

การพัฒนากลยุทธ์การวางแผนใช้งานตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแบบอุโมงค์สลับ
ทิศทางการวิจัย - ลมร้อนสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน



พิสนีย์ เสือสีบพันธุ์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2564

การพัฒนากลยุทธ์การวางแผนใช้งานตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแบบอุโมงค์สลับ
ทิศทางก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อนสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน



พิลีนี เสือสีบพันธุ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

สำนักบริหารและพัฒนาระบบวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนากลยุทธ์การวางแผนใช้งานตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแบบอุโมงค์สลับ
ทิศทางก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อนสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

ฟิลินี เสือสืบพันธุ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรภัทร วาฤทธิ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิต์คนวีจิตร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การพัฒนากลยุทธ์การวางแผนใช้งานตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแบบ อุโมงค์สลับทิศทางก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อนสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน
ชื่อผู้เขียน	นางสาวพิสนีย์ เสือสืบพันธุ์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ

บทคัดย่อ

กลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำมช้างได้จัดตั้งกลุ่มทำผลไม้อบแห้งเพื่อส่งออกอีกทั้งยังเพิ่มรายได้ให้กับคนในชุมชน แต่มักประสบกับปัญหา เช่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้ง มีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ ใช้น้ำมันคนเป็นจำนวนมากในการเคลื่อนย้ายหรือขนย้ายสำหรับสลับรถเข็นหน้า และหลัง เพื่อให้คุณภาพหลังการอบดียิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวางแผนการใช้งานและพัฒนาปรับปรุงตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อนของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน โดยใช้กรณีศึกษาเป็นผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือ แนวทางที่ 1 เป็นการวางแผนการใช้งาน และหาแนวทางการจัดการเพื่อปรับปรุงกระบวนการอบแห้งมะม่วงให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนแนวทางที่ 2 เป็นการแก้ไขปัญหาการกระจายลมที่ไม่สม่ำเสมอในตู้อบแห้งเชิงแนวคิด โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ร่วมกับเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computation Fluid Dynamic, CFD) เป็นเครื่องมือช่วยในการแก้ไขปัญหา โดยทำการเก็บความเร็วลมเพื่อทำนายการกระจายความเร็วลมภายในตู้อบแห้ง จากผลการศึกษาพบว่าแนวทางที่ 1 การวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามระยะเวลาอบผลิตภัณฑ์ร่วมกับการบริหารจัดการด้วยการนำผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่แห้งมาอบวนซ้ำ ช่วยให้การอบแห้งผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและประสิทธิภาพดีขึ้น ส่วนแนวทางการศึกษาที่ 2 เมื่อใช้โปรแกรม CFD เข้ามาช่วยแก้ปัญหา พบว่าเทคนิคนี้สามารถช่วยอธิบายการกระจายลมได้ดี หากทำการปรับปรุงแบบสลับทิศทางลมร้อน มีการกระจายลมภายในตู้อบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถนำไปประกอบการตัดสินใจการพัฒนาปรับปรุงเครื่องในอนาคตได้

คำสำคัญ : การวางแผนใช้งาน, การอบแห้งแบบอุโมงค์สลับทิศทางก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน, มะม่วง

Title	DEVELOPMENT OF STRATEGIC PLANNING FOR AGRICULTURAL PRODUCTS WITH SWITCHING OF GAS INFRARED - HOT AIR TUNNEL DRYER INWARD COMMUNITY ENTERPRISE
Author	Miss Pisinee Suasubphan
Degree	Master of Engineering in Food Engineering
Advisory Committee Chairperson	Associate Professor Dr. Somkiat Jaturonglumlert

ABSTRACT

Ban Lam chang agricultural product community enterprise has established a dried fruit group for export and increase income for people in the community. But often encounter problems such as the quality of the product was irregularly after drying, use a lot of worker of moving or transport trolley. This research study was aimed to study the planning and development of the drying of the agricultural products with gas infrared-hot air tunnel dryer of the community enterprise group. This work was presented with the dried mango as the product case study. The study was divided into two approaches. First, planning and finding a solution to improve drying management to achieve the effectiveness of the drying mango. Second, finding the conceptual solution to improve the problem of hot air distribution in the dryer by using the computation fluid dynamic (CFD) program as a tool, by collecting the air distribution data in the dryer during drying. The result of the first approach was found that the management of drying duration and looping the moist product to repeat the drying can improve the product quality. For the second approach, the result was found the CFD can use as an effective tool for solving the problem in the dryer. Moreover, this approach could be simulated the air distribution of a modified dryer which was applied as an option for further improvement.

Keywords : Development of planning, Gas infrared-hot air tunnel dryer, Mango



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่ผู้วิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ สติปัญญา กำลังกายและกำลังใจ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือ จากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ ซึ่งเป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา ตลอดจนให้ความดูแลและเอาใจใส่เป็นอย่างดี จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรภัทร วาฤทธิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร ที่กรุณาได้รับเป็นกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ความรู้ คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ กลุ่มวิสาหกิจแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำช้าง ที่อนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ เครื่องมือต่าง ๆ ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และอำนวยความสะดวกในการทำงานตลอดระยะเวลาที่เข้าทำการทดลอง จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ คณาจารย์ ข้าราชการและเจ้าหน้าที่ของสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำดี ๆ เสมอ และที่ให้ความช่วยเหลือ เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณวรลักษณ์ สุริวงษ์ คุณสกวเดือน แก้วดำ คุณพิรุฬห์รัชชย์ ไทยสมัคร เพื่อน ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาตรีและปริญญาโท ห้องปฏิบัติการอบแห้งทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อไพศาล เสือสืบพันธุ์ และคุณแม่ไมตรี เสือสืบพันธุ์ ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา เป็นกำลังใจที่ดี ให้การสนับสนุนทั้งในด้านการเรียนและการดำเนินชีวิต ให้คำปรึกษา จนทำให้ผู้จัดทำโครงการประสบความสำเร็จในการเรียน

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากนักน้อยต่อไป

พิสิณี เสือสืบพันธุ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ	ฉ
สารบัญ.....ช	ช
สารบัญตาราง.....ญ	ญ
สารบัญภาพ.....ฎ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 3	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย..... 3	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร..... 4	4
2.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ (Products) ที่ใช้ในการศึกษาการอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน..... 4	4
2.2 การอบแห้งแบบก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน..... 5	5
2.3 กลไกการอบแห้ง..... 5	5
2.4 อินฟราเรดชนิดใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิง (Infrared gas burner)..... 6	6
2.5 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง..... 7	7
2.6 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการอบแห้ง..... 9	9
2.7 การวิเคราะห์สาเหตุและผลในการแก้ไขปัญหาลมแห้ง..... 10	10
2.9 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)..... 15	15

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.12 สรุปกรอบแนวคิด	23
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	28
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	28
3.2 วิธีการเตรียมวัสดุดิบ	29
3.3 ศึกษากระบวนการและกลุ่ทรูการอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน.....	31
3.4 วางแผนการทดลอง.....	35
3.5 การวิเคราะห์ต้นทุนโดยใช้หลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม	43
3.6 งบประมาณที่ใช้ในการวิจัย	43
3.7 สถานที่ดำเนินการวิจัย	43
3.8 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	45
4.1 ผลของการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน.....	45
4.2 ผลของการพัฒนาการวางแผนใช้งานตู้อบแห้งสำหรับมะม่วงมหาชนก.....	53
4.3 ผลคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง.....	59
4.4 ผลการแก้ไขปัญหาโดยใช้การปรับปรุงตู้เซ็งแนวคิด	62
4.5 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนโดยใช้หลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม	68
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการศึกษา	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	70
ประวัติผู้วิจัย	98



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
ตารางที่ 2 แบบบันทึกการจัดการเก็บข้อมูลความเร็วลม (m/s) ที่แต่ละตำแหน่งในเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน	34
ตารางที่ 3 แบบบันทึกการจัดการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (°C) ที่แต่ละตำแหน่งในเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน	34
ตารางที่ 4 การเก็บข้อมูลเบื้องต้นในการนำมาวิเคราะห์ปัญหาของรถเข็นคันที่ 1 และคันที่ 8.....	38
ตารางที่ 5 ผลจากการศึกษาผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งในกลยุทธ์ที่ 2 ส่วนของร้อยละผลผลิตที่ได้ (Average %yield) และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิต (Cost) ต่อรอบ (Batch)	55
ตารางที่ 6 ผลจากการศึกษาผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งในกลยุทธ์ที่ 3 ส่วนของร้อยละผลผลิตที่ได้ (Average %yield) และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิต (Cost) ต่อรอบ (Batch)	57
ตารางที่ 7 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์อบแห้งมะม่วงในท้องตลาด.....	59
ตารางที่ 8 ผลการทดสอบคุณสมบัติมะม่วงหลังการอบแห้ง	59
ตารางที่ 9 ผลการตรวจวิเคราะห์ด้านจุลชีววิทยามะม่วงหลังการอบแห้ง	60
ตารางที่ 10 ผลการตรวจสอบสารอาหารสำคัญมะม่วงหลังการอบแห้งเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อ้างอิง .60	
ตารางที่ 11 รายละเอียดและต้นทุนการปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบสลับลมร้อนได้สองทิศทาง	68

