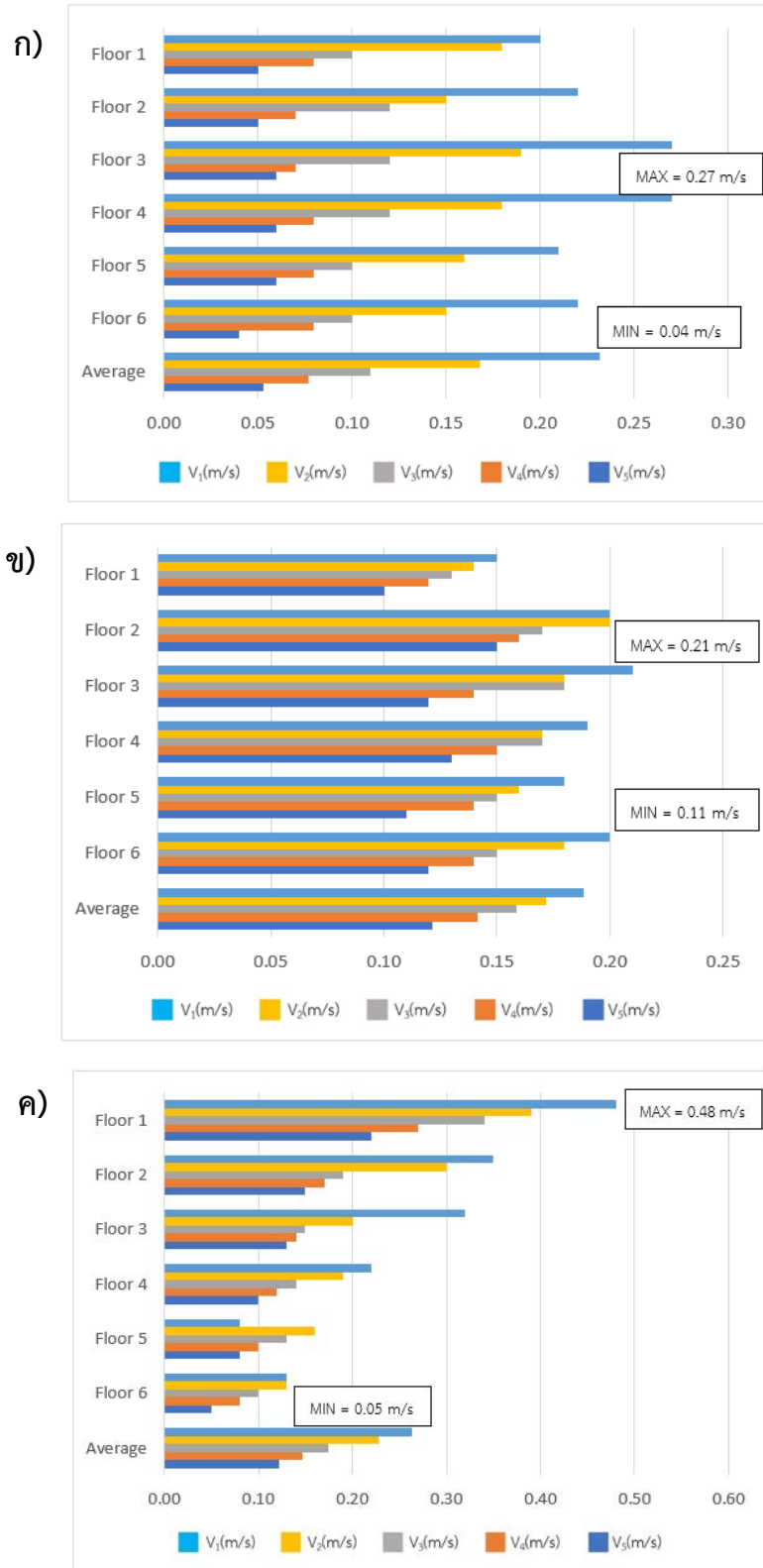
ก) ตะแกรง 2 รู ข) ตะแกรง 4 รู และ ค) ตะแกรง 6 รู

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการวัดค่าความดันตกคร่อมที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ที่ทางออกเป็นแบบตะแกรงรู 2 4 และ 6 แถว ตามลำดับ โดยจะพบว่าค่าความดันตกคร่อมในแต่ละชั้น (Floor) มีค่าไม่แตกต่างกันนัก เนื่องจากการออกแบบเครื่องมีการบังคับให้ลมหมุนเวียนเข้าในแต่ละชั้น (In) ที่ปริมาณเท่า ๆ กัน ในขณะที่ความดันตกคร่อมแต่ละช่วงพบว่า ช่วง 1-3 จะมีค่ามากกว่า ช่วง 2-3 และ ช่วง 1-2 ตามลำดับ เนื่องจากพื้นที่ไหลผ่านมีปริมาณที่ทำให้ลมสามารถไหลผ่านได้จากน้อยไปมาก ผลการทดลองวัด (Experiment) เมื่อเทียบกับการใช้แบบจำลอง (Simulation) การคำนวณเชิงพลศาสตร์ CFD ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่ามีค่าความดันตกคร่อมสูงสุดที่ทางออกเป็นแบบตะแกรงรู 2 แถว เท่ากับ 2.5 Pa ในแนวระนาบ (Horizontal) โดยการเปรียบเทียบระหว่างการวัดกับแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่ามีความแตกต่างกันของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยในแต่ละจุดที่ทางออกเป็นแบบตะแกรงรู 2 4 และ 6 แถว เป็น 15.31% 9.34% และ 13.09% ตามลำดับ ซึ่งถือว่ายอมรับได้ในงานทางวิศวกรรม (ไม่เกิน 15%) โดยค่าความดันตกคร่อมจะแสดงผลเชื่อมโยงไปกับหัวข้อถัดไปในเรื่องการวัดความเร็วลมภายในตู้ลมก๊าซไอโซนแบบถาด

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการศึกษาผลของความเร็วลมภายในตู้ ซึ่งเลือกทดสอบและวัดค่า 5 ตำแหน่ง เพื่อให้ทั่วถึงตลอดหน้าตัดแต่ละชั้น (Floor) ซึ่งทำการทดสอบระหว่างช่องทางลมเข้าและออก ด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (Hot wire, Velocity meter) ยี่ห้อ Lutron model AM-4234SD โดยเลือกใช้ช่องลมขาเข้าเป็นแบบเปิดตลอดแนว (Open Louver) และช่องลมขาออกเป็นแบบตะแกรงรู 2 4 และ 6 แถว (Perforated Sieves)

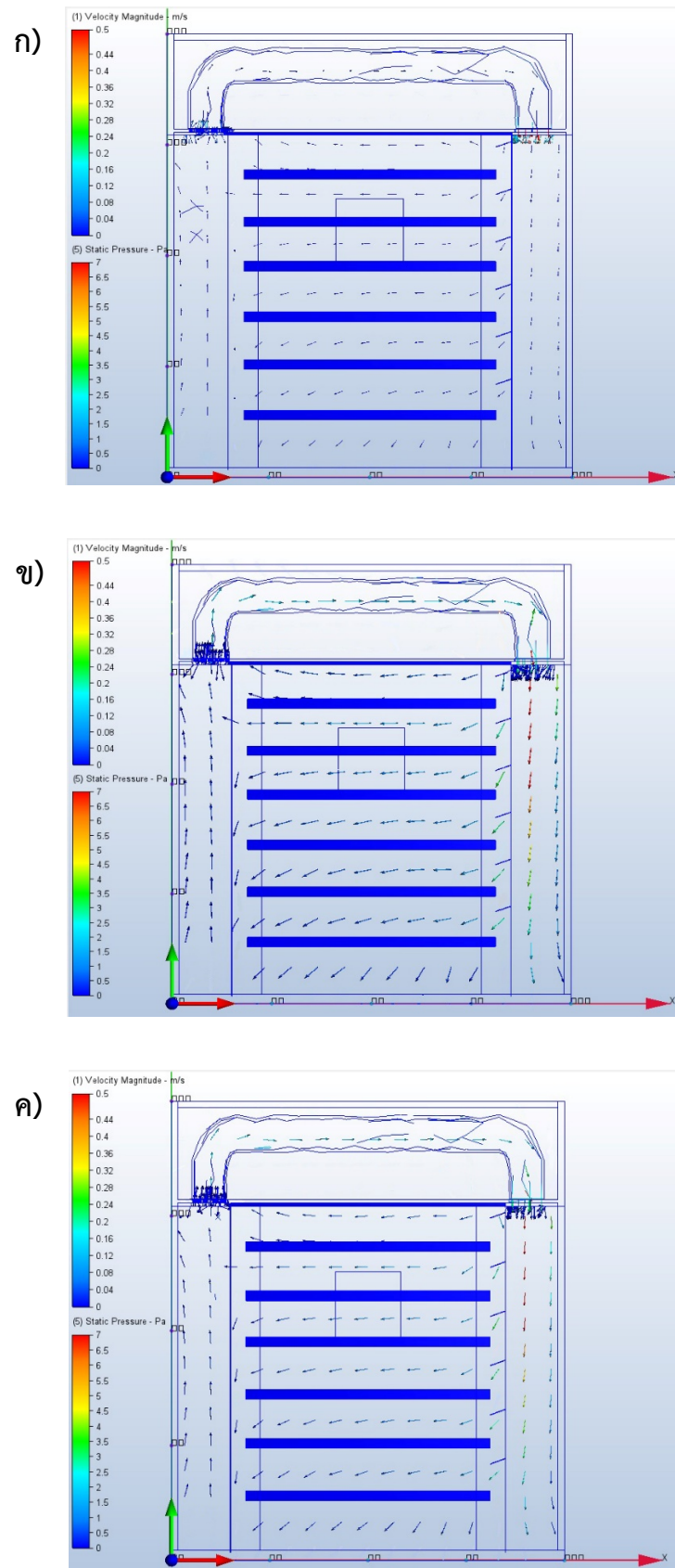


รูปที่ 4.7 แสดงทิศทางการไหลในตู้ลมก๊าซไอโซน และตำแหน่งวัดค่าความเร็วลม



รูปที่ 4.8 ผลการวัดค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อที่ทางออกเป็น

ก) ตะแกรง 2 รู ข) ตะแกรง 4 รู และ ค) ตะแกรง 6 รู



รูปที่ 4.9 การคำนวณ CFD เพื่อหาค่าความดันตกคร่อมที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อที่ทางออกเป็น

ก) ตะแกรง 2 รู ข) ตะแกรง 4 รู และ ค) ตะแกรง 6 รู

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการวัดค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ที่ทางออกเป็นแบบตะแกรงรู 2 4 และ 6 แถว ตามลำดับ โดยจะพบว่าค่าความเร็วลมมีแนวโน้มลดลงตามระยะจากช่องทางเข้าไปทางออก เพราะผลจากค่าความดันตกคร่อมที่ทางเข้าไปทางออก โดยในการออกแบบทางวิศวกรรมใช้ช่องเปิดทางเข้าแบบเปิดเพื่อให้ลมด้านเข้าสามารถไหลผ่านทางเข้าทุก ๆ ชั้นได้อิสระมากที่สุด ซึ่งส่งผลให้สามารถจัดระเบียบอากาศ (Straightener) ทางเข้าได้ง่ายและเกิดความสม่ำเสมอในทุก ๆ ชั้นด้วย ผลการทดลองวัด (Experiment) เมื่อเทียบกับการใช้แบบจำลอง (Simulation) การคำนวณเชิงพลศาสตร์ CFD ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่ามีค่าความความเร็วลมตกสูงสุดที่ทางออกเป็นแบบตะแกรงรู 6 แถว เท่ากับ 0.48 m/s ในแนวระนาบ (Horizontal) โดยการเปรียบเทียบระหว่างการวัดกับแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่ามีความแตกต่างกันของค่าความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละจุดที่ทางออกเป็นแบบตะแกรงรู 2 4 และ 6 แถว เป็น 15.26% 9.77% และ 4.46% ตามลำดับ ซึ่งถือว่ายอมรับได้ในงานทางวิศวกรรม (ไม่เกิน 15%) โดยค่าความเร็วลมเฉลี่ยจะเป็นปัจจัยสำคัญในการใช้ก๊าซโอโซน (Gaseous Ozone) ทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับจุลินทรีย์ในอาหาร (Microorganism) เพื่อลดการปนเปื้อน (Decontamination)

โดยผลการคำนวณพื้นที่ส่วนรูตะแกรงต่อพื้นที่บนแผ่นตะแกรงทั้งหมด ทำให้สามารถหาอัตราส่วนพื้นที่ช่องเข้า-ออกต่อพื้นที่รวมได้ โดยพบว่าอัตราส่วนพื้นที่ช่องเข้าเท่ากับ 12.79% และอัตราส่วนพื้นที่ช่องออกของตะแกรงรู 2 4 และ 6 แถว เป็น 0.62% 1.62% และ 2.80% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อนำคำนวณร่วมกับค่าความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละแบบของตะแกรงรูและระยะห่างของทางเข้า-ออก จะพบว่าความเร็วลมดังกล่าวหากใช้เป็นก๊าซโอโซนจริงจะมีค่าเวลาหน่วงหรือเวลาสัมผัส (Contact time) ประมาณ 5-8 วินาที ซึ่งเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างก๊าซโอโซนกับจุลินทรีย์ในอาหารประเภทต่าง ๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Joseph (2003) และ Xue et al. (2023) ซึ่งแสดงผลการศึกษาเรื่องเวลาสัมผัส (Contact time) ของก๊าซโอโซนต่อการลดจำนวนสปอร์ (Germination of spores) และหลักการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างก๊าซโอโซนกับจุลินทรีย์ในอาหาร (Microbial Inactivation by Ozone Treatment)

สรุปผลการศึกษาเรื่องการพัฒนาตู้รมก๊าซโอโซนแบบภาคสำหรับระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 1) ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ทีมนักวิจัยพบว่า การออกแบบตู้รมก๊าซโอโซนแบบภาคในแนวราบสามารถใช้งานในระดับอุตสาหกรรมจริง เนื่องจากสามารถรมก๊าซโอโซนกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคได้คราวละจำนวนมาก ๆ โดยสามารถควบคุมการกระจายได้อย่างสม่ำเสมอทุกชั้นวาง อีกทั้งยังสามารถหน่วงเวลาให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างก๊าซโอโซนกับจุลินทรีย์ในอาหารได้ โดยระบบแบบหมุนเวียนอากาศแบบภายใน สามารถรักษาและปรับระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซนได้ตามความต้องการ (Ct Dose) เพื่อให้เพียงพอต่อการกำจัดจุลินทรีย์และเชื้อที่ไม่ต้องการในอาหารได้ และสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาเพื่อขยายขนาดการผลิต (Scaling up) ต่อไปได้



ก) ทางเข้า ช่องเปิด



ข) ทางออก ตะแกรงเจาะรู 2 แถว

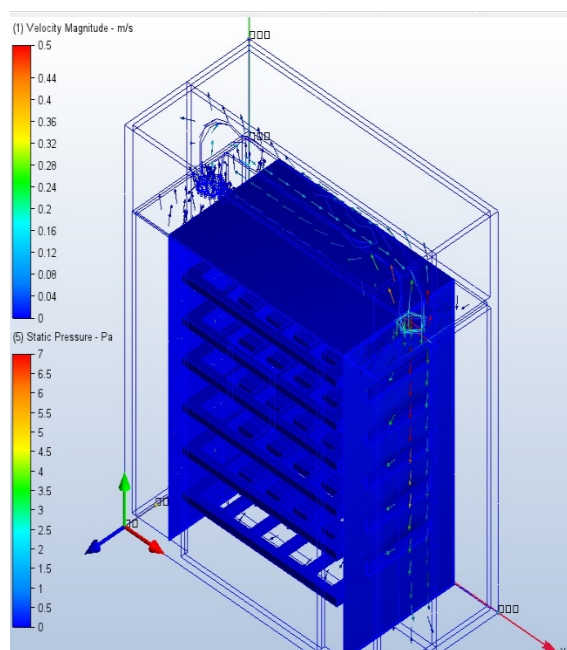
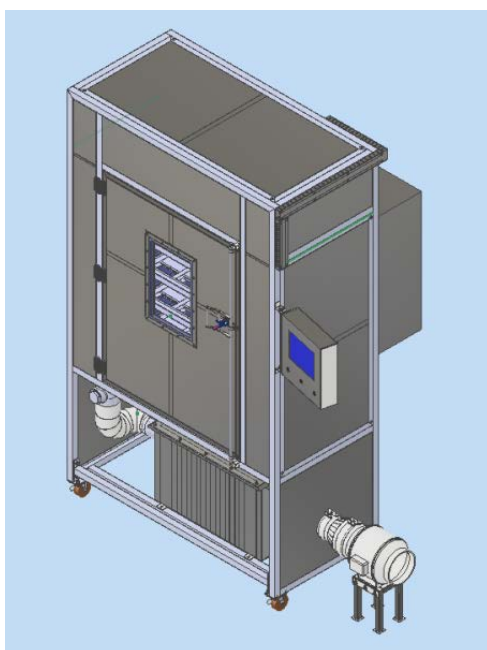


ค) ทางออก ตะแกรงเจาะรู 4 แถว



ง) ทางออก ตะแกรงเจาะรู 6 แถว

รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะและพื้นที่รูเจาะที่ลมไหลผ่านเข้าและออก



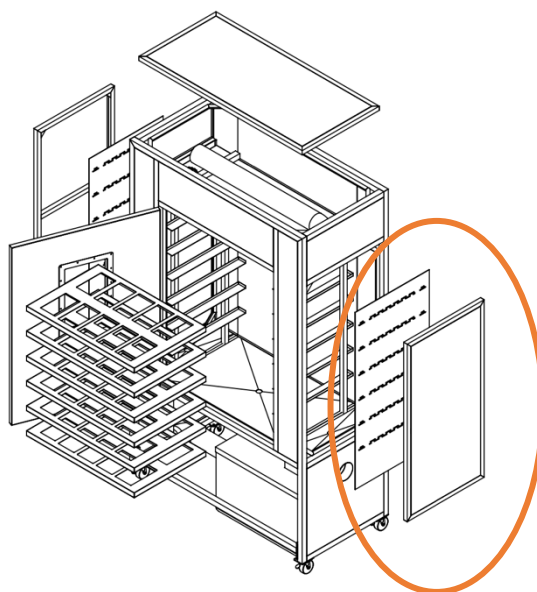
รูปที่ 4.11 แสดงผลการพัฒนาตัวรวมก๊าซไอโซนแบบถาดสำหรับระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 1)

4.1.4 การสร้างและประกอบตู้รมก๊าซโอโซน

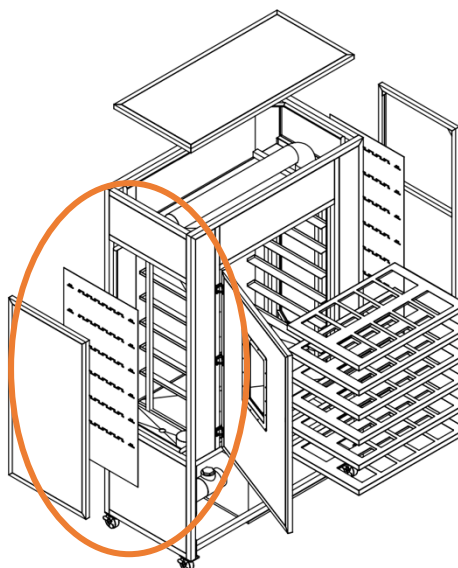


รูปที่ 4.12 การสร้างและประกอบตู้รมก๊าซโอโซน

หลังจากที่ได้ออกแบบจึงได้ดำเนินการสร้างตู้รมก๊าซโอโซน จำนวน 2 ชุด โดยโครงสร้างทั้งหมดทำจากเหล็กสแตนเลส เกรด 304 ประกอบเป็นตัวตู้ดังรูปที่ 4.12 ภายในตัวตู้มีชั้นวางที่เจาะรูสำหรับกล่อง Clamshell ชั้นละ 10 กล่อง เจาะช่องรวมน้ำหนักรูเรียน ชั้นละ 5 กก. รวมการบรรจุทุเรียนทั้ง 6 ชั้น ได้ทั้งสิ้น 30 กก. มีการติดตั้งแผ่นกันลมทางลมเข้าด้านขวา และทางลมออกด้านซ้าย เพื่อสร้างความดันตกในตู้รมก๊าซให้มีการกระจายก๊าซได้ทั่วถึง ขอบรอบฝาปิดตู้กรุด้วยยางซิลิโคนกันก๊าซรั่วซึมออกจากตัวตู้ รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 เมื่อประกอบแล้วเสร็จมีลักษณะตัวตู้ตามการออกแบบ แสดงดังรูปที่ 4.15



ก) ช่องทางลมเข้า (ขวา) แสดงช่องเปิดเพื่อให้ลมเข้า



ข) ช่องทางลมออก (ซ้าย) แสดงช่องเปิดเพื่อให้ลมออก

รูปที่ 4.13 การติดตั้งแผ่นกั้นลมทางลมเข้าด้านขวา (ก) และทางลมออกด้านซ้าย (ข)



รูปที่ 4.14 ขอบยางซิลิโคนกว้าง 10 มม.หนา 2 มม. ตีครอบฝาช่องลมขาเข้าและออก เพื่อกันก๊าซรั่วออกสู่ภายนอก



รูปที่ 4.15 ตู้รมก๊าซไอโซนสำหรับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคมือประกอบและสร้างแล้วเสร็จ

4.1.5 การออกแบบระบบกำเนิดก๊าซโอโซน ระบบควบคุม และตรวจวัด

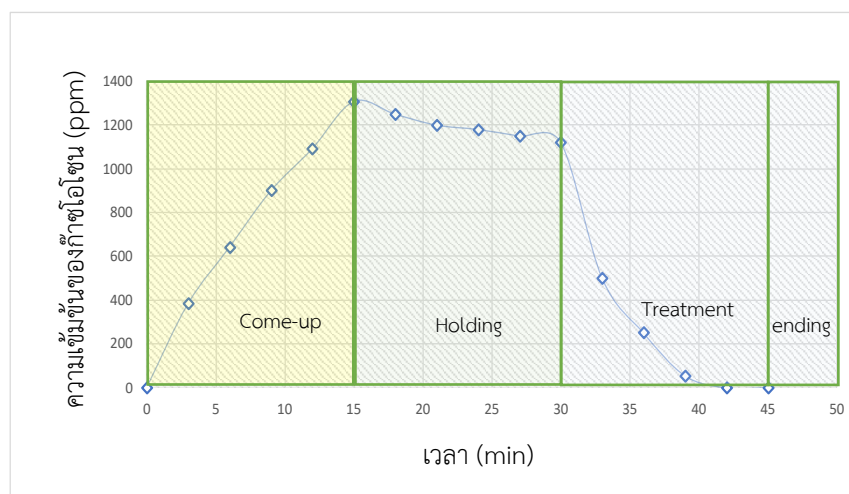
ในการออกแบบระบบกำเนิดโอโซน ใช้แนวทางการควบคุมเวลาของเครื่องกำเนิดโอโซน เพื่อปล่อยปริมาณก๊าซโอโซนเข้าสู่ห้องรมที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีการคำนวณดังนี้

- ความเข้มข้นห้องรมก๊าซที่ต้องการ = 900 ppm
- ปริมาตรห้องรมก๊าซ $1.0 \times 0.6 \times 1.2 = 0.72$ ลบ.ม.
- สูตรคำนวณความเข้มข้นโอโซน $1 \text{ ppm} = 2.14 \text{ mg/m}^3$
- ถ้าต้องการความเข้มข้น 900 ppm เทียบเท่ากับความเข้มข้น $900 \times 2.14 = 1926 \text{ mg/m}^3$
- ดังนั้น ปริมาณก๊าซโอโซนในห้องรม = $1926 \times 0.72 = 1386.72 \text{ mg}$
- ระยะเวลาปล่อยก๊าซที่ต้องการ = 10 นาที เพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซโอโซน 1386.72 mg
- เทียบเท่าอัตราการปล่อยก๊าซโอโซน $1,386.72 / 10 \times 60 = 8,320 \text{ mg/hr}$ หรือ ประมาณ 8.3 g/hr
- ดังนั้น สามารถเลือกเครื่องกำเนิดโอโซนที่มีอยู่ในท้องตลาด ขนาด 5 g/hr จำนวน 2 ตัว โดยใช้เวลาปล่อยก๊าซเข้าห้องรมประมาณ 8 นาที

ผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องกำเนิดโอโซน รุ่น CCA-5G-W (Coco Technology Co., Ltd) มีอัตราการผลิตโอโซนที่ 5 g/hr จำนวน 2 เครื่อง กำเนิดโอโซนโดยใช้ที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 6 L/min และวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในห้องรมด้วยโอโซนเซนเซอร์ รุ่น MikroElektronika Ozone 2 Click ซึ่งใช้เซ็นเซอร์วัดโอโซน รุ่น MQ131 บรรจุบนบอร์ด MCP3551 มี 22-bit ADC converter แปลงสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่ PLC ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานหลัก ผลของความเข้มข้นในตูรมก๊าซโอโซนแบบสถานะที่ไม่ได้ใส่ทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโศค แสดงดังรูปที่ 4.16

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในตูรมก๊าซเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาที่ปล่อยก๊าซเข้าตูรมเป็นระยะเวลา 15 นาที ในช่วง Come-up period พบว่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 1,308 ppm จากนั้นเมื่อหยุดป้อนก๊าซโอโซนเข้าสู่ตูรมก๊าซในช่วง Holding period ปริมาณก๊าซจะลดลงไปตามลำดับ ถึงเวลานาทีที่ 33 ความเข้มข้นคงเหลือประมาณ 1120 ppm การลดลงดังกล่าวอาจเกิดจากการรั่วไหลตามขอบแนวรอยต่อและวาล์วต่าง ๆ เนื่องจากความดันบวกในห้องรมที่เกิดจากพัดลมหมุนเวียนอากาศตลอดเวลา ซึ่งคิดเป็นประมาณ 14% อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวสามารถควบคุมได้เมื่อมีวัสดุทดสอบ เช่น ทุเรียน หรือผลไม้สด อยู่ในตูรม เนื่องจากวัสดุเกษตรสามารถดูดซับก๊าซโอโซนได้ในปริมาณมาก จากการทดสอบวัดค่าก๊าซโอโซนจึงเป็นไปได้ว่าตูรมก๊าซมีวัสดุเกษตรอยู่ภายใน เช่น ลำไย และทุเรียน พบว่าในช่วงเวลาการปล่อยก๊าซโอโซนเข้าตูรม 15 นาที เซ็นเซอร์โอโซนไม่สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นได้ตลอดช่วงเวลาปฏิบัติงาน จึงอนุมานได้ว่าวัสดุ

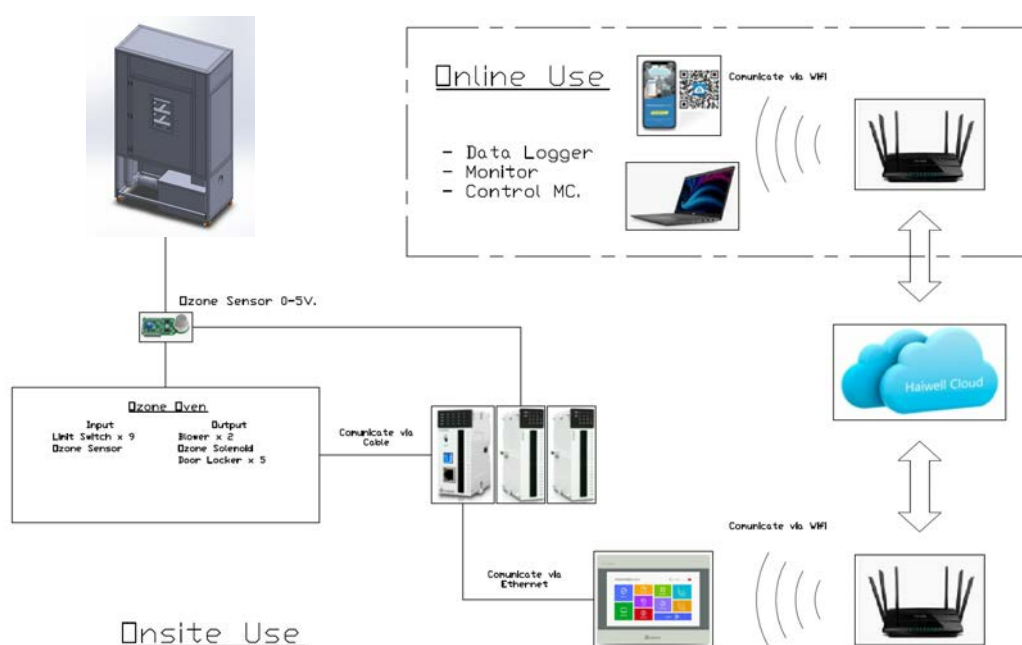
เกษตรที่เป็นผลไม้สดสามารถดูดซับก๊าซโอโซนเข้าไปได้ทั้งหมด



รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในตูรมัก๊าซโอโซนในตูรมะพร้าว

4.1.6 การออกแบบระบบควบคุมและตรวจวัด

ในระบบควบคุมการทำงานรุ่น AT12MOR และมี I/O extension slot รุ่น A16XDR เชื่อมต่อเพื่อตรวจวัดและควบคุมระบบการทำงานแบบ SCADA ตามแผนภูมิการออกแบบในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แผนภูมิการออกแบบ ระบบ SCADA เพื่อควบคุมกระบวนการรมก๊าซโอโซนในตูรมัก๊าซโอโซนแบบถาด

จากรูปที่ 4.17 ระบบการตรวจวัด ได้ใช้เซ็นเซอร์วัดค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในห้องรมด้วยโอโซนเซนเซอร์ รุ่น MikroElektronika Ozone 2 Click ซึ่งใช้เซ็นเซอร์วัดก๊าซโอโซน รุ่น MQ131 บรรจุบนบอร์ด MCP3551 มี 22-bit ADC converter แปลงสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่ PLC รุ่น AT12MOR (Xiamen Haiwell Technology Co.,Ltd., China) ต่อเข้ากับ I/O expansion slot รุ่น A16XDR (Xiamen Haiwell Technology Co.,Ltd., China) แสดงผลที่หน้าจอสัมผัส HMI รุ่น C7S-W (Xiamen Haiwell Technology Co.,Ltd., China) โดยมีตำแหน่งตรวจวัดความเข้มข้นของโอโซนอยู่ 2 จุด คือ จุดช่องทางลมออก เพื่อแสดงค่าความเข้มข้นของโอโซนในตูรมก๊าซ และ จุดใกล้กับตู้ควบคุมภายนอกตูรมเพื่อแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในบริเวณรอบตู้ปฏิบัติงาน ตำแหน่งของเซ็นเซอร์วัดโอโซน แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดก๊าซโอโซนภายในและภายนอกตูรมก๊าซ

ในการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการรมก๊าซโอโซน ได้ออกแบบขั้นตอนการรมก๊าซไว้ 4 ขั้นตอน คือ 1) การปล่อยก๊าซโอโซนเข้าห้องรมก๊าซ 2) การรมก๊าซโอโซน 3) การบำบัดก๊าซโอโซนเหลือจ่าย 4) เสร็จสิ้นกระบวนการและรีเซ็ตค่าตั้งต้น (ตาราง 4.1) ในแต่ละขั้นตอนมี Logic การควบคุมทางระบบไฟฟ้าดังนี้

ตาราง 4.1 Logic ของการควบคุมกระบวนการรมก๊าซโอโซนที่จัดทำไว้ในระบบ SCADA

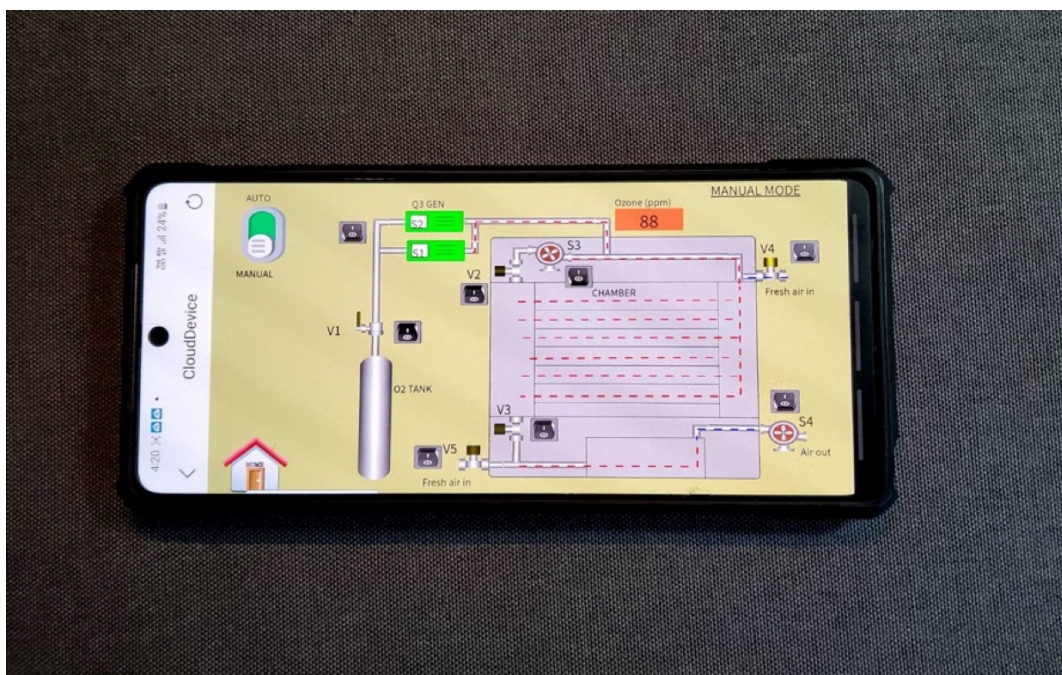
Control logic for Ozone Fumigation Process		
Working state	Component	Action
1. Starting state	O ₃ Generator (S1, S2)	on
	Circulating Blower (S3)	on
	O ₃ sensor measure	on
	O ₂ tank (V1)	on
	Timer state	Fumigate
	Scrubber blower (S4)	off
	V2	on
	V3	off
	V4	off
	V5	on
2. Holding state	O ₃ Generator (S1, S2)	off
	Circulating Blower (S3)	on
	O ₃ sensor measure	on
	O ₂ tank (V1)	off
	Timer state	Fumigate
	Scrubber blower (S4)	off
	V2	on
	V3	off
	V4	off
	V5	on
3. O ₃ Scrubber state	O ₃ Generator (S1, S2)	off
	Circulating Blower (S3)	on
	O ₃ sensor measure	on
	O ₂ tank (V1)	off
	Timer state	Treatment
	Scrubber blower (S4)	on
	V2	off
	V3	on

Control logic for Ozone Fumigation Process		
Working state	Component	Action
	V4	on
	V5	on
4. Ending state	O ₃ Generator (S1, S2)	Off
	Circulating Blower (S3)	off
	O ₃ sensor measure	on
	O ₂ tank (V1)	off
	Timer state	End
	Scrubber blower (S4)	on
	V2	off
	V3	on
	V4	on
	V5	on

หลังจากที่ได้ออกแบบ Logic ในการควบคุมกระบวนการรมก๊าซและบำบัดก๊าซโอโซนสำหรับผลไม้สดแล้ว จึงได้จัดทำโปรแกรมควบคุมเพื่อฝังโปรแกรมลงในหน่วยประมวลผล PLC พร้อมทั้งเชื่อมต่อ หน้าจอควบคุมสัมผัสแบบ HMI สามารถบันทึกผลในแผ่น SD Card และควบคุมการทำงานผ่านระบบเครือข่ายไร้สายบน Mobile application ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.19 และ 4.20



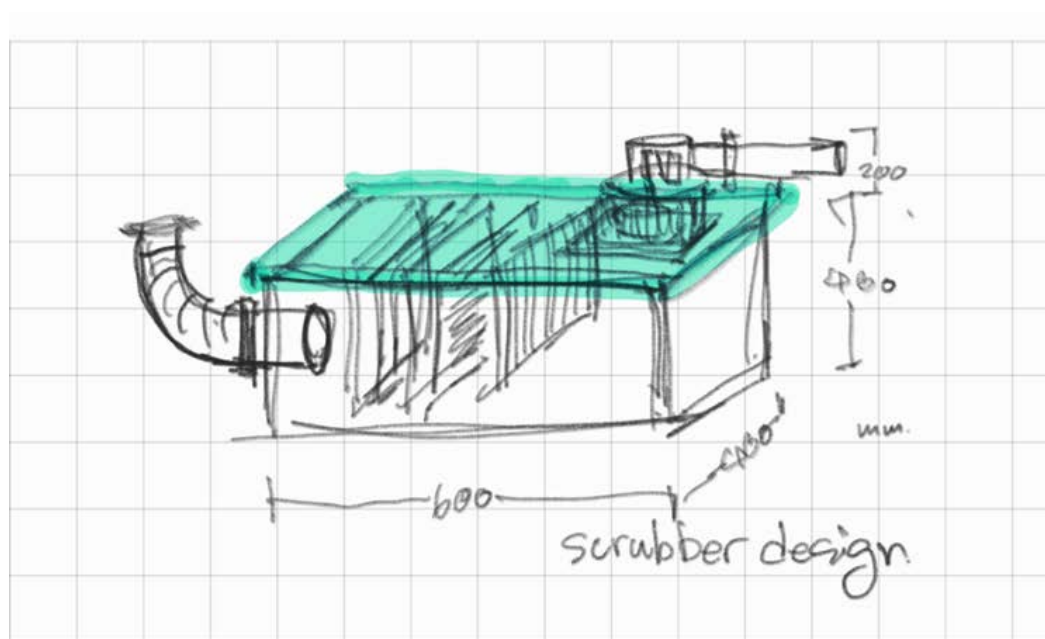
รูปที่ 4.19 จอสัมผัส HMI ควบคุม PLC สำหรับการประมวลผลการทำงานของระบบกำเนิดก๊าซโอโซน



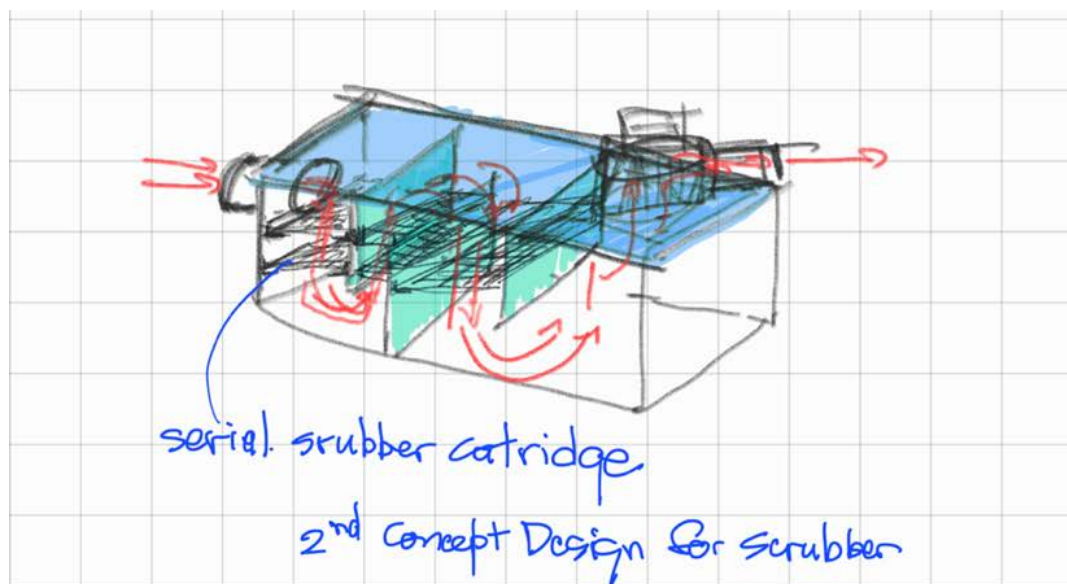
รูปที่ 4.20 Mobile application ควบคุมการทำงานของตู้รมก๊าซโอโซนผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่

4.1.7 การออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์บำบัดก๊าซโอโซน

ในการออกแบบระบบบำบัดก๊าซโอโซนให้ออกแบบแนวคิดของการบำบัดเป็นแบบ Catalyst หลายชั้น (รูปที่ 21) โดยได้ทดสอบเบื้องต้นแล้ว พบว่า สามารถบำบัดได้ 100% โดยมีหลักการดังนี้