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 กระบวนการอบแห้งมะม่วง	1
ภาพที่ 2 ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชื้นในการอบแห้ง ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอัตราการอบแห้ง.....	7
ภาพที่ 3 วิธีการเขียนผังก้างปลา.....	11
ภาพที่ 4 ชี้นมะม่วงมีความหนา 1 - 1.5 เซนติเมตร	29
ภาพที่ 5 แสดงลักษณะการเรียงมะม่วงบนถาดสแตนเลส	30
ภาพที่ 6 แสดงลักษณะการบรรจุถาดบนรถเข็น.....	30
ภาพที่ 7 เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน แบบใช้อุณหภูมิสูง หมายเลขตู้ 1 และ 2	31
ภาพที่ 8 เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อนของกลุ่มวิสาหกิจ หมายเลขตู้ 3 ถึง 8	32
ภาพที่ 9 แบบจำลองวิธีการวัดความเร็วลมภายในเตาอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน	33
ภาพที่ 10 ตัวแทนรถเข็นที่ใช้ในการเก็บข้อมูลการวัดความเร็วลมภายในตู้อบแห้ง.....	33
ภาพที่ 11 แบบจำลองการไหลของรถเข็นโดยเรียงตามลำดับหมายเลขหน้าตู้.....	36
ภาพที่ 12 แบบจำลองการเก็บข้อมูลเบื้องต้นของรถเข็นคันที่ 1 ภายในเตาอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน	39
ภาพที่ 13 แผนภาพการดำเนินงาน.....	44
ภาพที่ 14 ทิศทางการไหลลมร้อนภายในตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วย ก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน.....	45
ภาพที่ 15 หัวพ่นอินฟราเรดชนิดใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ในวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตร บ้านลำมช้าง	47

ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชันฐานแห่งของรถเข็นคันที่ 1 ในภาค ชั้นบน กลาง และล่างสุด.....	48
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (m/s) และเวลาของตุ้บแห้งหมายเลข 3, 6 และ 8 ..	49
ภาพที่ 18 การวิเคราะห์สาเหตุด้วยผังก้างปลา.....	50
ภาพที่ 19 สัดส่วนของปัญหาจากการวิเคราะห์สาเหตุด้วยผังก้างปลา	51
ภาพที่ 20 คุณภาพมะม่วงที่อบแห้งในอุณหภูมิ 70, 75 และ 80 °C	53
ภาพที่ 21 อัตราการอบแห้งจากการวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามกลยุทธ์ที่ 2.....	54
ภาพที่ 22 การจำแนกค่าใช้จ่ายในการอบแห้งต่อรอบ.....	55
ภาพที่ 23 อัตราการอบแห้งจากการวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามกลยุทธ์ที่ 3.....	56
ภาพที่ 24 การจำแนกค่าใช้จ่ายในการอบแห้งต่อรอบ.....	58
ภาพที่ 25 แบบจำลองตุ้บแห้งก่อนทำการปรับปรุง.....	62
ภาพที่ 26 รูปแบบการกระจายอากาศในรูปแบบเดิม.....	63
ภาพที่ 27 ตำแหน่งตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองการไหลรูปแบบการกระจายอากาศ ในรูป แบบเดิม	64
ภาพที่ 28 การเปรียบเทียบการกระจายอากาศระหว่างความเร็วอากาศจากการจำลอง และผลจาก การทดลอง.....	64
ภาพที่ 29 แบบจำลองตุ้บแห้งหลังการปรับปรุง.....	66
ภาพที่ 30 รูปแบบการสร้างแบบจำลองการกระจายอากาศหลังจากการปรับปรุง (A) ทิศทางการไหล จากขวา-ซ้าย (B) ทิศทางการไหลจากซ้าย-ขวา.....	67
ภาพที่ 31 สร้างแบบจำลองตุ้บแห้งที่ทำการปรับปรุงแล้วด้วยโปรแกรม Autodesk Fusion กำหนด รายละเอียดในการคำนวณ และแบบจำลองทางกายภาพ	76
ภาพที่ 32 การกำหนดเงื่อนไขของชนิดของคุณสมบัติ.....	77
ภาพที่ 33 การกำหนดสภาวะภายในตุ้บแห้ง.....	78
ภาพที่ 34 การกำหนดวัสดุที่ใช้ให้เสมือนวัสดุจริง	79
ภาพที่ 35 การกำหนดค่าในการ solve ด้านตัวแปรควบคุม	79

ภาพที่ 36 การกำหนดค่าในการ solve ด้านทางกายภาพ	80
ภาพที่ 37 การกำหนดผลการวิเคราะห์	80
ภาพที่ 38 แบบจำลองอนุกรมและควมเร็วลม หลังจากทำการกำหนดค่า	81
ภาพที่ 39 แบบจำลองของความเร็วลมภายในตู้อบแห้ง	82
ภาพที่ 40 ผลการวิเคราะห์ด้านจุลชีววิทยาในมะม่วงอบแห้ง	84
ภาพที่ 41 ผลการวิเคราะห์สารอาหารสำคัญในมะม่วงอบแห้ง	85
ภาพที่ 42 ฉลากการวิเคราะห์สารอาหารสำคัญในมะม่วงอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยบริโภค	86
ภาพที่ 43 ฉลากการวิเคราะห์สารอาหารสำคัญในมะม่วงอบแห้งต่อหนึ่งถุง	87

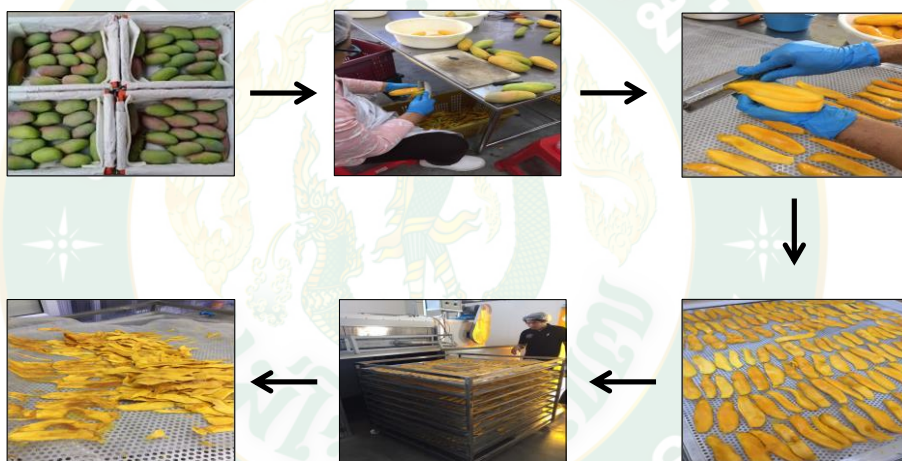


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

กลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำช้างได้จัดตั้งกลุ่มเพื่อทำผลไม้อบแห้งเพื่อส่งออกและเพื่อเพิ่มรายได้ให้กับคนในชุมชน แต่มักประสบกับปัญหา เช่น ผลิตภณฑ์ที่ได้หลังจากรอบแห้งมีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ ใช้งานคนเป็นจำนวนมากในการเคลื่อนย้ายสลับที่รถเข็นหน้าและหลัง เพื่อให้คุณภาพหลังการอบดีขึ้น นอกจากนั้นยังเกิดการสูญเสียความร้อนทิ้งเป็นจำนวนมากมีผลทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นทั้งในด้านแรงงานและไฟฟ้า โดยใช้กรณีศึกษาเป็นผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการอบแห้งมะม่วง

มะม่วงจัดเป็นผลไม้เขตร้อนที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย สามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศ ผลผลิตมะม่วงที่ได้ส่วนใหญ่ใช้บริโภคภายในประเทศ ในปี พ.ศ. 2556 มีการส่งออกมะม่วงปริมาณ 59.05 พันตัน มีมูลค่ารวม 3.32 ล้านบาท โดยส่งออกในรูปแบบมะม่วงสดประมาณ 33.38 พันตัน คิดเป็นมูลค่า 1.67 ล้านบาท และแปรรูป ส่งออกในรูปแบบผลไม้สดแช่เย็น และในรูปแบบมะม่วงกระป๋องประมาณ 25.66 พันตัน คิดเป็นมูลค่า 1.65 ล้านบาท และส่งออกในรูปแบบการแปรรูปอื่น ๆ เช่น น้ำมะม่วงคั้น น้ำมะม่วงเข้มข้น พริ้วตลัด ฯลฯ (กาญจนา, 2548)

การอบแห้ง (Drying) เป็นวิธีการถนอมอาหาร (Food preservation) ที่นิยมใช้มานาน โดยส่วนใหญ่วัสดุนั้นจะอยู่ในสถานะของแข็ง น้ำที่ระเหยออกจากวัสดุนั้นอาจจะไม่ต้องระเหยที่จุดเดือด

แต่ใช้อากาศพัดผ่านวัสดุนั้นเพื่อดึงน้ำออกมา วัสดุจะแห้งได้มาก-น้อยจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของมันด้วย อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการเก็บรักษา การอบแห้งเป็นการลดปริมาณน้ำในอาหาร เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทุกชนิด เช่น รา (Mold) ยีสต์ (Yeast) แบคทีเรีย (Bacteria) ที่เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย (Microbial spoilage) ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme) หรือชะลอปฏิกิริยาต่าง ๆ ทั้งทางเคมีและทางชีวเคมีซึ่งมีน้ำเป็นส่วนร่วมและเป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย (Food spoilage) การอบแห้งประกอบด้วยหลายวิธี ดังนี้ การอบแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์ (ตากแดด), การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน, การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying), การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying), การทำแห้งแบบโฟมแมท (Foam - mat drying), การอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) โดยวิธีอบแห้งที่สุดเป็นการอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying) เนื่องจากการอบแห้งวิธีนี้เป็นวิธีที่ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์มีจุดเดือดต่ำลง อินฟราเรดช่วยให้ความร้อนทะลุผ่านพื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้น้ำภายในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมาได้ไวยิ่งขึ้น โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงกับวัตถุดิบเดิมอีกด้วย (ชญานิศ และคณะ, 2561) และอีกวิธีคือการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry) เนื่องจากการอบแห้งโดยวิธีนี้สามารถรักษาสวนประกอบสำคัญของอาหารที่ถูกทำลายได้ง่ายด้วยความร้อน เช่น วิตามิน กลิ่น สี รักษารูปร่างและเนื้อสัมผัสของอาหารให้อยู่ใกล้เคียงกับของเดิม แต่ข้อเสียทั้งสองวิธีนี้คือไม่เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงและใช้เวลานาน (ชาลีตา, 2555)

การอบแห้งแบบการใช้ลมร้อน-ก๊าซอินฟราเรด (Hot air - gas infrared drying) มีข้อดีคือเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เช่น กลุ่มวิสาหกิจชุมชน สหกรณ์การเกษตร เป็นต้น เนื่องจากลงทุนต่ำ การดูแลง่าย ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาเครื่องอบแห้งน้อย แต่อย่างไรก็ตาม การอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน ยังพบปัญหาด้านประสิทธิภาพของการอบแห้ง เช่น ความเร็วลมภายในตู้อบแห้งมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้ภายในตู้เกิดการสะสมความชื้นและวัสดุอบแห้งได้รับความร้อนไม่ทั่วถึง และผลไม้ที่อบแห้งออกมามีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาการอบแห้งด้วยตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและหากลยุทธ์ในการอบแห้งเพื่อให้เหมาะสำหรับการอบแห้งผลไม้ของกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดเล็กและ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการอบแห้งลดการสูญเสีย และลดต้นทุนแรงงานและการจัดการ โดยใช้ผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเป็นกรณีศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งมะม่วงมหาชนกด้วยตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน
2. เพื่อศึกษากลยุทธ์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของการอบแห้งมะม่วงมหาชนกด้วยตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รูปแบบที่ใช้ในการอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน
2. ได้กลยุทธ์ไปปรับใช้กับอุตสาหกรรมผลไม้อบแห้งได้จริง อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการอบแห้งและแรงงานคน

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ผลไม้ที่นำมาศึกษาเป็นมะม่วงสายพันธุ์มหาชนก ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอยู่ในช่วง 16 - 17 °Brix (อุบล และคณะ, 2561)
2. ทำการเก็บผลการทดลองโดยใช้ตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อนของวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำมช้างเท่านั้น

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ (Products) ที่ใช้ในการศึกษาการอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วย ก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน

มะม่วง มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดีย มีการปลูกในหลายประเทศที่มีอากาศร้อนมะม่วงเป็นผลไม้พื้นบ้านของไทย เป็นที่นิยมปลูกกันมาก มีการปลูกหลากหลายสายพันธุ์ มีคุณประโยชน์และมีสรรพคุณ ทางยาหลายอย่าง นำมาเป็นผลไม้รับประทาน ใช้ประกอบอาหาร ใช้ทำเครื่องดื่มต่าง ๆ ได้ มะม่วงจะให้ผลผลิตใช้เวลาประมาณ 2-3 ปี จึงจะออกผลผลิต ถ้าเก็บรับประทานผลดิบ ให้เลือกผลมะม่วงที่มีขนาดพอดี ให้เก็บผลผลิตได้ตามต้องการ ถ้ารับประทานผลสุก สังเกตที่ผลขยายขนาดผลโตเต็มที่ เปลือกมีสีเหลืองทั่วผล มีกลิ่นหอม แสดงว่าผลสุก แล้วให้เก็บโดยให้ใช้กรรไกรตัดขั้ว แล้วต้องระวังการทำหล่น อาจทำให้เสียหายได้ แล้วจะนำมาพักบ่มไว้ เพื่อให้ผลสุกหอมหวานเต็มที่

มะม่วงมหาชนก

ชื่อวงศ์ Anacardiaceae

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Mangifera indica* Linn.

ชื่อสามัญ Mango (Mahachanok)

ชื่อท้องถิ่น มะม่วงมหาชนก

มะม่วงมหาชนกมีชื่อภาษาอังกฤษว่า Mahachanok หรือ Rainbow Mango มะม่วงมหาชนกมีแคลอรีต่อ 1/4 ผล หรือน้ำหนัก 65 กรัม อยู่ที่ประมาณ 51-55 กิโลแคลอรี และในปริมาณ 1/4 ผลของมะม่วงมหาชนก จะมีปริมาณน้ำตาลประมาณ 10.9 กรัม หรือราว ๆ 2.7 ช้อนชา สรรพคุณของมะม่วงมหาชนกถูกยืนยันประโยชน์โดยงานวิจัยของมหาวิทยาลัยนเรศวร พบว่าในมะม่วงมหาชนกมีสารแคโรทีนอยด์ ที่ช่วยเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกันให้ดีขึ้น สามารถทำหน้าที่เช่นเดียวกับวิตามินอี คือผลสารตัวเองเข้ากับเยื่อบุเซลล์ ช่วยลดความเสี่ยงโรคเมเร็งหลายชนิด และลดความเสี่ยงที่จะเป็นโรคหัวใจลงได้ถึง 40 % อีกทั้งยังสามารถลดความเสี่ยงโรคต่อกระดูกและจอประสาทตาเสื่อมได้ด้วย และยังพบสารแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นสารที่ให้สีแดง สีม่วง หรือสีน้ำเงินกับพืช โดยสารชนิดนี้จะช่วยยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ไม่ดีในระบบทางเดินอาหาร ช่วยชะลอความเสี่ยงของเซลล์ ลดอัตราเสี่ยงโรคหัวใจ รวมทั้งลดความเสี่ยงของโรคที่เกี่ยวข้องกับเส้นเลือดเลือดในสมองได้ แต่สารต้านอนุมูลอิสระชนิดนี้สามารถพบได้ในมะม่วงมหาชนกซึ่งเป็นมะม่วงพันธุ์ที่เปลือกผลเมื่อแก่หรือสุก จะมีผิวสีแดงม่วงหรือเหลืองเข้มปนแดงด้วยเช่นกัน (มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2560)

2.2 การอบแห้งแบบก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นของวัสดุอาหาร ธัญพืช และผลไม้ที่น่าสนใจ เพราะนอกจากสามารถนำมาใช้ในการถนอมวัสดุแล้ว ยังช่วยยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถนำผลิตภัณฑ์มาจัดจำหน่ายในช่วงที่มีราคาดี แม้ว่าเทคโนโลยีการอบแห้งไม่สลับซับซ้อน แต่การวางแผนการดำเนินการอบแห้งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษา ซึ่งรวมไปถึงการพิจารณาเลือกใช้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (สมชาติ, 2540) โดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการอบแห้งอย่างต่อเนื่องและวิธีการอบแห้งหนึ่งที่น่าสนใจคือการอบแห้งด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน ใช้ต้นทุนในการลงทุนต่ำกว่าการอบแห้งแบบอื่นพร้อมทั้งได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดี อีกทั้งยังเหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

การอบแห้งด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน (Infrared-hot air drying) เป็นการอบแห้งด้วยลมร้อนมาปรับปรุงโดยใช้อุปกรณ์เข้าไปช่วยเพื่อให้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากแห้งตามที่ต้องการ และมีความชื้นที่สม่ำเสมอ ผลิตผลที่อบแห้งด้วยวิธีนี้จะสะอาด และลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ได้ดีกว่าการตากแดด โดยหลักการอบแห้งของเตาอบชนิดนี้คือ เป็นการอบแห้งโดยมีอากาศผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ใช้หัวก๊าซอินฟราเรดแบบ LPG เป็นเชื้อเพลิงในการทำให้อากาศร้อน โดยอากาศร้อนจะถูกเป่าผ่านรถเข็นแต่ละคันภายในตู้อบแห้งและพาความชื้นจากผลิตภัณฑ์ออก (อาทิตยา และอมรชัย, 2557)