ก) Catalyst scrubber concept design 1



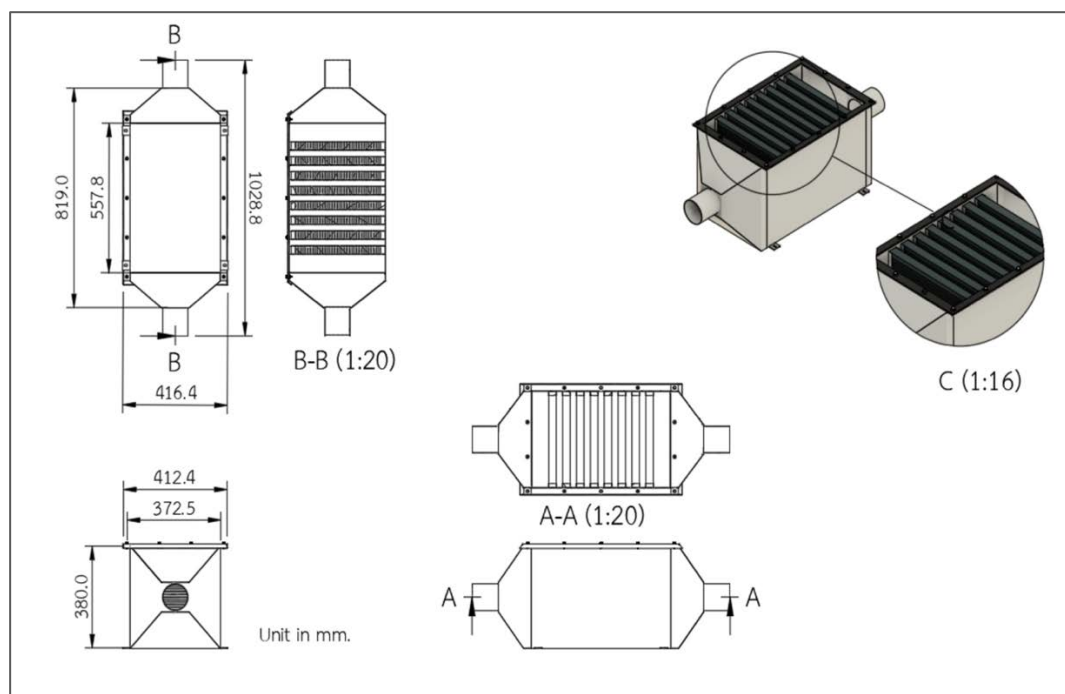
ข) Catalyst scrubber concept design 2

รูปที่ 4.21 แนวคิดการออกแบบ Catalyst scrubber concept design 2 แบบ

แนวคิดการออกแบบจะใช้ Catalyst ซึ่งประกอบไปด้วยผงแมงกานีสเปอร์ออกไซด์ร่วมกับผงคาร์บอนในการบำบัดก๊าซโอโซนเหลือจ่าย ผง Catalyst จะถูกจัดวางแนวระนาบ โดยแบบที่ 1 จะวางเรียงซ้อนกันปิดมิดชิดให้ก๊าซโอโซนไหลผ่านในแนวตั้งฉากกับแผ่น Catalyst แนวตรง แบบที่ 2 เป็นแบบการจัดเรียงให้ก๊าซโอโซนไหลผ่านตั้งฉากกับ Catalyst ในแนวตั้งฉาก จากนั้นจึงไหลซิกแซ็กผ่านแต่ละช่อง เพื่อเพิ่มระยะเวลาการสัมผัส Catalyst ให้มากขึ้น จากการทดสอบเบื้องต้น พบว่าการให้แบบที่ 1 มีความสามารถเพียงพอที่จะบำบัดก๊าซโอโซนเหลือทิ้ง และไม่จำเป็นต้องใช้แบบที่ 2 ซึ่งมีความซับซ้อนในการประกอบมากกว่ารูปของอุปกรณ์ทดสอบนำร่อง แสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 Proof of Concept อุปกรณ์บำบัดก๊าซไอโซนเหลือจ่าย



รูปที่ 4.23 ภาพแบบของอุปกรณ์กำจัดก๊าซไอโซนเหลือจ่าย



รูปที่ 4.24 การขึ้นรูปอุปกรณ์กำจัดโอโซนเหลือจ่าย

รูปที่ 4.23 แสดงรายละเอียดของแบบอุปกรณ์กำจัดก๊าซโอโซนเหลือจ่าย ซึ่งมีขนาด 42 x 102 x 38 cm โดยประมาณ จากนั้นจึงได้จัดสร้างขึ้นโดยใช้เหล็กสแตนเลสเกรด 304 ขึ้นรูปตามแบบแสดงดังรูปที่ 4.24 ภายในอุปกรณ์บำบัดสามารถสอดใส่แผ่นบรรจุสารบำบัดก๊าซโอโซน MnO_2 + Carbon filter จำนวน 8 แผ่น อุปกรณ์บำบัดเชื่อมต่อกับพัดลมดูดอากาศวิ่งจากซ้ายไปขวา และ

ต่อเชื่อมเข้ากับตู้รมก๊าซไอโซน โดยอุปกรณ์บำบัดก๊าซจะวางตัวอยู่ข้างล่างตู้และมีพัดลมดูดอากาศ บำบัดแล้ววางตัวอยู่ภายนอก เพื่อดึงอากาศที่บำบัดแล้วออกไปจากพื้นที่ปฏิบัติงาน



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บำบัดก๊าซไอโซนเหลือจ่ายส่วนล่างของตู้รมก๊าซไอโซน

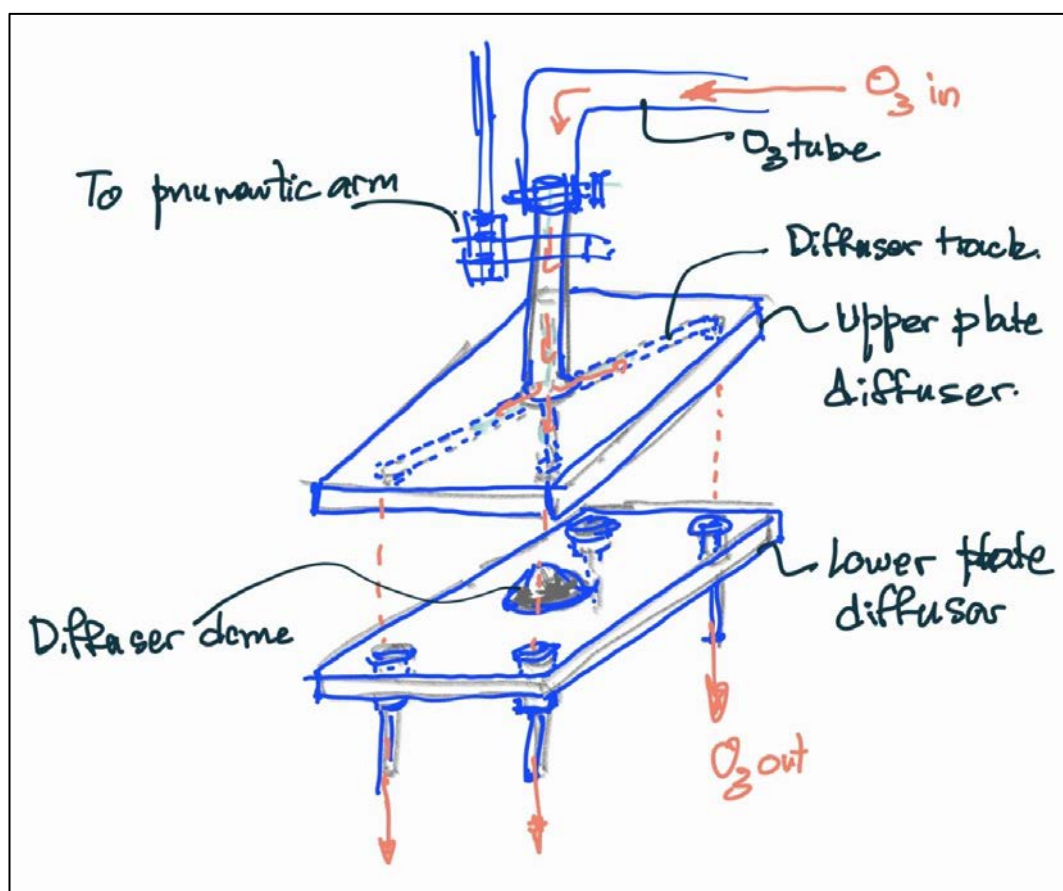
รูปที่ 4.25 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บำบัดก๊าซไอโซนเหลือจ่าย พบว่าระบบบำบัดสามารถทำงานได้ดี ผลของการทดสอบอุปกรณ์บำบัดก๊าซแสดงดังรูปที่ 4.16 ซึ่งพบว่าสามารถบำบัดก๊าซไอโซนในตู้จากความเข้มข้น 1120 ppm เหลือ 0 ppm ภายในเวลา 15 นาที หรือคิดเป็นอัตราการบำบัด 75 ppm ต่อนาที และยังพบว่าบริเวณก๊าซปล่อยทิ้งออกจากอุปกรณ์บำบัดมีค่าเป็น 0 ppm ไม่สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซไอโซนได้ แสดงว่าอุปกรณ์บำบัดก๊าซไอโซนมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะใช้บำบัดก๊าซในระดับประมาณ $1,000 \pm 100$ ppm ภายใน 15 นาที

4.2 การพัฒนาเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยวสำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 2)

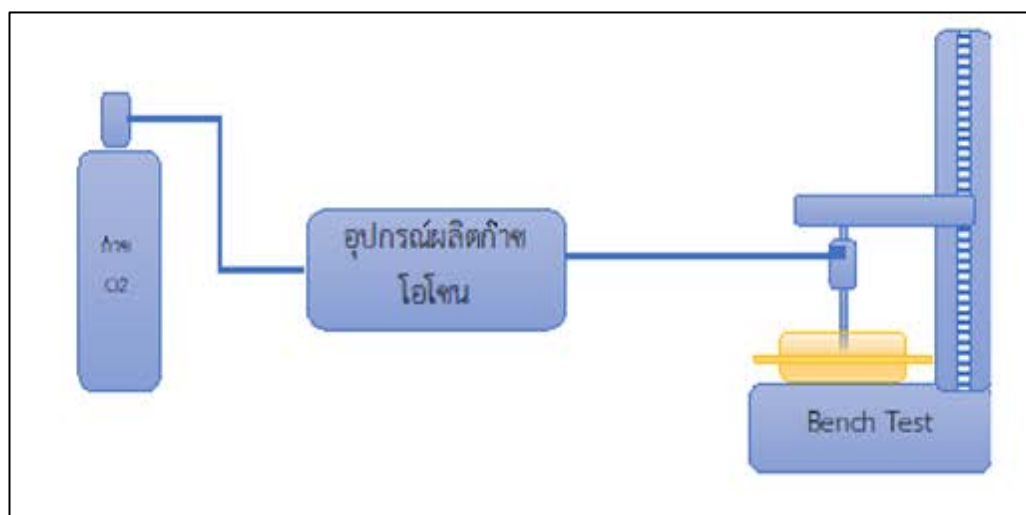
เครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยวสำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยได้ดำเนินการวิจัย ดังนี้

4.2.1 การออกแบบระบบหัวฉีดและระบบสำรองก๊าซโอโซน

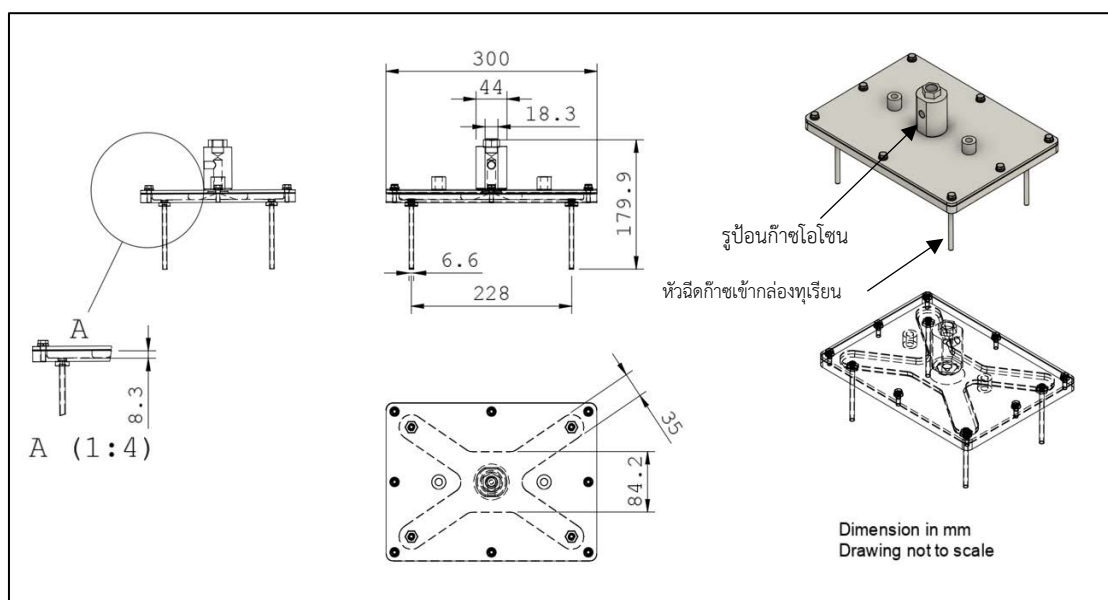
ในการออกแบบระบบการจ่ายก๊าซโอโซนเพื่อป้อนเข้าสู่บรรจุภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอได้ออกแบบแนวคิดการป้อนโดยมีหัวกระจายก๊าซโอโซนจำนวน 4 หัว รูปที่ 4.26 แสดงร่าง Concept design ของการออกแบบหัวฉีด โดยใช้แผ่นเหล็กสแตนเลสจำนวน 2 แผ่น ประกบกัน แผ่นบนเป็นแบบเรียบ แผ่นล่างมีการเจาะร่องลึกเพื่อให้มีการกระจายลมออกไป 4 ทิศทาง การติดตั้งติดอยู่กับแผ่นกระจายก๊าซซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงตามความเร็วที่กำหนดในแนวดิ่ง การออกแบบหัวจ่ายก๊าซโอโซนในลักษณะนี้จะสามารถป้อนก๊าซเข้าสู่กล่องบรรจุทุเรียนได้ครั้งละ 4 กล่อง แต่ละกล่องจะต้องมีการเจาะรูตรงกลางกล่องวางประกบกันหัว-ท้าย เพื่อให้พอดีกับตำแหน่งของหัวป้อนที่จะเคลื่อนที่เข้าไปป้อนก๊าซเข้าสู่กล่องทุเรียน ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 Concept design การออกแบบหัวกระจายก๊าซโอโซน ซึ่งมีหัวฉีดก๊าซติดอยู่ที่หัวกระจายจำนวน 4 หัว



รูปที่ 4.27 แนวคิดการศึกษาหัวฉีดก๊าซที่ป้อนเข้าสู่บรรจุมันท์



รูปที่ 4.28 ภาพแบบรายละเอียดหัวฉีดที่ออกแบบเพื่อการจัดสร้าง

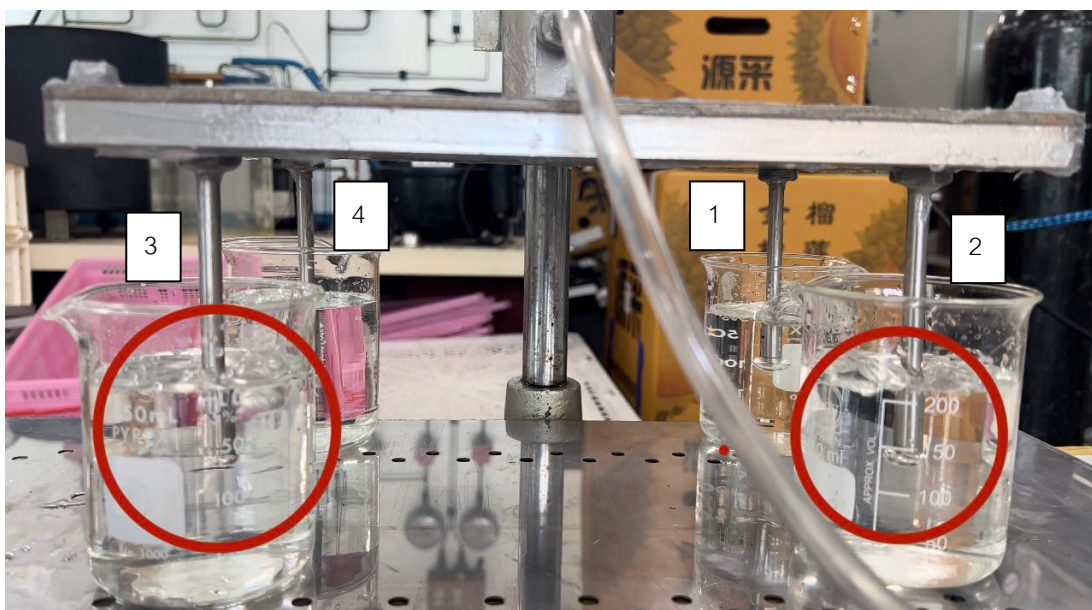
จากภาพแบบในรูปที่ 4.28 ได้ดำเนินการจัดสร้างชิ้นหัวฉีดก๊าซโอโซนเข้าสู่กล่องบรรจุทุเรียน เมื่อสร้างแล้วเสร็จได้ทำการทดสอบการกระจายตัวของหัวฉีด โดยการฉีดป้อนก๊าซออกซิเจนที่ความเร็ว 2 L/min เข้าไปยังรูป้อนก๊าซ ซึ่งส่งผลให้แต่ละหัวมีก๊าซออกซิเจนในอัตราการไหล 0.5 L/min และทดสอบการกระจายตัวของก๊าซออกซิเจนที่ออกในแต่ละหัว เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซอยู่ในอัตราที่ต่ำมาก ไม่มีเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดเพียงพอ จึงใช้วิธีการทดสอบการกระจายก๊าซออกซิเจนผ่านหัวฉีดโดยการแช่น้ำแล้วสังเกตอัตราการผลิตฟองอากาศในน้ำแทน ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 การทดสอบการกระจายตัวของก๊าซออกซิเจนที่หัวฉีดผ่านน้ำ

เนื่องจากการทดสอบการวัดอัตราการสร้างฟองออกซิเจนทั้ง 4 ท่อฉีด ไม่เท่ากันจึงได้มีการวิเคราะห์ปัญหาพบว่าเกิดจากหัวฉีดก๊าซที่มีการไหลของก๊าซที่ต่างกัน จึงได้มีการปรับแก้ไขและทดสอบใช้ก๊าซออกซิเจนและโอโซน ดังรายการต่อไปนี้

1. ทำการทดสอบการไหลของก๊าซภายในหัวฉีดทั้ง 4 หัว ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้ใช้ก๊าซ O_2 / ใช้ก๊าซ O_3 / ลูกโป่ง+ใช้ก๊าซ O_2 / น้ำ+ใช้ก๊าซ O_2 โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้
 - การใช้ลูกโป่ง+ใช้แก๊ส O_2 ที่มีอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ flow 5 l/min และเสียบลูกโป่งขนาดเล็กที่หัวฉีดก๊าซทั้ง 4 หัวโดยสังเกตพบว่าลูกโป่งแต่ละลูกพองตัวขึ้นเล็กน้อยแต่มีความแตกต่างกันไม่ชัด และพบว่ามีกรั่วของก๊าซที่บริเวณหัวฉีดปลายท่อฉีดก๊าซ จึงได้มีการปรับแก้ไขโดยจะทำการสังเกตฟองอากาศของก๊าซที่ออกจากปลายท่อฉีดก๊าซแทนเนื่องจากวิธีการใช้ลูกโป่งยังสามารถระบุประสิทธิภาพของหัวฉีดได้ชัดเจน
 - การใช้น้ำ+ใช้แก๊ส O_2 ที่มีอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1 l/min + น้ำ 200 ml ใส่ในบีกเกอร์และทำการจุ่มหัวฉีดก๊าซทั้ง 4 หัวจุ่มลงน้ำเพื่อสังเกตฟองอากาศ พบว่าแรงดันของแก๊สในแต่ละบีกเกอร์ไม่เท่ากัน จากนั้นจึงได้ปรับแก้ไขระยะของหัวฉีดเนื่องจากระยะที่ใช้จุ่มน้ำมีผลต่อแรงดันที่เกิดขึ้น
 - การใช้น้ำ+ใช้แก๊ส O_2 ที่มีอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1 l/min + น้ำ (ให้ท่อฉีดก๊าซห่างจากผิวน้ำ 1 cm ทั้ง 4 หัวเท่า ๆ กัน) โดยพบว่าแรงดันของแก๊สในแต่ละบีกเกอร์ไม่เท่ากัน โดยมีความแรงของก๊าซและการเกิดฟองอากาศ ตำแหน่งที่ $3>2>1>4$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.30



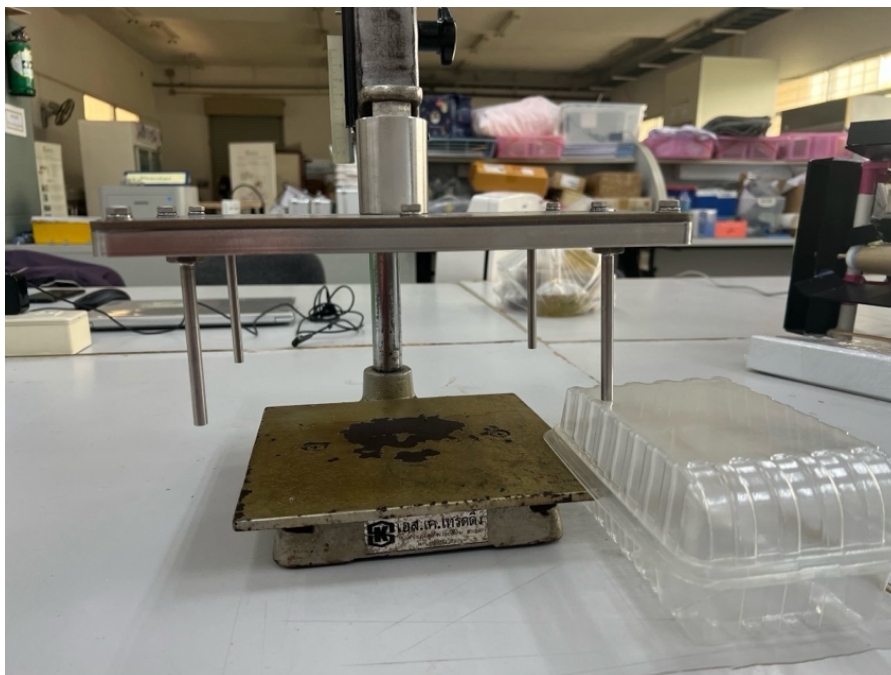
รูปที่ 4.30 อัตราการเกิดฟองอากาศตามตำแหน่งหัวฉีดทั้ง 4 หัว

จากการทดลองอัตราการเกิดฟองอากาศเบื้องต้น พบว่าการไหลของก๊าซแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน อาจมาจากรอยรั่วที่น้อย จึงได้ทำแก้ไขโดยใช้ซิลิโคนมาปิดรอยรั่วบริเวณภายในไว้เพื่อประสิทธิภาพของหัวฉีด ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 การใช้ซิลิโคนปิดรอยรั่วบริเวณภายในหัวฉีดก๊าซไอโซน

2. ทำการทดสอบการไหลของก๊าซ O_2 หลังปิดซิลิโคนรอบหัวฉีด ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้ปรับระดับฐาน/ 2 รู/ 4 รู (ติดเทปอลูมิเนียมฟอยล์ พันด้วยพาราฟิล์ม และเจาะรูด้วยคลิปหนีบกระดาษ) จากผลการทดลองจะพบว่าการปรับสภาวะต่าง ๆ จนกระทั่งความแรงของก๊าซแต่ละหัวใกล้เคียงกัน
 - รู (ติดฟอยล์ พันด้วยพาราฟิล์ม และเจาะรูด้วยคลิปหนีบกระดาษ) + ใช้ก๊าซ O_2 พบว่ามีแรงดันของก๊าซทุกตำแหน่งใกล้เคียงกันจากการทดลองข้างต้นจะพบว่า
 - คู่น้ำ 1 และ 2 = ตำแหน่งที่ $1 > 2$
 - คู่น้ำ 3 และ 4 = ตำแหน่งที่ $3 > 4$
 - คู่อ่างมูม 2 และ 3 = ตำแหน่งที่ $2 > 3$
 - คู่อ่าง 1 และ 3 = ตำแหน่งที่ $3 > 1$
 จึงได้มีการปรับสภาวะต่าง ๆ จนกระทั่งความแรงของก๊าซหรือการฟองอากาศแต่ละหัวใกล้เคียงกัน และจะได้นำไปทำการทดลองกับก๊าซโอโซนในกล่องทุเรียนเป็นลำดับถัดไป
3. ทำการทดสอบจำนวนและตำแหน่งหัวฉีดทั้ง 4 หัวต่อการไหลของก๊าซ O_2 ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้ โดยทดสอบการลดจำนวนหัวฉีดก๊าซลงเพื่อปรับแก้ไขประสิทธิภาพของหัวฉีด
 - ปรับการไหลในรูปแบบ 4 หัวฉีด และ 2 หัวฉีด ตามแต่ละตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4 จากการทดลองพบว่าการไหลของก๊าซแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน จึงทำการแกะดูภายในแท่นหัวฉีด พบว่าร่องแต่ละรูค่อนข้างกว้าง จึงมีความเป็นไปได้สูงที่ก๊าซจะไหลไม่เท่ากัน จึงได้ทำการลดขนาดร่องกว้างโดยใช้ซิลิโคนในการปรับแก้ไข
4. การปรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ต่อการไหลของก๊าซโอโซนด้วยวิธีการดังต่อไปนี้ปรับแท่นหัวฉีดและเปลี่ยนขนาดรูหัวฉีด/ 4 รู/ 2 รู จากการทดลองพบว่าการไหลของก๊าซแบบ 2 รู มีการไหลของก๊าซใกล้เคียงมากขึ้น
5. ทำการทดสอบฉีดก๊าซโอโซนเข้าในกล่องบรรจุภัณฑ์ทดลอง ดังรูปที่ 4.32 โดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.32 การทดสอบป้อนก๊าซโอโซนและออกซิเจน เข้าในกล่องบรรจุภัณฑ์

- ทำการทดสอบความเข้มข้นของก๊าซเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของหัวฉีดทั้ง 2 หัวโดยใช้การปล่อยก๊าซ O_3 ที่มีอัตราการไหลของก๊าซ O_3+O_2 ในอัตราส่วนต่าง ๆ และทำการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซ O_3 โดยปล่อยก๊าซจากหัวฉีด 2 หัว ใส่ลงไปในกล่องทุเรียนเป็นเวลา 10 วินาที และกล่องจะทำการปิดรอบกล่องด้วยพาราฟิล์มเพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซและตรวจสอบความเข้มข้นของก๊าซภายในกล่องดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยพบว่าการความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่องที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่องทุเรียนที่มีการปรับสภาพหัวฉีด

Flow (L/min)		เข้าที่	[O ₃] (ppm)			Aver	SD
O ₃	O ₂		กล่องที่ 1	กล่องที่ 2	Aver		
2.00	1.00	1	3743	3743	3743.00		
1.50	0.50	1	3743	3743	3743.00		
0.75	0.75	1	3573	3203	3388.00	3393.67	118.10
		2	3743	2814	3278.50		
		3	3489	3540	3514.50		
0.50	0.50	1	1917	2301	2109.00	2265.17	137.49
		2	2245	2392	2318.50		
		3	2813	1923	2368.00		
0.50	1.00	1	2762	1940	2351.00	2370.67	307.97
		2	2248	1898	2073.00		
		3	2733	2643	2688.00		

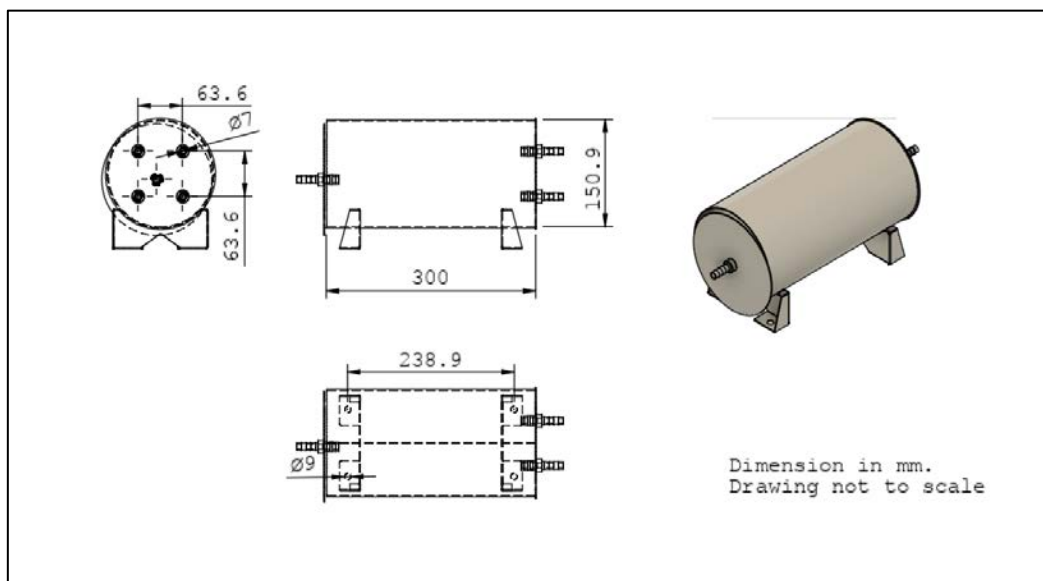
จากตารางที่ 4.2 พบว่าการปรับสภาพของหัวฉีด และการลดจำนวนหัวฉีดจาก 4 หัว เหลือเพียง 2 หัวฉีด รวมไปถึงการ Dilution ของก๊าซโอโซนโดยใช้ก๊าซออกซิเจนผสมร่วมกับโอโซน ทำให้ความเข้มข้นระหว่างกล่องซ้าย และขวา มีค่าใกล้เคียงกัน ที่อัตราการป้อนก๊าซ O₃+O₂ พอสรุปได้ดังนี้

1. อัตราส่วนในการผสมก๊าซ O₃+O₂ ที่อัตราการไหลของ O₃ มากกว่า 0.75 ทำให้ได้ความเข้มข้นในกล่องอยู่ในระดับประมาณ >3,000 ppm
2. อัตราส่วนในการผสมก๊าซ O₃+O₂ เพื่อให้ความเข้มข้นของก๊าซอยู่ในช่วงที่เครื่องวัดก๊าซโอโซนอ่านได้ ต่ำที่สุดอยู่ที่อัตราการไหล 1 L/min ซึ่งเมื่อกระจายออก 2 หัวฉีดแล้วจะได้อัตราการไหลแต่ละหัวที่ 0.5 L/min
3. ที่อัตราส่วนในการผสมก๊าซ O₃+O₂ ที่ 50:50 ปล่องก๊าซเป็นเวลา 10 วินาที ทำให้ได้ความเข้มข้นที่ $2,265 \pm 137$ ppm มีการกระจายตัวระหว่างหัวใกล้เคียงกัน

ดังนั้นจากผลการทดลองจึงได้มีการปรับภายในหัวฉีดให้มีช่องว่างลดลงและเลือกใช้หัวฉีดก๊าซ 2 หัว เพื่อให้ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่องทุเรียนมีความเข้มข้นเท่ากัน

นอกจากการศึกษาการปล่อยก๊าซให้ผสมกันในอัตราส่วนผ่านหัวฉีดโดยตรงแล้ว ผู้วิจัยยังได้ทำการออกแบบถังพักและสร้างสำหรับเตรียมการศึกษาระบบถังพักก๊าซโอโซน ตามรูปที่ 4.33 อย่างไรก็ตาม จากการทดลองข้างต้นเนื่องจากการปล่อยก๊าซโดยตรงในอัตราที่ต่ำมาก 0.5 L/min จึงทำให้

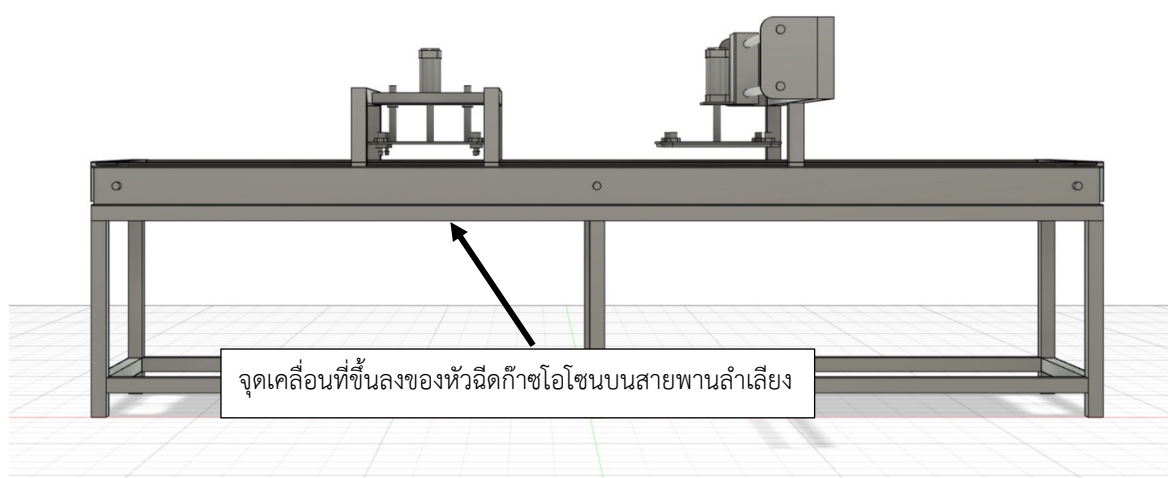
การศึกษาระบบถังพักไอโซนมีความคลาดเคลื่อนมาก ๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่นำระบบถังพักก๊าซไอโซนมาใช้งานจริง



รูปที่ 4.33 แบบของถังพักเพื่อใช้ในการทดสอบระบบสำรองก๊าซไอโซนสำหรับการฉีดป้อนเข้ากล่องทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคม

4.2.2 การออกแบบระบบและกลไกการเคลื่อนที่ของหัวฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ

จากการออกแบบหัวฉีดป้อนก๊าซไอโซน พบว่า เมื่อสร้างต้นแบบจริงหัวฉีดไอโซนมีน้ำหนักมาก ประมาณ 10 กิโลกรัม ต่อชุด ทำให้ไม่สามารถศึกษาปัจจัยในการเคลื่อนขึ้น-ลงของหัวฉีดไอโซนในห้องปฏิบัติการได้ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้มีการศึกษาปรับแต่งการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของหัวฉีดก๊าซไอโซนเมื่อติดตั้งบนตัวเครื่องฉีดสายพานแล้ว เป็นไปดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 แบบของตำแหน่งชุดฉีดหัวจ่ายก๊าซไอโซนบนสายพานลำเลียง

เนื่องจากหัวฉีดก๊าซไอโซนมีน้ำหนักมากถึง 10 กิโลกรัม จึงต้องมีการเลือกอุปกรณ์ในการช่วยเลื่อนขึ้นลงในแนวดิ่ง ผู้วิจัยได้เลือกกระบอกสูบนิวเมติกส์ รุ่น MDB1B32-100Z-M9BL (SMC Corporation, Japan) ที่มีความยาว Stroke 100 มิลลิเมตร และมีความเร็วในการเคลื่อนที่ปรับได้ตั้งแต่ 50-1,000 mm/s เมื่อติดตั้งบนระบบสายพานลำเลียงแล้วทำให้หัวฉีดก๊าซไอโซนเคลื่อนที่ในระยะตำแหน่งได้ โดยมีการปรับตั้ง Alignment กับกล่องบรรจุทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค เคลื่อนที่ขึ้นลงได้ตรงตามตำแหน่ง การปรับตั้ง Alignment ของการเคลื่อนที่ของหัวฉีดก๊าซไอโซนแสดงดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 4.35 การปรับตั้ง Alignment ของหัวฉีดไอโซนให้ขึ้นลงในแนวดิ่ง ตรงกับรูป้อนก๊าซบนกล่องบรรจุ

4.2.3 การออกแบบและพัฒนาระบบการติดสติ๊กเกอร์ซีลป้องกันการรั่วไหลของก๊าซไอโซน

ในการออกแบบระบบติดสติ๊กเกอร์ ได้ออกแบบให้ใช้ระบบนิวเมติกส์ เป็นหัวสูญญากาศดูดแผ่นสติ๊กเกอร์ที่อยู่ในม้วน 1 แถว โดยหัวดูดสติ๊กเกอร์ จะมีลักษณะการดูดแบบ 2 หัวพร้อมกัน ในขั้นตอนการติดสติ๊กเกอร์เพื่อทับบนรูสำหรับป้อนก๊าซไอโซนเข้ากล่องนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซไอโซนออกจากกล่องทุเรียน โดยมีขั้นตอนการติดสติ๊กเกอร์ดังนี้

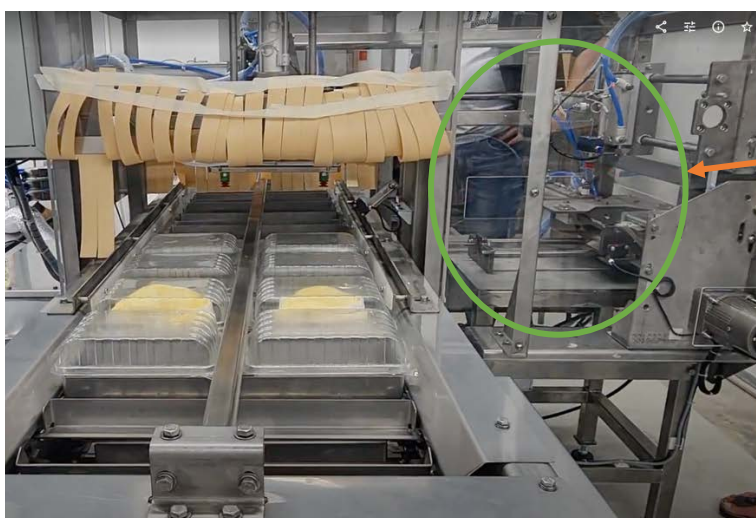
1. ชุดเตรียมสติ๊กเกอร์ หัวดูดสติ๊กเกอร์ด้วยระบบนิวเมติกส์ จะดูดสติ๊กเกอร์มาจัดเรียงทีละดวงบนแผ่นเตรียมสติ๊กเกอร์ จนครบ 2 ดวง

2. ชุดติดสติ๊กเกอร์ จะเคลื่อนที่ออกจากสายพานไปดูดจับสติ๊กเกอร์ที่ชุดเตรียม แล้วเคลื่อนที่กลับมารอในตำแหน่งสายพาน เพื่อเตรียมพร้อมการติดสติ๊กเกอร์

3. สายพานลำเลียงทุเรียนเข้าสู่ห้องฉีดก๊าซโอโซน โดยจะเคลื่อนที่เป็นชุด ๆ ละ 1 วงรอบ ๆ ละ 2 กล่อง หัวฉีดก๊าซโอโซนเคลื่อนที่ลงไปเข้าสู่หัวฉีดก๊าซโอโซนบนกล่อง แล้วเคลื่อนที่ขึ้นหลังจากฉีดก๊าซโอโซนเข้ากล่องแล้วเสร็จตามเวลาที่กำหนด

4. สายพานเคลื่อนที่ 1 วงรอบ พร้อมกับหัวติดสติ๊กเกอร์เคลื่อนที่ลงมาปิดสติ๊กเกอร์บนกล่องเพื่อปิดผนึกป้องกันการรั่วของก๊าซโอโซนออกจากกล่อง

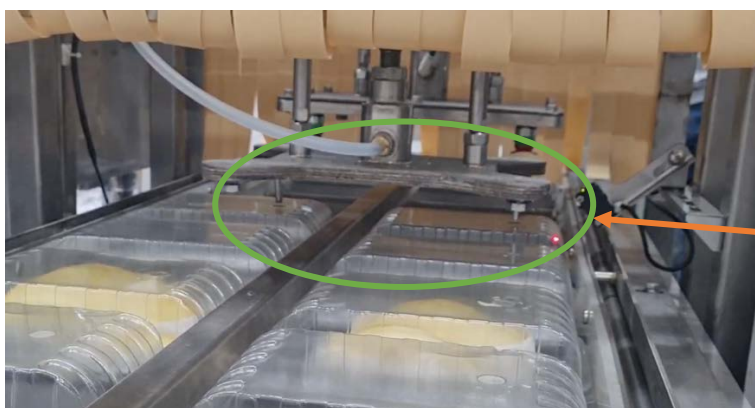
ขั้นตอนการติดสติ๊กเกอร์แสดงดังรูปที่ 4.36