2.3 กลไกการอบแห้ง

คือกระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย (สมชาติ, 2537.) สิ่งที่สำคัญที่สุดในการอบแห้งคือ การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด โดยทั่วไปการอบแห้งมักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทไปยังผิวของวัสดุโดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำ ซึ่งไอน้ำจะเคลื่อนที่จากผิววัสดุมายังกระแสอากาศ และถ้าวัสดุมีปริมาณน้ำอยู่มาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะคงที่ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดลงเหลือน้อย อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำจะลดลงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง น้ำที่อยู่ภายในอาหารจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหนังอาหารด้วยกลไก แบ่งได้เป็น 3 แบบดังนี้ (กอบพัชรกุล และคณะ, 2550)

1) แบบให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัตถุ

จะเกิดเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง อากาศร้อนจะสัมผัสกับวัสดุ และอุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่า ๆ หนึ่งและจะคงที่ที่ค่าอุณหภูมิในช่วงเวลาหนึ่ง เรียกช่วงเวลานี้ว่า ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัตถุ

2) แบบแคปิลลารี (Capillary flow mechanism)

หลังจากที่วัสดุได้รับความร้อนในช่วงให้ความร้อนเบื้องต้นแล้ว ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการระเหยน้ำ น้ำที่อยู่ภายในวัตถุเคลื่อนที่มาที่พื้นผิวของวัตถุโดยอาศัยแรงแคปิลลารี อัตราเร็วของน้ำที่เคลื่อนที่มาที่พื้นผิวจะมีมากกว่าหรือเท่ากับอัตราที่น้ำระเหยกลายเป็นไอออกไป ทำให้ปริมาณความร้อนที่วัสดุใช้ในการระเหยน้ำหมด อุณหภูมิของผิววัตถุในช่วงนี้จึงมีอุณหภูมิกคงที่ จึงเรียกว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

3) แบบแพร่กระจาย (Diffusion mechanism)

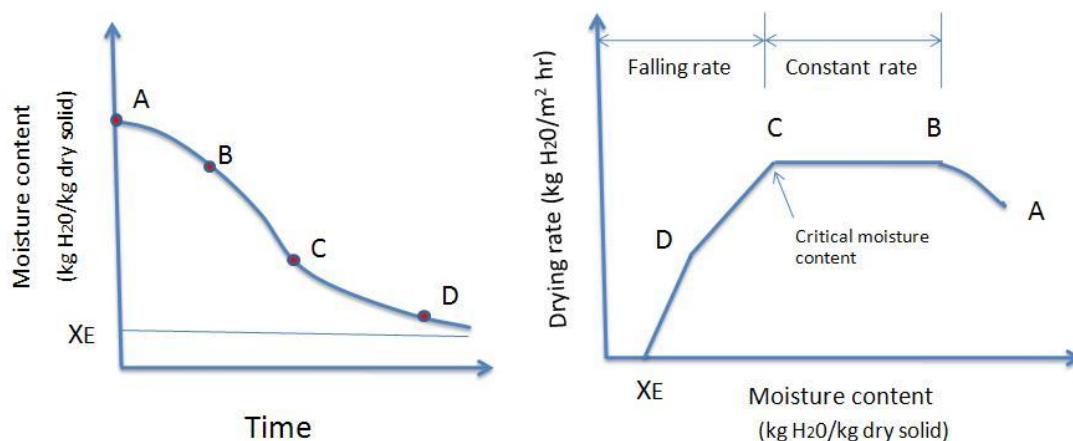
เมื่อน้ำที่ผิววัสดุระเหยออกไปแล้ว ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และความเข้มข้นของไอน้ำลดลง จะเกิดการแพร่กระจายของน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาค หรือแพร่ผ่านเข้าไปภายในอนุภาคของวัตถุ โดยอาศัยความดันไอที่แตกต่างกันระหว่างภายในและภายนอกของวัตถุ หลังจากกลไกการอบแห้งแบบที่ 2 วัสดุมีปริมาณน้อยลง การเคลื่อนที่ของน้ำมายังพื้นผิวของวัตถุก็จะช้าลงและอัตราการระเหยของน้ำที่พื้นผิววัสดุน้อยลง ปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับจะเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่ผิววัตถุเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำที่อยู่ตามรูพรุนหรือตามช่องแคบ ๆ นั้น ออกหมดการเคลื่อนที่ของน้ำที่เกิดขึ้นในวัตถุจะอาศัยการเคลื่อนที่แบบแพร่กระจาย ซึ่งอาศัยความแตกต่างของความดันไอต่อไป (เหมือนหมาย อภินทนาพงศ์, 2550) การอบแห้งจะสิ้นสุดเมื่อความชื้นของอากาศในตู้อบสมดุลกับความชื้นของอาหาร และเรียกความชื้นของอากาศขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล

2.4 อินฟราเรดชนิดใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิง (Infrared gas burner)

หัวเตาอินฟราเรด เป็นแหล่งให้ความร้อนชนิดใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงโดยเป็นการให้ความร้อนแบบแผ่รังสี (Radiant infrared heating) ซึ่งความร้อนสูง จึงทำให้การสูญเสียความร้อนไปกับอากาศน้อยกว่าหัวเตาทั่วไป 30-40 % โดยหัวเตาอินฟราเรดชนิดใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงจะทำจากเหล็กหล่อเกรดเฉพาะ ทำให้มีความแข็งแรงสูง ไม่บิดตัวเมื่อเกิดไฟย้อน และทำจากแผ่นเซรามิกรังผึ้ง เคลือบด้วยสาร Rare earth element หัวเตาอินฟราเรดจะเป็นเซรามิกอัดขึ้นรูปเจาะรู โดยก๊าซจะเผาไหม้อยู่ในรูของหัวเตาอินฟราเรด แล้วปล่อยรังสีความร้อนออกมาในช่วงของอินฟราเรด (มากกว่า 760 นาโนเมตร) ที่ตามองไม่เห็น

2.5 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics) คือ การศึกษาอัตราการอบแห้ง จากข้อมูลการอบแห้ง โดยการพลอตกราฟการอบแห้ง (Drying curve) หรือกราฟอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve) ดังภาพที่ 2



ก)

ข)

ภาพที่ 2 ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชื้นในการอบแห้ง ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอัตราการอบแห้ง

ที่มา: นิธิยา และพิมพ์เพ็ญ (2552)

1) กราฟการอบแห้ง (Drying curve)

กราฟการอบแห้ง (Drying curve) คือกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับความชื้น ค่าความชื้น (Moisture content, MC) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุตามมาตรฐาน AOAC ความชื้นในวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, M_w) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, M_d) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$M_w(\%) = \frac{(w-d)}{w} \times 100 \quad \dots(1)$$

$$M_d(\%) = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \quad \dots(2)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.)

W คือ มวลเปียกของวัสดุ (kg)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (kg)

การวิเคราะห์การอบแห้งนอกจากค่าความชื้น (Moisture content, MC) ยังมีค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้น เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปเป็นเวลาใด ๆ คือ อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) (อีลีเย และคณะ, 2558) โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$MR = \frac{M_1 - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad \dots(3)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น (-)
	M_1	คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาใด ๆ (%d.b.)
	M_0	คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาเริ่มต้น (%d.b.)
	M_{eq}	คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (%d.b.)

2) กราฟอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve)

กราฟอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve) คือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับอัตราการอบแห้ง ทั้งนี้อัตราการอบแห้ง (Drying rate, D_r) คือ มวลของเหลวที่ระเหยต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อเวลา จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเครื่องอบแห้งโดยเฉพาะในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยสามารถคำนวณอัตราการอบแห้ง (D_r) จากสมการที่ (4) (Kar and Gupta, 2003) เพื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้

$$D_r = \frac{M_1 - M_0}{t} \quad \dots(4)$$

เมื่อ	D_r	คือ อัตราการอบแห้ง ($g_{H_2O}/g_{dry\ mass} \cdot h$)
	M_0	คือ ความชื้นเริ่มต้น (%d.b.)
	M_1	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (%d.b.)
	T	คือ เวลาในการอบแห้ง (h)

กราฟระหว่างอัตราการแห้ง (Drying rate) และความชื้นในสารนั้น (Moisture content) แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period - AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้ง มีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหาร ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหาร มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางอัตราการแห้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (Constant rate)

ช่วงที่ 2 ช่วงอัตราคงที่ (Constant rate period-BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่ อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุ ณ เวลานั้น เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)

ช่วงที่ 3 ช่วงอัตราอบแห้งลดลง (Falling rate period CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการอบแห้งจะลดลงความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ใช้ อยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้ อัตราการแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

2.6 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการอบแห้ง

ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ (Temperature) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ความเร็วลม (Air velocity) และความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) ของอากาศเป็นสิ่งสำคัญมาก การระเหยน้ำออกจะทำได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศและความเร็วลม

ความดัน (Pressure) เป็นอีกปัจจัยในการระเหยของน้ำ เนื่องจากในที่มีความดันต่ำ ๆ ลงมา น้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการทำแห้งภายใต้ความดันจะทำให้อัตราการแห้งเร็วขึ้น

ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ (Specific heat capacity of gas) คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้มวลของก๊าซ 1 กิโลกรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 °C หรือ 1 เคลวิน ซึ่งมีอยู่ 2 ค่า คือความจุความร้อนเมื่อปริมาตรของก๊าซคงที่ (C_v) และความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเมื่อความดันคงที่ (C_p) สำหรับอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ ค่า C_p เท่ากับ 1 kJ/kg.K

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ พลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยซึ่งเป็นส่วนกลับของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (อีลีเย่ และคณะ, 2558) เขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (5) ดังนี้

$$SEC = \frac{3.6 \times P_e}{W_i - W_f} \quad \dots(5)$$

เมื่อ	SEC	คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)
	W_i	คือ มวลวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
	W_f	คือ มวลวัสดุหลังอบแห้ง (kg)
	P_e	คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

2.7 การวิเคราะห์สาเหตุและผลในการแก้ไขปัญหาเชิงกลยุทธ์

แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and effect diagram)

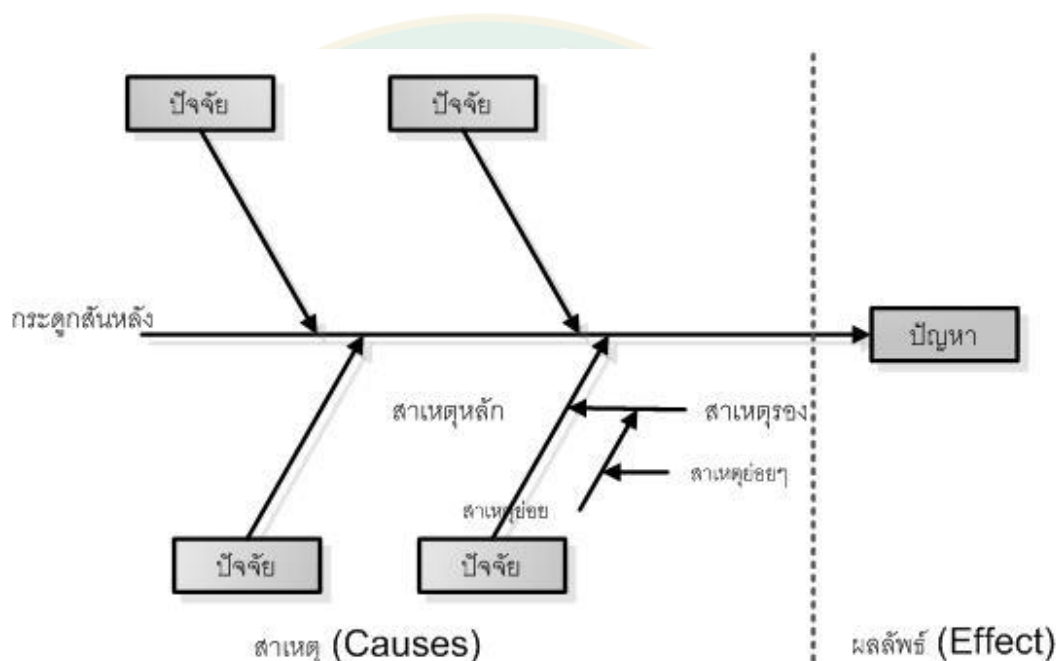
ผังแสดงเหตุและผล อาจเรียกย่อ ๆ ว่า ผังก้างปลา (Fish bone diagram) หมายถึง แผนผังที่ใช้ในการวิเคราะห์ค้นหาสาเหตุต่าง ๆ ว่ามีอะไรบางอย่างที่เกี่ยวข้องกัน สัมพันธ์ต่อเนื่อกัน จึงทำให้ผลปรากฏตามมาในขั้นสุดท้าย โดยการระดมความคิดอย่างเป็นอิสระของทุกคนในกลุ่มกิจการด้านการควบคุมคุณภาพ

วิธีการสร้างแผนผังแสดงเหตุและผล

ผังก้างปลาหรือผังแสดงเหตุและผล ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนหัวปลาจะแสดงหัวข้อปัญหาที่เรากำลังวิเคราะห์ (Problem) และส่วนก้างปลา จะมีลักษณะเป็นเส้นแตกแขนงไปเพื่อแสดงสาเหตุของปัญหา (Cause) แผนผังชนิดนี้ถูกใช้เพื่อค้นหาสาเหตุของปัญหาต่าง ๆ ที่เราต้องการคำตอบ หรือทำความเข้าใจเกี่ยวกับการแก้ปัญหาของระบบงานในองค์กร หรือสำหรับกระบวนการผลิตสินค้าต่าง ๆ โดยแผนผังก้างปลาดังกล่าวได้มีการกำหนดปัจจัยที่จะช่วยให้แบ่งกลุ่มของสาเหตุต่าง ๆ ที่พบในกระบวนการผลิต ส่วนมากใช้หลักการ 4M แบ่งเป็นกลุ่มปัจจัย (Factors) เพื่อจะนำไปสู่การแยกแยะสาเหตุต่าง ๆ ประกอบด้วย

Manpower	พิจารณาในด้าน คนงาน หรือพนักงาน หรือบุคลากร
Machine	พิจารณาในเรื่องของ เครื่องจักรหรืออุปกรณ์อำนวยความสะดวก
Material	พิจารณาวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต หรืออะไหล่ อุปกรณ์อื่น ๆ
Method	พิจารณากระบวนการทำงานหรือ วิธีการทำงานของแต่ละสถานีนงาน

หลักการใช้แผนผังก้างปลา แสดงดังภาพที่ 3 เริ่มต้นกำหนดปัญหาที่หัวปลาโดยต้องกำหนดปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตให้ชัดเจน ผังก้างปลา กำหนดให้เป็นส่วนของสาเหตุที่กระทบต่อปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตโดยตรง (หัวปลา) พิจารณาตามปัจจัยหลักการ 4M เป็นสาเหตุหลัก แบ่งตามเส้นกระดูกสันหลังของก้างปลา และมีการแบ่งสาเหตุรองของแต่ละปัจจัยได้ย่อยลงไปอีกหลาย ๆ ข้อ ตามแนวเส้นก้างปลาแต่ละเส้น เมื่อเขียนผังก้างปลาสมบูรณ์แล้วจะทำให้มองเห็นองค์ประกอบที่สามารถค้นพบสาเหตุปัญหาทั้งหมดที่พบในสถานีนงานกระบวนการผลิตที่สนใจ ทำให้หาแนวทางปรับปรุงกระบวนการผลิตได้ง่ายขึ้น (ธวัชรรัตน์, 2558)



ภาพที่ 3 วิธีการเขียนผังก้างปลา

ประโยชน์ของการใช้แผนผังแสดงเหตุและผล

1. ไม่ต้องเสียเวลาแยกความคิดต่าง ๆ ที่กระจัดกระจายของแต่ละสมาชิก แผนผังก้างปลาจะช่วยรวบรวมความคิดของสมาชิกในทีม
2. แสดงให้เห็นสาเหตุต่าง ๆ ของปัญหา และผลที่เกิดขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง จนนำไปสู่วิธีการปรับปรุงแก้ไข
3. สามารถนำไปวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ได้มากมาย ทั้งในระดับอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งปัญหาในชีวิตประจำวัน

การลดความสูญเสีย 7 ประการ (7 Waste)

การลดสูญเสีย 7 ประการ เป็นระบบจำกัดความสูญเสียและปรับปรุงคุณภาพอย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิต เพิ่มเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกิจกรรมหรืองานที่ดำเนินการ โดยการลดการสูญเสีย เกิดจากการสูญเสีย 7 ประการดังนี้ (รินฤดี และคณะ, 2560)

1) การสูญเสียจากการผลิตที่มากเกินไป (Overproduction)

การเกิดการสูญเสียเนื่องมาจากการผลิตที่มากเกินไปความต้องการ อาจจะเป็นเนื่องมาจากการผลิตสินค้าที่อยู่ได้ในระยะสั้น ๆ การผลิตสินค้าเพื่อไว้ล่วงหน้าเป็นเวลานาน ในที่นี้อาจเพราะต้องการที่จะลดต้นทุนโดยใช้การผลิตครั้งเดียวจบ รวมไปถึงการการผลิตสินค้ามากกว่าความต้องการของลูกค้า ที่มาจากความคิดที่ว่าสินค้านั้น ๆ จะไม่พอต่อความต้องการจนกลายเป็นการผลิตสินค้ามากไปจนล้นตลาด บ่อยครั้งที่มีการพยายามที่จะใช้เครื่องจักรหรือพนักงานในการผลิตเพื่อให้ได้สินค้าในหน่วยเวลาที่มากที่สุด โดยอาจจะละเลยในเรื่องขีดความสามารถในการผลิตจนนำไปสู่ ความสูญเสียเปล่าทั้งงานและเวลา การเสื่อมสภาพของสินค้าและเครื่องจักร ความไม่ปลอดภัยในการปฏิบัติงาน การต้องการพื้นที่จัดเก็บที่มากเกินไปจนจำเป็น เกิดการล่าช้าในการแก้ไขของเสียของเสียบางอย่างอาจซ้ำเกินจะแก้ไขให้กลับมาใช้ได้ใหม่ ทำให้มีการขนย้ายวัสดุซ้ำซ้อนโดยไม่จำเป็น เป็นต้น