1. ชุดเตรียมสติ๊กเกอร์ จัดเตรียมสติ๊กเกอร์ 2 ดวง เพื่อพร้อมปิดผนึก



2. ชุดติดสติ๊กเกอร์ เคลื่อนไปดูดสติ๊กเกอร์และกลับมาเตรียมพร้อมการติดผนึก



3. หัวฉีดก๊าซโอโซนเคลื่อนที่ลง และ
ฉีดป้อนก๊าซโอโซนเข้ากล่องตามเวลา
ที่กำหนด

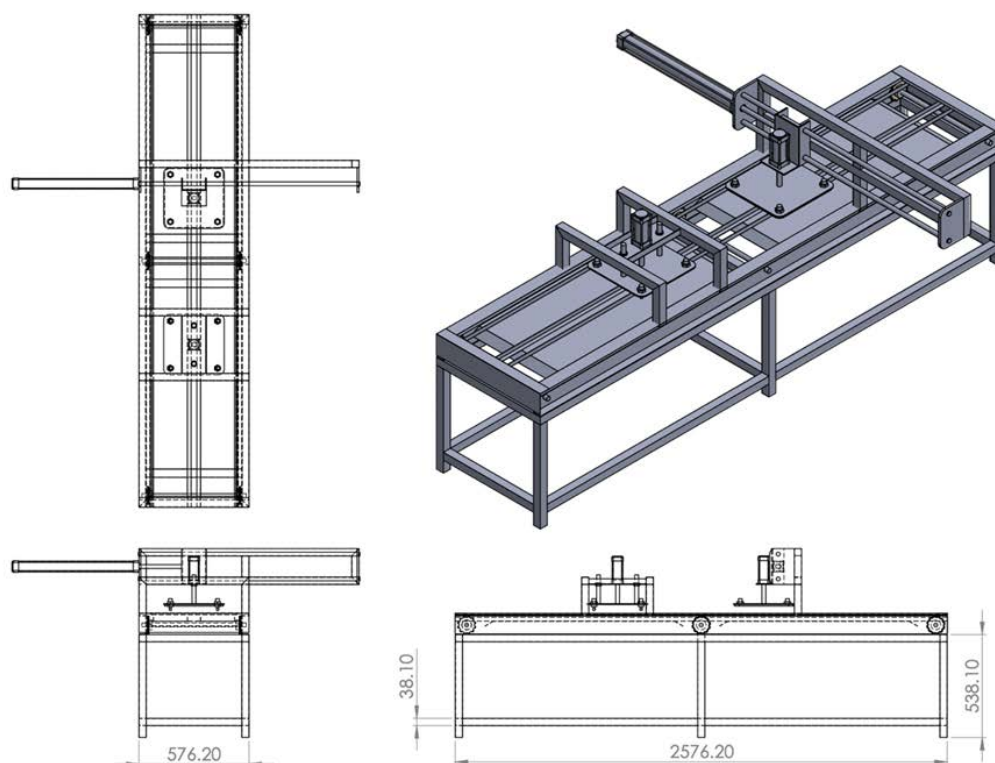


4. หัวติดสติ๊กเกอร์เคลื่อนที่ลงไปติด
สติ๊กเกอร์ที่กล่องหลังจากการฉีด
ป้อนก๊าซโอโซนแล้วเสร็จ

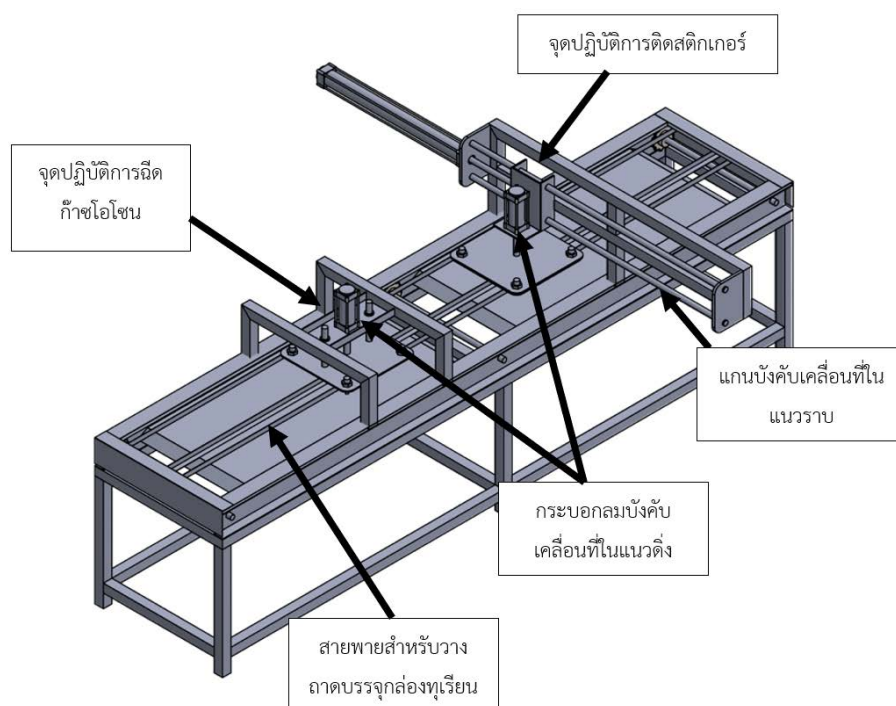
รูปที่ 4.36 ขั้นตอนการติดสติ๊กเกอร์บนกล่องเพื่อป้องกันก๊าซโอโซนรั่วไหลออกจากกล่องบรรจุทุเรียน

4.2.4 การออกแบบระบบสายพานลำเลียง โครงสร้างภายนอก และระบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

- การออกแบบระบบสายพานลำเลียง แสดงดังรูปที่ 4.37 และ 4.38
 - ออกแบบให้มีสายพานลำเลียงสำหรับลำเลียงถาดบรรจุกล่องทุเรียนที่เจาะรูไว้แล้ว จำนวน 4 กล่องต่อถาด ขนาดโดยรวมประมาณ $2.5 \times 0.6 \times 0.6$ ม.
 - จุดปฏิบัติการสำหรับฉีดก๊าซโอโซนเข้าสู่กล่องครั้งละ 4 หัว เคลื่อนที่ในแนวดิ่งด้วยกระบอกลม
 - จุดปฏิบัติการสำหรับติดสติ๊กเกอร์ปิดรูโอโซน มีหัวเคลื่อนขึ้นลงในแนวดิ่งด้วยกระบอกลม และเคลื่อนที่ซ้าย-ขวาด้วยแกนขับเคลื่อนด้วยกระบอกลม ติดสติ๊กเกอร์ได้ครั้งละ 4 ดวง

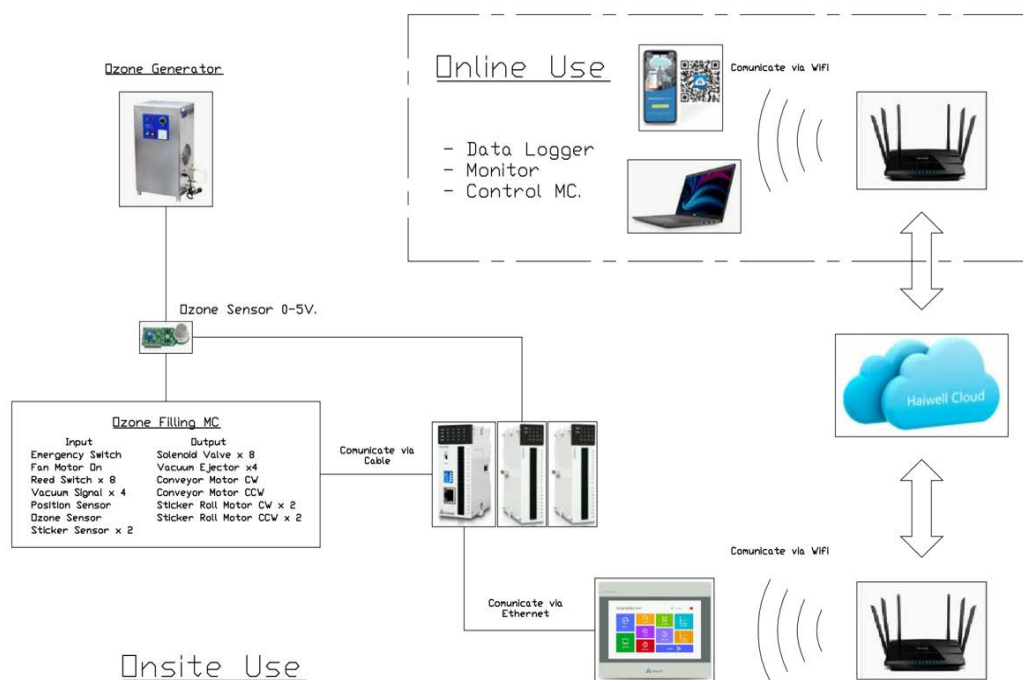


รูปที่ 4.37 มิติโดยรวมของโครงสร้างสายพานลำเลียงและจุดปฏิบัติการฉีดไอโซนและติดสติ๊กเกอร์



รูปที่ 4.38 จุดแสดงรูปแบบการติดตั้งส่วนประกอบหลักบนสายพานลำเลียง

● การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมทางกล



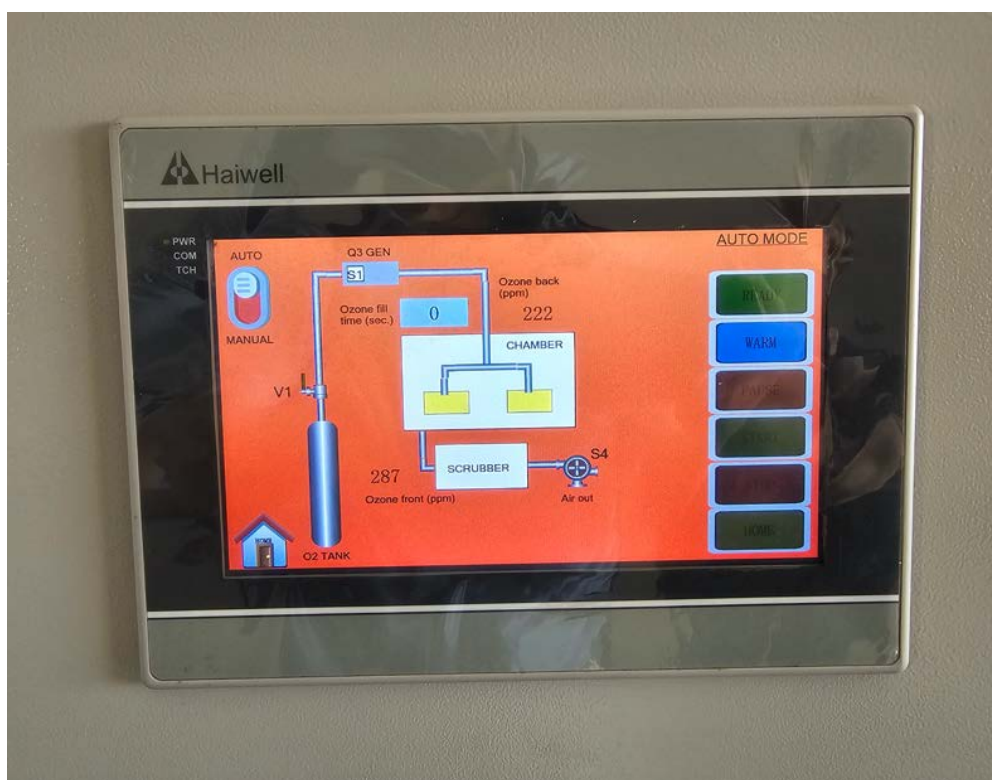
รูปที่ 4.39 แผนภูมิการออกแบบ ระบบ SCADA เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตก๊าซโอโซนและติดสติ๊กเกอร์ในเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ

จากรูปที่ 4.39 ระบบการตรวจวัด ได้ใช้เซ็นเซอร์วัดค่าความเข้มข้นของโอโซนอยู่ 1 จุด ด้วยโอโซนเซนเซอร์ รุ่น MikroElektronika Ozone 2 Click ซึ่งใช้เซ็นเซอร์วัดโอโซน รุ่น MQ131 บรรจุบนบอร์ด MCP3551 มี 22-bit ADC converter แปลงสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่ PLC รุ่น AT12MOR (Xiamen Haiwell Technology Co.,Ltd., China) ต่อเข้ากับ I/O expansion slot รุ่น A16XDR (Xiamen Haiwell Technology Co.,Ltd., China) แสดงผลที่หน้าจอสัมผัส HMI รุ่น C7S-W (Xiamen Haiwell Technology Co.,Ltd., China) โดยมีตำแหน่งตรวจวัดความเข้มข้นของโอโซนอยู่ 1 จุด คือ จุดใกล้กับตู้ควบคุมภายนอกตู้รวมเพื่อแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในบริเวณรอบตู้ปฏิบัติงาน ตำแหน่งของเซ็นเซอร์วัดโอโซน (ตารางที่ 4.3)

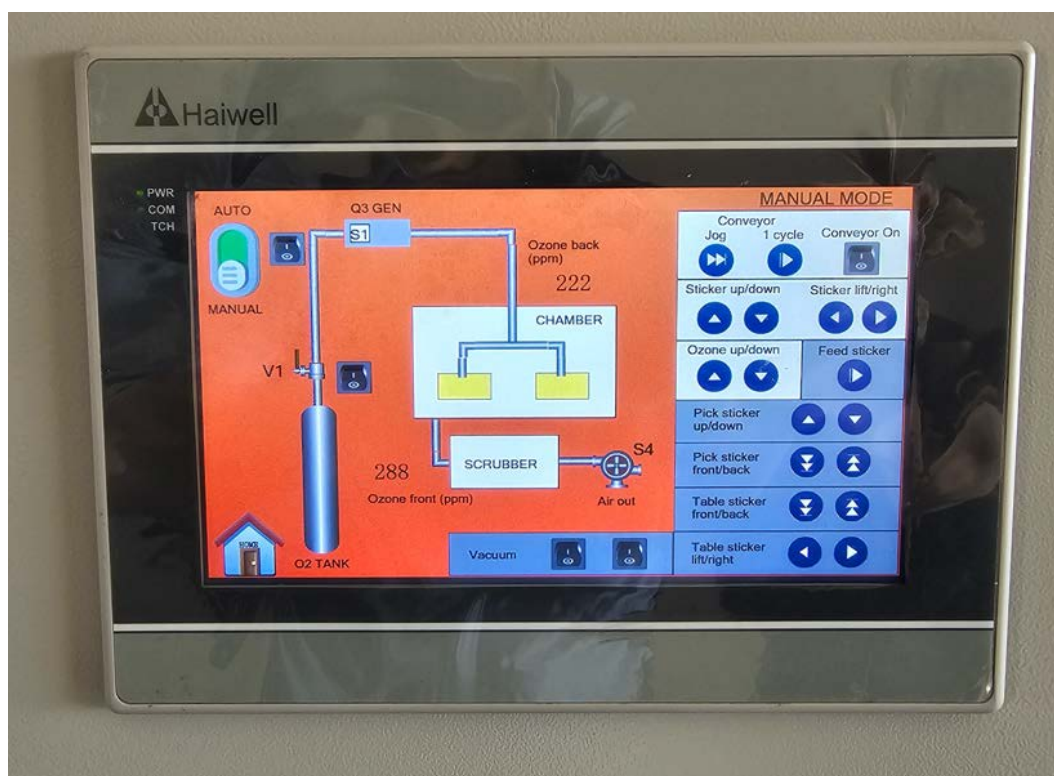
ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งของเซ็นเซอร์วัดโอโซน

Input	Output
Emergency Switch 2 จุด	Solenoid valve 10 ชุด
Blower On-off 1 ชุด	Vacuum ejector 2 ชุด
Reed switch 14 จุด	Invertor conveyor motor 1 ชุด
Pressure sensor 3 ชุด	Sticker roll motor 1 ชุด
Position Sensor 2 ชุด	
Ozone Sensor 1 ชุด	
Sticker sensor 2 ชุด	

การควบคุมระบบการทำงาน แบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ Automatic และ Manual ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.40 และ 4.41



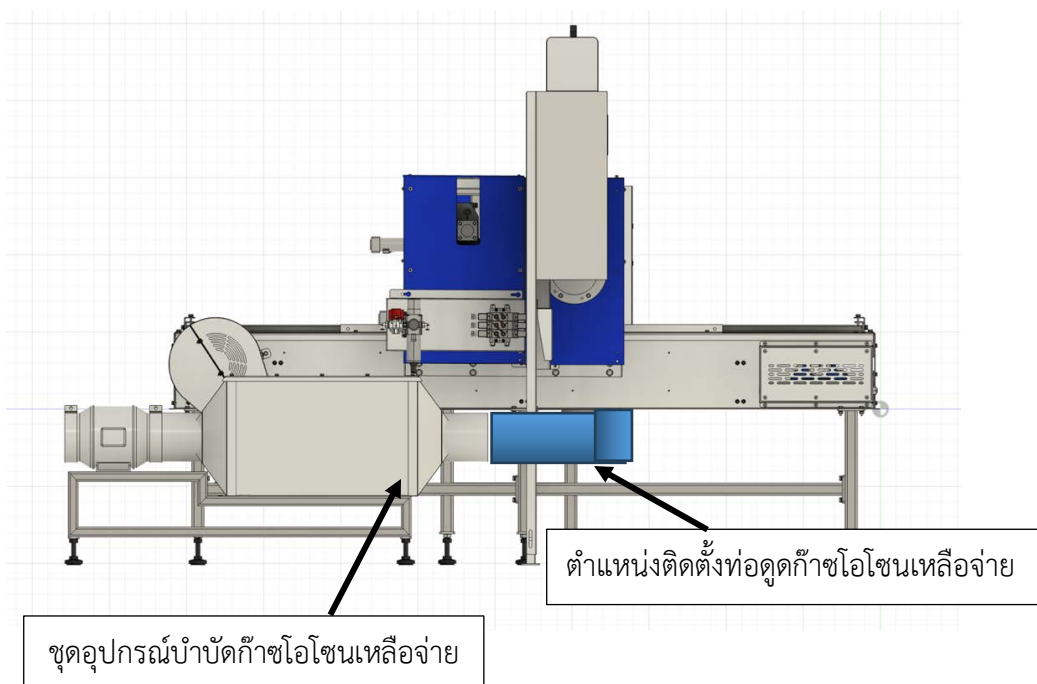
รูปที่ 4.40 แสดงหน้าจอควบคุมการทำงานระบบ Automatic สั่งการโดยการตั้งโปรแกรม



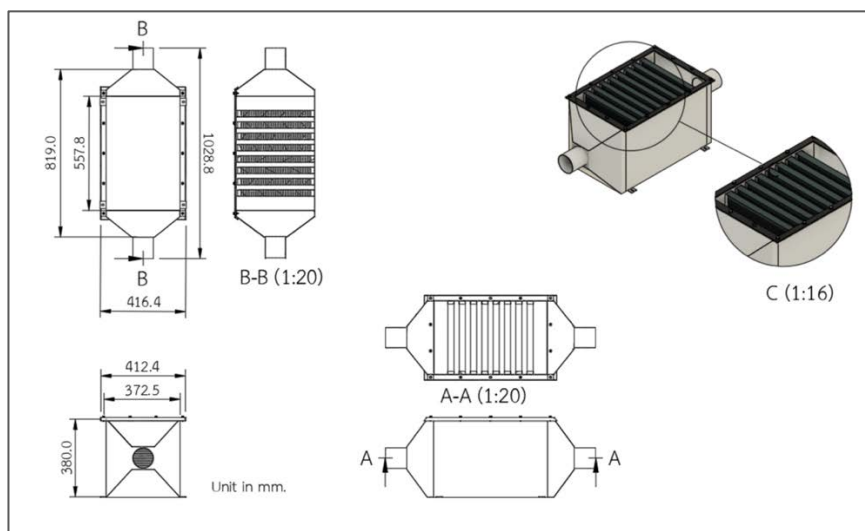
รูปที่ 4.41 แสดงหน้าจอควบคุมการทำงานระบบ Manual เพื่อควบคุมระบบด้วยผู้ปฏิบัติงาน

- การออกแบบระบบดูดก๊าซโอโซนเหลือทิ้งบริเวณปฏิบัติงาน และออกแบบระบบบำบัดก๊าซโอโซนเหลือทิ้งก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ

ออกแบบโดยใช้อุปกรณ์บำบัดก๊าซเหลือง่าย วางตัวไว้ด้านข้างของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ เชื่อมเข้าไปใต้เครื่องฉีดฯ โดยใช้ท่อ Flex โค้งงอไปสู่ใต้สายพาน ตำแหน่งตรงกับหัวฉีดก๊าซโอโซน เพื่อดูดก๊าซโอโซนเหลือทิ้งจากการฉีดป้อนเข้ากล่องระหว่างปฏิบัติงาน รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.42 และ 4.43

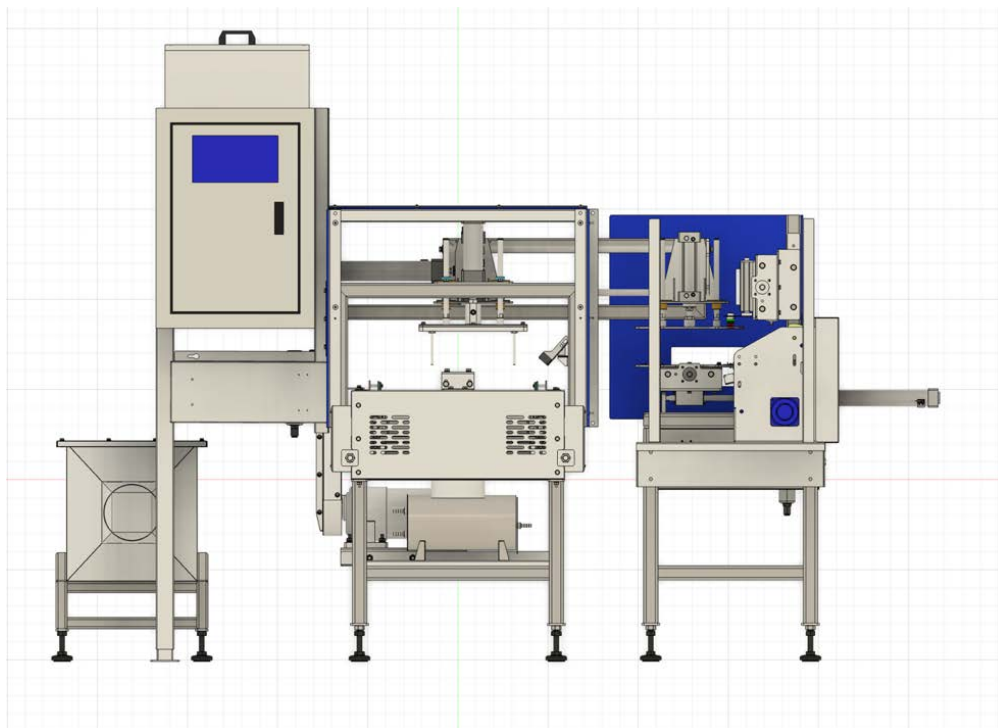


รูปที่ 4.42 ตำแหน่งการติดตั้งระบบบำบัดก๊าซโอโซนเหลือจ่ายบริเวณปฏิบัติงาน

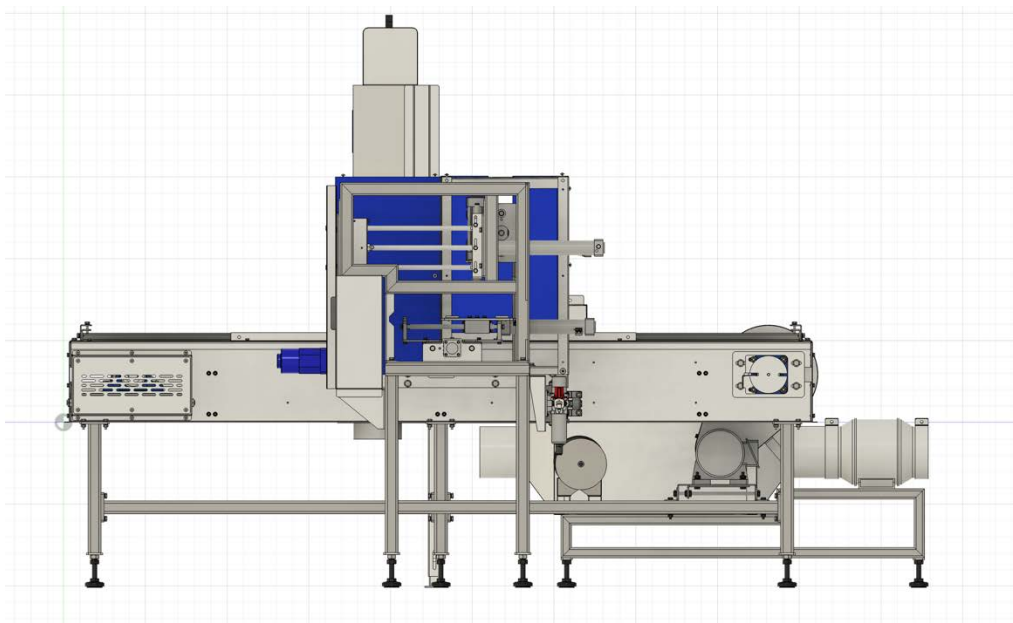


รูปที่ 4.43 ภาพแบบระบบบำบัดก๊าซโอโซนเหลือของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ

เมื่อออกแบบรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชิ้นส่วนแล้วเสร็จ นำมาประกอบกันเป็นภาพแบบเครื่องจักรรวม แสดงดังรูปที่ 4.44-4.47 ดังนี้

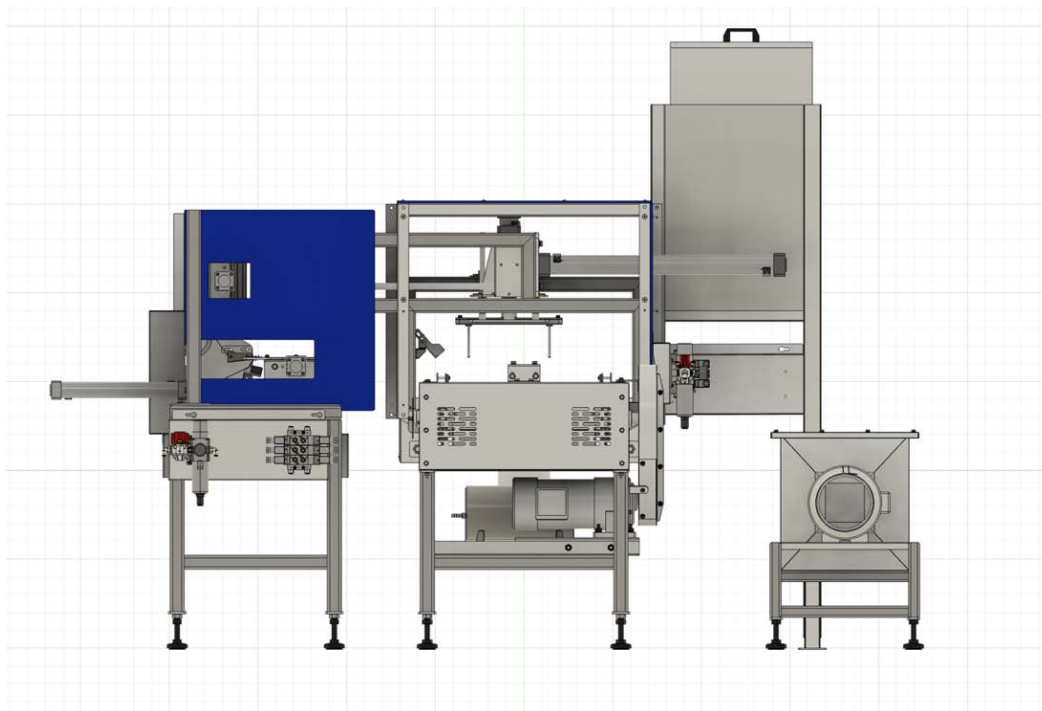


Front View

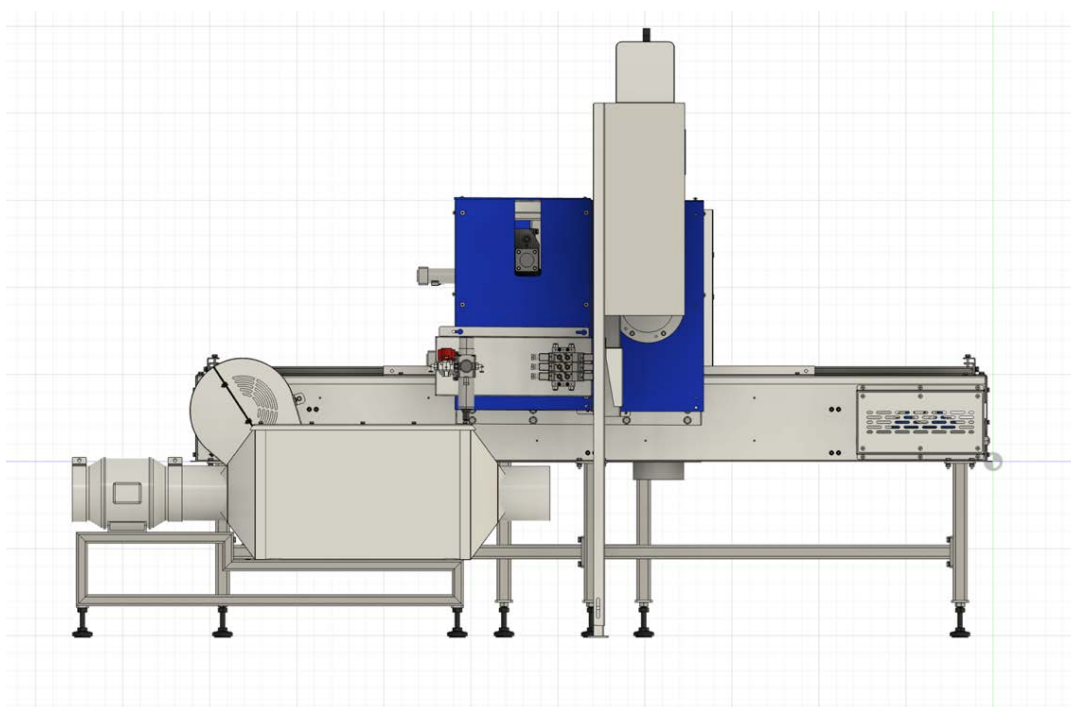


Right side view

รูปที่ 4.44 แบบประกอบเครื่องฉีก้าชไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ มุมมอง Front view และ Right side view

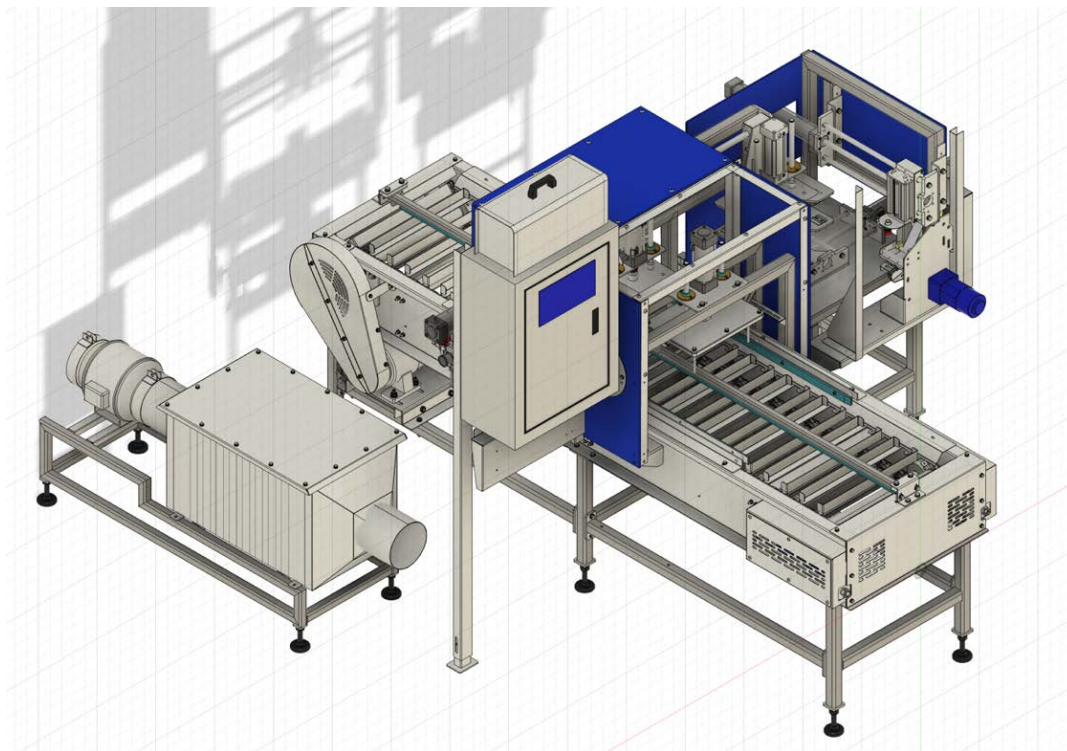


Back view

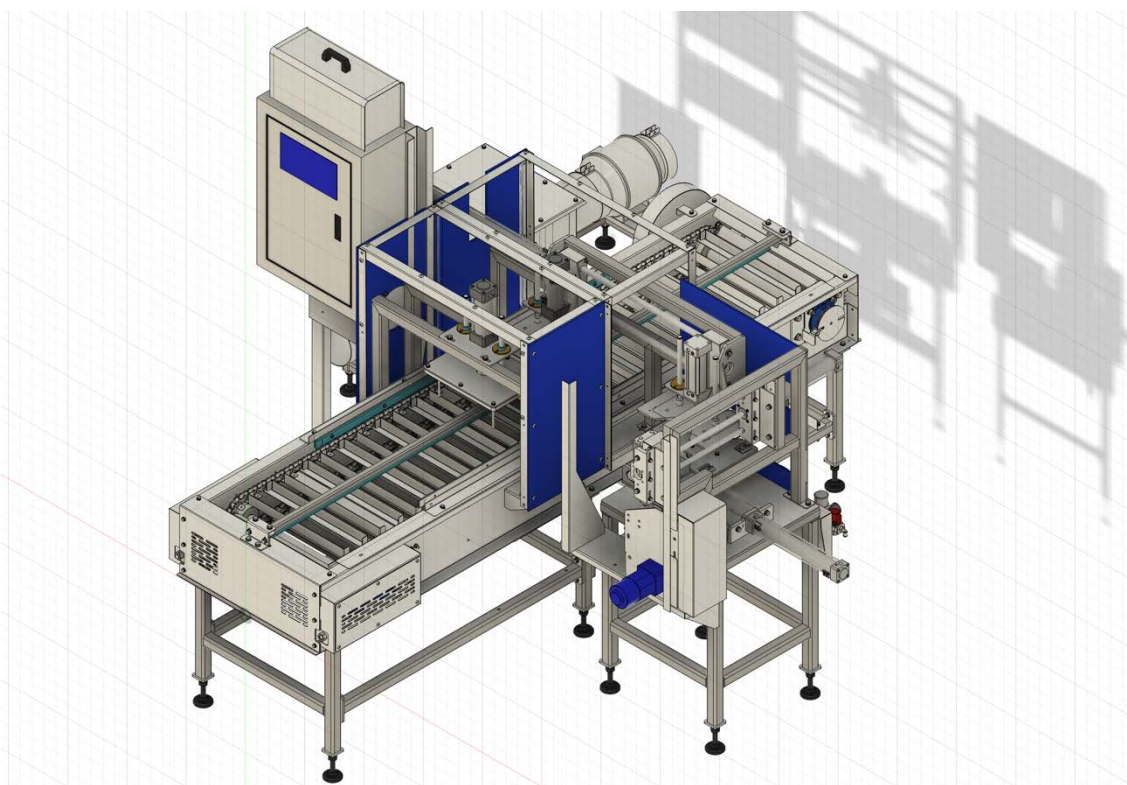


Left side view

รูปที่ 4.45 แบบประกอบเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมุมมอง Back view และ Left side view

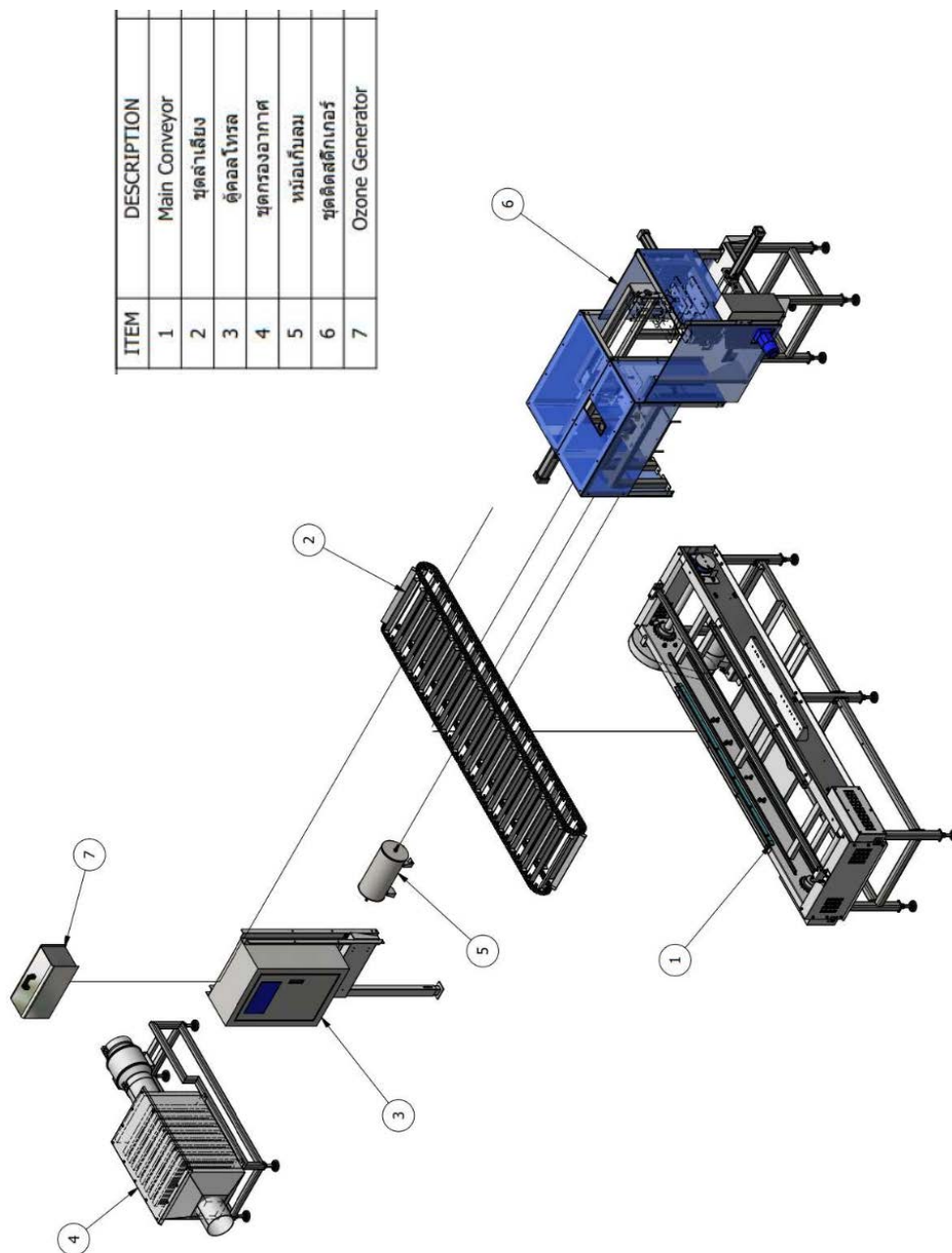


Left Isometric View



Right Isometric view

รูปที่ 4.46 แบบประกอบเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมุมมอง Left และ Right Isometric view



รูปที่ 4.47 ส่วนประกอบหลักของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ

เมื่อออกแบบแล้วเสร็จ ได้จัดสร้าง ประกอบ และติดตั้ง แสดงดัง รูปที่ 4.48-4.49



รูปที่ 4.48 เครื่องฉีดก๊าซโอโซนกึ่งอัตโนมัติเมื่อประกอบแล้วเสร็จ ติดตั้ง ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้



รูปที่ 4.49 เครื่องฉีดก๊าซโอโซนกึ่งอัตโนมัติเมื่อประกอบแล้วเสร็จ ติดตั้ง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เมื่อได้ติดตั้งแล้วเสร็จ ได้ดำเนินการทดสอบการใช้งานเบื้องต้น โดยการฉีดพ่นก๊าซโอโซน ผสมกับก๊าซออกซิเจน ในอัตราส่วน 50:50 พ่นเข้าหัวฉีดด้วยอัตราการไหล 1 L/min จ่าย 2 หัวฉีด เข้ากล่องบรรจุทุเรียนเปล่า แล้วปิดผนึกสติกเกอร์ ซีลรอบกล่องด้วยพาราฟิล์ม จากนั้นจึงนำมา ตรวจสอบปริมาณความเข้มข้นของโอโซนในกล่องบรรจุทุเรียนฝั่งซ้ายและขวา ได้ผลการทดสอบ ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในกล่องเปล่าที่ใช้บรรจุทุเรียนเพื่อเปรียบเทียบความ สม่ำเสมอของการฉีดพ่นหัวฉีดก๊าซเข้ากล่องข้างซ้ายและขวา

Feed time (s)	O3 Concentration (ppm)								
	Side \ Box	1	2	3	4	Avg	SD	Diff. L-R	% Diff. L-R
10	L	193	206	213	196	202	9	25	11.1
	R	206	237	243	223	227	16		
30	L	566	578	-	-	572	8	58	9.1
	R	589	670	-	-	630	57		
40	L	970	1012	-	-	991	30	127	11.4
	R	1083	1153	-	-	1118	49		
40	L	1273	1153	-	-	1213	85	94	7.2
	R	1338	1275	-	-	1307	45		
50	L	1254	-	-	-	1254	-	226	15.3
	R	1480	-	-	-	1480	-		
60	L	1470	-	-	-	1470	-	196	11.8
	R	1666	-	-	-	1666	-		
70	L	1691	-	-	-	1691	-	159	8.6
	R	1850	-	-	-	1850	-		
80	L	1932	-	-	-	1932	-	175	8.3
	R	2107	-	-	-	2107	-		
150	L	2668	-	-	-	2668	-	27	1.0
	R	2641	-	-	-	2641	-		
200	L	2930	-	-	-	2930	-	27	0.9
	R	2957	-	-	-	2957	-		
250	L	2846	-	-	-	2846	-	148	4.9
	R	2994	-	-	-	2994	-		
300	L	2835	-	-	-	2835	-	194	6.4
	R	3029	-	-	-	3029	-		
Average								121	8.0

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในกล่องเปล่าที่ใช้บรรจุทุเรียนเพิ่มขึ้น ตามเวลาของการฉีดพ่นโอโซน ตั้งแต่เวลาฉีดพ่น 10 – 300 วินาที ได้ความเข้มข้นจาก 200-3,000 ppm โดยมีค่าความแตกต่างของความเข้มข้นกล่องซ้ายและขวาเฉลี่ยที่ 8% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การ ออกแบบหัวฉีดพ่นที่ยอมรับได้

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดและเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

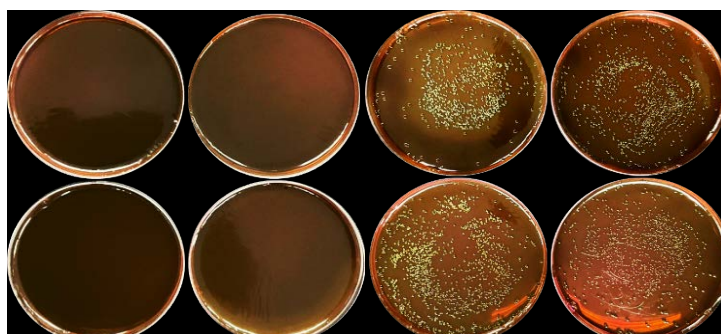
4.3.1 ประสิทธิภาพของตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในการกำจัดเชื้อ Non-pathogenic *E. coli* ในจานอาหารเลี้ยงเชื้อจำเพาะ (*in vitro* test)

จากการทดสอบประสิทธิภาพของตูรมโอโซนแบบถาด ในการกำจัดเชื้อ non-pathogenic *E. coli* โดยใช้ก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 900 ppm นาน 3 นาที พบว่าตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย โดยจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผ่านการรมก๊าซโอโซนในตู้ทุกชั้น (6 ชั้น) ไม่มีการเจริญของเชื้อ non-pathogenic *E. coli* บนหน้าอาหารจำเพาะ ในขณะที่บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (positive control) มีการเจริญของเชื้อสูงถึง 8.19 log CFU/mL (ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.50)

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในการกำจัดเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ในจานอาหารเลี้ยงเชื้อจำเพาะ

ทรีตเมนต์	Non-pathogenic <i>E. coli</i> (log CFU/mL)
ไม่รมก๊าซโอโซน (control)	8.19
รมก๊าซโอโซน ชั้นที่ 1	ND
รมก๊าซโอโซน ชั้นที่ 2	ND
รมก๊าซโอโซน ชั้นที่ 3	ND
รมก๊าซโอโซน ชั้นที่ 4	ND
รมก๊าซโอโซน ชั้นที่ 5	ND
รมก๊าซโอโซน ชั้นที่ 6	ND

หมายเหตุ ND (Not detected) หมายถึง ตรวจสอบแล้วไม่เจอเชื้อจุลินทรีย์



ก)

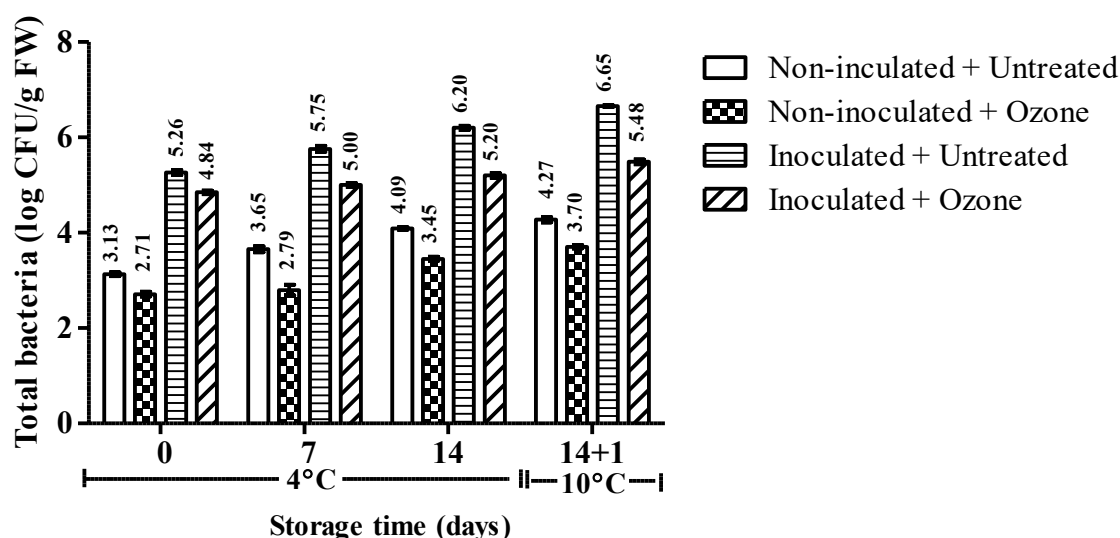
ข)

รูปที่ 4.50 การเจริญของเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ในจานอาหารเลี้ยงเชื้อจำเพาะที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (ก) เปรียบเทียบกับที่ไม่รมก๊าซโอโซน (ข)

4.3.2 ประสิทธิภาพของตูรมีก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคและผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียน

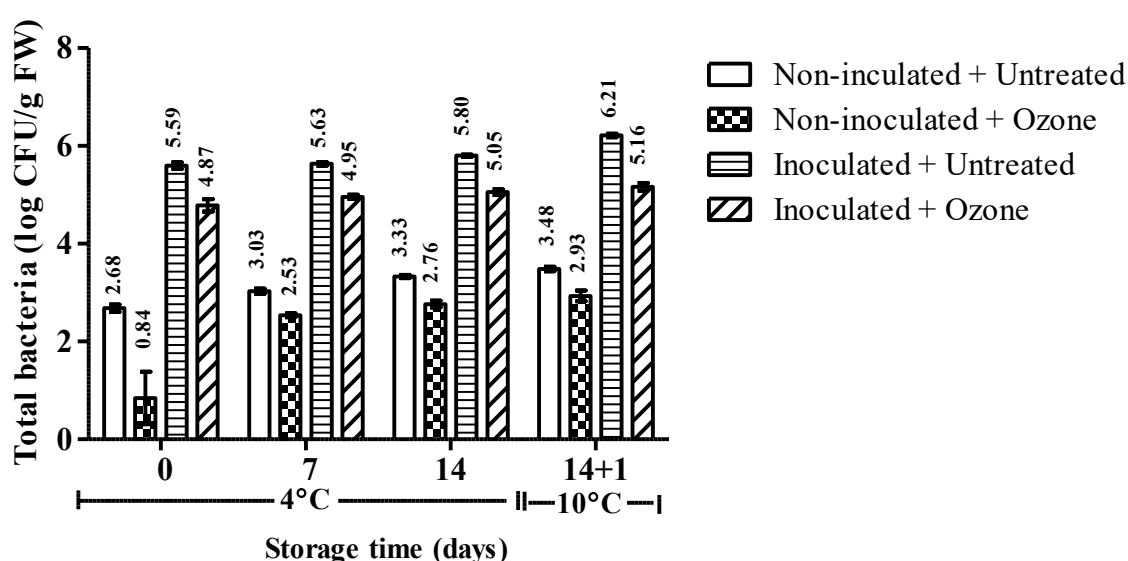
4.3.2.1 การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียทั้งหมด (Total bacteria)

เนื้อทุเรียนในส่วนสีขาว (funiculus) มีการปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria เริ่มต้น (day 0) เฉลี่ยเท่ากับ 3.13 log CFU/g FW หลังจากรมก๊าซโอโซนการปนเปื้อนลดลงเหลือ 2.71 log CFU/g FW เช่นเดียวกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ปลูกเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนการรมก๊าซโอโซนมีการปนเปื้อนเท่ากับ 5.26 log CFU/g FW หลังจากรมก๊าซโอโซนปริมาณเชื้อลดลงเหลือ 4.84 log CFU/g FW อย่างไรก็ตามในระหว่างการเก็บรักษาเชื้อ total bacteria เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเมื่อย้ายทุเรียนออกมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน (14+1 วัน) ปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยในทุเรียนที่ไม่ปลูกเชื้อมีการปนเปื้อนของเชื้อเพิ่มขึ้นเป็น 4.27 log CFU/g FW และในทุเรียนชุดที่ปลูกเชื้อปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นเป็น 6.65 log CFU/g FW และพบว่าการรมก๊าซโอโซนสามารถลดปริมาณเชื้อ total bacteria ลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้รมก๊าซโอโซน โดยสามารถลดปริมาณเชื้อลงได้สูงสุดเท่ากับ 1.17 log (รูปที่ 4.51 และตารางภาคผนวกที่ ค.1)



รูปที่ 4.51 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมีก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)

การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในส่วนของเนื้อสีเหลืองของทุเรียน ก่อนการทรีตเมนต์ (day 0) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.68 log CFU/g FW ปริมาณการปนเปื้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หลังจากการรมก๊าซโอโซน โดยปริมาณการปนเปื้อนลดลงเหลือ 0.84 log CFU/g FW เช่นเดียวกับ ทุเรียนชุดที่ปลูกเชื้อ non-pathogenic *E. coli* หลังจากรมก๊าซโอโซนการปนเปื้อนของเชื้อลดลงจาก 5.59 log CFU/g FW เหลือ 4.87 log CFU/g FW อย่างไรก็ตามปริมาณการปนเปื้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (14+1 วัน) ทุเรียนทั้งที่ไม่ปลูกและปลูกเชื้อที่ผ่านการรมก๊าซโอโซนมีการปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria น้อยกว่าทุเรียนที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน คือ 0.55 และ 1.05 log ตามลำดับ (รูปที่ 4.52 และตารางภาคผนวกที่ ค.2)



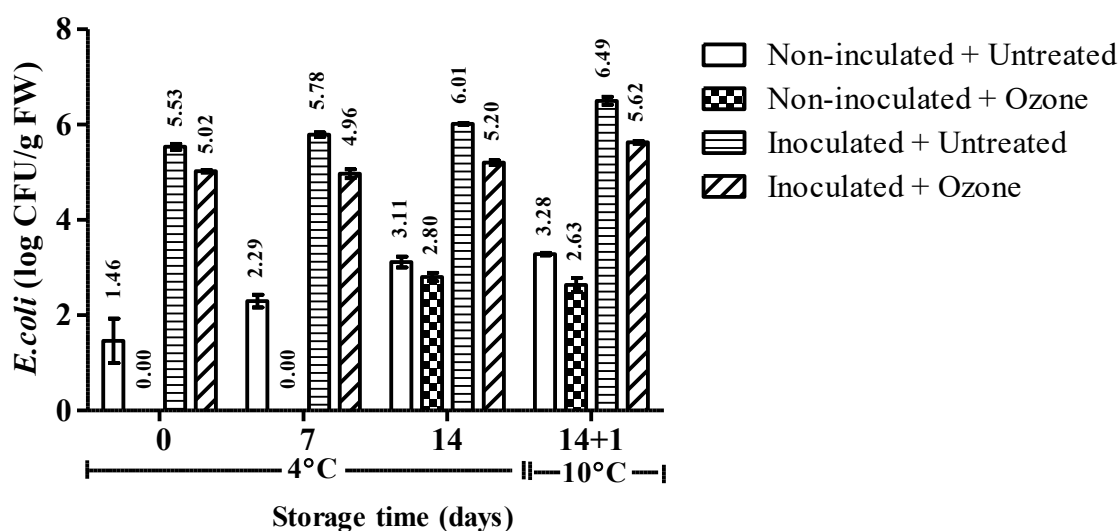
รูปที่ 4.52 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)

4.3.2.2 การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli*

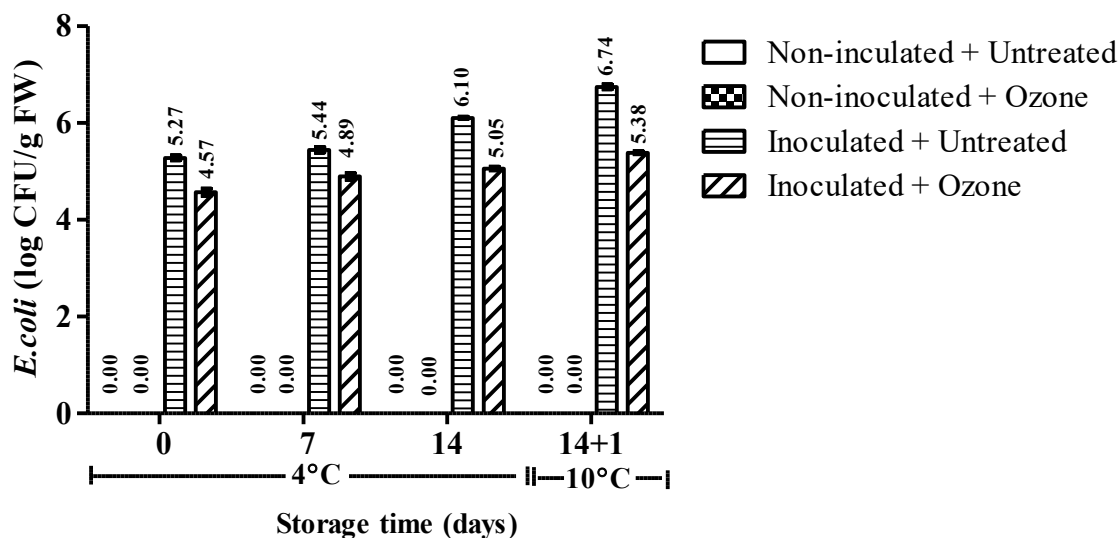
ก่อนการรมก๊าซโอโซน (day 0) ทุเรียนในชุดที่ไม่ปลูกเชื้อมีการปนเปื้อนของ *E. coli* ในส่วนของเนื้อสีขาวเท่ากับ 1.46 log CFU/g FW หลังจากการรมก๊าซโอโซนและเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ทันที ไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* เช่นเดียวกับเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน ทุเรียนในชุดควบคุมมีการปนเปื้อนของเชื้อเพิ่มขึ้นเป็น 2.29 log CFU/g FW ในขณะที่ทุเรียนชุดที่รมก๊าซโอโซนไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* แต่เมื่อเก็บรักษาทุเรียนนาน 14 วัน และ 14+1 วัน พบ

การปนเปื้อนของ *E. coli* ในทุเรียนทั้ง 2 ชุด แต่ชุดที่รมก๊าซโอโซนมีปริมาณ *E. coli* น้อยกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ 2.63 - 2.80 และ 3.11 - 3.28 log CFU/g FW ตามลำดับ สำหรับทุเรียนชุดที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน พบว่าเริ่มต้นมีปริมาณ *E. coli* เท่ากับ 5.53 log CFU/g FW หลังการรมก๊าซโอโซนปริมาณเชื้อลดลงเหลือ 5.02 log CFU/g FW หลังจากนั้นในระหว่างการเก็บรักษาปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และสูงสุดในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (day 14+1) โดยในชุดควบคุมมีการปนเปื้อนสูงถึง 6.49 log CFU/g FW ส่วนทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนมีการปนเปื้อนเท่ากับ 5.62 log CFU/g FW (รูปที่ 4.53 และตารางภาคผนวกที่ ค.3)

สำหรับเนื้อทุเรียนส่วนสีเหลือง พบว่าทุเรียนชุดที่ไม่ได้ปลูกเชื้อไม่พบการปนเปื้อนของ *E. coli* ทั้งในทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนและไม่ก๊าซรมโอโซน (control) ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ส่วนทุเรียนชุดที่ปลูกเชื้อเริ่มต้น (day 0) มีการปนเปื้อนของเชื้อเท่ากับ 5.27 log CFU/g FW หลังการรมก๊าซโอโซนปริมาณเชื้อลดลงเหลือ 4.47 log CFU/g FW ในระหว่างการเก็บรักษาการปนเปื้อนของเชื้อเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามการรมก๊าซโอโซนช่วยลดการปนเปื้อนของเชื้อลงได้สูงสุด 1.36 log เมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนที่ไม่ได้รมก๊าซโอโซน (รูปที่ 4.54 และตารางภาคผนวกที่ ค.4)



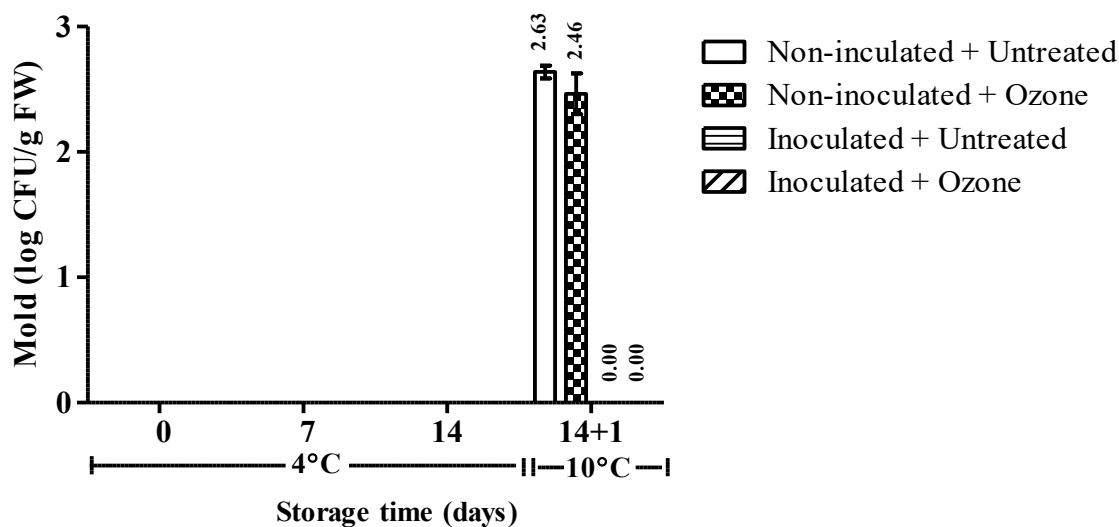
รูปที่ 4.53 การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ในเนื้อสีขาว (funiculus) ของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภาคที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภาคที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตู้รมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภาคที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภาคที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)



รูปที่ 4.54 การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

4.3.2.3 การปนเปื้อนของเชื้อรา

จากการตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อราทั้งในส่วนเนื้อสีขาวและสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาทุเรียนที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน ไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อราทั้งในทุเรียนที่รมและไม่รมก๊าซโอโซน แต่เมื่อย้ายทุเรียนมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน (day 14+1) พบการปนเปื้อนของเชื้อราในส่วนของเนื้อสีขาวของทุเรียนที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อ โดยพบในทุเรียนชุดควบคุมสูงกว่าในชุดที่รมก๊าซโอโซน คือ 2.63 และ 2.46 log CFU/g FW ตามลำดับ ส่วนเนื้อเหลืองของทุเรียนไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อราตลอดการเก็บรักษา (รูปที่ 4.55 และตารางภาคผนวกที่ ค.5)



รูปที่ 4.55 การปนเปื้อนของเชื้อราในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่พร้อมบริโคมที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่พร้อมบริโคมที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

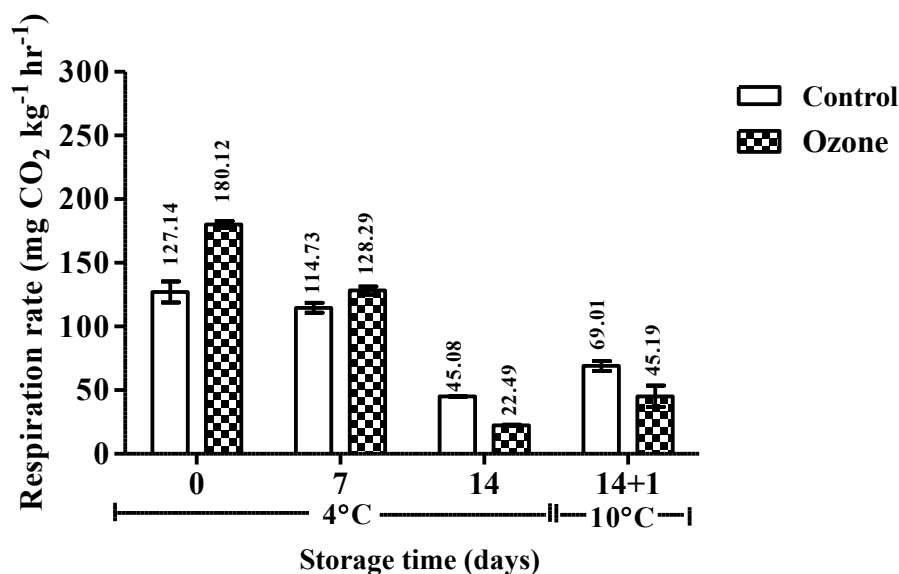
4.3.2.4 อัตราการหายใจ

ทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมมีอัตราการหายใจสูงที่สุดในวันแรก (day 0) โดยเฉพาะทุเรียนที่ผ่านการรมก๊าซโอโซนมีอัตราการสูงกว่าทุเรียนในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ 180.12 mg CO₂ kg⁻¹ hr⁻¹ และ 127.14 mg CO₂ kg⁻¹ hr⁻¹ ตามลำดับ หลังจากนั้นอัตราการหายใจมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดย 7 วันแรกของการเก็บรักษา ทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนมีอัตราการหายใจลดลงและมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับทุเรียนในชุดควบคุม คือ 128.29 และ 114.73 mg CO₂ kg⁻¹ hr⁻¹ ตามลำดับ แต่เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 14 และ 14+1 วัน ทุเรียนที่รมก๊าซโอโซน (22.49 และ 45.19 mg CO₂ kg⁻¹ hr⁻¹) มีอัตราการหายใจลดลงต่ำกว่าทุเรียนในชุดควบคุม (45.08 และ 69.01 mg CO₂ kg⁻¹ hr⁻¹) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 4.56 และตารางภาคผนวกที่ ค.6)

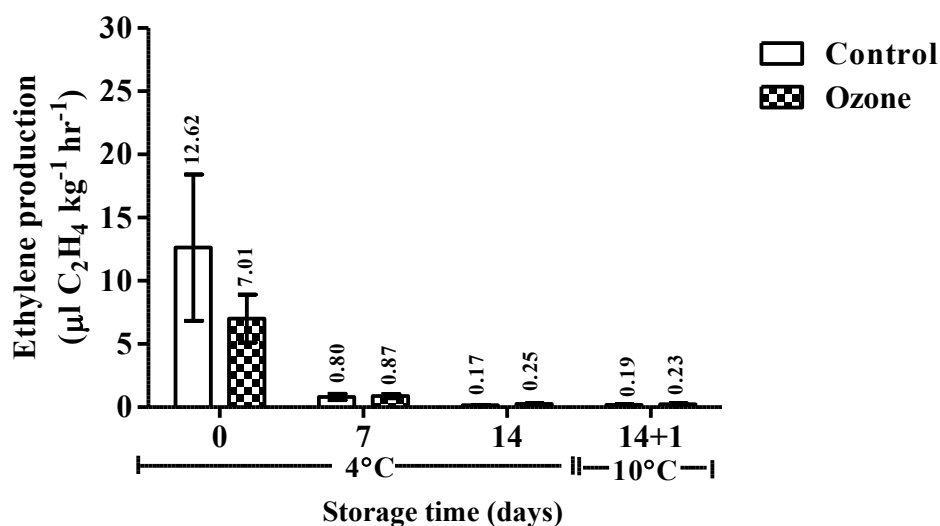
4.3.2.5 การผลิตเอทิลีน

การผลิตเอทิลีนของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมก่อนการเก็บรักษา (day 0) ทุเรียนในชุดควบคุมมีการผลิตเอทิลีนสูงถึง 12.62 μL C₂H₄ kg⁻¹ hr⁻¹ แต่เมื่อรมก๊าซโอโซนก่อนเก็บรักษา พบว่าการผลิตเอทิลีนลงเหลือ 7.01 μL C₂H₄ kg⁻¹ hr⁻¹ อย่างไรก็ตามเมื่อเก็บรักษาทุเรียนที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายออกมาเก็บที่ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน (14+1 วัน) ทุเรียน

ทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซนมีการผลิตเอทิลีนไม่แตกต่างกันทางสถิติ (รูปที่ 4.57 และตารางภาคผนวกที่ ค.6)



รูปที่ 4.56 อัตราการหายใจของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร่วมกับการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตู้รมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร่วมที่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)



รูปที่ 4.57 การผลิตเอทิลีนของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร่วมกับการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตู้รมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน

14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

4.3.2.6 การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อทุเรียนตัดแต่ง

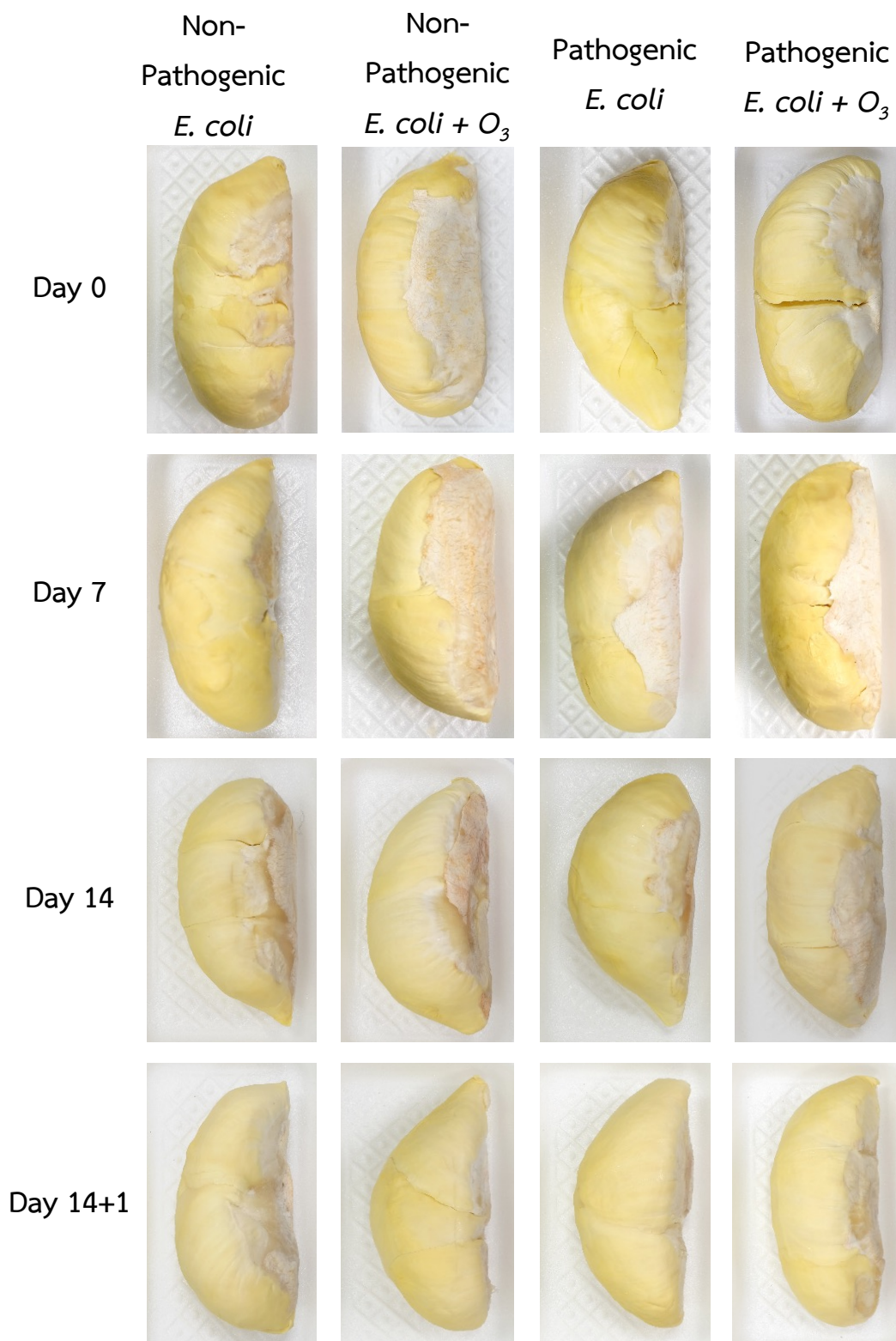
เนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) มีลักษณะและสีปกติเช่นเดียวกับเนื้อทุเรียนที่ไม่ได้รมก๊าซโอโซน (รูปที่ 4.58) ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเนื้อทุเรียนด้วยเครื่อง colorimeter และรายงานผลเป็นค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีเขียว-แดง (a^*) ค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) และ ค่าโทนสี (Hue angle) ได้ผลดังนี้

การรมก๊าซโอโซนไม่มีผลต่อค่าความสว่าง (L^*) ของเนื้อทุเรียน เนื้อทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซนมีค่าความสว่างค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา ซึ่งมีค่าความสว่างเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 84.42 – 87.04 (รูปที่ 4.59 และตารางภาคผนวกที่ ค.7)

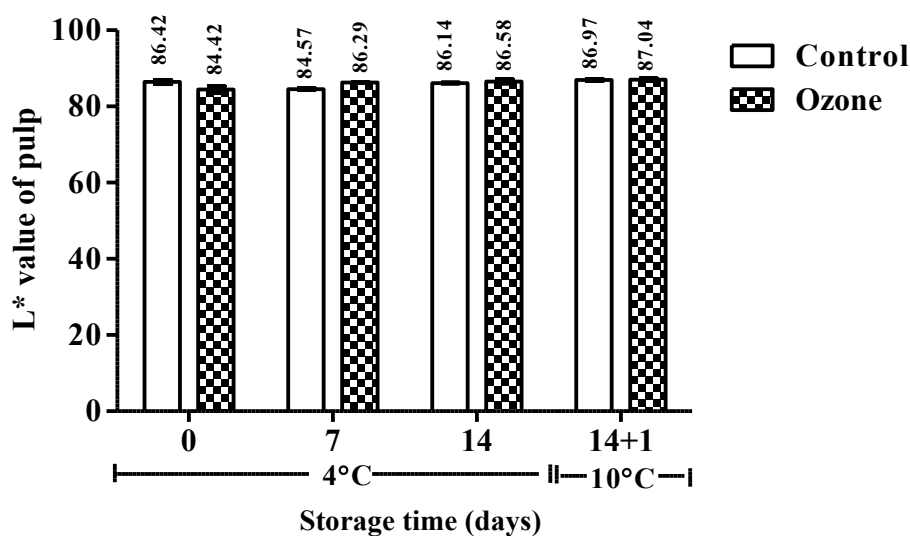
ค่า a^* หรือค่าสีที่บ่งบอกถึงเฉดสีเขียว-แดง พบว่าค่า a^* ของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น และพบว่าก๊าซโอโซนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า a^* ของเนื้อทุเรียน โดยทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคทั้งสองทรีตเมนต์มีค่า a^* เริ่มต้น (day 0) เฉลี่ยเท่ากับ -3.52 - -4.01 และในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (day 14+1) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -4.00 - -4.45 (รูปที่ 4.60 และตารางภาคผนวกที่ ค.7)

ค่า b^* หรือค่าสีที่บ่งบอกถึงเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง พบว่าค่า b^* ของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในระหว่างการเก็บรักษา ในวันแรก (day 0) และวันที่ 14 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่รมก๊าซโอโซน (46.54 และ 43.16) มีค่า b^* ค่อนข้างสูงกว่าทุเรียนในชุดควบคุม (39.96 และ 36.06) อย่างไรก็ตามเมื่อย้ายทุเรียนมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน ทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซนมีค่า b^* ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (รูปที่ 4.61 และตารางภาคผนวกที่ ค.7)

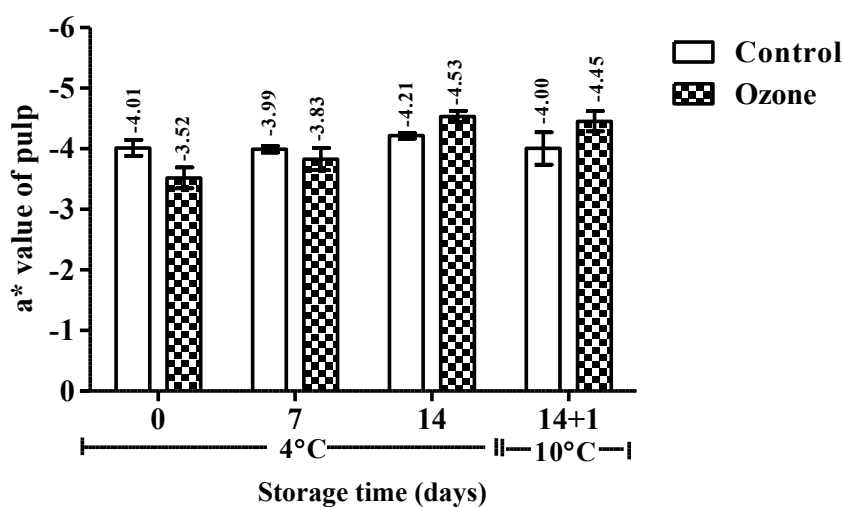
ค่า Hue angle หรือค่าโทนสีของเนื้อทุเรียน พบว่าค่า Hue angle ของเนื้อทุเรียนค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา ทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนมีค่า Hue angle ไม่แตกต่างทางสถิติกับทุเรียนในชุดควบคุม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 94.69 – 96.45 (รูปที่ 4.62 และตารางภาคผนวกที่ ค.7)



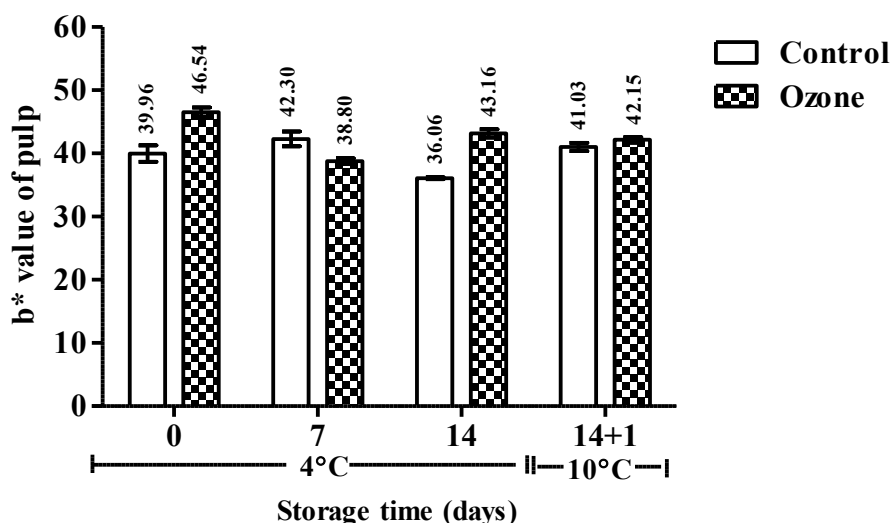
รูปที่ 4.58 ลักษณะปรากฏของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร่วมกับการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตัวรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร่วมที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)



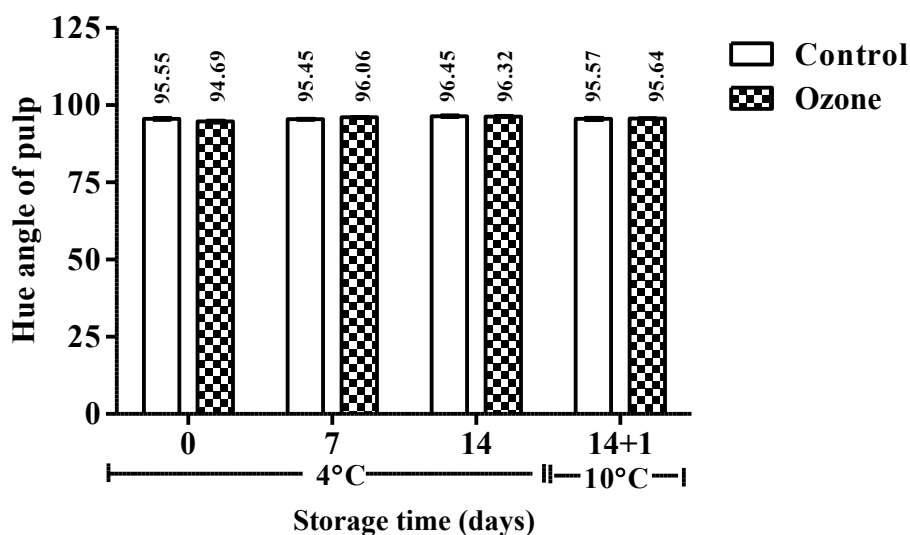
รูปที่ 4.59 การเปลี่ยนแปลงค่า L* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)



รูปที่ 4.60 การเปลี่ยนแปลงค่า a* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)



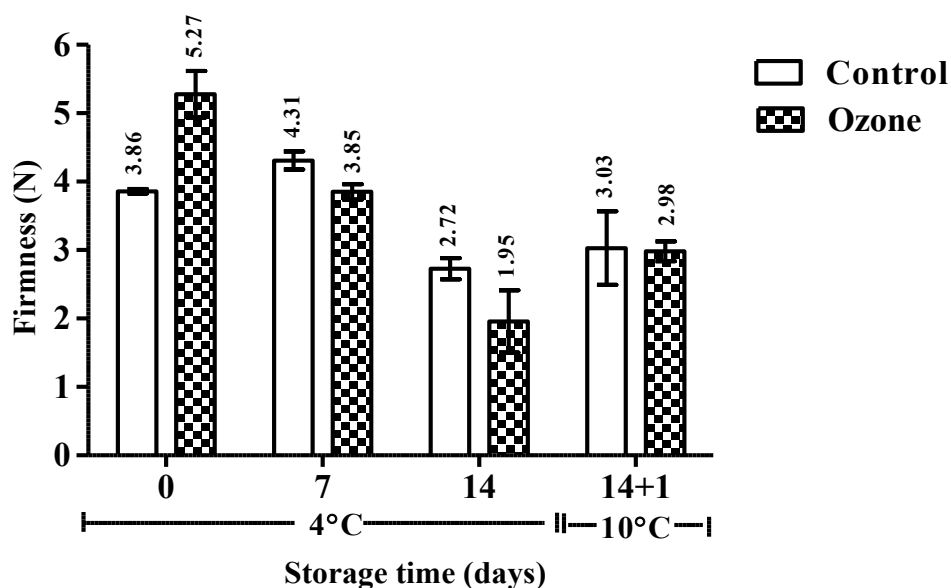
รูปที่ 4.61 การเปลี่ยนแปลงค่า b^* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)



รูปที่ 4.62 การเปลี่ยนแปลงค่า Hue angle ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

4.3.2.7 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ

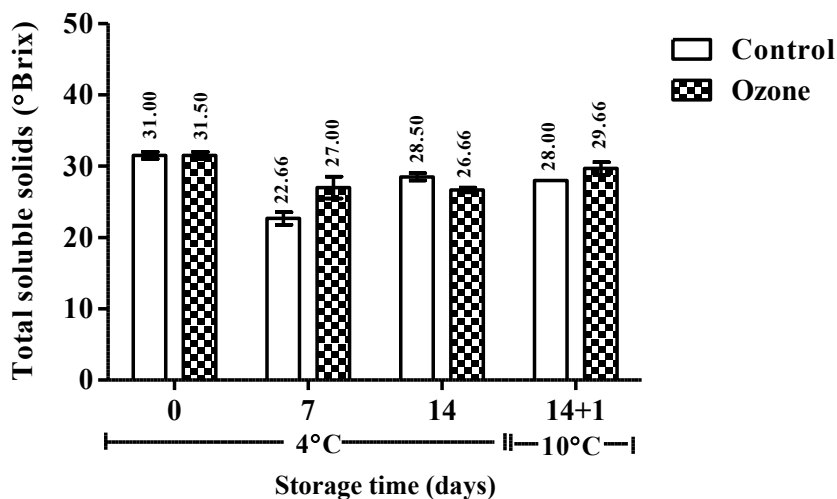
ความแน่นเนื้อของทุเรียนมีค่าลดลงในระหว่างการเก็บรักษา ทุเรียนที่ผ่านการรมก๊าซโอโซนมีค่าความแน่นเนื้อไม่แตกต่างทางสถิติกับทุเรียนในชุดควบคุม ยกเว้นในวันแรกก่อนการเก็บรักษา (day 0) พบว่าทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนมีความแน่นเนื้อมากกว่าในชุดควบคุมคือ 5.27 และ 3.86 N ตามลำดับ หลังจากนั้นทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซนมีความแน่นเนื้อลดลงและมีค่าใกล้เคียงกัน ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (day 14+1) มีความแน่นเนื้อเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.98 – 3.03 N (รูปที่ 4.63 และตารางภาคผนวกที่ ค.8)