2) การสูญเสียจากการเก็บวัสดุคงคลัง (Inventory)

การเกิดการสูญเสียที่เกิดจากการเก็บวัสดุคงคลัง อาจเนื่องมาจากการตัดสินใจสั่งซื้อวัสดุต่อครั้ง ครั้งละมาก ๆ อาจเพราะต้องการลดต้นทุนในส่วนของวัสดุจากส่วนลดต่อการสั่งในหนึ่งครั้งหรือเพื่อเพื่อวัสดุในการผลิตครั้งต่อ ๆ ไปคราวละมาก ๆ และนั่นทำให้มีวัสดุในคลังเก็บมีปริมาณที่มากเกินไป ความต้องการตลอดเวลา เป็นภาระในการจัดการดูแลรักษา บางครั้งสินค้านั้นอาจเปรียบเสมือนของเสีย เพราะในการเก็บสินค้าไว้นาน ๆ อาจทำให้สินค้าเสื่อมสภาพและล้าสมัยได้ และต้องอาศัยทรัพยากรบุคคลและการจัดการในการจัดเก็บวัสดุนั้น ๆ เป็นต้น

3) การสูญเสียจากการขนส่ง (Transportation)

การเกิดการสูญเสียที่เกิดจากการขนส่ง ซึ่งไม่ได้ทำให้เกิดมูลค่าเพิ่มสำหรับวัสดุ อาจเนื่องมาจากระยะทางในการขนส่ง การขนย้ายสินค้าทั้งที่ไม่จำเป็น การวางแผนที่ไม่ดีในการขนส่งสินค้า หรือการวางแผนผังโครงสร้างสถานที่เก็บสินค้าที่ไม่ดีหรืออุปกรณ์ที่ใช้ไม่ได้คุณภาพ ส่งผลให้ต้นทุนที่ใช้ในการขนส่ง เช่น แรงงาน เชื้อเพลิง เป็นต้น สูญเสียเวลาในการผลิต อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายกับวัสดุหากมีวิธีในการขนส่งที่ไม่เหมาะสม และความระมัดระวังในการขนส่งอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ เป็นต้น

4) ความสูญเสียจากการเคลื่อนไหว (Motion)

การจัดสภาพร่างกาย การวางท่าทางขณะทำงานไม่เหมาะสม การวางอุปกรณ์ที่ไม่เอื้อแก่การใช้งาน หรือการวางแผนผังโรงงานและระบบการทำงานไม่ได้มาตรฐาน ทำให้เหนื่อยล้าง่าย สูญเสียเวลาใน

การทำงาน การทำงานล่าช้า และก่อให้เกิดอุบัติเหตุ ซึ่งการลดความสูญเสียจากการเคลื่อนไหว สามารถแก้ไขได้โดยการจัดลำดับขั้นตอนการทำงาน วางระบบโรงงานให้ได้มาตรฐาน ศึกษาวิธีการ วางท่าทางกับงานที่ทำให้เหมาะสม วางอุปกรณ์ที่จำเป็นให้ง่ายต่อการใช้งาน เพื่อลดเวลาการทำงาน ลดความเหนื่อยล้าให้กับพนักงาน และเพิ่มความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

5) ความสูญเสียจากกระบวนการผลิต (Processing)

การวางกระบวนการผลิตบางกระบวนการแบบไม่จำเป็น ทำให้เกิดการดำเนินงานมากขึ้นตอนใน กระบวนการผลิต ซึ่งไม่เกิดผลต่อผลผลิตนั้น มีต้นทุนเพิ่มขึ้นแบบไม่จำเป็น พื้นที่การทำงานมากเกินไป ซึ่งไม่เพียงพอเมื่อต้องการพื้นที่ในการทำงานบางส่วน การลดความสูญเสียจากกระบวนการผลิต สามารถแก้ไขได้โดยวิเคราะห์ความจำเป็นของกระบวนการผลิตและนำหลัก 5W1H มาประยุกต์ใช้ เลือกการวิเคราะห์กระบวนการผลิตโดยใช้ Operation process chart, Flow Process Chart, Assembly Process Chart, Multi-Product Process Chart หรือ Travel Chart เพื่อปรับปรุงการทำงานอย่างเหมาะสมทำให้ช่วยลดกระบวนการผลิตที่ไม่จำเป็น ลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มพื้นที่ในการทำงานมากขึ้น

6) ความสูญเสียจากการรอคอย (Delay)

การรอนักงานที่เกิดจากการลางาน ขาดงาน การรอวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต การรอ เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต เกิดจากเครื่องจักรเสีย รอการซ่อมแซม ทำให้ไม่สามารถทำงานได้ ในส่วนนั้น ๆ ได้ สูญเสียเวลาในการทำงาน เกิดต้นทุนเพิ่มมากขึ้น กระบวนการผลิตบกพร่อง ไม่สามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพ เกิดการล่าช้าพนักงานเสียขวัญและ กำลังใจ การลดความสูญเสียจากการรอคอยสามารถแก้ไขได้โดยการวางแผนระบบการผลิต ตรวจสอบเช็ค สภาพเครื่องจักรก่อนใช้งาน ขณะใช้งานและหลังใช้งานอยู่เป็นประจำ จัดสรรปริมาณพนักงานให้มีความสมดุลในการทำงาน ฝึกทักษะให้กับพนักงาน เพื่อให้พนักงานทำงานได้หลากหลายประเภท

7) ความสูญเสียจากการผลิตของเสีย (Defect)

การผลิตแล้วเกิดของเสีย ซึ่งเสียเวลาและแรงงานในการแก้ไขงาน เกิดการทำงานนั้นซ้ำ ทำให้สินค้าและวัตถุดิบในการผลิตไม่ได้คุณภาพ มีต้นทุนที่สูงขึ้น การออกแบบและสร้างกระบวนการผลิตไม่เหมาะสม สูญเสียพื้นที่ในการจัดเก็บและกำจัดของเสียโดยไม่จำเป็น เกิดการชำรุดขณะขนส่ง หรือเคลื่อนย้าย การลดความสูญเสียจากการผลิตของเสียสามารถแก้ไขได้โดยการสร้างมาตรฐานการทำงานและวัตถุดิบให้ถูกต้องเหมาะสม ฝึกอบรมพนักงานให้มีความรู้ความสามารถ มีจิตสำนึกด้านคุณภาพการผลิต พัฒนาวิธีการทำงานให้มีประสิทธิภาพเรื่อย ๆ เพื่อลดของเสียที่เกิดจากการผลิต ลดความซับซ้อนของกระบวนการผลิต ตรวจสอบเช็คเครื่องจักรก่อนใช้งาน ขณะใช้งานและหลังใช้งานอยู่เป็นประจำ

ซิกซ์ ซิกม่า (Six sigma)

ซิกซ์ ซิกม่า เป็นวิธีการและการประยุกต์ใช้กลวิธีทางสถิติในองค์กรช่วยให้องค์กรสามารถทำกำไรได้เพิ่มขึ้น มีผลผลิตมากขึ้น สามารถนำมาใช้ได้ทั้งส่วนของสินค้าและบริการ คำว่าซิกซ์มาเป็นตัวอักษรกรีก (σ) ซึ่งหมายถึง ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ (Standard Deviation) เพื่อวัดความแปรปรวนเฉลี่ยที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยมาตรฐาน ค่าระดับซิกม่าที่สูงแสดงให้เห็นถึงคุณภาพที่ดีกว่าในค่าระดับของ 6 ซิกซ์มานั้น เราจะได้ชิ้นงานที่ไม่ได้ตามขอบเขตหรือมาตรฐานที่กำหนดเพียง 3.4 ชิ้น ในชิ้นงานหนึ่งล้านชิ้นงานเท่านั้น (กรรณิการ์, 2558.)

ขั้นตอนการดำเนินงาน จัดอยู่ในระดับกระบวนการ (Process level) ซึ่งเน้นไปที่การแก้ไขปัญหาในกระบวนการเป็นหลัก ผู้ที่มีบทบาทสำคัญในส่วนนี้ได้แก่คณะทำงานที่เรียกว่า แบลคเบล (Black belt) มีหน้าที่ในการเฝ้าพินิจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ แล้วดำเนินการแก้ไข เพื่อไม่ให้ปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นอีก โดยหลักการของซิกซ์ ซิกม่า คือ DMAIC มาจาก Define - Measure - Analyze - Improve - Control ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปเกี่ยวกับขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนการระบุปัญหา (Define phase)