รูปที่ 4.63 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตู้รมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

4.3.2.8 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด

การรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ไม่มีผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของเนื้อทุเรียน ทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซนมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดเริ่มต้น (day 0) เฉลี่ยเท่ากับ 31.00 – 31.05 °Brix เมื่อเก็บรักษาทุเรียนเป็นเวลา 7 วัน ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 22.66 – 27.00 °Brix หลังจากนั้นมีความคงที่จนถึงวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (14+1 วัน) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 28.00 – 29.66 °Brix (รูปที่ 4.64 และตารางภาคผนวกที่ ค.8)



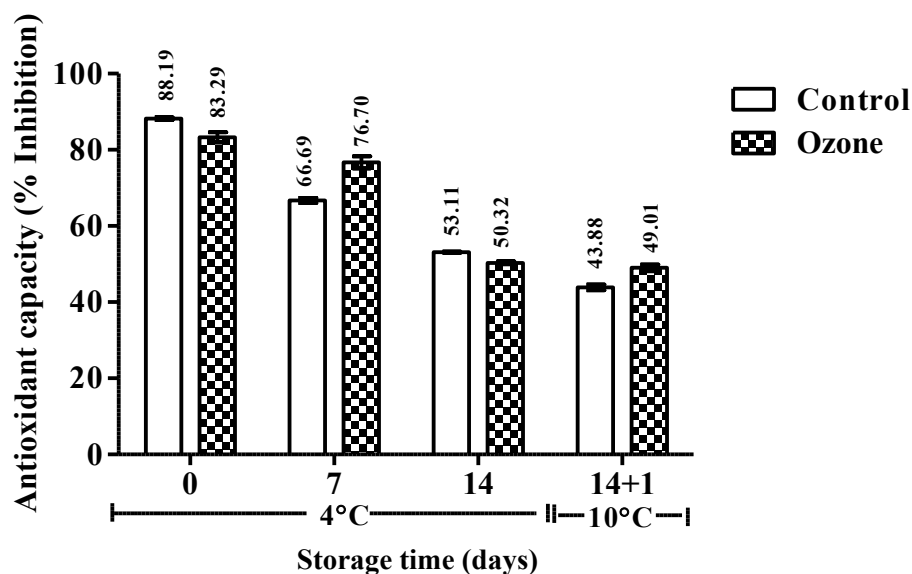
รูปที่ 4.64 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

4.3.2.9 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) โดย DPPH method

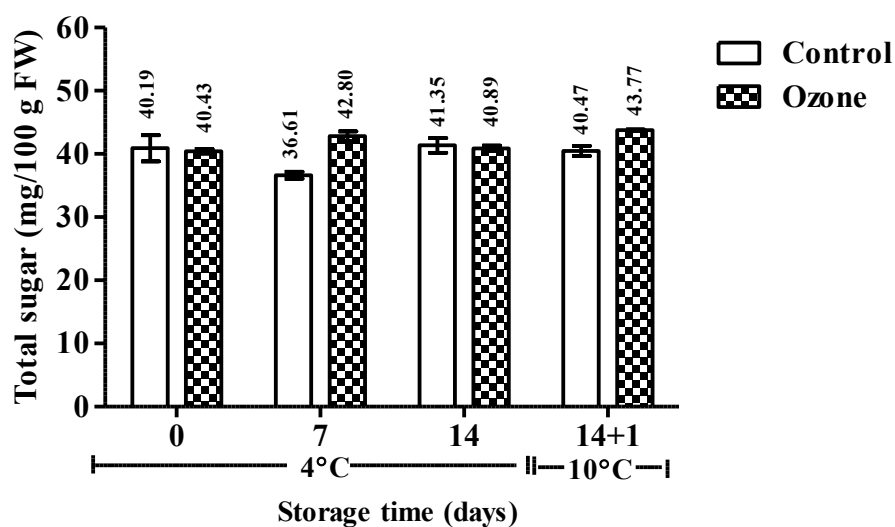
ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเก็บรักษาที่นานขึ้น และพบว่าการรมก๊าซโอโซนมีแนวโน้มชะลอการลดลงของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของเนื้อทุเรียน โดยพบว่าในวันที่ 7 และวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (day 14+1) เนื้อทุเรียนที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (76.70 และ 49.01%) มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าทุเรียนในชุดควบคุม (66.69 และ 43.88%) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 4.65 และตารางภาคผนวกที่ ค.8)

4.3.2.10 ปริมาณน้ำตาล (Total sugar)

ปริมาณน้ำตาลของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโคมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในระหว่างการเก็บรักษา และพบว่าการรมก๊าซโอโซนมีแนวโน้มทำให้ทุเรียนมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนในชุดควบคุม โดยในวันที่ 7 และวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (วันที่ 14+1) ทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนมีปริมาณน้ำตาลมากกว่าทุเรียนในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือ 42.80 และ 43.77 mg/100 g FW ในขณะที่ทุเรียนในชุดควบคุมมีปริมาณน้ำตาลเท่ากับ 36.61 และ 40.47 mg/100 g FW (รูปที่ 4.66 และตารางภาคผนวกที่ ค.8)



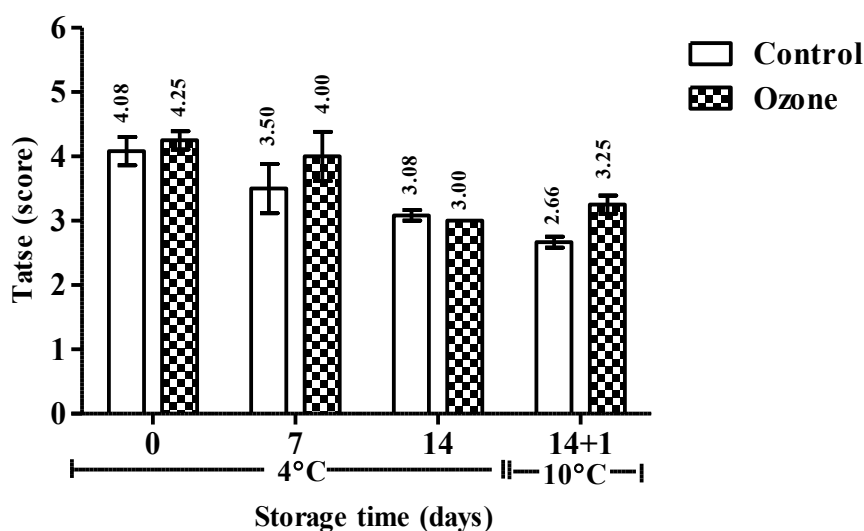
รูปที่ 4.65 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)



รูปที่ 4.66 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

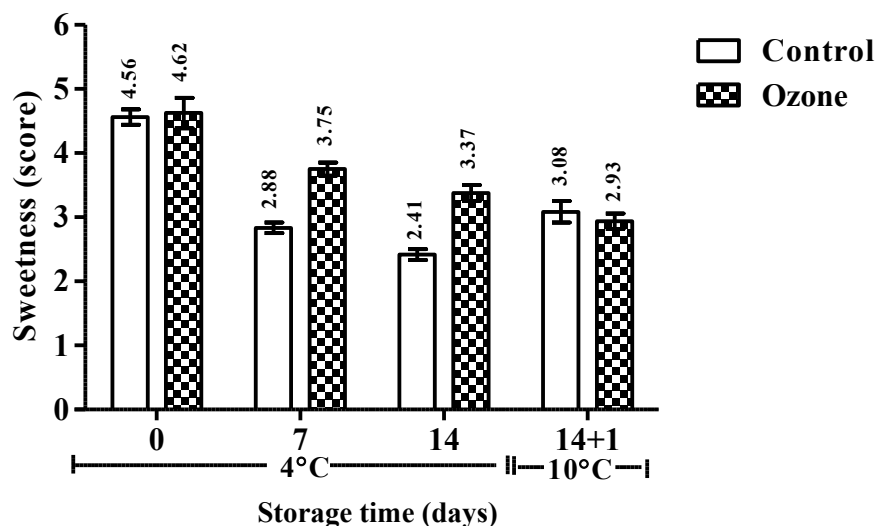
4.3.2.10 คะแนนการยอมรับด้านคุณภาพการรับประทานของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

คะแนนการยอมรับของผู้บริโภคต่อรสชาติของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาในการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน ทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซนมีคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่เมื่อย้ายทุเรียนมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน (14+1 วัน) พบว่าทุเรียนที่รมก๊าซโอโซน (3.25 คะแนน) มีคะแนนการยอมรับมากกว่าทุเรียนในชุดควบคุม (2.66 คะแนน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 4.67 และตารางภาคผนวกที่ ค.9)



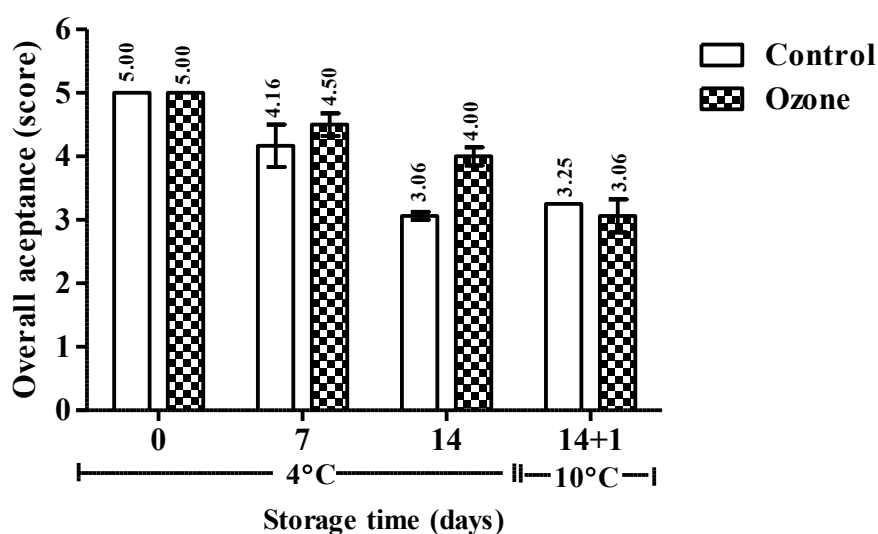
รูปที่ 4.67 คะแนนการยอมรับของผู้บริโภคด้านรสชาติของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

จากการประเมินคะแนนการยอมรับด้านความหวานของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน ทุเรียนที่ผ่านการรมก๊าซโอโซนก่อนเก็บรักษามีคะแนนความหวานสูงกว่าทุเรียนในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือ 3.37 และ 2.41 คะแนน ตามลำดับ แต่เมื่อย้ายทุเรียนออกมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน (14+1 วัน) พบว่าทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซนมีคะแนนความหวานไม่แตกต่างกันทางสถิติ คือ 2.93 และ 3.08 คะแนน ตามลำดับ (รูปที่ 4.68 และตารางภาคผนวกที่ ค.9)



รูปที่ 4.68 คะแนนการยอมรับของผู้บริโภคด้านความหวานของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

สำหรับคะแนนการยอมรับโดยรวมของผู้บริโภคต่อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรมก๊าซโอโซนก่อนเก็บรักษา พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ผู้บริโภคให้คะแนนการยอมรับโดยรวมต่อทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนสูงกว่าทุเรียนในชุดควบคุม โดยในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (day 14) มีคะแนนเท่ากับ 4.00 และ 3.06 ตามลำดับ แต่เมื่อย้ายทุเรียนมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน (day 14+1) คะแนนการยอมรับของผู้บริโภคต่อทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนลดลง และมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับทุเรียนในชุดควบคุม (รูปที่ 4.69 และตารางภาคผนวกที่ ค.9)



รูปที่ 4.69 คะแนนการยอมรับโดยรวมของผู้บริโภคต่อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่

อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

4.3.2.11 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่องทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคหลังการรมก๊าซโอโซน

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่องทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค หลังจากการรมก๊าซโอโซนแล้วทำการตรวจวิเคราะห์ทันที (ชั่วโมงที่ 0) พบว่าตรวจไม่พบก๊าซโอโซนภายในกล่อง เช่นเดียวกับเมื่อตรวจวิเคราะห์ที่ชั่วโมงอื่น ๆ

4.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอากาศภายในห้อง high care and clean room ที่วางตู้รมก๊าซโอโซน

จากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอากาศภายในห้องที่วางตู้รมก๊าซโอโซนที่ใช้ในการรมทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค พบว่ามีการปนเปื้อนของยีสต์และเชื้อราเฉลี่ยเท่ากับ 5.99 CFU/dm²/hr และเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 3.60 CFU/dm²/hr ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าดัชนีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในอากาศ (Index of Microbial Air Contamination, IMA) พบว่าคุณภาพอากาศภายในห้องอยู่ในระดับดีมาก (ตารางที่ 4.6) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอากาศภายในห้องตัดแต่งผลไม้ของบริษัท พบว่ามีการปนเปื้อนของยีสต์และเชื้อราเฉลี่ยเท่ากับ 10.87 CFU/dm²/hr และเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 8.65 CFU/dm²/hr เมื่อนำปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่พบเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศ พบว่าคุณภาพอากาศภายในห้องตัดแต่งผลไม้ของบริษัทอยู่ในเกณฑ์ระดับดี (ตารางที่ 4.7)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณยีสต์และเชื้อรา (Yeast and Molds) และแบคทีเรียทั้งหมด (Total bacteria) ที่ปนเปื้อนในอากาศภายในห้อง high care and clean room ที่วางตู้รวมก๊าซโอโซน

Position in fresh cut room	Yeast and Molds (CFU/dm ² /hr) in air	Total bacteria count (CFU/dm ² /hr) in air
1	7.81 ^{ab}	4.68 ^{ab}
2	5.73 ^{bc}	2.60 ^b
3	2.60 ^b	2.60 ^b
4	5.21 ^{bc}	5.21 ^{ab}
5	8.85 ^a	2.60 ^b
6	6.25 ^{bc}	4.17 ^{ab}
7	4.69 ^c	2.60 ^b
8	7.29 ^{abc}	2.60 ^b
9	4.69 ^c	3.13 ^{ab}
10	5.73 ^{bc}	3.13 ^{ab}
11	4.69 ^c	6.25 ^a
12	5.21 ^{bc}	4.16 ^{ab}
$\bar{x}$	5.99	3.60
T-test	*	*
C.V. (%)	23.00	46.29

ตารางที่ 4.7 ปริมาณยีสต์และเชื้อรา (Yeast and Molds) และแบคทีเรียทั้งหมด (Total bacteria) ที่ปนเปื้อนในอากาศภายในห้อง high care and clean room ของบริษัท

Position in fresh cut room	Yeast and Molds (CFU/dm ² /hr) in air	Total bacteria count (CFU/dm ² /hr) in air
	Fresh-cut room	Fresh-cut room
1	21.88 ^a	7.81 ^{bc}
2	13.54 ^{bcd}	5.73 ^{bc}
3	13.02 ^{bcd}	6.77 ^{bc}
4	8.33 ^{de}	3.13 ^{bc}
5	7.81 ^{de}	3.65 ^{bc}
6	9.38 ^{cde}	10.42 ^{bc}
7	5.21 ^e	7.30 ^{bc}
8	4.69 ^e	6.77 ^{bc}
9	7.81 ^{de}	3.65 ^{bc}
10	5.21 ^e	4.69 ^{bc}
11	15.10 ^{bc}	11.98 ^b
12	15.63 ^{bc}	11.98 ^b
13	17.19 ^{ab}	22.40 ^a
14	9.90 ^{cde}	12.50 ^b
15	8.33 ^{de}	10.94 ^{bc}
$\bar{x}$	10.87	8.65
T-test	**	*
C.V. (%)	31.86	46.51

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) ในการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคและผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

กิจกรรมที่ 4.4a การวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่องทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค หลังการรมก๊าซโอโซน (กิจกรรมนี้ทำเพิ่มเติม โดยไม่ได้ระบุในข้อเสนอโครงการ)

ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่อง clamshell ที่ไม่มีทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค หลังฉีดก๊าซโอโซนเข้ากล่องนาน 10 15 และ 20 วินาที จากนั้นทำการวัดความเข้มข้นของก๊าซโอโซนทันที พบว่ามีค่าเฉลี่ยของก๊าซโอโซนเท่ากับ 1,420.50 2,426.07 และ 3,613.88 ppm และเมื่อนำทุเรียนมาบรรจุใส่ในกล่อง clamshell ปิดผนึกและฉีดก๊าซโอโซนเข้าในกล่องเป็นเวลา 10 15 และ 20 วินาที พบว่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่องมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 201.5 986.5 และ 1,281.5 ppm หรือลดลง 7.01 2.46 และ 2.82 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซโอโซนในกล่องเปล่า (กล่องที่ไม่ได้บรรจุทุเรียน) (ตารางที่ 4.8) แสดงให้เห็นว่าเนื้อทุเรียนอาจจะดูดซับก๊าซโอโซนไว้ ทำให้ปริมาณก๊าซโอโซนในกล่องบรรจุทุเรียนมีค่าลดลงมาก และเมื่อพิจารณาระยะเวลาในการฉีดก๊าซโอโซนใส่ในกล่องทุเรียนเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนมากกว่าหรือเท่ากับ 900 ppm (ในรายงานปีที่ 1 พบว่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์คือ 900 ppm) คือ 15 และ 20 วินาที ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบต่อไปว่า ก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 986.5 และ 1,281.5 ppm หรือระยะเวลาที่ต้องใช้ในการฉีดก๊าซคือ 15 และ 20 วินาที (ตารางที่ 4.8) จะสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนได้หรือไม่ และจะมีผลทำให้เนื้อทุเรียนเกิดความเสียหายหรือไม่ต่อไป

ตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนภายในกล่อง clamshell ที่มีและไม่มีทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค หลังฉีดก๊าซโอโซนเข้ากล่องนาน 10 15 และ 20 วินาที โดยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนกึ่งอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดล 2)

Treatment	Ozone (ppm) in clamshell (right)	Ozone (ppm) in clamshell (left)	Average Ozone (ppm)
กล่องเปล่า			
Ozone-10sec (empty box)	1,569.17	1,271.83	1,420.50
Ozone-15sec (empty box)	2,397.57	2,454.57	2,426.07
Ozone-20sec (empty box)	3,531.75	3,696.00	3,613.88
กล่องมีทุเรียน			
Ozone-10sec (Durian in box)	235	168	201.5
Ozone-15sec (Durian in box)	913	1,060	986.5
Ozone-20sec (Durian in box)	1,340	1,223	1,281.5

หมายเหตุ: แต่ละ treatment มี 4 ซ้ำ

กิจกรรมที่ 4.4b การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) ในการกำจัดเชื้อ Non-pathogenic *E. coli* และ total bacteria ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (กิจกรรมนี้ทำเพิ่มเติม โดยไม่ได้ระบุในข้อเสนอโครงการ)

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว ในการกำจัดเชื้อ non-pathogenic *E. coli* และ total bacteria ในสภาพ *in vitro* ทำโดยนำเชื้อ non-pathogenic *E. coli* และ total bacteria มาเกลี่ยลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ EMB และ PCA และนำจานอาหารเลี้ยงเชื้อไปใส่ในกล่องทุเรียน ปิดผนึกให้สนิท จากนั้นทำการฉีดก๊าซโอโซนใส่ในกล่องนาน 10 15 และ 20 วินาที พบว่าการฉีดก๊าซโอโซนนาน 10 15 และ 20 วินาที มีผลทำให้เชื้อ non-pathogenic *E. coli* ลดลง 6.88 7.18 และ 7.23 log reduction และมีผลทำให้ total bacteria ลดลง 5.06 4.85 และ 5.19 log reduction ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระยะเวลาในการที่เชื้อได้รับก๊าซโอโซน (10-20 วินาที) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.9) แต่พบว่าการให้ก๊าซโอโซนที่นาน 20 วินาที สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว (โมเดลที่ 2) ในการกำจัดเชื้อ non-pathogenic *E. coli* และ total bacteria

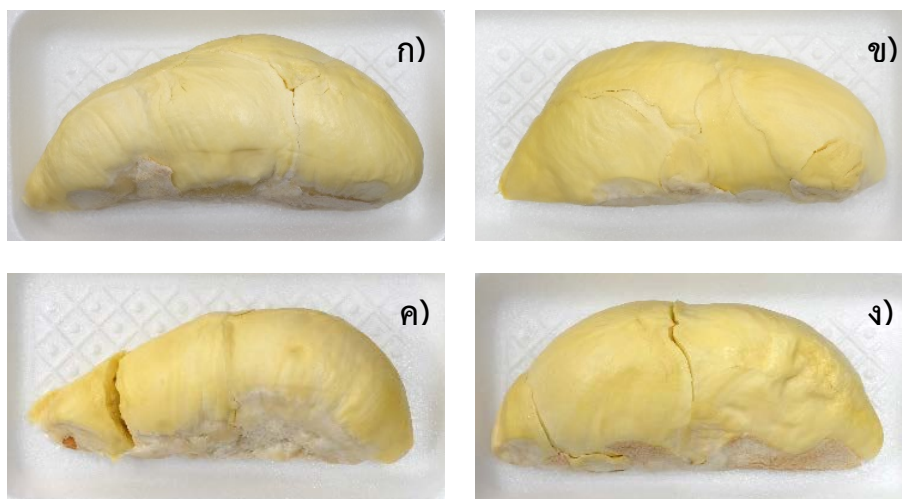
Treatment	Log CFU/ml		Log reduction	
	Non-pathogenic <i>E. coli</i>	Total bacteria	Non-pathogenic <i>E. coli</i>	Total bacteria
Control	8.71a	8.60a	0.00	0.00
Ozone-10 sec	1.83b	3.54b	6.88	5.06
Ozone-15 sec	1.52b	3.75b	7.18	4.85
Ozone-20 sec	1.47b	3.41b	7.23	5.19

กิจกรรมที่ 4.4c การทดสอบเบื้องต้น ประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว (โมเดลที่ 2) ในการลดการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ปลูกด้วยเชื้อ Non-pathogenic *E. coli* และลักษณะปรากฏของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (กิจกรรมนี้ทำเพิ่มเติม โดยไม่ได้ระบุในข้อเสนอโครงการ)

จากผลการศึกษาในปี 2564 พบว่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่เหมาะสมในการรมเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคเพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ คือ 900 ppm ซึ่งการศึกษาในครั้งนั้นใช้เครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในระดับห้องปฏิบัติการ (Gastec ozone gas detector, Japan) ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้กับการวัดค่าโอโซนในเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติได้ ผู้วิจัยจึงเปลี่ยนเป็นมาใช้เครื่องวัดก๊าซโอโซนรุ่น WASP-XM-E-O3-5000 ppm (Hunan Gri Instrument Co. Ltd., China) ที่สามารถวัดความเข้มข้นของก๊าซโอโซนได้สูงสุด 5,000 ppm ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดสอบว่า ก๊าซโอโซนฉีดลงในกล่องทุเรียน เป็นเวลา 10 15 และ 20 วินาที (ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนเฉลี่ยเท่ากับ 201.5 986.5 และ 1,281.5 ppm) สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์บนเนื้อทุเรียนได้หรือไม่ และเนื้อทุเรียนที่ได้รับก๊าซโอโซน เป็นเวลา 10 15 และ 20 วินาที นี้จะเกิดความเสียหายของเนื้อเยื่อหรือไม่

ผลการทดสอบเบื้องต้นนี้ พบว่าการฉีดก๊าซโอโซนลงในกล่องทุเรียนที่ทำแผลและปลูกเชื้อ non-pathogenic *E. coli* บริเวณเนื้อเยื่อสีขาวและเนื้อเยื่อสีเหลือง เป็นเวลา 10 15 และ 20 วินาที ไม่มีผลทำให้เนื้อทุเรียนได้รับความเสียหาย (รูปที่ 4.70) และเมื่อพิจารณาผลของการให้ก๊าซโอโซนนาน พบว่า ภายหลังจากการรมโอโซน (วันที่ 0) ปริมาณเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ที่ปนเปื้อนบริเวณเนื้อเยื่อสีขาวและเนื้อเยื่อสีเหลือง ลดลง 3.63 – 3.89 log CFU และ 1.89 – 2.06 log CFU ตามลำดับ และเมื่อเก็บรักษาเนื้อทุเรียนไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน พบว่า ปริมาณเชื้อ *E. coli* ที่ปนเปื้อนบริเวณเนื้อเยื่อสีขาวและเนื้อเยื่อสีเหลือง ลดลง 2.90 – 2.92 log CFU และ 3.01 – 3.59 log CFU ตามลำดับ (ตารางที่ 4.10) ดังนั้นในการทดลองนี้จึงพิจารณาเลือกระยะเวลาในการฉีดก๊าซ

โอโซนใส่ในกล่อง Clamshell เท่ากับ 20 วินาที เนื่องจากในสภาพการปฏิบัติงานจริงในโรงงาน อาจมีการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์มีสูงกว่าการทดสอบในห้องทดลอง



รูปที่ 4.70 ลักษณะปรากฏของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่รมก๊าซโอโซนด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) โดยฉีดก๊าซโอโซนลงในกล่องทุเรียน นาน 0 (ก) 10 (ข) 15 (ค) และ 20 (ง) วินาที และเก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน (การทดสอบเบื้องต้น)

ตารางที่ 4.10 การทดสอบเบื้องต้น ประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว (โมเดลที่ 2) ในการลดการปนเปื้อนเชื้อในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ปลูกด้วยเชื้อ Non-pathogenic *E. coli* โดยวิเคราะห์ปริมาณเชื้อภายหลังการรมก๊าซโอโซนทันที (day 0) และหลังจากเก็บเนื้อทุเรียนไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน

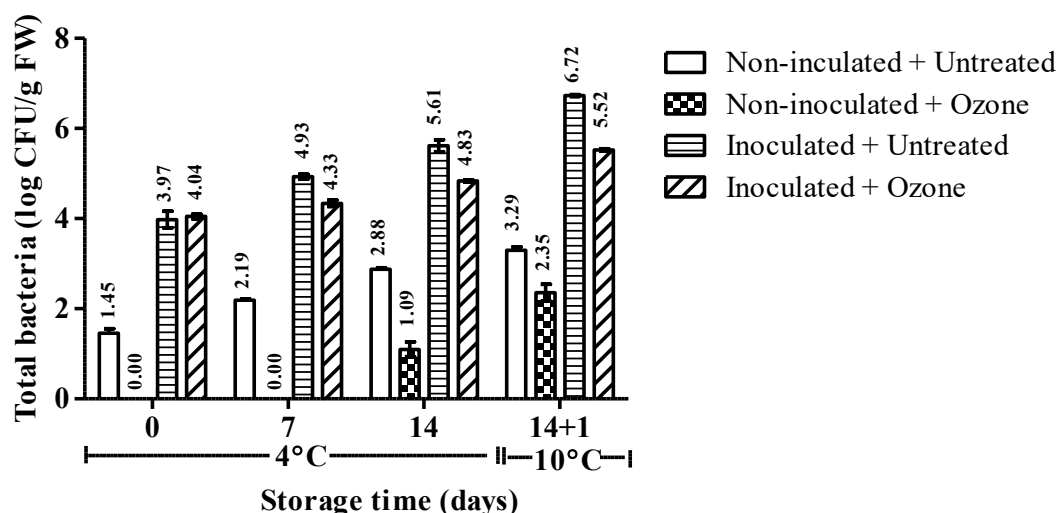
	Treatment	<i>E. coli</i>		
		CFU/g	Log CFU	Log reduction
เนื้อเยื่อสีขาว (day 0)	Original	5.16×10^8	8.71a	0
	Ozone-10 sec	1.10×10^5	5.04b	3.67
	Ozone-15 sec	1.20×10^5	5.08b	3.63
	Ozone-20 sec	6.67×10^4	4.82b	3.89
เนื้อสีเหลือง (day 0)	Original	5.16×10^8	8.71a	0
	Ozone-10 sec	6.60×10^6	6.82b	1.89
	Ozone-15 sec	4.50×10^6	6.65b	2.06
	Ozone-20 sec	4.73×10^6	6.67b	2.04
เนื้อเยื่อสีขาว (day 7)	Original	5.16×10^8	8.71a	0
	Ozone-10 sec	6.50×10^5	5.81b	2.90
	Ozone-15 sec	6.20×10^5	5.79b	2.92
	Ozone-20 sec	6.30×10^5	5.80b	2.91
เนื้อสีเหลือง (day 7)	Original	5.16×10^8	8.71a	0
	Ozone-10 sec	1.50×10^5	5.18b	3.53
	Ozone-15 sec	5.00×10^5	5.70b	3.01
	Ozone-20 sec	1.70×10^5	5.23b	3.48

กิจกรรมที่ 4.4d การทดสอบทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุกัญหัดเดียว (โมเดลที่ 2) ในการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

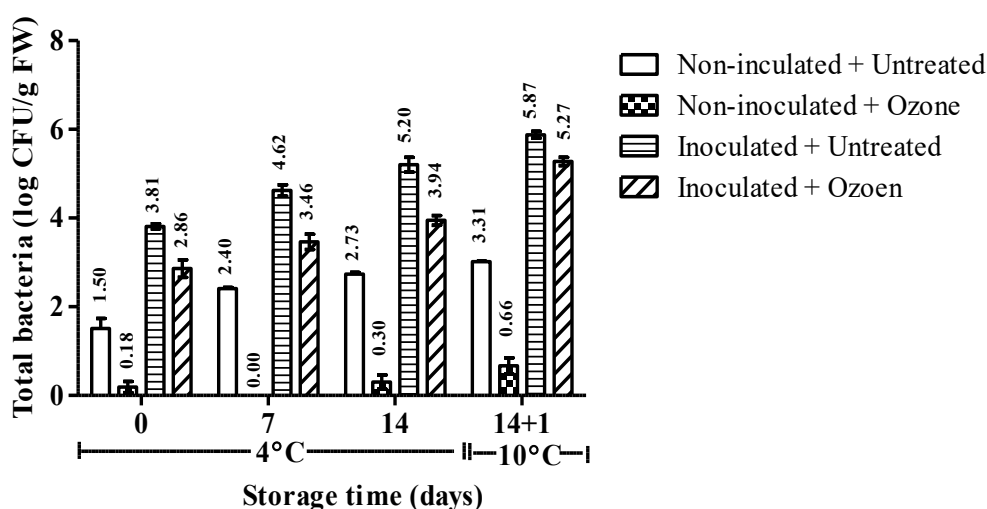
4.4.1 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria

เนื้อสีขาวของทุเรียนในชุดที่ไม่ได้รมก๊าซโอโซนมีการปนเปื้อนของเชื้อเริ่มต้น (day 0) เท่ากับ $1.45 \log \text{CFU/g FW}$ และเมื่อเก็บรักษาทุเรียนเป็นเวลา 7 วัน ปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นเป็น $2.19 \log \text{CFU/g FW}$ ในขณะที่ทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนตรวจไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อในระหว่างการเก็บรักษานาน 7 วัน อย่างไรก็ตามในวันที่ 14 และ 14+1 ตรวจพบการปนเปื้อนของเชื้อในทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซน แต่การปนเปื้อนของเชื้อในทุเรียนที่รมก๊าซโอโซน (1.09 และ $2.35 \log \text{CFU/g FW}$) มีปริมาณน้อยกว่าในชุดควบคุม (2.88 และ $3.29 \log \text{CFU/g FW}$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับทุเรียนชุดที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* พบว่าการรมก๊าซโอโซนสามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อลงได้ประมาณ $0.60 - 1.20 \log$ เมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนในชุดควบคุม โดยวันแรกของการเก็บรักษาทุเรียนทั้งที่รมและไม่ได้รมก๊าซโอโซน (ชุดควบคุม) มีการปนเปื้อนของเชื้อไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่หลังจากนั้นทุเรียนในชุดที่รมก๊าซโอโซนมีการปนเปื้อนของเชื้อน้อยกว่าในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยวันสุดท้าย (วันที่ 14+1) ของการเก็บรักษาพบการปนเปื้อนของเชื้อในทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนเท่ากับ $5.52 \log \text{CFU/g FW}$ ส่วนทุเรียนในชุดควบคุมมีการปนเปื้อนของเชื้อเท่ากับ $6.72 \log \text{CFU/g FW}$ (รูปที่ 4.71 และตารางภาคผนวกที่ ค.10)

สำหรับในส่วนของเนื้อสีเหลือง ทุเรียนในชุดควบคุมพบการปนเปื้อนของเชื้อในวันแรกเท่ากับ $1.50 \log \text{CFU/g FW}$ หลังจากนั้นปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น วันสุดท้ายของการเก็บรักษามีปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นเป็น $3.31 \log \text{CFU/g FW}$ ส่วนทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนในวันแรกพบเชื้อเพียง $0.18 \log \text{CFU/g FW}$ และปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในระหว่างการเก็บรักษา ในวันสุดท้าย (day 14+1) พบเชื้อเท่ากับ $0.66 \log \text{CFU/g FW}$ เช่นเดียวกับทุเรียนในชุดที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนการรมก๊าซโอโซนพบการปนเปื้อนของเชื้อเท่ากับ $3.81 \log \text{CFU/g FW}$ หลังจากการรมก๊าซโอโซนเชื้อลดลงเหลือเท่ากับ $2.86 \log \text{CFU/g FW}$ และในระหว่างการเก็บรักษาทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนมีการปนเปื้อนของเชื้อน้อยกว่าทุเรียนในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 4.72 และตารางภาคผนวกที่ ค.11)



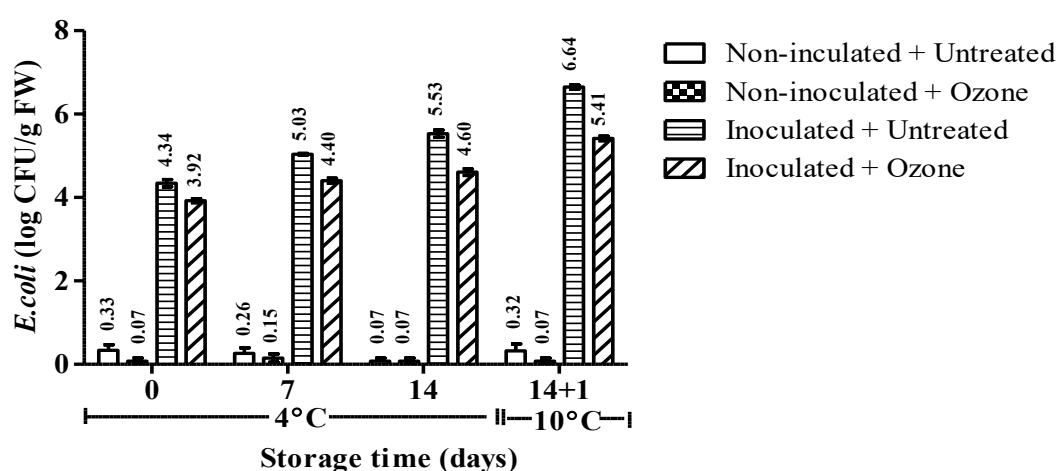
รูปที่ 4.71 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน ด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)



รูปที่ 4.72 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซนด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

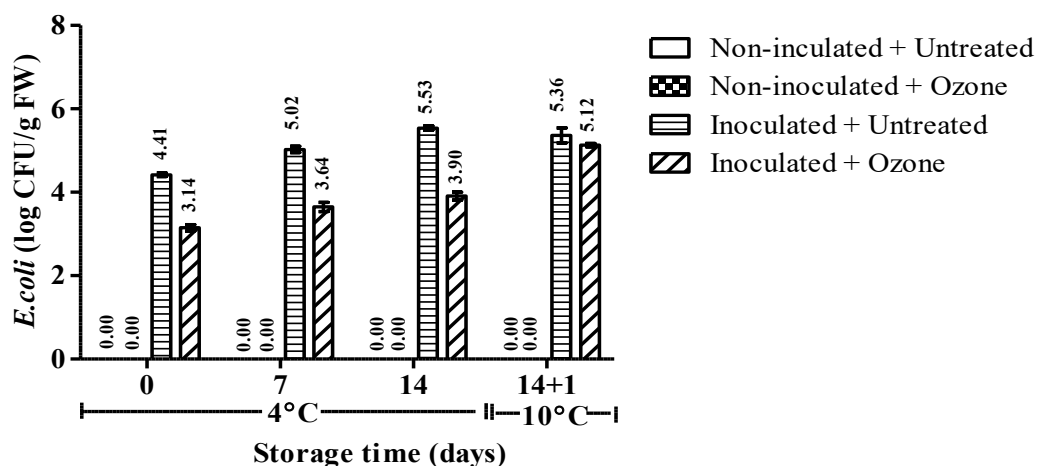
4.4.2 การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli*

ทุเรียนทั้งในส่วนของเนื้อสีขาวและสีเหลืองที่ไม่ผ่านการปลุกถ่ายเชื้อพบการปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* น้อยมาก โดยในส่วนของเนื้อสีขาวมีการปนเปื้อนเฉลี่ยเพียง 0.07 – 0.33 log CFU/g FW ส่วนทุเรียนในชุดที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* เริ่มต้น (day 0) พบการปนเปื้อนของเชื้อเท่ากับ 4.34 log CFU/g FW หลังจากรมก๊าซโอโซนปริมาณเชื้อลดลงเหลือ 3.92 log CFU/g FW หลังจากนั้นในระหว่างการเก็บรักษาปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยวันสุดท้าย (วันที่ 14+1) ทุเรียนในชุดควบคุมมีการปนเปื้อนของเชื้อเท่ากับ 6.64 log CFU/g FW ในขณะที่ทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนมีการปนเปื้อนเพียง 5.41 log CFU/g FW (รูปที่ 4.73 และตารางภาคผนวกที่ ค.12)



รูปที่ 4.73 การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมกับทุเรียนที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซนด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมกับทุเรียนที่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมกับทุเรียนที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

สำหรับเนื้อสีเหลืองของทุเรียนที่ไม่ผ่านการปลุกถ่ายเชื้อ ตรวจไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ตลอดระยะเวลาของการเก็บรักษา ส่วนทุเรียนชุดที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* พบการปนเปื้อนของเชื้อเริ่มต้น (day 0) เท่ากับ 4.41 log CFU/g FW และปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยวันสุดท้ายของการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นเป็น 5.36 log CFU/g FW สำหรับทุเรียนที่ผ่านการรมก๊าซโอโซนสามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งช่วยลดการปนเปื้อนของเชื้อลงได้เฉลี่ยประมาณ 0.50 - 1.62 log (รูปที่ 4.74 และตารางภาคผนวกที่ ค.13)



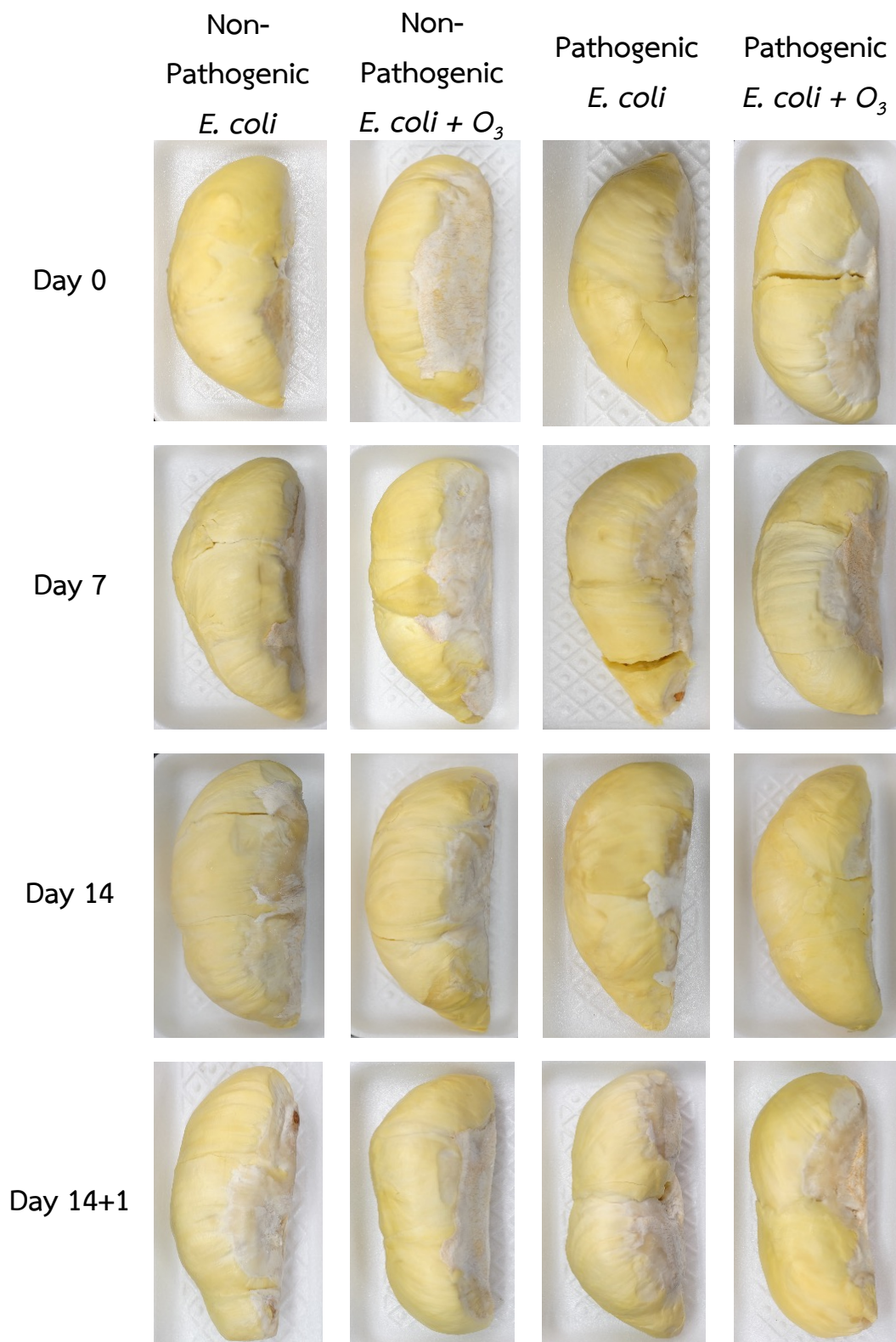
รูปที่ 4.74 การปนเปื้อนของ *E. coli* ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อ และทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมก๊าซโอโซน ด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