ขั้นตอนของการเลือกปัญหาเริ่มจากการกำหนดลูกค้า และศึกษาความต้องการของลูกค้า อีกทั้งจากการสำรวจความต้องการ ความพึงพอใจของลูกค้า หรือจากข้อมูลการร้องเรียนของลูกค้า ศึกษากระบวนการทำงานหลักขององค์กร ผู้ที่รับผิดชอบในระดับบริหารของแต่ละกระบวนการนั้น ๆ แบลคเบล และผู้ที่รับผิดชอบในระดับบริหารของแต่ละกระบวนการ ซึ่งจะกลายมาเป็นแชมเปียน (Champion) ของโครงการจะร่วมกันนำความต้องการของลูกค้ากระจายเป็นปัจจัยคุณภาพที่สำคัญของแต่ละกระบวนการ ปัญหาต่าง ๆ ที่สำคัญ และตรงกับความต้องการของลูกค้า รวมถึงปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้ในหน่วยงานปกติ ก็จะจัดเรียงลำดับความสำคัญและเลือกให้ดำเนินการแก้ไขปรับปรุงเมื่อแบลคเบล และแชมเปียนสามารถกำหนดโครงการที่จะดำเนินการแก้ไขปรับปรุงได้แล้ว จะร่วมกันกำหนดขอบเขตการดำเนินงานและคณะทำงานต่อไป

2) ขั้นตอนการวัด (Measure phase)

ขั้นตอนนี้แบลคเบล และคณะร่วมกันกำหนดแนวทางในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการทำการศึกษาระบบการโดยละเอียด กำหนดปัจจัยที่ได้จากกระบวนการหรือตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ (Key Process Output Variable :KPOV : Ys) และปัจจัยนำเข้าต่าง ๆ ของกระบวนการ กำหนดแนวทางในการวัดปัจจัยต่าง ๆ ทำการวิเคราะห์ระบบการวัด หากผลการวิเคราะห์ระบบการวัดมีความผันแปรมากเกินกว่าที่กำหนด ต้องทำการปรับปรุงระบบการวัดให้ดีขึ้นเมื่อยอมรับได้แล้วจึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการดำเนินงานกำหนดปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ ที่จะส่งผลกระทบต่อระดับคุณภาพของเอาท์พุทของกระบวนการ เพื่อจะดำเนินการศึกษา และวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

3) ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analyze phase)

ขั้นตอนนี้จะนำปัจจัยนำเข้าที่สำคัญของกระบวนการต่าง ๆ มาทำการวิเคราะห์เพื่อดูว่าปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มีผลกระทบต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของกระบวนการ หากปัจจัยใดที่ทดสอบแล้วพบว่าไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ (KPOV) ก็นำไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไป ซึ่งจากการดำเนินงานในขั้นตอนนี้ จะทำให้เข้าใจกระบวนการมากขึ้น และมาตรฐานการทำงานต่าง ๆ ปรับปรุงใหม่ตัวแปรต่าง ๆ จะถูกกำหนดและศึกษา และทำให้ทราบว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ (KPOV) อย่างมากซึ่งจะเป็นปัจจัยที่เหมาะสมที่จะนำไปทำการแก้ไขต่อไป

4) ขั้นตอนการปรับปรุง (Improve phase)

ขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบ และทำการทดลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ (KPOV) กับปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ (KPOV) นั้น ๆ และหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่จะทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ (KPOV) ที่ดีที่สุด จากนั้นดำเนินการวิเคราะห์ระบบการวัดของแต่ละปัจจัยเพื่อทำการดำเนินการควบคุมในขั้นตอนถัดไปเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

5) ขั้นตอนการควบคุม (Control phase)

กระบวนการผลิตได้รับการปรับปรุงแล้ว ขั้นตอนนี้ก็เป็นวิธีการออกแบบวิธีการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เพื่อให้พนักงานสามารถควบคุมได้ด้วยตนเอง แล้วทำการประเมินความสามารถของกระบวนการผลิตอีกครั้ง เพื่อดูว่าหลังจากปรับปรุงแล้วสามารถทำได้ตามเป้าหมายหรือไม่ หากความสามารถของกระบวนการยังไม่ดี ก็ต้องย้อนกลับไปทำตามขั้นตอนก่อนหน้านี้อีกครั้ง นอกจากนี้แล้วจะต้องมีการประเมินผลการดำเนินงาน โดยวัดจากระดับคุณภาพที่เปลี่ยนแปลงไป และประเมินความสามารถในการลดต้นทุน หรือความพึงพอใจของลูกค้าที่เปลี่ยนไปหลังจากมีการปรับปรุงกระบวนการ

2.9 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

เป็นการจำลองการไหลเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ ที่สามารถมองเห็นลักษณะการเคลื่อนที่ของความเร็วลมในสภาวะหนึ่ง ๆ และสามารถทำนายสภาวะเชิงความร้อน ความเร็ว หรือทิศทางของอากาศได้ สามารถศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ของของไหล และช่วยในการออกแบบอุตสาหกรรม เช่น การจำลองการไหลของความเร็วลมภายในตู้ขนส่ง การจำลองการไหลของความเร็วลมภายในห้องเย็น เป็นต้น (Giovanni Cortella, 2002) การใช้คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamics) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาศัยความสามารถของคอมพิวเตอร์สมัยใหม่ช่วยในการคำนวณ

โดยการทำการวิเคราะห์ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลได้ ในระยะเวลาอันสั้นเพียงไม่กี่ชั่วโมง (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2553) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการออกแบบ วิเคราะห์ ตรวจสอบและพัฒนางานทางด้านต่าง ๆ มิให้พบเห็นกันอย่างแพร่หลายรวมถึงงานทางด้านปรับอากาศ และการอบแห้ง (เอกรงค์ และคณะ, 2547) การทำความเข้าใจในปรากฏการณ์ของของไหล การถ่ายเทความร้อน รวมถึงปรากฏการณ์อื่น ๆ จำเป็นต้องอาศัยการทดลองที่ใช้ระยะเวลานานและมีค่าใช้จ่ายสูง อาจจะต้องทำการทดลองซ้ำในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นอาจจะทำให้ได้ผลดีหรือไม่ดี เพื่อแก้ไขปัญหานั้นจึงได้มีการนำเอาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหานั้นเป็นการทำนายปรากฏการณ์ทางความร้อน การถ่ายเทมวล และปรากฏการณ์อื่น ๆ ซึ่งจะอธิบายพฤติกรรมทางกายภาพในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) สามารถหาคำตอบได้ด้วยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เช่น ระเบียบวิธีผลสี่บเนื้อง (Finite difference method) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) และระเบียบวิธีไฟไนต์วอร์ลุ่ม (Finite volume method) เป็นต้น โดยจะเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางกายภาพ ให้เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic equation) อยู่ในรูปแบบของการบวก ลบ คูณ หาร ที่สามารถหาคำตอบได้ง่ายขึ้น การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลไม่ได้เข้ามาแทนที่ทฤษฎีหรือการทดลอง แต่เป็นการสร้างความเข้าใจและการยืนยันผลที่ได้จากทฤษฎีและการทดลอง สามารถนำเสนอค่าของตัวแปรต่าง ๆ ด้วยรูปภาพเสมือนจริง มีความสวยงาม ง่ายต่อการทำความเข้าใจลักษณะการไหล (เกียรติฟ้า และอัญชิสรา, 2554) การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

1) ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-processing)

ในขั้นตอนนี้เป็นการพิจารณาปัญหาที่น่าสนใจ การเลือกสมมติฐานที่เหมาะสม การสร้างแบบจำลองทางกายภาพและการสร้างกริด ในขั้นตอนการสร้างกริดจะต้องมีการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด (Grid independent study) เป็นการหาความเป็นอิสระของกริดที่มีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์จากการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดจะทำโดยการเพิ่มจำนวนกริดครั้งละ $1/3$ ของจำนวนกริดเดิมแล้วตรวจสอบดูว่าที่จำนวนกริดขนาดไหนที่ไม่ทำให้คำตอบเปลี่ยนแปลง สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกความหนาแน่นของกริดในแบบจำลองได้และสามารถเลือกใช้กริดจำนวนที่น้อยที่สุดที่ไม่ทำให้ผลคำตอบเปลี่ยนแปลง ทำให้ลดระยะเวลาและขั้นตอนในการคำนวณลงได้ (Yao et al., 2006)

2) ขั้นตอนการประมวลผล (Processing or Solver setting)

ขั้นตอนนี้จะเลือกใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขให้เหมาะสมกับปัญหา กำหนดคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ในแบบจำลอง กำหนดเงื่อนไขในการทำงาน เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต รายละเอียดของ Solver control และทำการประมวล

3) ขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post-processing)

ขั้นตอนหลังการประมวลผลสามารถแยกเป็นการตรวจผลคำตอบ และการปรับปรุงแก้ไข เพื่อให้ได้คำตอบที่มีความถูกต้องมากขึ้นโดยการตรวจผลคำตอบพิจารณาจากการแสดงผลของภาพการกระจายตัวของอากาศหรืออุณหภูมิ สามารถบอกถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหรือแสดงค่าออกมาเป็นตัวเลขต่าง ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เป็นต้น เมื่อมีการตรวจผลคำตอบแล้วสามารถกลับไปแก้ไขปรับปรุงในส่วนที่คิดว่ายังไม่เหมาะสมได้ต่อไป เช่น ค่าความละเอียดของกริด หรือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งอาจจะทำให้ผลคำตอบใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น