4.4.3 การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์

ลักษณะเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบรรจุภัณฑ์ที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) มีลักษณะและสีปกติเช่นเดียวกับเนื้อทุเรียนที่ไม่ได้รมก๊าซโอโซน (รูปที่ 4.75) ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเนื้อทุเรียนด้วยเครื่อง colorimeter และรายงานผลเป็นค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีเขียว-แดง (a^*) ค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) และ ค่าโทนสี (Hue angle) ได้ผลดังนี้

ค่า L^* หรือค่าความสว่างของเนื้อทุเรียนมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา และพบว่าการรมก๊าซโอโซนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L^* ของเนื้อทุเรียนเมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนในชุดควบคุมที่ไม่รมก๊าซโอโซน โดยเนื้อทุเรียนมีค่า L^* เฉลี่ยอยู่ในช่วง 86.06 – 87.73 (รูปที่ 4.76 และตารางภาคผนวกที่ ค.14)

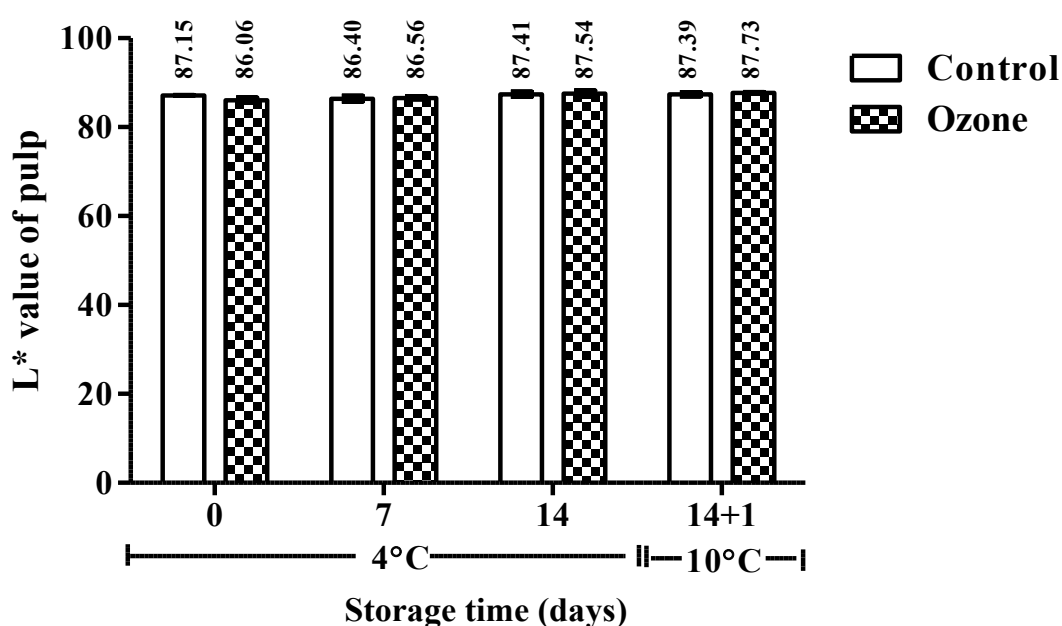
ค่า a^* หรือค่าสีแดงของเนื้อทุเรียนมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในระหว่างการเก็บรักษา และพบว่าทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซนมีค่า a^* ใกล้เคียงกันและมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง -4.47 - -5.53 (รูปที่ 4.77และตารางภาคผนวกที่ ค.14)



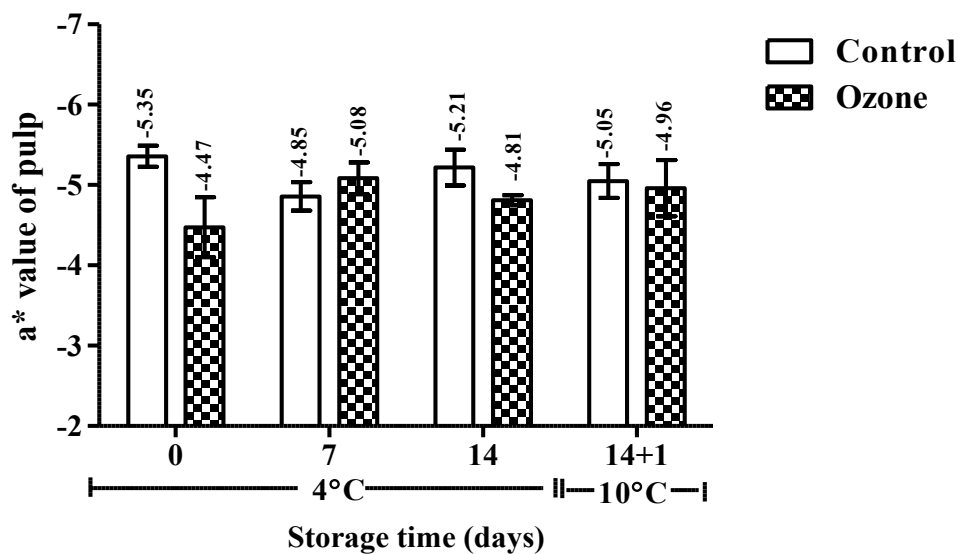
รูปที่ 4.75 ลักษณะเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร่วมกับผลไม้ที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซน แบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร่วมกับผลไม้ที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

ค่า b^* หรือค่าสีเหลืองของเนื้อทุเรียนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น การรมก๊าซโอโซนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า b^* ของเนื้อทุเรียนเมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนในชุดควบคุม โดยวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (วันที่ 14+1) ทุเรียนในชุดควบคุมและทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนมีค่า b^* เท่ากับ 39.75 และ 40.43 ตามลำดับ (รูปที่ 4.78 และตารางภาคผนวกที่ ค.14)

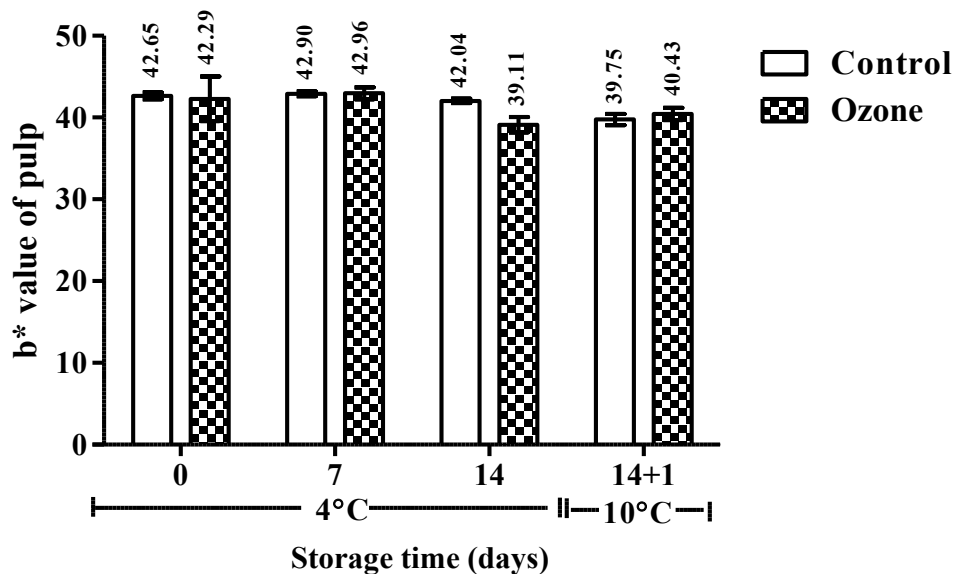
ค่า Hue angle หรือค่าโทนสีของเนื้อทุเรียนค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา และพบว่าทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซนมีค่า Hue angle ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 96.39 – 97.76 (รูปที่ 4.79 และตารางภาคผนวกที่ ค.14)



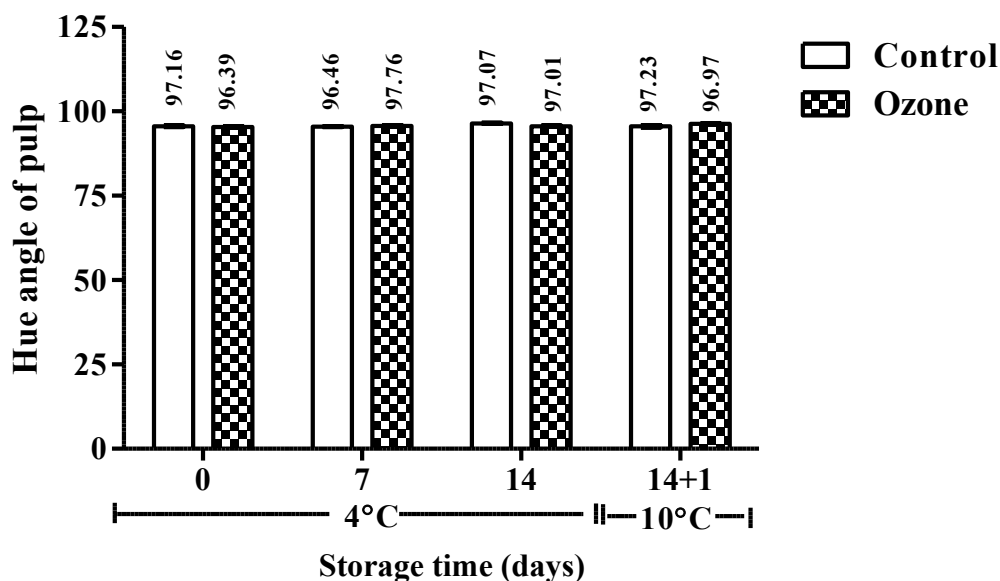
รูปที่ 4.76 การเปลี่ยนแปลงค่าสี L^* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโกลที่ผ่านการรมก๊าซโอโซนความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโกลที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)



รูปที่ 6.77 การเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมการรมก๊าซโอโซน (control)



รูปที่ 4.78 การเปลี่ยนแปลงค่าสี b^* ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมการรมก๊าซโอโซน (control)



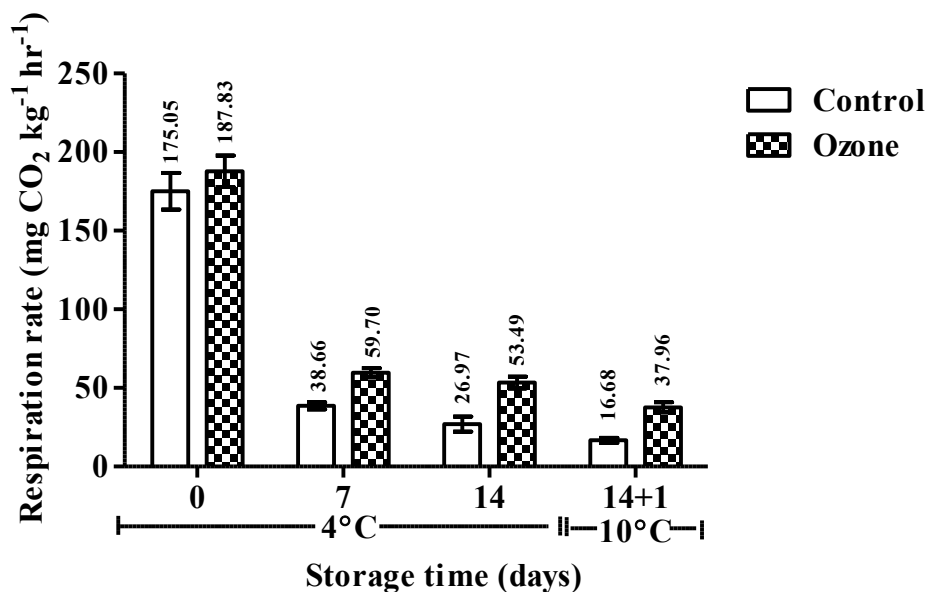
รูปที่ 4.79 การเปลี่ยนแปลงค่าสี Hue angle ของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร่วมกับการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร่วมกับการรมก๊าซโอโซน (control)

4.4.4 อัตราการหายใจ

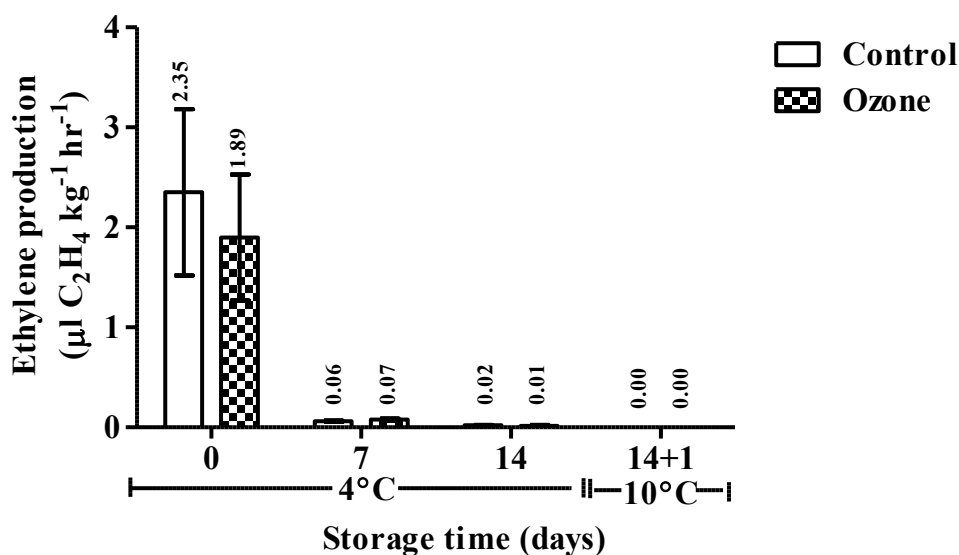
การรมก๊าซโอโซนมีแนวโน้มทำให้อัตราการหายใจของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคร่วมกับการรมก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนในชุดควบคุมที่ไม่รมก๊าซโอโซน โดยวันแรก (day 0) ทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซนมีอัตราการหายใจสูงและมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติคือ 175.05 และ 187.83 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ ตามลำดับ หลังจากนั้นอัตราการหายใจของทุเรียนทั้ง 2 ทรีตเมนต์ลดลงอย่างรวดเร็ว แต่พบว่าทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนมีอัตราการหายใจสูงกว่าทุเรียนในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยวันสุดท้ายของการเก็บรักษามีอัตราการหายใจเท่ากับ 37.96 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ ส่วนทุเรียนในชุดควบคุมมีอัตราการหายใจเท่ากับ 16.68 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ (รูปที่ 4.80 และตารางภาคผนวกที่ ค.15)

4.4.5 การผลิตเอทิลีน

ในวันแรกของการเก็บรักษา (day 0) ทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนมีการผลิตเอทิลีนน้อยกว่าในชุดควบคุมคือ 1.89 และ 2.35 $\mu\text{L C}_2\text{H}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ ตามลำดับ หลังจากนั้นการผลิตเอทิลีนของทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซน (ชุดควบคุม) ลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (day 14+1) ไม่พบการผลิตเอทิลีนของทุเรียนทั้ง 2 ทรีตเมนต์ (รูปที่ 4.81 และตารางภาคผนวกที่ ค.15)



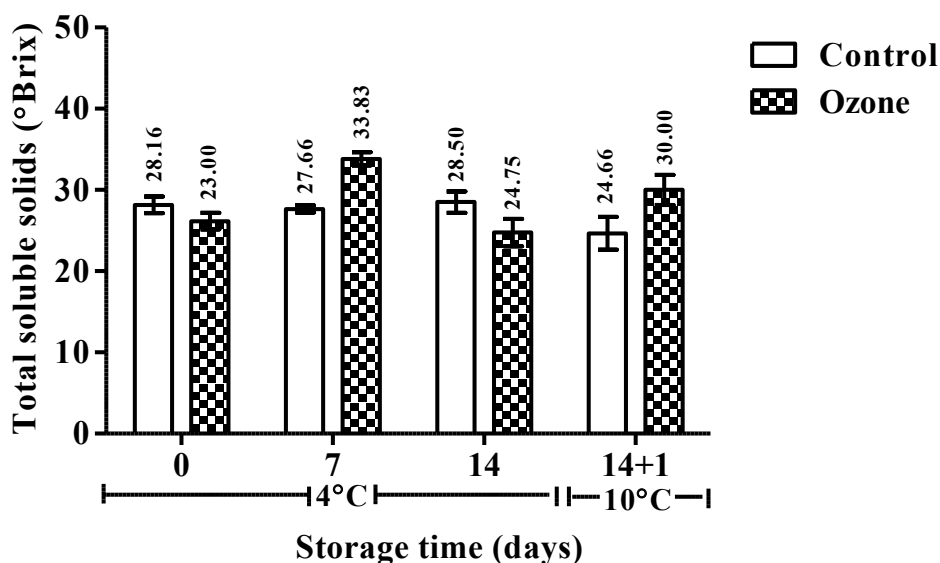
รูปที่ 4.80 อัตราการหายใจของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)



รูปที่ 4.81 อัตราการผลิตเอทิลีนของเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภครวมที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

4.4.6 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนทั้งที่รมและไม่รมก๊าซโอโซนมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ยกเว้นในวันที่ 7 และ 14+1 ทุเรียนที่รมก๊าซโอโซนมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้สูงกว่าทุเรียนในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ 33.83 และ 30.00 °Brix ส่วนทุเรียนในชุดควบคุมมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 27.66 และ 24.66 °Brix (รูปที่ 4.82 และตารางภาคผนวกที่ ค.15)



รูปที่ 4.82 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโกลที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) นาน 20 วินาที ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโกลที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน (control)

4.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และประเมินความเป็นไปได้ในการลงทุน

1. การลงทุนการผลิตทุเรียนรมก๊าซโอโซนแบบติดตั้งบรรจุกล่องพร้อมรับประทาน

ในการลงทุนการผลิตทุเรียนรมก๊าซโอโซนแบบติดตั้งบรรจุกล่องพร้อมรับประทานขนาด 500 กรัม ด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดเทียบกับเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมีขอบเขตการวิเคราะห์ดังนี้

1. การลงทุนเป็นระบบพื้นฐานขั้นต่ำที่จำเป็น ได้แก่ ตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดที่มาพร้อมกับชุดอุปกรณ์กำเนิดโอโซน ระบบบำบัดก๊าซโอโซน และระบบควบคุมทางไฟฟ้า หรือเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติที่มาพร้อมกับชุดอุปกรณ์กำเนิดก๊าซโอโซน ระบบควบคุมแบบนิวเมติกส์ และระบบควบคุมทางไฟฟ้า ซึ่งทั้งสองรวมค่าแรงติดตั้งแล้ว
2. ไม่คิดรวมระบบการควบคุมผ่าน IOT และการเก็บข้อมูลเข้าระบบ Cloud
3. ไม่คิดรวมค่าเช่า หรือค่าลงทุนสถานที่
4. มูลค่าการลงทุนเชิงพาณิชย์ เป็นมูลค่าที่ไม่ใช่ข้อมูลการลงทุนด้านการวิจัย
5. สมมติฐานราคาของมูลค่าการลงทุนเชิงพาณิชย์ โดยประมาณ
 - 5.1 ตูรมก๊าซโอโซน ราคาลงทุน 300,000 บาท สำหรับการผลิตขั้นต่ำ 4 ตู้
 - 5.2 เครื่องฉีดก๊าซโอโซน ราคาลงทุน 800,000 บาท สำหรับการสั่งผลิตขั้นต่ำ 2 เครื่อง
 - 5.3 ค่าใช้จ่ายไม่รวมการขนส่งและภาษีมูลค่าเพิ่ม แต่รวมค่าติดตั้ง
 - 5.4 ราคาอาจเปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้ตามสภาวะเศรษฐกิจแต่ละปี

1.1 การลงทุนการผลิตทุเรียนรมก๊าซโอโซนแบบติดตั้งบรรจุกล่องพร้อมรับประทานด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดที่มีกำลังการผลิต 30 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต อายุการใช้งาน 5 ปี

ค่าใช้จ่ายสำหรับตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด พร้อมติดตั้ง 300,000 บาท

1.2 การลงทุนการผลิตทุเรียนรมก๊าซโอโซนแบบติดตั้งบรรจุกล่องพร้อมรับประทานด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีกำลังการผลิต 60 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต อายุการใช้งาน 5 ปี

ค่าใช้จ่ายสำหรับเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ พร้อมติดตั้ง 800,000 บาท

2. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตทุเรียนOrmก๊าซโอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทาน

ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตทุเรียนOrmก๊าซโอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทาน ด้วยทุเรียนOrmก๊าซโอโซนแบบภาคเทียบกับเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตทุเรียนOrmก๊าซโอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทาน

รายการ	ทุเรียนOrmก๊าซ	เครื่องฉีดOrmก๊าซ
รายละเอียดวัตถุดิบและกำลังการผลิต		
ราคาวัตถุดิบ (ทุเรียนตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทานขนาด 500 กรัม) (บาท/กล่อง)	350	350
จำนวนสติ๊กเกอร์ติดหน้ากล่อง (ดวง/กล่อง)	0	1
ราคาสติ๊กเกอร์ติดหน้ากล่อง (บาท/ดวง)	1	1
กำลังการผลิต (กล่อง/ชั่วโมง)	90	240
ระยะเวลาการทำงาน (วัน/ปี)	90	90
ระยะเวลาการทำงานต่อวัน (ชั่วโมง/วัน)	8	8
ต้นทุนคงที่		
ค่าเสื่อมราคา (อายุการใช้งาน 5 ปี ไม่คิดมูลค่าซาก) (บาท/ปี)	60,000	160,000
ค่าเสียโอกาสในการลงทุนหรือค่าดอกเบี้ยกรณีกู้เงินมาลงทุน (อัตราดอกเบี้ย 8 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ไม่คิดมูลค่าซาก) (บาท/ปี)	12,000	32,000
รวมต้นทุนคงที่ (บาท/ปี)	72,000	192,000
ต้นทุนแปรผัน		
ค่าวัตถุดิบ (บาท/ปี)	22,680,000	60,480,000
ค่าสติ๊กเกอร์ติดหน้ากล่อง (บาท/ปี)	0	172,800
ค่าแรงงาน		
จำนวนแรงงาน (คน)	1	2
ค่าจ้างแรงงาน (บาท/วัน)	500	500
รวมค่าแรงงาน (บาท/ปี)	45,000	90,000

รายการ	ตูรมก๊าซฯ	เครื่องฉีดก๊าซฯ
<u>ค่าไฟฟ้าและก๊าซ</u>		
ราคาก๊าซ (บาท/ถัง)	450	450
จำนวนก๊าซที่ใช้ (ถัง/ปี)	6	15
ค่าก๊าซ (บาท/ปี)	2,700	6,750
ราคาไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	4.42	4.42
จำนวนไฟฟ้าที่ใช้ (หน่วย/วัน)	20	92
ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)	7,956	36,597.6
รวมค่าไฟฟ้าและก๊าซ		
ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา (บาท/ปี)	5,000	20,000
รวมต้นทุนแปรผัน (บาท/ปี)	22,740,656	60,806,147.6
ต้นทุนรวมทั้งหมด (บาท/ปี)	22,812,656	60,998,147.6
<u>กำลังการผลิตต่อปี (กล่อง/ปี)</u>	64,800	172,800
<u>ต้นทุนการผลิตต่อกล่อง (บาท/กล่อง)</u>	352.05	353.00
<u>ต้นทุนการผลิตไม่รวมค่าวัตถุดิบ (บาท/กล่อง)</u>	2.05	3.00
<u>ต้นทุนการผลิตเฉพาะการรมก๊าซ (บาท/กล่อง)</u>	0.164	0.251

หมายเหตุ – ราคาทุเรียนที่ใช้ในการคำนวณเป็นราคาในช่วงที่ผลิตผลทุเรียนในฤดูกาล

จากตารางที่ 4.11 การผลิตทุเรียนรมก๊าซโอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องขนาด 500 กรัม พร้อมรับประทานด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบกดเทียบกับเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ ทั้งสองมีกำลังการผลิตที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตแตกต่างกัน ในการผลิตด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบกด ที่มีกำลังการผลิตประมาณ 64,800 กล่อง/ปี จะมีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 352.05 บาท/กล่อง และต้นทุนการผลิตไม่รวมค่าวัตถุดิบ 2.05 บาท/กล่อง เมื่อเทียบกับการผลิตด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่มีกำลังการผลิตประมาณ 172,800 กล่อง/ปี จะมีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 353.00 บาท/กล่อง และต้นทุนการผลิตไม่รวมค่าวัตถุดิบ 3.00 บาท/กล่อง ซึ่งต้นทุนการผลิตด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติแพงกว่า เนื่องมาจากการลงทุนที่แพงกว่าและมีกำลังการผลิตที่สูงกว่าการผลิตด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบกด ส่งผลให้การผลิตด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมีต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันสูงกว่าต้นทุนการผลิตด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบกด

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเฉพาะการรวมก๊าซพบว่า การผลิตด้วยตูรมก๊าซไอโซนแบบถาดมีต้นทุนการผลิตเฉพาะการรวมก๊าซอยู่ที่ 0.164 บาท/กล่อง เมื่อเทียบกับการผลิตด้วยเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมีต้นทุนการผลิตเฉพาะการรวมก๊าซอยู่ที่ 0.251 บาท/กล่อง ซึ่งต้นทุนเฉพาะการรวมก๊าซในการผลิตด้วยเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสูงกว่าต้นทุนเฉพาะการรวมก๊าซในการผลิตด้วยตูรมก๊าซไอโซนแบบถาด เนื่องจากเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าตูรมก๊าซไอโซนแบบถาดส่งผลให้มีค่าไฟฟ้าแพงกว่าตูรมก๊าซไอโซนแบบถาด และกำลังการผลิตที่สูงกว่าส่งผลให้มีการใช้ก๊าซสูงกว่าตูรมก๊าซไอโซนแบบถาด ต้นทุนเฉพาะการรวมก๊าซในการผลิตด้วยเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติจึงสูงกว่าต้นทุนเฉพาะการรวมก๊าซในการผลิตด้วยตูรมก๊าซไอโซนแบบถาด

3. การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้เพื่อการลงทุน

ในการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้เพื่อการลงทุนการผลิตทุเรียนรมก๊าซไอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทานขนาด 500 กรัม ด้วยตูรมก๊าซไอโซนแบบถาดเทียบกับเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้เพื่อการลงทุนการผลิตทุเรียนรมก๊าซไอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทาน

รายการ	ตูรมก๊าซฯ	เครื่องฉีดก๊าซฯ
ต้นทุนการลงทุน (บาท/เครื่อง)	300,000	800,000
กำลังการผลิตต่อปี (กล่อง/ปี)	64,800	172,800
ต้นทุนคงที่ (บาท/ปี)	72,000	192,000
ต้นทุนแปรผัน (บาท/ปี)	22,740,656	60,806,147.6
ต้นทุนรวมทั้งหมด (บาท/ปี)	22,812,656	60,998,147.6
ต้นทุนการผลิตต่อกล่อง (บาท/กล่อง)	352.05	353.00
ต้นทุนการเฉพาะส่วนเพิ่มเติมการปฏิบัติการฉีดและรมก๊าซไอโซน (บาทต่อกล่อง)	2.05	3.00
ราคาขายสินค้า (บาท/กล่อง)	400	400
จุดคุ้มทุน (กล่อง/ปี)	6,257	17,021
ระยะเวลาคืนทุน (วัน)	36	36

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้เพื่อการลงทุน ตู้รมก๊าซโอโซนแบบถาดที่มีกำลังการผลิต 64,800 กล่อง/ปี มีการลงทุน 300,000 บาท ในขณะที่เครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีกำลังการผลิต 172,800 กล่อง/ปี ต้องใช้เงินลงทุน 800,000 บาท ด้วยกำลังการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้การลงทุนมีความแตกต่างกัน โดยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมีการลงทุนสูงกว่าเนื่องจากมีกำลังการผลิตที่มากกว่าตู้รมก๊าซโอโซนแบบถาด เมื่อพิจารณาถึงการลงทุนการผลิตทุเรียนรมก๊าซโอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทานด้วยตู้รมก๊าซโอโซนแบบถาดเทียบกับเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ พบว่าทั้งสองเครื่องมีกลุ่มเป้าหมายเป็นกลุ่มผู้ผลิตขนาดเล็กเหมาะกับการขายภายในประเทศ ด้วยกำลังการผลิตเพียง 64,800 และ 172,800 กล่อง/ปี ตามลำดับ และต้นทุนการผลิตต่อกล่องของทั้งสองเครื่องไม่แตกต่างกันมากนัก

การเปรียบเทียบระหว่างการผลิตทุเรียนรมก๊าซโอโซนแบบตัดแต่งบรรจุกล่องพร้อมรับประทานด้วยตู้รมก๊าซโอโซนแบบถาดและเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยกำหนดราคาขายไว้ที่ 400 บาท/กล่อง ส่งผลให้มีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 1,502 และ 4,085 กล่อง/ปี ตามลำดับ และมีระยะเวลาคืนทุนของการลงทุนเท่ากัน คือ 36 วัน

บทที่ 5 วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 การพัฒนาตู้รมก๊าซไอโซนแบบถาดสำหรับระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 1)

ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่องผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดหรือฆ่าเชื้อที่ใช้สำหรับอาหาร ฉบับที่ 412 พ.ศ. 2562 กำหนดในบัญชีแนบท้ายลำดับที่ 13 ให้สามารถใช้ก๊าซไอโซนโดยตรง (Fumigation) กับผักและผลไม้ เพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ (INS-; CAS 10028-15-6) ซึ่งยังไม่ได้กำหนดปริมาณที่เหมาะสมปริมาณการตกค้างในอาหาร สำหรับผักและผลไม้แต่ละประเภทเอาไว้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาส่วนแรกเป็นเรื่องการพัฒนาตู้รมก๊าซไอโซนแบบถาดสำหรับระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 1) ทีมนักวิจัยพบว่าการออกแบบตู้รมก๊าซไอโซนแบบถาดในแนวราบสามารถใช้งานในระดับอุตสาหกรรมจริงเนื่องจากสามารถรมก๊าซไอโซนกับผลทุเรียนสดได้คราวละจำนวนมาก ๆ โดยสามารถควบคุมการกระจายได้อย่างสม่ำเสมอทุกชั้นวาง อีกทั้งยังสามารถหน่วงเวลาให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างก๊าซไอโซนกับจุลินทรีย์ในอาหารได้ โดยระบบแบบหมุนเวียนอากาศแบบภายในสามารถรักษาและปรับระดับความเข้มข้นของก๊าซไอโซนได้ตามความต้องการ (Concentration time, Ct Dose) เพื่อให้เพียงพอต่อการกำจัดจุลินทรีย์และเชื้อที่ไม่ต้องการในอาหารได้ (Non-pathogenic agent)

อย่างไรก็ดีการออกแบบทางวิศวกรรมด้วยระบบไม่มีการหมุนเวียนอากาศ (Reserved air fumigation) มีข้อจำกัดในการใช้งานในส่วนองปริมาณผลิตภัณฑ์จำนวนมาก ๆ เนื่องจากตู้รมขนาดใหญ่จะทำให้การกระจายของก๊าซไอโซนไม่สม่ำเสมอ บางส่วนของตู้รมและบางตำแหน่งของผิวผลิตภัณฑ์อาจถูกทำลาย (Wounds on fruit) หากสัมผัสก๊าซไอโซนเป็นเวลานาน และเกิดการสะสมความเข้มข้นบางจุดมากเกินไป จนไม่สามารถใช้ก๊าซไอโซนควบคุมหรือกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้ (Control pathogens) การออกแบบระบบตู้รมก๊าซไอโซนแบบถาดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับแนวนอน (Horizontal Forced-Air Circulation) สามารถแก้ไขปัญหาข้างต้นได้ โดยการควบคุมระดับความเข้มข้นดังกล่าวด้วยชุดสร้างและควบคุมก๊าซไอโซน จากนั้นใช้ระบบหมุนเวียนอากาศบังคับทิศทางและความสม่ำเสมอภายในตู้รมก๊าซไอโซนแบบถาดให้ครบเวลารม ซึ่งขณะที่ก๊าซไอโซนทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับจุลินทรีย์ในอาหาร ภายในระบบหมุนเวียนยังคงมีการหน่วงเวลาหรือเวลาสัมผัส (Contact Time) เพียงพออยู่ โดยผลการทดลองวัดจริงและแบบจำลองคอมพิวเตอร์สามารถช่วยอธิบายหลักการทำงานและคำนวณหาความถูกต้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในผลการทดลองที่ผ่านมา

5.2 การพัฒนาเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์เดียวสำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 2)

การพัฒนาเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียวสำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 2) ได้ถูกออกแบบขึ้นเพื่อลดระยะเวลาในการม้วนเนื้อทุเรียนตัดแต่งให้สั้นลง เหมาะสำหรั้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกลางถึงใหญ่ที่ต้องผลิตสินค้าจำนวนมากในเวลาจำกัด เพื่อให้สามารถขนส่งสินค้าไปยังสนามบินได้ทันเวลา เครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียวมี PLC หรือ Microcontroller เป็นตัวควบคุมขั้นตอนการปฏิบัติงานแบบอัตโนมัติทดแทนการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม พร้อมทั้งมีการพัฒนาระบบควบคุมผ่านเครือข่ายไร้สาย ให้สามารถบันทึกข้อมูลเข้า Database ส่วนกลางด้วยระบบ IOT สำหรับการตรวจสอบย้อนกลับขั้นตอนการรมก๊าซโอโซนที่เป็นระบบ traceability ได้ และสามารถควบคุมระบบการสั่งงาน สามารถปรับตั้งและควบคุมการทำงานได้จากหน้าจอ HMI และผ่านระบบ SCADA ด้วย Mobile application ทำให้สามารถควบคุมการผลิต และสั่งงานเครื่องแบบออนไลน์ได้ ซึ่งทำให้ช่างหรือเจ้าหน้าที่ที่อยู่นอกพื้นที่การผลิต สามารถควบคุมการผลิต ตรวจสอบระบบ สั่งการเครื่อง และแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าได้ทันที เครื่องฉีดก๊าซโอโซนกึ่งอัตโนมัตินี้มีระบบการกำจัดก๊าซโอโซนที่เหลือโดยใช้ โดยให้โอโซนทำปฏิกิริยากับ KMgO_4 ภายในเวลาไม่เกิน 10 นาที เครื่องฉีดก๊าซโอโซนกึ่งอัตโนมัตินี้ มีกำลังผลิต 240 กล่องต่อชั่วโมง หรือเทียบเท่าการผลิตทุเรียนได้ 120 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หากเทียบการผลิตต่อ 1 วันหรือ 8 ชั่วโมง จะมีกำลังการผลิตเท่ากับ 1,920 กล่อง หรือเทียบเท่าการผลิตเนื้อทุเรียนตัดแต่งได้ 960 กิโลกรัม

5.3 การทดสอบประสิทธิภาพของตูรมโอโซนแบบถาดและเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์เดียว เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค

5.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพของตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคและผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียน

การทดสอบประสิทธิภาพของตูรมโอโซนแบบถาด ในการกำจัดเชื้อ Non-pathogenic *E. coli* บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยการใช้โอโซน ความเข้มข้น 900 ppm นาน 3 นาที พบว่าสามารถกำจัดเชื้อ Non-pathogenic *E. coli* บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อได้อย่างสมบูรณ์ (100%) โดยสังเกตจากการที่ไม่พบการเจริญของเชื้อบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผ่านการรมโอโซน ในขณะที่บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่ผ่านการรมโอโซนเชื้อสามารถเจริญได้สูงถึง 8.19 log CFU/mL การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าตูรมโอโซนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี เช่นเดียวกับเมื่อนำมาใช้รมทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในเนื้อทุเรียนทั้งส่วนสีเหลืองและสีขาวลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนในชุดควบคุม โดยสามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ได้ประมาณ 1.84 log และลดการปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ได้ประมาณ 2.29 log จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัยที่

แสดงให้เห็นว่าโอโซนมีผลช่วยลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนพร้อมบริโภค โดยลด total bacteria ลงได้ประมาณ 2 log CFU/g FW และโคลิฟอร์มประมาณ 1.5-1.8 log CFU/g FW (ผ่องเพ็ญ และคณะ, 2563) จากการทดลองนี้พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาเชื้อจุลินทรีย์มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในทุเรียนชุดที่ปลูกเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในวันที่ 14 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทุเรียนที่ปลูกเชื้อและไม่รมโอโซนมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนเกินเกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารพร้อมบริโภคของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2560) ในขณะที่ทุเรียนที่ปลูกเชื้อและรมโอโซนมีปริมาณเชื้อไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานตลอดการเก็บรักษา (15 วัน) สำหรับกลไกของโอโซนในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ 1) โมเลกุลของโอโซนเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ และ 2) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเป็นตัวเข้าทำลาย โดยสามารถเข้าทำลายเซลล์เมมเบรน ไซโตพลาสซึม โปรตีน และชั้นของไขมันในเซลล์จุลินทรีย์ ทำให้เซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์แตก (Guzel-Seydim et al., 2004; Alexopoulos et al., 2013) นอกจากนี้ โอโซนยังสามารถทำลายเอนไซม์ต่างๆ โดยเฉพาะเอนไซม์ที่มีบริเวณเร่งประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มีหมู่ R ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ได้ เช่น ซัลไฮดริล (-SH) ในโมเลกุลของเอนไซม์ และมีผลต่ออนุพันธ์พิวรีน (Purines) และไพริมิดีน (Pyrimidines) ซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มจำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ (ชรณี, 2547; McNair Scott and Leshner, 1962) อย่างไรก็ตาม การใช้ตูรมโอโซนแบบถาดจำเป็นต้องมีการนำกล่องทุเรียนที่ผ่านการรมโอโซนแล้วนำออกมาปิดฝากล่องข้างนอกตู้ ดังนั้นเพื่อป้องกันการ recontamination ห้องที่ใช้วางตู้โอโซนต้องเป็นห้องที่สะอาดและผ่านการฆ่าเชื้อที่ผนังและพื้นผิวภายในห้องก่อนการใช้งาน ทั้งนี้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศภายในห้องจะต้องมีค่าไม่เกินเกณฑ์คุณภาพอากาศด้านจุลินทรีย์ ตามมาตรฐาน The index of Microbial Air Contamination (IMA) นั่นคือ ในสถานประกอบการอุตสาหกรรมอาหารจะต้องมีเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศไม่เกิน 40-48 CFU/dm²/h จากการตรวจวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอากาศภายในห้องที่วางตูรมโอโซนในครั้งนี้ พบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในปริมาณต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าดัชนีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในอากาศ พบว่าคุณภาพอากาศภายในห้องอยู่ในระดับดีมาก

การรมโอโซนนอกจากจะช่วยลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ยังมีผลช่วยรักษาคุณภาพของทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค ซึ่งพบว่าทุเรียนที่ผ่านการรมโอโซนมีการผลิตเอทิลีนต่ำกว่าทุเรียนในชุดควบคุม เนื่องจากโอโซนมีผลยับยั้งการแสดงออกของยีน *AdACS1* และ *AdACO1* และลดกิจกรรมของเอนไซม์ ACC synthase (ACS) และ ACC oxidase (ACO) ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์เอทิลีน ส่งผลให้การสังเคราะห์เอทิลีนลดลงเช่นเดียวกับที่พบในกีวี (Minas et al., 2014) ทั้งนี้เอทิลีนเป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลผลิตในระหว่างการเก็บรักษา โดยเฉพาะทุเรียนเป็นผลไม้ที่มีการหายใจแบบไคลแมคเทอริก (climacteric fruit) ซึ่งเอทิลีนมีผลกระตุ้นการหายใจทำให้การหายใจของทุเรียนเพิ่มขึ้น (Wang et al. 2022) อัตราการหายใจที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้เซลล์น้ำน้ำตาล กรดอินทรีย์และสารอาหารไปใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของเซลล์มากขึ้น นำไปสู่

การสูญเสียคุณค่าทางอาหาร สูญเสียกลิ่นและรสชาติของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้พบว่า การรมโอโซนช่วยให้อัตราการหายใจของทุเรียนตัดแต่งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการผลิตเอทิลีนของ ทุเรียน นอกจากนี้การลดลงของอัตราการหายใจอาจเป็นผลมาจากปริมาณการปนเปื้อนของ เชื้อจุลินทรีย์ที่ลดลง เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์เป็นอีกสาเหตุที่มีผลกระทบทำให้ทุเรียนมีการหายใจสูงขึ้น และการหายใจบางส่วนยังเป็นผลมาจากการหายใจของเชื้อจุลินทรีย์เองด้วย (Yuk et al., 2006) ทั้งนี้ อัตราการหายใจที่ลดลงของทุเรียนที่ผ่านการรมโอโซนนั้นส่งผลให้ทุเรียนมีลักษณะปรากฏ กลิ่นและ รสชาติ และเนื้อสัมผัสดีกว่าทุเรียนในชุดควบคุม ซึ่งจะเห็นได้จากการประเมินการยอมรับของผู้บริโภค พบว่าผู้ประเมินให้คะแนนความชอบด้านรสชาติ ความหวาน และความชอบโดยรวมต่อทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่านการรมโอโซนมากกว่าทุเรียนที่ไม่ผ่านการรมโอโซน นอกจากนี้การรมโอโซนยังมีส่วนช่วยชะลอ การลดลงของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของเนื้อทุเรียน เนื่องจากโอโซนมีผลกระทบกลไก ในการต้านอนุมูลอิสระให้เกิดขึ้น โดยการชักนำกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ Superoxide dismutase (SOD) Catalase (CAT) และ Peroxidase (POD) (Zhang et al., 2020; Ong et al., 2014) และสารต้านอนุมูลอิสระอื่นๆ เช่น สารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ เบต้าแคโรทีน และ แคโรทีนอยด์ เป็นต้น (Zhu et al., 2019; Ong et al., 2014) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า โอโซนสามารถเพิ่มฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระในผลไม้ได้โดยการกระตุ้นกลไก Ascorbate-glutathione (Zhang et al., 2020)

อย่างไรก็ตาม ในการทดลองครั้งนี้พบว่าการรมโอโซนด้วยตูรมโอโซนแบบถาดไม่มีผลต่อความ แน่นเนื้อของทุเรียนเมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนในชุดควบคุม ซึ่งให้ผลแตกต่างจากการทดลองของ คณะผู้วิจัยครั้งที่ผ่านมา ที่รมโอโซนด้วยเครื่องผลิตก๊าซโอโซน ยี่ห้อ Ozonizer, รุ่น T1000 พบว่าการ รมโอโซนช่วยชะลอการอ่อนนุ่มของเนื้อทุเรียนได้ (ผ่องเพ็ญ และคณะ, 2563) ทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับ คุณภาพเริ่มต้นและการสุกของทุเรียนที่ใช้ในการทดลองในแต่ละครั้งแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การรม โอโซนด้วยตูรมแบบถาดไม่มีผลต่อสีและปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียน ทุเรียน ทั้งที่ผ่านการรมโอโซนและไม่รมโอโซนมีสีค่อนข้างคงที่ตลอดการเก็บรักษา ส่วนปริมาณของแข็ง ทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนทั้งที่รมโอโซนและไม่รมโอโซนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในระหว่าง การเก็บรักษา ทั้งนี้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล (Voon et al., 2007) ดังนั้นอาจเป็นผลมาจากน้ำตาลบางส่วนถูกนำไปใช้ในกระบวนการหายใจของทุเรียนทำให้ปริมาณ ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ลดลง (สายชล, 2538)

5.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) ในการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคและ ผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียน

การรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับ บรรจุภัณฑ์เดี่ยว มีประสิทธิภาพช่วยลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในส่วนของเนื้อสีขาวและสี

เหลือของทุเรียน โดยสามารถลดปริมาณเชื้อ total bacteria ได้ 2.65 log และ *E. coli* ได้ 1.63 log ทั้งนี้โอโซนเป็นสารออกซิไดซิงค์ที่แรงมีคุณสมบัติในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งกลไกการทำลายเชื้อจุลินทรีย์เป็นผลของโอโซนในการทำลายเชื้อโดยตรงและเป็นผลมาจากอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเป็นตัวเข้าทำลายเชื้อ ทำให้ผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ เอนไซม์ และสารพันธุกรรมภายในเซลล์จุลินทรีย์ถูกทำลาย (Alexopoulos et al., 2013; McNair Scott and Leshner, 1962) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของการรวมโอโซนในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระยะเวลาในการให้โอโซนสัมผัสกับเชื้อจุลินทรีย์ ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ จำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ ความเข้มข้นของโอโซน และชนิดของผลผลิต เป็นต้น (วรพรรณ และ จำรูญศรี, 2559)

เมื่อพิจารณาคุณภาพของทุเรียนตัดแต่ง พบว่าการรวมโอโซนด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียวช่วยลดการผลิตเอทิลีน ชะลอการลดลงของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ แต่ไม่มีผลต่อสีของเนื้อทุเรียน การผลิตเอทิลีนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยว รวมทั้งคุณภาพของผลิตผลตัดแต่งพร้อมบริโภค (Saltveit, 1999) อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้พบว่าการผลิตเอทิลีนของทุเรียนทั้งที่รวมและไม่รวมโอโซนมีค่าสูงในวันแรกของการเก็บรักษา และพบว่าทุเรียนที่รวมโอโซนมีการผลิตเอทิลีนน้อยกว่าทุเรียนในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หลังจากนั้นการผลิตเอทิลีนของทุเรียนทั้ง 2 ทรีตเมนต์ลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าต่ำมากในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อทุเรียน พบว่าสีของเนื้อทุเรียนทุกทรีตเมนต์มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการเก็บรักษา ทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (4°C) ซึ่งมีผลช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสีและปฏิกิริยาต่างๆ ภายในเซลล์ของทุเรียน (Voon et al., 2006) สำหรับปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนที่รวมโอโซนมีแนวโน้มสูงกว่าทุเรียนในชุดควบคุม โดยผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้โอโซนกับเกรฟฟรุต์ (Kassem et al., 2022) แก้วมังกรตัดแต่งพร้อมบริโภค (Li et al., 2022) และสตรอเบอร์รี่ (Zhang et al., 2020) แต่อย่างไรก็ตามการรวมโอโซนด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดียวมีผลทำให้ทุเรียนมีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

5.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และประเมินความเป็นไปได้ในการลงทุน

ตูรมก๊าซโอโซนและเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ มีกำลังการผลิตทุเรียนตัดแต่งขนาดบรรจุ 500 กรัมต่อกล่อง ประมาณ 64,800 และ 172,800 กล่อง/ปี ตามลำดับ และจะมีต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้นต่อกล่องเท่ากับ 2.05 และ 3.00 บาท/กล่อง ตามลำดับ ซึ่งต้นทุนการผลิตด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ (800,000 บาทต่อเครื่อง) แพงกว่าตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด (300,000 บาทต่อตู้) เนื่องจากมีการลงทุนที่แพงกว่าและมีกำลังการผลิตที่สูงกว่าการผลิตด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด ส่งผลให้การผลิตด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติมีต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันสูงกว่าต้นทุนการผลิตด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด

เมื่อพิจารณาถึงการลงทุนการผลิตทุเรียนตัดแต่งที่รมก๊าซโอโซนด้วยตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด เทียบกับเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ พบว่าทั้งสองเครื่องมีกลุ่มเป้าหมายผู้ใช้งานที่แตกต่าง กัน สำหรับตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดเหมาะสำหรับกลุ่มผู้ผลิตขนาดเล็กและการลงทุนไม่สูงมากนัก หรือการผลิตเพื่อขายเหมาะกับการขายภายในประเทศ ไม่ต้องดูแลการซ่อมบำรุงซับซ้อน ส่วนเครื่อง ฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติเหมาะกับผู้ประกอบการระดับอุตสาหกรรมการผลิตขนาดใหญ่ และ จำเป็นที่จะต้องมีการปฏิบัติงานที่เข้าใจระบบควบคุมอัตโนมัติ และมีการซ่อมบำรุงที่ซับซ้อนมากกว่าตูรมโอโซนแบบถาด

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

6.1 การพัฒนาตูรมีก๊าซไอโซนแบบถาดสำหรับระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 1)

จากผลการศึกษาเรื่องการพัฒนาตูรมีก๊าซไอโซนแบบถาดสำหรับระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 1) ทีมนักวิจัยพบว่า การออกแบบตูรมีก๊าซไอโซนแบบถาดในแนวราบสามารถใช้งานในระดับอุตสาหกรรมจริงได้ เนื่องจากสามารถมีก๊าซไอโซนกับผลทุเรียนสดได้คราวละจำนวนมาก ๆ โดยสามารถควบคุมการกระจายได้อย่างสม่ำเสมอทุกชั้นวาง อีกทั้งยังสามารถหนดเวลาหรือเวลาสัมผัส (Contact Time) ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างก๊าซไอโซนกับจุลินทรีย์ในอาหารได้ โดยระบบแบบหมุนเวียนอากาศแบบภายใน สามารถรักษาและปรับระดับความเข้มข้นของก๊าซไอโซนได้ตามความต้องการ (Concentration time, Ct Dose) เพื่อให้เพียงพอต่อการกำจัดจุลินทรีย์และเชื้อที่ไม่ต้องการในอาหารได้ เช่นในกรณีงานวิจัยนี้ต้องการระดับความเข้มข้นของก๊าซไอโซน 900 ppm (mg/L) ร่วมกับเวลารวม (Fumigated time) นาน 3 นาที หากใช้ตูรมีก๊าซไอโซนแบบถาดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับแนวนอน (Horizontal Forced-Air Circulation) ก็สามารถทำได้โดยควบคุมระดับความเข้มข้นดังกล่าวด้วยชุดสร้างและควบคุมก๊าซไอโซน จากนั้นใช้ระบบหมุนเวียนอากาศบังคับทิศทางและความสม่ำเสมอภายในตูรมีก๊าซไอโซนแบบถาดให้ครบเวลารวม ซึ่งขณะที่ก๊าซไอโซนทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับจุลินทรีย์ในอาหาร ภายในระบบหมุนเวียนยังคงมีการหนดเวลาหรือเวลาสัมผัส (Contact Time) เพียงพออยู่ ผลการศึกษาวิจัยดังกล่าวสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาเพื่อขยายขนาดการผลิต (Scaling up) ต่อไป

6.2 การพัฒนาเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยวสำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค (โมเดลที่ 2)

เครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยวออกแบบเพื่อใช้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง (โมเดลที่ 2) การออกแบบเป็นโครงสร้างทำจากเหล็กสแตนเลสเกรด 304 มีสายพานลำเลียงกล่องทุเรียนที่บรรจุกล่องทุเรียนได้จำนวน 32 กล่อง เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 m/min แบบเป็นชุด ๆ ละ 4 กล่อง มีระบบฉีดก๊าซไอโซนเข้ากล่องบรรจุทุเรียนและติดสติ๊กเกอร์ได้ครั้งละ 2 กล่อง อัตราการฉีดก๊าซที่ 1 L/m ต่อกล่อง และหากปรับตั้งระยะเวลาฉีดไว้นาน 20 วินาที จะได้ความเข้มข้นในกล่องเปล่าประมาณ 1,260 ppm มี PLC ควบคุมระบบ สามารถปรับตั้งและควบคุมการทำงานได้จากหน้าจอ HMI และผ่านระบบ SCADA ด้วย Mobile application เครื่องฉีดมีกำลังผลิต 240 กล่องต่อชั่วโมง

6.3 การทดสอบประสิทธิภาพของตูรมก๊าซไอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) และเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียน

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของตูรมก๊าซไอโซนแบบถาดและเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว ต่อการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคและผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตูรมไอโซนแบบถาด

1.1 การทดสอบประสิทธิภาพของตูรมก๊าซไอโซนแบบถาดในการกำจัดเชื้อ Non-pathogenic *E. coli* บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยการใช้ไอโซน ความเข้มข้น 900 ppm นาน 3 นาที พบว่าสามารถกำจัดเชื้อ Non-pathogenic *E. coli* บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อได้อย่างสมบูรณ์ (100%)

1.2 การรมก๊าซไอโซน ความเข้มข้น 900 ppm นาน 3 นาที ด้วยตูรมก๊าซไอโซนแบบถาด ช่วยลดปริมาณ total bacteria และ *E. coli* ที่ปนเปื้อนในเนื้อทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคทั้งเนื้อส่วนสีเหลืองและสีขาวลงได้ โดยการรมก๊าซไอโซนมีผลทำให้เชื้อ total bacteria ลดลง 1.84 log CFU/g FW และ *E. coli* ลดลง 2.29 log CFU/g FW ส่งผลให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดทั้งในระหว่างที่เก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และหลังจากย้ายมาวางที่ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน

1.3 คุณภาพของเนื้อทุเรียนที่ผ่านการรมก๊าซไอโซน ความเข้มข้น 900 ppm นาน 3 นาที ด้วยตูรมก๊าซไอโซนแบบถาด พบว่าการรมก๊าซไอโซนมีผลช่วยลดอัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีน ชะลอการลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระ และมีคะแนนการยอมรับของผู้บริโภค (ด้านรสชาติ ความหวาน และการยอมรับโดยรวม) เมื่อเทียบกับทุเรียนในชุดควบคุม และการรมก๊าซไอโซนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อทุเรียน ความแน่นเนื้อ และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

2. สำหรับประสิทธิภาพของเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว

2.1 การฉีดก๊าซไอโซนใส่ในกล่องที่บรรจุทุเรียน 500 กรัม นาน 20 วินาที พบว่าช่วยลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งในส่วนของเนื้อสีขาวและสีเหลืองของทุเรียนลงได้ โดยสามารถลดปริมาณเชื้อ total bacteria ได้ 2.65 log CFU/g FW และ *E. coli* ได้ 1.63 log CFU/g FW ส่งผลให้ทุเรียนที่ผ่านการรมก๊าซไอโซนมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดตลอดการเก็บรักษา

2.2 คุณภาพของทุเรียนตัดแต่งที่ผ่านการรมก๊าซไอโซนด้วยเครื่องฉีดก๊าซไอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว พบว่าช่วยลดการผลิตเอทิลีน ชะลอการลดลงของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อทุเรียน แต่ส่งผลให้ทุเรียนมีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

6.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และประเมินความเป็นไปได้ในการลงทุน

1) การผลิตทุเรียนตัดแต่งที่รมก๊าซโอโซนต่อปี พบว่า การรมก๊าซโอโซนด้วยตูรมก๊าซโอโซนมีกำลังการผลิตประมาณ 64,800 กล่อง/ปี จะมีต้นทุนการผลิตเฉพาะการปฏิบัติงานรมก๊าซโอโซนไม่รวมค่าวัตถุดิบทุเรียน 2.05 บาท/กล่อง และการรมทุเรียนด้วยเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่มีกำลังการผลิตประมาณ 172,800 กล่อง/ปี จะต้นทุนการผลิตไม่รวมค่าวัตถุดิบทุเรียน 3.00 บาท/กล่อง

2) การวิเคราะห์ความเป็นไปได้เพื่อการลงทุน พบว่า ตูรมก๊าซโอโซนแบบถาด ต้องใช้เงินลงทุน 300,000 บาท/เครื่อง และเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ ต้องใช้เงินลงทุน 800,000 บาท/เครื่อง ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องทั้งสองมีกำลังการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้การลงทุนมีความแตกต่างกัน

3) หากกำหนดราคาขายไว้ที่ 400 บาท/กล่อง ส่งผลให้มีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 6,257 และ 17,021 กล่อง/ปี ตามลำดับ และมีระยะเวลาคืนทุนของการลงทุนเท่ากัน คือ 36 วัน

4) ตูรมก๊าซโอโซนแบบถาดเหมาะสำหรับกลุ่มผู้ผลิตขนาดเล็กที่มีการลงทุนไม่สูง เหมาะกับการผลิตเพื่อขายภายในประเทศ ส่วนเครื่องฉีดก๊าซโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติเหมาะกับผู้ประกอบการระดับอุตสาหกรรมการผลิตขนาดกลางถึงใหญ่ และจำเป็นที่จะต้องมีการปฏิบัติงานที่เข้าใจระบบควบคุมอัตโนมัติ และมีการซ่อมบำรุงที่ซับซ้อนมากกว่าตูรมโอโซนแบบถาด

เอกสารอ้างอิง

- Alexopoulos, A., Plessas, S., Ceciu, S., Lazar, V., Mantzourani, I., Voidarou, C., E. Stavropoulou and Bezirtzoglou, E., 2013. Evaluation of ozone efficacy on the reduction of microbial population of fresh cut lettuce (*Lactuca sativa*) and green bell pepper (*Capsicum annuum*). Food control, 30(2): 491-496.
- Beltrán, D., Selma, M. V., Marín, A. and Gil, M. I., 2005. Ozonated water extends the shelf life of fresh-cut lettuce. Journal of agricultural and food chemistry, 53(14): 5654-5663.
- Beltrán, D., Selma, M. V., Marín, A. and Gil, M. I., 2005. Ozonated water extends the shelf life of fresh-cut lettuce. Journal of agricultural and food chemistry, 53(14): 5654-5663.
- Booncherm, P. and Siriphanich, J., 1991. Postharvest physiology of durian pulp and husk. Agriculture and Natural Resources, 25(5): 119-125.
- Booncherm, P. and Siriphanich, J., 1991. Postharvest physiology of durian pulp and husk. Agriculture and Natural Resources, 25(5): 119-125.
- Day, R., Abrahams, P., Bateman, M., Beale, T., Clottey, V., Cock, M., Colmenarez, Y., Corniani, N., Early, R., Godwin, J., Gomez, J., Moreno, P. G., Murphy, S. T., Oppong-Mensah, B., Phiri, N., Pratt, C., Silvestri, S. and Witt, A., 2017. Fall armyworm impacts and implications for Africa. Outlooks on Pest Management, 28(5): 196-201.
- Forney, C. F., Song, J., Fan, L., Hildebrand, P. D. and Jordan, M. A., 2003. Ozone and 1-methylcyclopropene alter the postharvest quality of broccoli. Journal of the American Society for Horticultural Science, 128(3): 403-408.
- Graham, T., Zhang, P., Zheng, Y. and Dixon, M. A., 2009. Phytotoxicity of aqueous ozone on five container-grown nursery species. HortScience, 44(3): 774-780.
- Güzel-Seydim, Z., Bever Jr, P. I. and Greene, A. K., 2004. Efficacy of ozone to reduce bacterial populations in the presence of food components. Food Microbiology, 21(4): 475-479.
- Kassem, H. S., Tarabih, M. E., Ismail, H. and Eleryan, E. E., 2022. Effectiveness of Ozonated Water for Preserving Quality and Extending Storability of Star Ruby Grapefruit. Processes, 10(2): 277.

- Khadre, M. A. and Yousef, A. E., 2001. Sporocidal action of ozone and hydrogen peroxide: a comparative study. *International journal of food microbiology*, 71(2-3): 131-138.
- Kim, B. H., Ikeda, T., Park, H. S., Kim, H. J., Hyun, M. S., Kano, K., Takagi, K. and Tatsumi, H., 1999. Electrochemical activity of an Fe (III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens* IR-1, in the presence of alternative electron acceptors. *Biotechnology Techniques*, 13: 475-478.
- Koseki, S. and Isobe, S., 2006. Effect of ozonated water treatment on microbial control and on browning of iceberg lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of food protection*, 69(1): 154-160.
- Kumar, B. M. and Kim, Y. W., 2010. Processing of polysiloxane-derived porous ceramics: a review. *Science and Technology of Advanced Materials*.
- Li, C., Zhu, Q., Jin, X. and Cohen, R. C., 2022. Elucidating contributions of anthropogenic volatile organic compounds and particulate matter to ozone trends over China. *Environmental Science & Technology*, 56(18): 12906-12916.
- Liew, C. L. and Prange, R. K., 1994. Effect of ozone and storage temperature on postharvest diseases and physiology of carrots (*Daucus carota* L.). *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119(3): 563-567.
- Lu, X., Zhang, L., Wang, X., Gao, M., Li, K., Zhang, Y., Yue, X. and Zhang, Y., 2020. Rapid increases in warm-season surface ozone and resulting health impact in China since 2013. *Environmental Science & Technology Letters*, 7(4): 240-247.
- McClurkin, J. D. and Maier, D. E., 2010. Half-life time of ozone as a function of air conditions and movement. *Julius-Kühn-Archiv*, 425: 381.
- McNair Scott, D. M. and Leshner, E. C., 1963. Effect of ozone on survival and permeability of *Escherichia coli*. *Journal of bacteriology*, 85(3): 567-576.
- Minas, I. S., Vicente, A. R., Dhanapal, A. P., Manganaris, G. A., Goulas, V., Vasilakakis, M., Crisosto, C. H. and Molassiotis, A., 2014. Ozone-induced kiwifruit ripening delay is mediated by ethylene biosynthesis inhibition and cell wall dismantling regulation. *Plant Science*, 229: 76-85.
- Niponsak, A., Laohakunjit, N. and Kerdchoechuen, O., 2015. Contribution to volatile fingerprinting and physico-chemical qualities of minimally processed Durian cv. 'Monthong' during storage: Identification of a novel chemical ripeness marker. *Food and Bioprocess Technology*, 8: 1229-1243.

- Ölmez, H. and Akbas, M. Y., 2009. Optimization of ozone treatment of fresh-cut green leaf lettuce. *Journal of Food Engineering*, 90(4): 487-494.
- Ong, M. K., Ali, A., Alderson, P. G. and Forney, C. F., 2014. Effect of different concentrations of ozone on physiological changes associated to gas exchange, fruit ripening, fruit surface quality and defence-related enzymes levels in papaya fruit during ambient storage. *Scientia Horticulturae*, 179: 163-169.
- Ong, M. K., Ali, A., Alderson, P. G. and Forney, C. F., 2014. Effect of different concentrations of ozone on physiological changes associated to gas exchange, fruit ripening, fruit surface quality and defence-related enzymes levels in papaya fruit during ambient storage. *Scientia Horticulturae*, 179: 163-169.
- Pascual, A., Llorca, I., and Canut, A., 2007. Use of ozone in food industries for reducing the environmental impact of cleaning and disinfection activities. *Trends in Food Science and Technology*, 18: S29–S35.
- Pasquarella, C., Pitzurra, O. and Savino, A., 2000. The index of microbial air contamination. *Journal of hospital infection*, 46(4): 241-256.
- Pothitirat, W., Chomnawang, M. T., Supabphol, R. and Gritsanapan, W., 2010. Free radical scavenging and anti-acne activities of mangosteen fruit rind extracts prepared by different extraction methods. *Pharmaceutical biology*, 48(2): 182-186.
- Renumarn, P., Srilaong, V., Uthairatanakij, A., Kanlayanarat, S. and Jitareerat, P., 2014. The effects of immersion methods and concentration of ozonated water on the microbial counts and the quality and sensory attributes of fresh-cut broccoli. *International Food Research Journal*, 21(2).
- Saltveit, M. E., 1999. Effect of ethylene on quality of fresh fruits and vegetables. *Postharvest biology and technology*, 15(3): 279-292.
- Schwartz, A., 2017. Ozone Therapy in Papillomavirus Infection-HPV. *Ozone Therapy Global Journal*, 7(1): 17-28.
- Selma, M. V., Beltrán, D., Allende, A., Chacón-Vera, E. and Gil, M. I., 2007. Elimination by ozone of *Shigella sonnei* in shredded lettuce and water. *Food microbiology*, 24(5): 492-499.
- Selma, M. V., Ibáñez, A. M., Cantwell, M. and Suslow, T., 2008. Reduction by gaseous ozone of *Salmonella* and microbial flora associated with fresh-cut cantaloupe. *Food microbiology*, 25(4): 558-565.

- Singh, H. P., Batish, D. R., Kaur, S., Ramezani, H. and Kohli, R. K., 2002. Comparative phytotoxicity of four monoterpenes against *Cassia occidentalis*. *Annals of Applied Biology*, 141(2): 111-116.
- Skog, and CL Chu, L. J., 2001. Effect of ozone on qualities of fruits and vegetables in cold storage. *Canadian Journal of Plant Science*, 81(4): 773-778.
- Sripong, K., Uthairatanakij, A. and Jitareerat, P., 2022. Impact of gaseous ozone on microbial contamination and quality of fresh-cut durian. *Scientia Horticulturae*, 294: 110799.
- Subhadrabandhu, S. and Ketsa, S., 2001. Durian: king of tropical fruit. Daphne Brasell Associates.
- United States Food and Drug Administration (US FDA), 2012. U.S. FDA Regulatory Approval of Ozone as an Antimicrobial Agent – What Is Allowed and What Needs to Be Understood.
- Voon, V. and Fox, S. H., 2007. Medication-related impulse control and repetitive behaviors in Parkinson disease. *Archives of neurology*, 64(8): 1089-1096.
- Voon, V., Kubu, C., Krack, P., Houeto, J. L. and Tröster, A. I., 2006. Deep brain stimulation: neuropsychological and neuropsychiatric issues. *Movement disorders: official journal of the Movement Disorder Society*, 21(S14): S305-S327.
- Voon, V., Thomsen, T., Miyasaki, J. M., de Souza, M., Shafo, A., Fox, S. H., Duff-Canning, S., Lang, A. E. and Zurowski, M., 2007. Factors associated with dopaminergic drug-related pathological gambling in Parkinson disease. *Archives of Neurology*, 64(2): 212-216.
- Voon, Y. Y., Hamid, N. S. A., Rusul, G., Osman, A. and Quek, S. Y., 2006. Physicochemical, microbial and sensory changes of minimally processed durian (*Durio zibethinus* cv. D24) during storage at 4 and 28 °C. *Postharvest Biology and Technology*, 42(2): 168-175.
- Wang, S. J., Liu, Q. M. and Zhang, D. F., 2004. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. *Land degradation & development*, 15(2): 115-121.
- Wang, Y., Zhao, Y., Liu, Y., Jiang, Y., Zheng, B., Xing, J., Liu, Y., Wang, S. and Nielsen, C. P., 2022. Sustained emission reductions have restrained the ozone pollution over China. *Nature Geoscience*, 1-8.

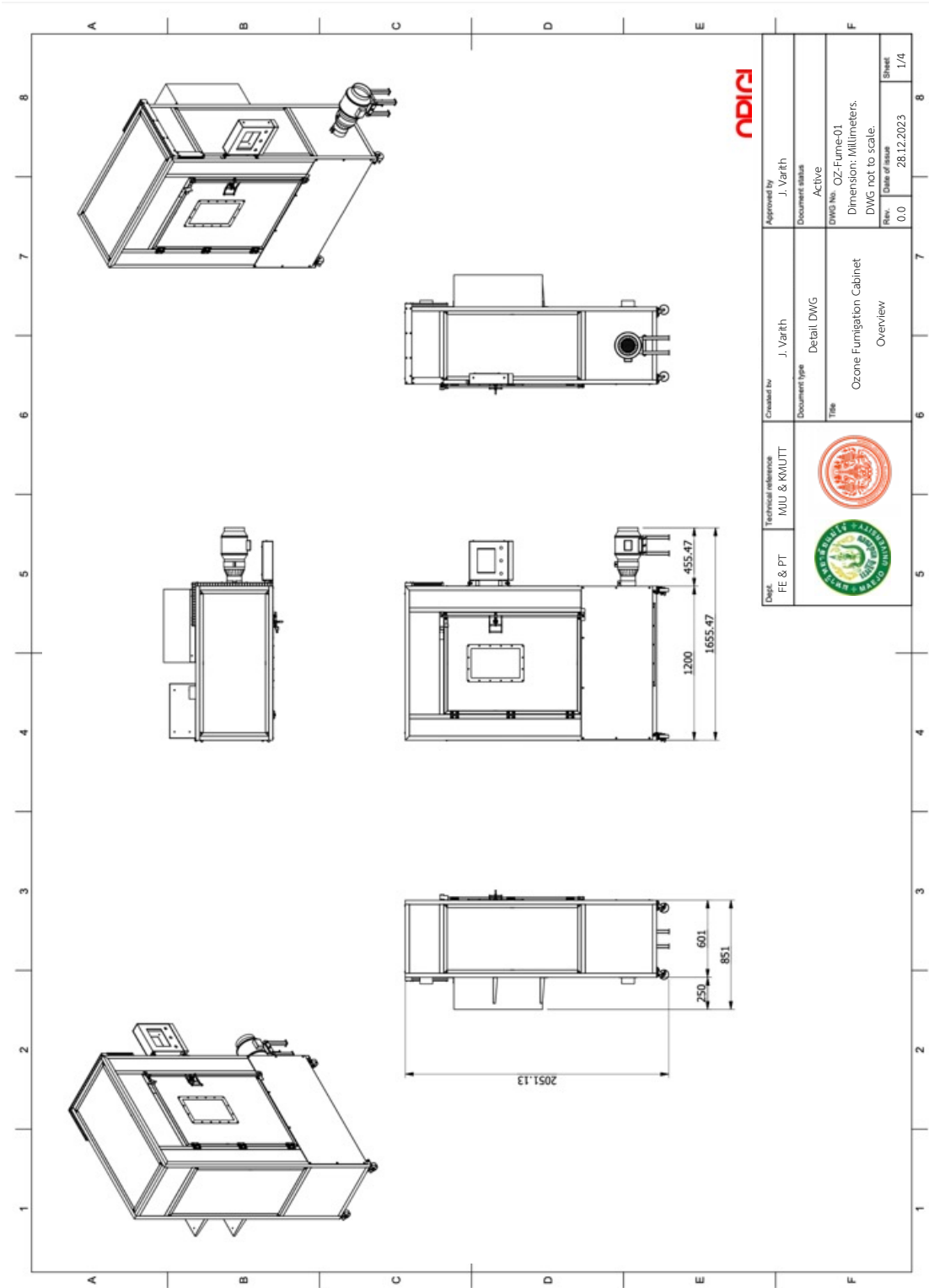
- Wisutiamonkul, A., Ampomah-Dwamena, C., Allan, A. C. and Ketsa, S., 2017. Carotenoid accumulation in durian (*Durio zibethinus*) fruit is affected by ethylene via modulation of carotenoid pathway gene expression. *Plant Physiology and Biochemistry*, 115: 308-319.
- Yuk, H. G., Yoo, M. Y., Yoon, J. W., Moon, K. D., Marshall, D. L. and Oh, D. H., 2006. Effect of combined ozone and organic acid treatment for control of *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* on lettuce. *Journal of Food Science*, 71(3): M83-M87.
- Yuk, H. G., Yoo, M. Y., Yoon, J. W., Moon, K. D., Marshall, D. L. and Oh, D. H., 2006. Effect of combined ozone and organic acid treatment for control of *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* on lettuce. *Journal of Food Science*, 71(3): M83-M87.
- Zhang, K., Li, L., Huang, L., Wang, Y., Huo, J., Duan, Y., Wang, Y. and Fu, Q., 2020. The impact of volatile organic compounds on ozone formation in the suburban area of Shanghai. *Atmospheric environment*, 232: 117511.
- Zhang, Y., Tan, Y. W., Stormer, H. L. and Kim, P., 2005. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene. *nature*, 438(7065): 201-204.
- Zhu, J., Chen, Y., Shang, J. and Zhu, T., 2019. Effects of air/fuel ratio and ozone aging on physicochemical properties and oxidative potential of soot particles. *Chemosphere*, 220: 883-891.
- กรมควบคุมมลพิษ, 2561. ดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย. กรมควบคุมมลพิษ. เล่มที่ 135 (พิเศษ): 283.
- กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2560. เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร. ฉบับที่ 3. 9 หน้า.
- กฤษณา หงส์คู, ญัฎฐา เลหากุลจิตต์ และอรพิน เกิดชูชื่น. 2555. การเร่งการสุกของทุเรียนหมอนทอง ต่อคุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และสารหอมระเหย. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 43 ฉบับที่ 2 (พิเศษ): 417-420.
- ขรณี ต้อยเต็มวงศ์, 2547. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการล้างผักด้วยสารไตรโซเดียมฟอสเฟต คลอรีน และการใช้โอโซน. สืบค้นได้จาก; <https://phtnet.or.th>.
- จาดุพงศ์ วาฤทธิ, นลิน วงศ์ขัตติยะ และนพมณี โทปุญญานนท์. 2555. การพัฒนาระบบปลอดเชื้อ ภาชนะ เพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อด้วยโอโซนสำหรับระบบไบโอรีแอคเตอร์จุ่มชั่วคราวระดับอุตสาหกรรม. ภายใต้แผนงานวิจัย ระบบการผลิตท่อนพันธุ์อ้อยปลอดโรคด้วยระบบไบโอรีแอคเตอร์จุ่ม

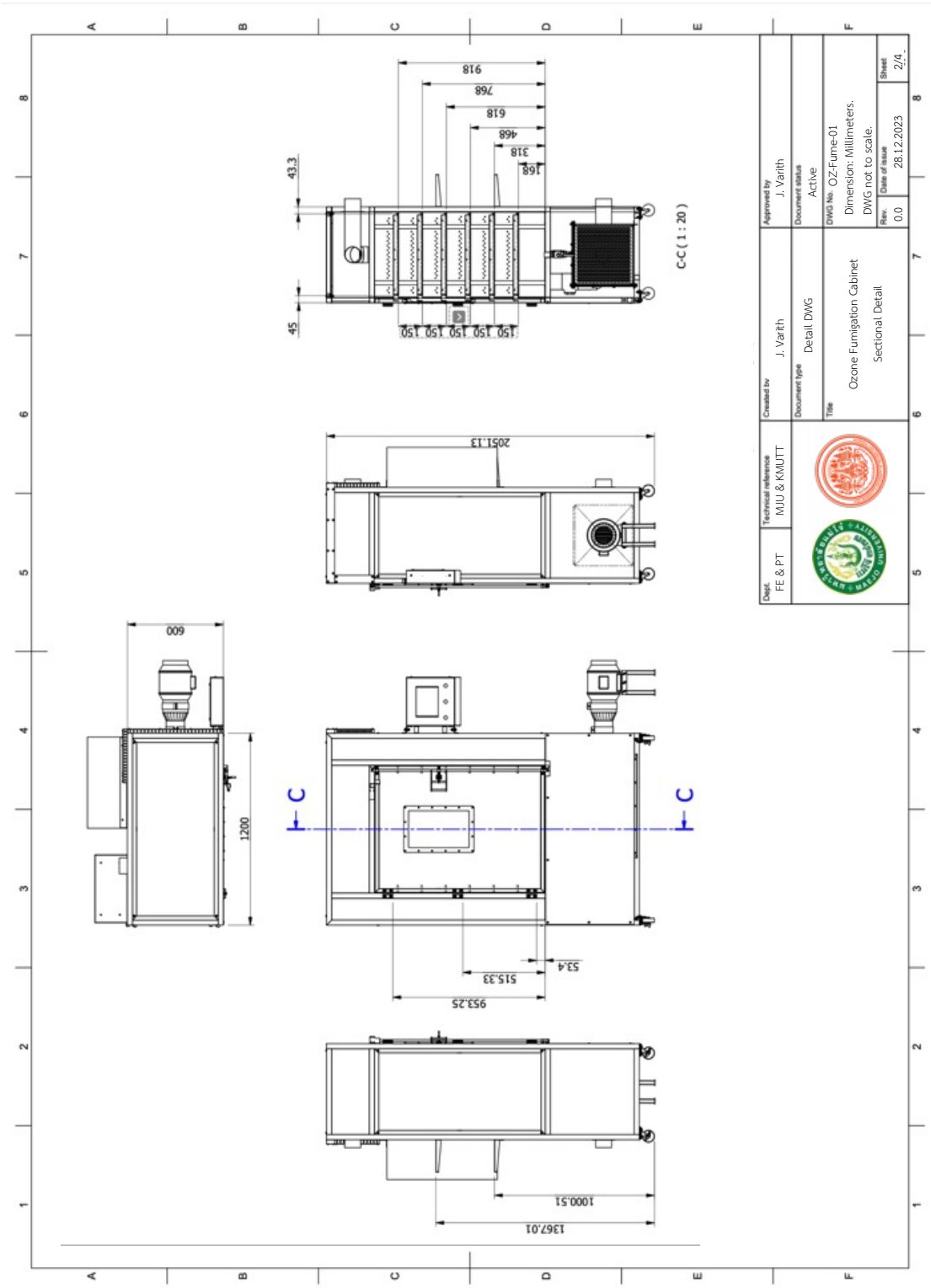
- ชั่วคราวขนาดอุตสาหกรรม. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้: เชียงใหม่.
- จตุรภัทร วาฤทธิ์, จักรพงษ์ พิมพ์พิมล, สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ และชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร, 2563. การพัฒนาระบบรมแก๊สไอโซนกับผลลำไยสดเพื่อทดแทนการรมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์. ภายใต้แผนงานวิจัย Smart Farming ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน).
- ดารณี ปานขลิบ, 2544. การปลูกผลและการเก็บรักษาเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 110 หน้า
- ต้นวงศ์ สุดโต, 2549. ผลของอุณหภูมิ ชนิดของฟิล์มและสาร 1-MCP ต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองพร้อมบริโภค. วิทยานิพนธ์ (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) สาขาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 136 หน้า.
- ปรารค์ทอง กวานห้อง และ เบญจมาศ รัตนชินกร, 2553. ผลของบรรจุภัณฑ์ต่ออายุการเก็บรักษาเนื้อทุเรียนพร้อมบริโภค. การประชุมวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 9. วันที่ 11-14 พฤษภาคม 2553. ณ โรงแรมกรุงศรีริเวอร์.
- ผ่องเพ็ญ จิตอารีรัตน์, อภิรตี อุทัยรัตนกิจ, กัลยา ศรีพงษ์, ณัฐชัย พงษ์ประเสริฐ และสุกัญญา เอี่ยมลออ, 2562. การลดเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในผักอินทรีย์ที่บริโภคสดและการยืดอายุการเก็บรักษา. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุนประจำปีงบประมาณ 2561 มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี. 127 หน้า.
- ผ่องเพ็ญ จิตอารีรัตน์, อภิรตี อุทัยรัตนกิจ, ณัฏฐา เลาหกุลจิตต์, พนิดา บุญฤทธิ์ธงไชย, กัลยา ศรีพงษ์, สุกัญญา เอี่ยมลออ และณัฏฐพล ไขแสงศรี, 2563. การควบคุมคุณภาพและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค. รายงานการวิจัยและการพัฒนาการวิจัยการเกษตร ฉบับสมบูรณ์ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). 115 หน้า.
- พีรพงษ์ แสงวนวงศ์กุล และ ยุพิน อ่อนศิริ, 2560. การชะลอการสุกและแตกของผลทุเรียนพันธุ์หมอนทองระหว่างการส่งออกทางเรือด้วยสารเอทีฟอน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 50 ฉบับที่ 3 (พิเศษ): 236-239.
- ภริสา ทศวิล, อรพิน เกิดชูชื่น และณัฏฐา เลาหกุลจิตต์, 2552. การยืดอายุการเก็บรักษาและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทุเรียนพร้อมบริโภคโดยใช้สารเคลือบที่บริโภคได้. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 40 ฉบับที่ 1 (พิเศษ) หน้า 257-260.
- วรพรรณี เผ่าทองสุข และ จำรูญศรี พุ่มเทียน, 2559. ผลของการใช้ไอโซนร่วมกับความร้อนในการกำจัดเชื้อ *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli* และ *Saccharomyces*

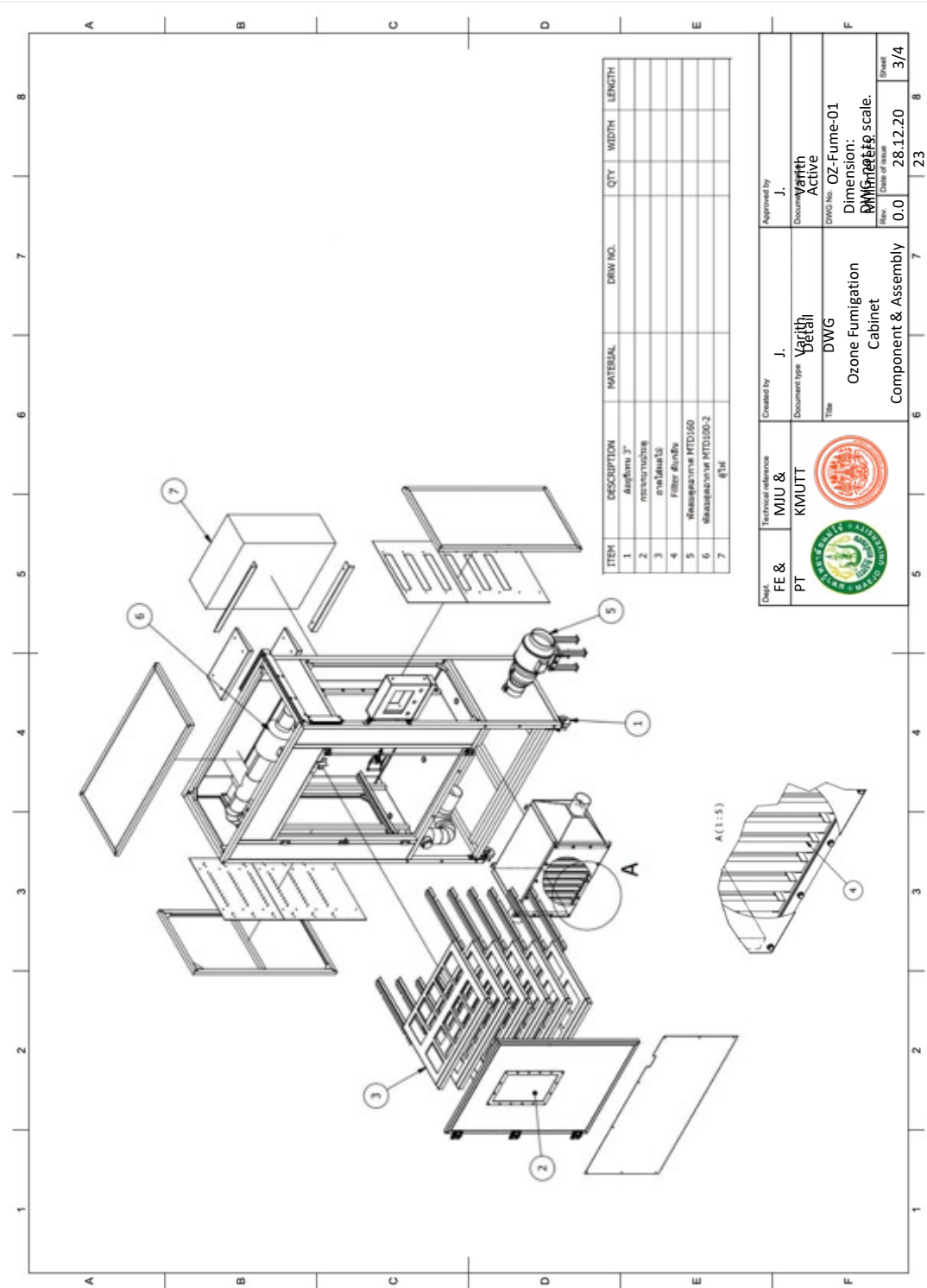
- cerevisiae* ในน้ำตาลสด น้ำลำไย และน้ำมะพร้าว. มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ วิชาการ ปีที่ 20 ฉบับที่ 39, หน้า 119-131.
- วรภัทร ลัคนทินวงศ์, ปิยะพงษ์ สอนแก้ว และอัสจิม่า ฤกษ์ทวีสุข, 2556. ผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิ วางจำหน่ายต่อคุณภาพทุเรียนหมอนทองตัดแต่งพร้อมบริโภคร. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปี ที่ 44 ฉบับที่ 3 (พิเศษ): 170-173.
- ศิริกาญจน์ จันทร์ถาวรพานิช, 2554. การศึกษาอิทธิพลของสาร 1-MCP ที่มีต่อคุณภาพของทุเรียน พันธุ์หมอนทองตัดแต่งพร้อมบริโภคระหว่างการเก็บรักษา. วิทยานิพนธ์ (วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต) สาขาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 178 หน้า.
- ศิริพร อมรพุทธิ, 2558. ผลของ 1-methylcyclopropene (1-MCP) และอุณหภูมิต่อการสุกและการเก็บรักษาของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง. วิทยานิพนธ์ (วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต) สาขาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 140 หน้า.
- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562. ข้อมูลปริมาณการผลิตทุเรียน (ผลผลิต), (ระบบออนไลน์), สืบค้นได้จาก : <https://nabc-catalog.oae.go.th/dataset/oae0034> (12 สิงหาคม 2566).
- สมทรงศรี นันทะไชย, เบญจมาศ รัตนชินกร และอุมาภรณ์ สุจริตทวีสุข, 2544. การศึกษาภาชนะบรรจุและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับทุเรียนพร้อมรับประทาน. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการประจำปี 2543. สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร.
- สายชล เกตุษา, 2538. การศึกษากลไกและการควบคุมของการตกกระของกล้วยไข่สุก. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ 90.
- สุจิตร์ รตนะมโน, 2536. ผลของความเข้มข้นและระยะเวลาในการรมสาร 1-เมทิลไซโคลโพรเพนต่อการสุกของมะม่วงพันธุ์มหาชนก. Postharvest Newsletter. ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2536.
- สุดารัตน์ จันทร์ทอง, 2536. ความต้องการการส่งเสริมการผลิตข้าวของเกษตรกร ในอำเภอปัว จังหวัดน่าน. วิทยานิพนธ์ (เกษตรศาสตรมหาบัณฑิต) สาขาส่งเสริมและพัฒนาการเกษตร, คณะเกษตรศาสตร์และสหกรณ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 109 หน้า.
- สุดารัตน์ สุตพันธ์, 2536. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อทุเรียนพันธุ์ชะนีและพันธุ์หมอนทองภายหลังการเก็บเกี่ยว. วิทยานิพนธ์ (เกษตรศาสตรมหาบัณฑิต) สาขาพืชสวน, คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 79 หน้า.
- สุธีรา วัฒนกุล, 2546. การยืดอายุการเก็บรักษาผลทุเรียนสดและเนื้อทุเรียนพร้อมรับประทาน. วิทยานิพนธ์ (วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต) สาขาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร, ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 139 หน้า.

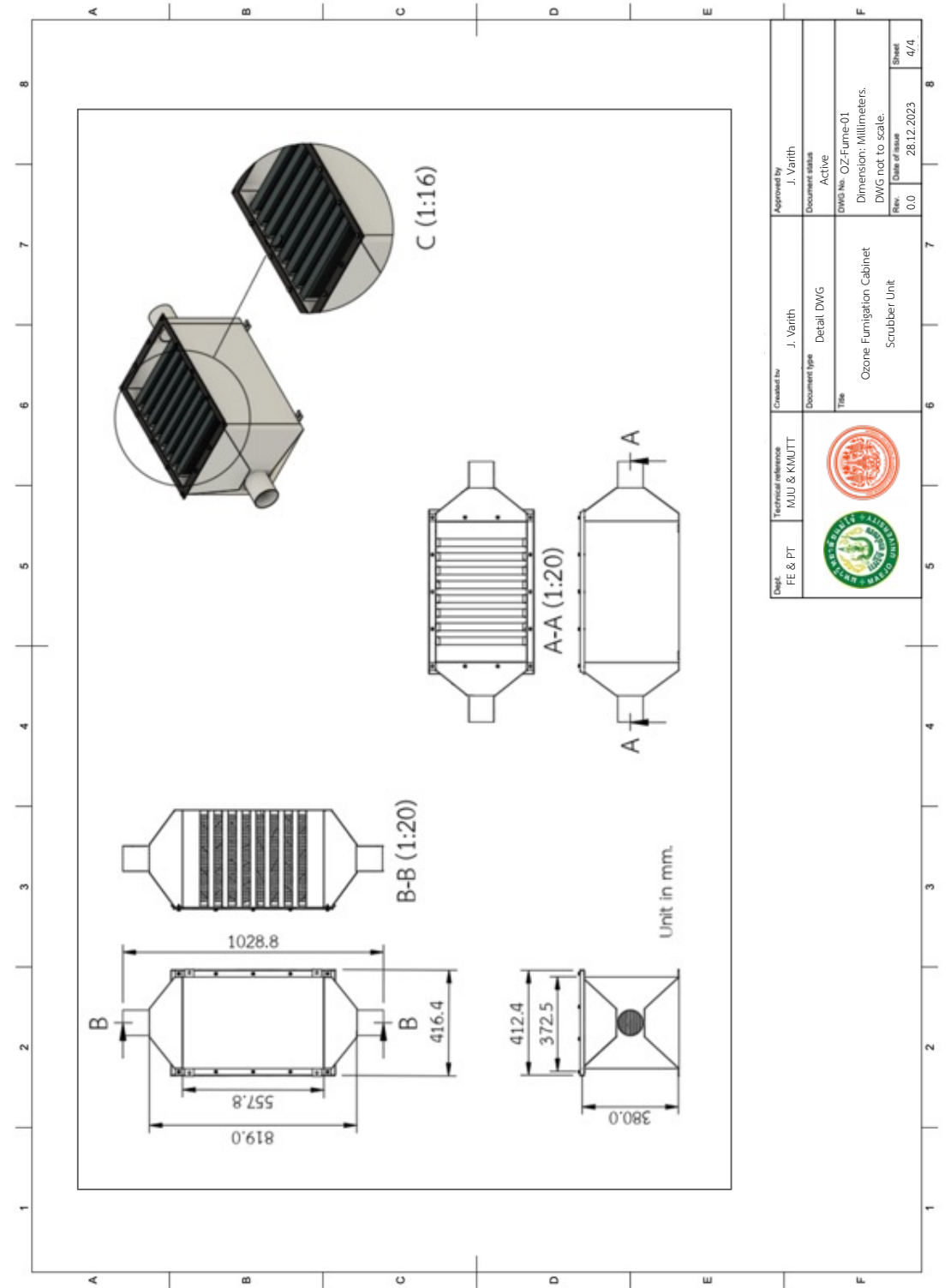
ภาคผนวก ก

แบบตู้รมก๊าซไอโซนสำหรับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภค





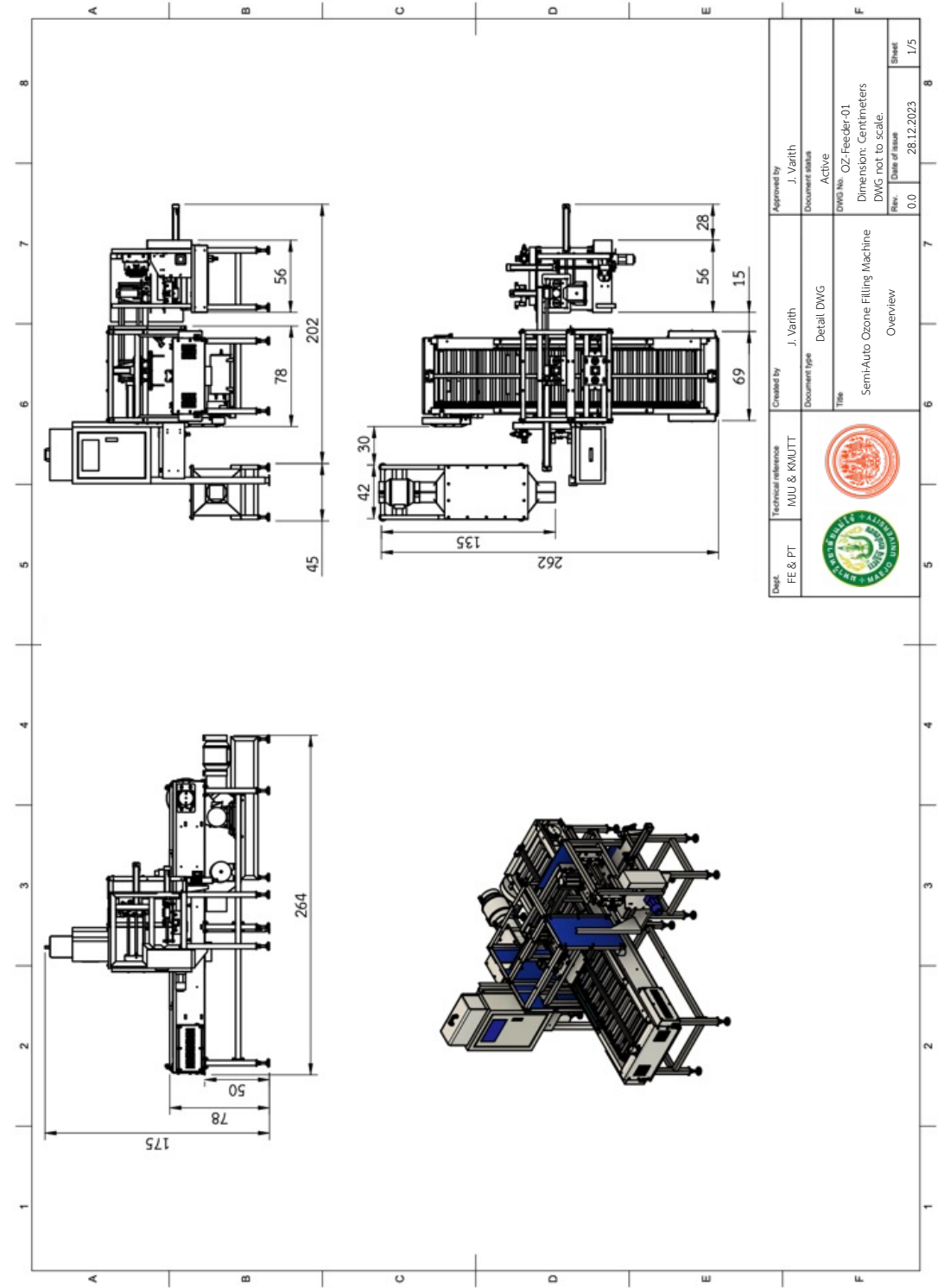


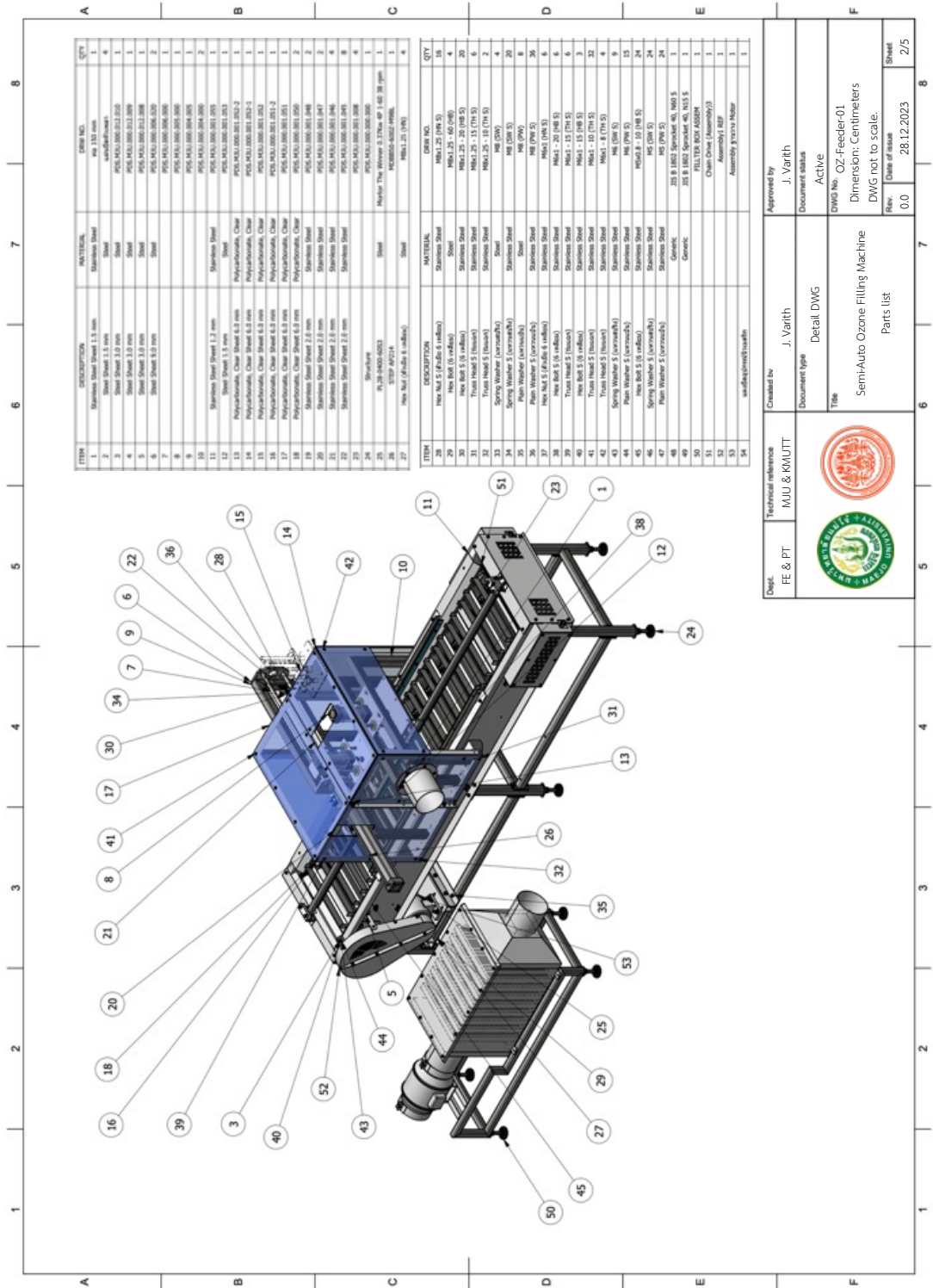


Dept. FE & PT	Technical reference MUU & KMUTT	Created by J. Varith	Approved by J. Varith
		Document type Detail DWG	Document status Active
		DWG No. OZ-Fume-01	
		Dimension: Millimeters.	
		DWG not to scale.	
		Rev.	Date of issue
		0.0	28.12.2023
			Sheet
			4/4

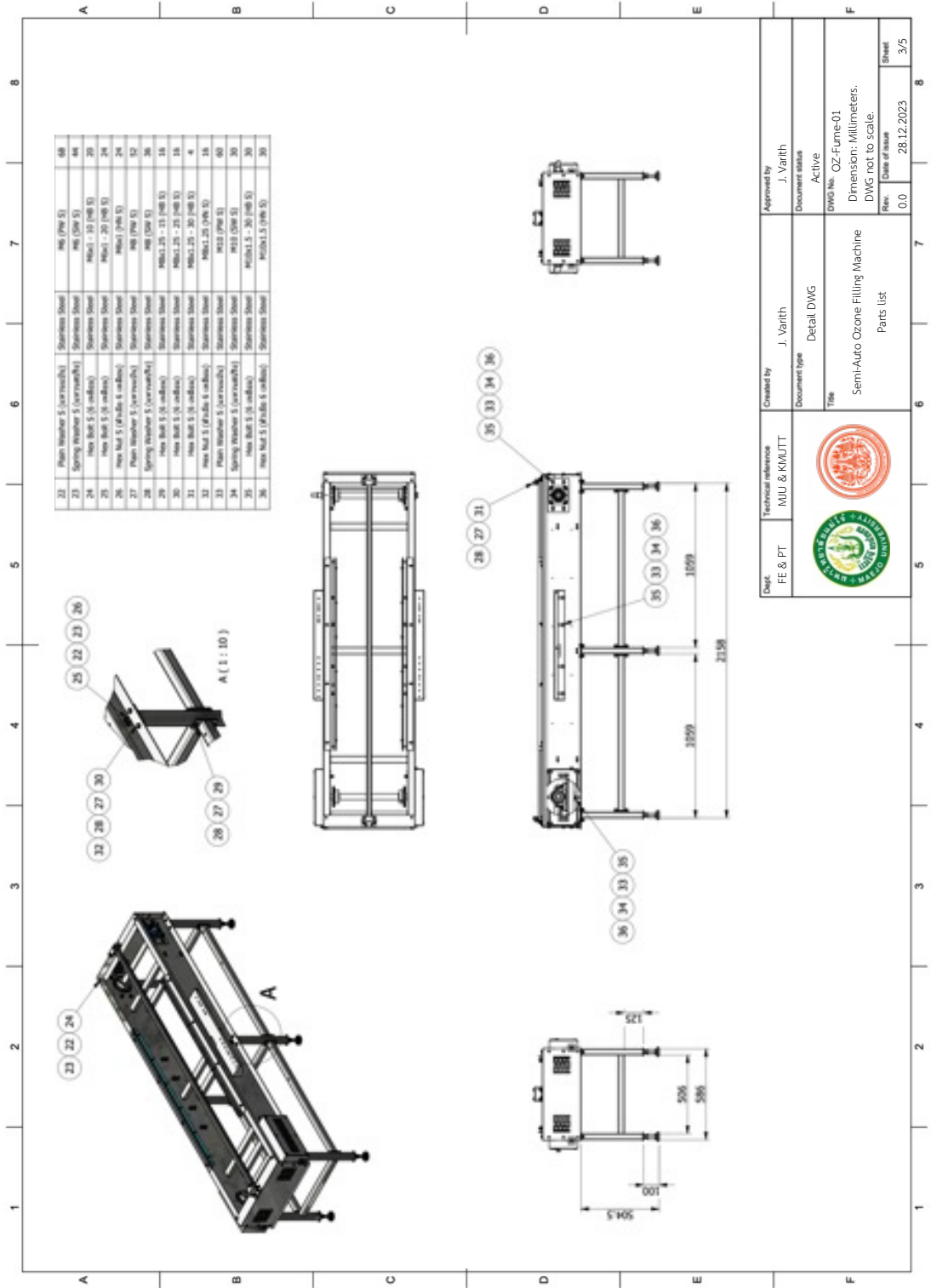
ภาคผนวก ข

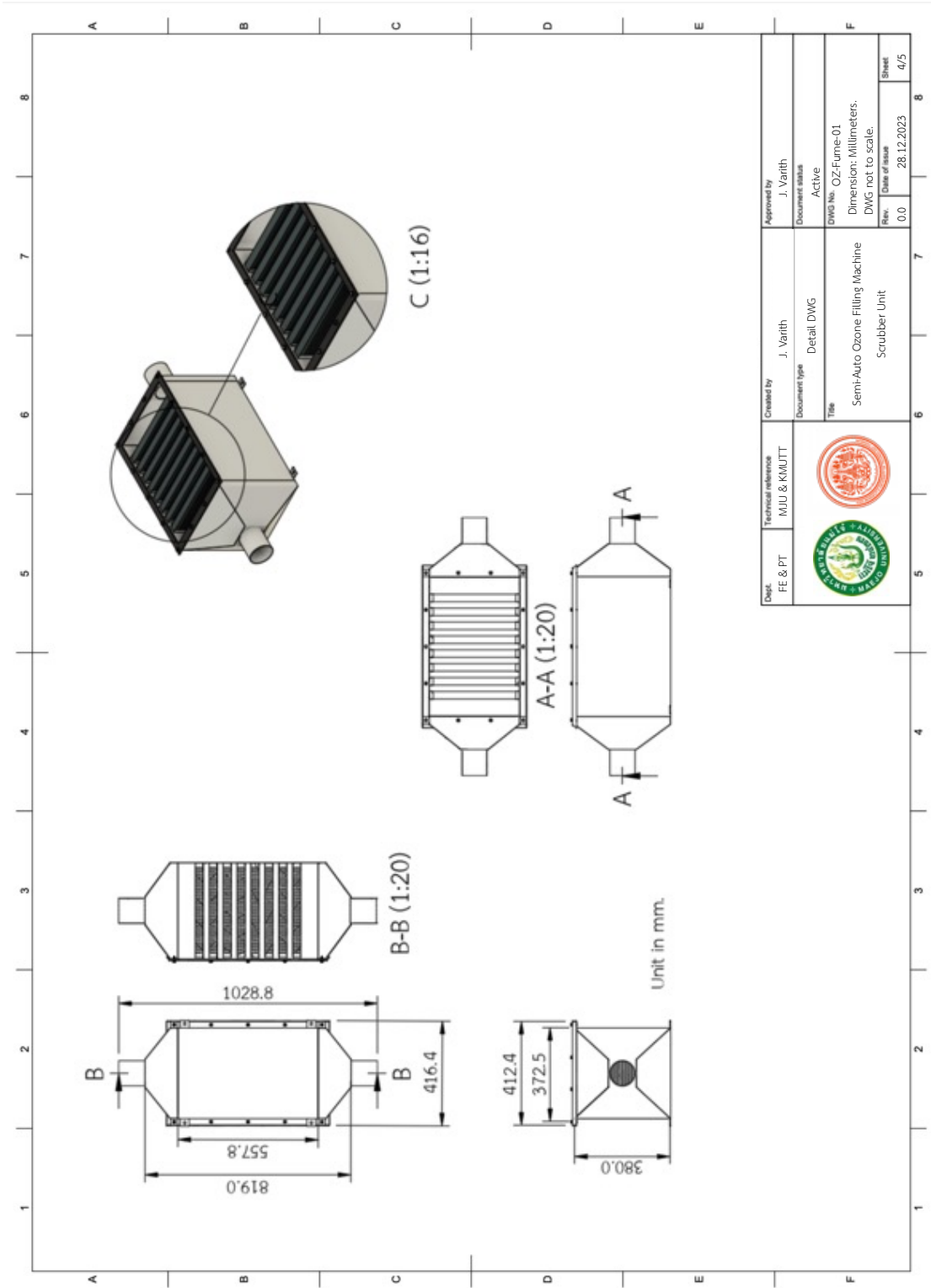
แบบเครื่องฉีดก๊าซไอโซนึ่งอัตโนมัติสำหรับทุเรียนตัดแต่งพร้อมบริโภคน

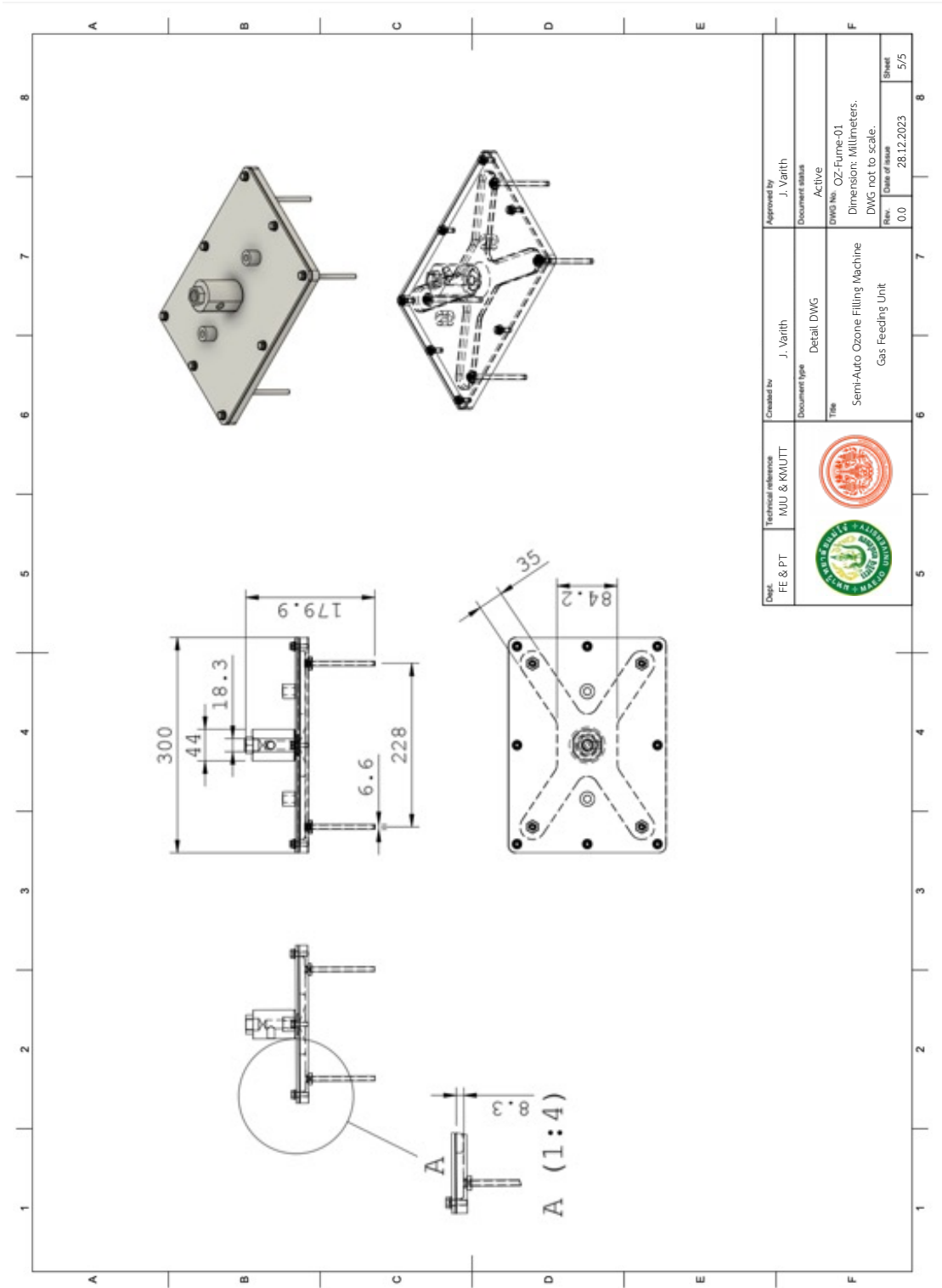




DWG No.	J. Varth		DWG No.	J. Varth							
	Detail DWG			Active							
Title											
Semi-Auto Ozone Filling Machine											
Parts list											
Revision											
Date of issue											
28.12.2023											
Sheet											
2/5											







ภาคผนวก ค
ตารางวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ตารางที่ ค.1 การปนเปื้อนของเชื้อ Total bacteria ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	Total bacteria (log CFU/ g FW)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Non inoculated + Untreated	3.13 ^c	3.65 ^c	4.09 ^c	4.27 ^c
Non inoculated + Ozone	2.71 ^d	2.79 ^d	3.45 ^d	3.70 ^d
Inoculated + Untreated	5.26 ^a	5.75 ^a	6.20 ^a	6.65 ^a
Inoculated + Ozone	4.84 ^b	5.00 ^b	5.20 ^b	5.48 ^b
F-test	**	**	**	**
C.V. (%)	2.83	4.16	2.03	2.13

ตารางที่ ค.2 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อ และทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซนความเข้มข้น 900 ppm และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน หลังจากนั้นย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) ทุเรียนที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ ใช้เป็นชุดควบคุม

Treatments	Total bacteria (log CFU/ g FW)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Non inoculated + Untreated	2.68 ^c	3.03 ^c	3.33 ^c	3.48 ^c
Non inoculated + Ozone	0.84 ^d	2.53 ^d	2.76 ^d	2.93 ^d
Inoculated + Untreated	5.59 ^a	5.63 ^a	5.80 ^a	6.21 ^a
Inoculated + Ozone	4.87 ^b	4.95 ^b	5.05 ^b	5.16 ^b
F-test	**	**	**	**
C.V. (%)	19.71	2.70	2.81	4.08

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

** = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ตารางที่ ค.3 การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบ ถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	<i>E. coli</i> (log CFU/ g FW)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Non inoculated + Untreated	1.46 ^b	2.29 ^c	3.11 ^c	3.28 ^c
Non inoculated + Ozone	0.00 ^c	0.00 ^d	2.80 ^d	2.63 ^d
Inoculated + Untreated	5.53 ^a	5.78 ^a	6.01 ^a	6.49 ^a
Inoculated + Ozone	5.02 ^a	4.96 ^b	5.20 ^b	5.62 ^b
F-test	**	**	**	**
C.V. (%)	19.31	6.40	4.44	4.67

ตารางที่ ค.4 การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบ ถาด (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	<i>E. coli</i> (log CFU/ g FW)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Non inoculated + Untreated	0.00 ^c	0.00 ^c	0.00 ^c	0.00 ^c
Non inoculated + Ozone	0.00 ^c	0.00 ^c	0.00 ^c	0.00 ^c
Inoculated + Untreated	5.27 ^a	5.44 ^a	6.10 ^a	6.74 ^a
Inoculated + Ozone	4.57 ^b	4.89 ^b	5.05 ^b	5.38 ^b
F-test	**	**	**	**
C.V. (%)	4.42	4.04	1.94	2.39

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

** = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ตารางที่ ค.5 การปนเปื้อนของเชื้อราในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบภาค (โมเดลที่ 1) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลูกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลูกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	Mold (log CFU/ g FW)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Non inoculated + Untreated	0.00	0.00	0.00	2.63 ^a
Non inoculated + Ozone	0.00	0.00	0.00	2.46 ^a
Inoculated + Untreated	0.00	0.00	0.00	0.00 ^b
Inoculated + Ozone	0.00	0.00	0.00	0.00 ^b
F-test	NS	NS	NS	**
C.V. (%)	0.00	0.00	0.00	16.34

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

NS = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

** = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ตารางที่ ค.6 อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนของทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	Respiration rate (mg CO ₂ kg ⁻¹ hr ⁻¹)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	127.14 ^b	114.73	45.08 ^a	69.01 ^a
Ozone	180.12 ^a	128.29	22.49 ^b	45.19 ^b
F-test	**	NS	*	*
C.V. (%)	5.67	4.04	0.95	16.10
Treatments	Ethylene production (μl C ₂ H ₄ kg ⁻¹ hr ⁻¹)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	12.62 ^a	0.80	0.17	0.19
Ozone	7.01 ^b	0.87	0.25	0.23
F-test	*	NS	NS	NS
C.V. (%)	39.82	43.94	41.22	40.32

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

NS = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

* = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ตารางที่ ค.7 การเปลี่ยนแปลงค่า L^* a^* b^* และ Hue angle ของเนื้อทุเรียนตัดแต่ง ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	L^* value of pulp			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	86.42	84.57 ^b	86.14	86.97
Ozone	84.42	86.29 ^a	86.58	87.04
F-test	NS	**	NS	NS
C.V. (%)	1.47	0.34	0.97	0.56
Treatments	a^* value of pulp			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	-4.01	-3.99	-4.21	-4.00
Ozone	-3.52	-3.83	-4.53	-4.45
F-test	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	8.05	7.49	3.47	9.17
	b^* value of pulp			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	39.96 ^b	42.30	36.06 ^b	41.03
Ozone	46.54 ^a	38.80	43.16 ^a	42.15
F-test	*	NS	**	NS
C.V. (%)	5.10	5.01	1.46	2.33
	Hue angle of pulp			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	95.55	95.49	96.45	95.57
Ozone	94.69	96.06	96.32	95.64
F-test	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	0.41	0.18	0.22	0.45

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

NS = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ * = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ตารางที่ ค.8 ความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	Firmness (N)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	3.86 ^b	4.31	2.72	3.03
Ozone	5.27 ^a	3.85	1.95	2.98
F-test	*	NS	NS	NS
C.V. (%)	9.17	4.77	28.96	15.23
Treatments	Total soluble solid content (°Brix)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	31.00	22.66	28.50	28.00
Ozone	31.50	27.00	26.66	29.66
F-test	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	2.24	6.91	2.27	4.39
Treatments	Antioxidant capacity (% inhibition)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	88.19 ^a	66.69 ^b	53.11 ^a	43.88 ^b
Ozone	83.29 ^b	76.70 ^a	50.32 ^b	49.01 ^a
F-test	*	**	**	*
C.V. (%)	2.31	2.20	0.99	2.94
Treatments	Total sugar content (mg/100g FW)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	40.91	36.61 ^b	41.35	40.47 ^b
Ozone	40.43	42.80 ^a	40.89	43.77 ^a
F-test	NS	**	NS	*
C.V. (%)	6.82	3.35	4.92	3.00

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

NS = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ * = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ตารางที่ ค.9 คะแนนการยอมรับของผู้บริโภคด้านรสชาติ ความหวาน และความชอบโดยรวมต่อทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบถาด (โมเดลที่ 1) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	Taste (score)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	4.08	3.50	3.08	2.66 ^b
Ozone	4.25	4.00	3.00	3.25 ^a
F-test	NS	NS	NS	*
C.V. (%)	7.74	17.63	3.00	6.89
Treatments	Sweetness (score)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	4.56	2.88 ^b	2.41 ^b	3.08
Ozone	4.62	3.75 ^a	3.37 ^a	2.93
F-test	NS	**	**	NS
C.V. (%)	8.23	5.43	5.56	8.67
Treatments	Overall acceptance (score)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	5.00	4.16	3.06 ^b	3.25
Ozone	5.00	4.50	4.00 ^a	3.06
F-test	NS	NS	**	NS
C.V. (%)	0.00	10.47	6.29	12.70

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

NS = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

* = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ตารางที่ ค.10 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	Total bacteria (log CFU/ g FW)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Non inoculated + Untreated	1.45 ^b	2.19 ^c	2.88 ^c	3.29 ^c
Non inoculated + Ozone	0.00 ^c	0.00 ^d	1.09 ^d	2.35 ^d
Inoculated + Untreated	3.97 ^a	4.93 ^a	5.61 ^a	6.72 ^a
Inoculated + Ozone	4.04 ^a	4.33 ^a	4.83 ^b	5.52 ^b
F-test	**	**	**	**
C.V. (%)	12.95	4.49	8.53	6.35

ตารางที่ ค.11 การปนเปื้อนของเชื้อ total bacteria ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	Total bacteria (log CFU/ g FW)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Non inoculated + Untreated	1.50 ^c	2.40 ^c	2.73 ^c	3.01 ^c
Non inoculated + Ozone	0.18 ^d	0.00 ^d	0.30 ^d	0.66 ^d
Inoculated + Untreated	3.81 ^a	4.62 ^a	5.20 ^a	5.87 ^a
Inoculated + Ozone	2.86 ^b	3.46 ^b	3.94 ^b	5.27 ^b
F-test	**	**	**	**
C.V. (%)	22.34	11.61	12.05	8.49

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

** = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ตารางที่ ค.12 การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ในเนื้อสีขาวของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูร์มโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	<i>E. coli</i> (log CFU/ g FW)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Non inoculated + Untreated	0.33 ^c	0.26 ^c	0.07 ^c	0.32 ^c
Non inoculated + Ozone	0.07 ^d	0.15 ^c	0.07 ^c	0.07 ^c
Inoculated + Untreated	4.34 ^a	5.03 ^a	5.53 ^a	6.64 ^a
Inoculated + Ozone	3.92 ^b	4.40 ^b	4.60 ^b	5.41 ^b
F-test	**	**	**	**
C.V. (%)	11.82	10.12	8.86	8.85

ตารางที่ ค.13 การปนเปื้อนของ *E. coli* ในเนื้อสีเหลืองของทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* ก่อนรมโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูร์มโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ปลุกถ่ายเชื้อและทุเรียนตัดแต่งที่ปลุกถ่ายเชื้อ non-pathogenic *E. coli* แต่ไม่ผ่านการทดสอบใดๆ (control)

Treatments	<i>E. coli</i> (log CFU/ g FW)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Non inoculated + Untreated	0.00 ^c	0.00 ^c	0.00 ^c	0.00 ^b
Non inoculated + Ozone	0.00 ^c	0.00 ^c	0.00 ^c	0.00 ^b
Inoculated + Untreated	4.41 ^a	5.02 ^a	5.53 ^a	5.36 ^a
Inoculated + Ozone	3.14 ^b	3.64 ^b	3.90 ^b	5.12 ^a
F-test	**	**	**	**
C.V. (%)	15.98	8.54	6.58	14.46

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

** = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ตารางที่ ค.14 ค่าสี L^* a^* b^* และ Hue angle ของเนื้อทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน(14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	L* value of pulp			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	87.15	86.40	87.41	87.39
Ozone	86.06	86.56	87.54	87.73
F-test	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	1.05	1.88	0.89	0.82
Treatments	a* value of pulp			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	-5.35	-4.85	-5.21	-5.05
Ozone	-4.47	-5.08	-4.81	-4.96
F-test	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	-7.70	-9.43	-7.14	-8.12
Treatments	b* value of pulp			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	42.65	42.90	42.04	39.75
Ozone	42.29	42.96	39.11	40.43
F-test	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	7.11	6.19	8.87	6.97
Treatments	Hue angle of pulp			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	97.16	96.46	97.07	97.23
Ozone	96.39	96.76	97.01	96.97
F-test	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	0.29	0.99	0.99	0.62

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

NS = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ ค.15 อัตราการหายใจ การผลิตเอทิลีน และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ของเนื้อทุเรียนตัดแต่ง ที่ผ่านการรมก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 900 ppm ด้วยตูรมโอโซนแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์เดี่ยว (โมเดลที่ 2) ในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และย้ายมาเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (14+1 วัน) เปรียบเทียบกับทุเรียนตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ (control)

Treatments	Respiration rate (mg CO ₂ kg ⁻¹ hr ⁻¹)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	175.05	38.66 ^b	26.97 ^b	16.68 ^b
Ozone	187.83	59.70 ^a	53.49 ^a	37.69 ^a
F-test	NS	**	*	**
C.V. (%)	10.35	9.33	18.51	15.09
Treatments	Ethylene production (μl C ₂ H ₄ kg ⁻¹ hr ⁻¹)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	2.35 ^a	0.06	0.01	0.00
Ozone	1.89 ^b	0.07	0.01	0.00
F-test	NS	*	NS	NS
C.V. (%)	73.89	27.70	82.64	0.00
Treatments	Total soluble solid content (°Brix)			
	Storage at 4°C			10°C
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 14+1
Control	28.16 ^a	27.66 ^b	28.50	24.66
Ozone	23.00 ^b	33.83 ^a	24.75	30.00
F-test	*	**	**	NS
C.V. (%)	12.82	12.38	15.89	20.47

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

NS = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

* = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** = ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99