2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Villa และคณะ (2010) ได้ศึกษาทฤษฎีและการทดลองสำหรับจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วง “Ataulfo” โดยศึกษาความแตกต่างของความหนา อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง และการถ่ายเทความร้อนโดยการแพร่ของมวลแบบ non-isotropic มีการคาดการณ์ความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นที่กระจายภายในด้วยการใช้แบบจำลองทางทฤษฎี ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา (Drying curve) และอุณหภูมิตรงกลางได้ตามรูปแบบของการทดลอง การศึกษาพารามิเตอร์ของการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50-70 °C ความหนา 2-5 มิลลิเมตร และระดับความสุกที่ 13.2-22 °Brix ผลการทดลองพบว่ามะม่วงมีพฤติกรรมที่ไม่แน่นอน 2.47% อัตราการอบแห้งลดลง 4.5 % เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น 1 mm และอัตราการอบแห้งลดลง 8.0% ของ 1 °Brix ที่เพิ่มขึ้น

อนุสร และคณะ (2012) ศึกษาแนวทางการอบแห้งใบเตยเพื่อใช้ทำชาด้วยรังสีอินฟราเรด ร่วมกับลมร้อน โดยเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะพิจารณาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของใบเตยหลังการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง การทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 45-65 °C กำลังรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000 W ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของใบเตยอยู่ในช่วง 400-600 % มาตรฐานแห้ง และ 8-12 % มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น แต่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000 W ร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว คือ แบบจำลอง Logarithmic ส่วนแบบจำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อน คือ แบบจำลองของ Page โดยผลการทดลองที่ค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองดังกล่าว ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า ร้อยละการคั่วและค่าสีในระบบ CIE (L^* , a^* และ b^*) แสดงให้เห็นว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95 %

สมเกียรติ และจตุพงศ์ (2556) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยวิธีการแผ่รังสีอินฟราเรด ร่วมกับการพาความร้อนสำหรับการอบแห้งสาหร่ายสไปรูลินา โดยศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการอบแห้ง 3 ชนิด คือ อุณหภูมิหลอดอินฟราเรด ($T_{fir} = 350, 400$ และ 450 °C) ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับชั้นทดสอบ ($h = 15, 20$ และ 25 เซนติเมตร) และความเร็วอากาศ ($V_a = 0.25, 0.50$ และ 0.75 เมตรต่อวินาที) ทุกการทดลองซึ่งทำการอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก พบว่า ที่อุณหภูมิหลอดอินฟราเรด 400 และ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับทดสอบ 15 เซนติเมตร และความเร็วอากาศ 0.5 เมตรต่อวินาที สามารถอบสาหร่ายสไปรูลินาได้ความชื้นที่ต้องการและมีคุณภาพเหมาะสมที่สุด

แบบจำลองเอมไพริคัลที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการอบแห้ง คือ แบบจำลอง Modified Page พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลซึ่งได้จากวิธีการสร้างสมการเส้นตรงมีค่าอยู่ในช่วง 2.56×10^{-10} ถึง 1.50×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที โดยสมการสำหรับการทำนายค่าคงที่ในการอบแห้งและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลซึ่งเป็นฟังก์ชันของ T_{fir} , h และ V_a ได้ศึกษาไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการออกแบบสร้างตู้อบแห้งอินฟราเรดในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

Guy และคณะ (2013) งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างแบบจำลองและการจำลองเชิงตัวเลขของอัตราการอบแห้งระหว่างกระบวนการอบแห้งของมะม่วงภายใต้สภาวะความร้อนที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ได้ทำการอบแห้งชิ้นบาง โดยคำนวณสมการความร้อนและมวล ณ เวลาที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ทำให้แบบจำลองที่คาดการณ์จลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วงไว้ภายใต้ตัวแปรนั้น แบบจำลองการอบแห้งมะม่วงที่อุณหภูมิ (40, 50, 60 °C) มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งมากขึ้นเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่ 60 °C คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งจะได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นเนื่องจากประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง

Aremu และคณะ (2013) ศึกษาความหนาของชิ้นมะม่วงและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ที่มีผลต่อจลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงเพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้ง โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งที่ 60, 70 และ 80 °C โดยความหนาของชิ้นมะม่วงคงที่ที่ 3, 6 และ 9 มิลลิเมตร และความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งคงที่ 3.5 เมตรต่อวินาที จากข้อมูลนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ 4 แบบดังนี้ Newton page, Modified page, Henderson และ Pabis และพบว่าแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมอัตราการอบแห้งที่ลดลงของมะม่วงอบแห้งได้ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.990 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้นมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามระหว่าง 3.89 ถึง 6.99×10^{-10} โดยมีพลังงานกระตุ้นที่ $28.95 \text{ kJ.mol}^{-1}$

Elamin O.M. Akoy (2014) งานวิจัยนี้ศึกษาอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อคุณภาพของมะม่วงสไลด์อบแห้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อคุณภาพของมะม่วงสไลด์อบแห้ง (60, 70 และ 80 °C) ที่ โดยลักษณะของคุณภาพที่ต้องการตรวจสอบ ได้แก่ การเปลี่ยนของสี อัตราส่วนคีนตัวของน้ำในชิ้นมะม่วงอบแห้ง จากผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของมะม่วงอบแห้ง โดยการวัดสี ทำการวัดค่าจากผิวด้านนอกของมะม่วงสไลด์อบแห้ง และแสดงผลออกมาในรูปแบบ L^* , a^* และ b^* นอกจากนี้ยังมีการวัดค่าความแตกต่างของสี (ΔE), ค่า Chroma (ความอิ่มตัวของสี), ค่า hue angle และค่าดัชนีสีน้ำตาล (BI) จากการศึกษาพบว่าค่า L^* และ b^* จะลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันค่า a^* สูงขึ้น ผลจากงานวิจัยพบว่าเวลามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแตกต่างของสี และอัตราส่วนคีนตัวของน้ำเช่นเดียวกัน จากการทดลองได้ค่าความแตกต่างของสีต่ำที่สุด และอัตราส่วนคีนตัวของน้ำสูงที่สุด จากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80, 70 และ 60 °C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่ 3, 5 และ 7 นาที

ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามพบว่าในการอบแห้งจริงนั้นใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 80 °C เนื่องจากใช้ระยะเวลาสั้นที่สุด เมื่อเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 และ 60 °C และค่าความแตกต่างของสีมีผลไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยลงจาก 7 ชั่วโมงเหลือเพียง 3 ชั่วโมง ส่งผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ

พิรุฬห์รัชชย์ (2557) ได้ศึกษาการอบแห้งพริกไทยดำแบบชั้นหนาอยู่กับที่โดยแบบจำลองถูกนำเสนอในรูปแบบอัตราส่วนอุณหภูมิไร้มิติและอัตราส่วนความชื้นไร้มิติซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาและชั้นความหนา ขั้นตอนการทำวิจัยถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการกระจายอุณหภูมิและความชื้นตลอดกระบวนการอบแห้งซึ่งศึกษาการอบแห้งพริกไทยที่อุณหภูมิ 100 และ 115 องศาเซลเซียส (พริกไทยไม่ผ่านการลวกและพริกไทยผ่านการลวก) โดยศึกษาอิทธิพลตัวแปรสองตัวแปรคือ ความหนาของชั้นพริกไทย 20, 30 และ 40 เซนติเมตร และรูปแบบการไหลของอากาศ (การไหลแบบธรรมชาติและการไหลแบบสลับทิศทางลมร้อน) ส่วนที่สองทำการประมาณค่าตัวแปรไร้มิติสำหรับการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการอบแห้ง ผลจากการศึกษาพบว่าแบบจำลองแบบชั้นหนาอยู่กับที่ให้ผลของอัตราส่วนอุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นคล้ายกันในการอบแห้งทั้งสองรูปแบบ แบบจำลองนี้ใช้อธิบายการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนได้ที่ความหนา 20 - 40 เซนติเมตร และผลจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถนำไปประกอบสร้างแบบจำลองการอบแห้งทางทฤษฎี อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการปรับปรุงตู้อบและกระบวนการอบแห้งในอุตสาหกรรมเพื่อลดต้นทุนในการอบแห้ง

ณัฐพล และณรงค์ (2559) ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชัน และหาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง ที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิของลมร้อนเท่ากับ 40 50 และ 60 °C และกำลังของรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 300 400 และ 500 วัตต์ ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที และความชื้นเริ่มต้นของขมิ้นชันอยู่ในช่วง 400-600 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง และจากข้อมูลการทดลองใช้แบบจำลองการอบแห้งจำนวน 5 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลอง Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithm และแบบจำลอง Two-term เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับทำนายการอบแห้งขมิ้นชัน จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการอบแห้งจะแปรผันกับอุณหภูมิลมร้อนและกำลังของรังสีอินฟราเรด และแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน และกำลังของรังสีอินฟราเรด ได้แก่ แบบจำลองการอบแห้งแบบ Two - term และแบบจำลองการอบแห้งแบบ Page ตามลำดับ

พัชรี และคณะ (2559) ศึกษาการอบกล้วยน้ำว้าอบด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนลักษณะของผลิตภัณฑ์จะคล้ายกับกล้วยฉาบแต่ไม่มีการใช้น้ำมันในกระบวนการผลิตทางการศึกษา 3 ปีวิจัยคือระดับพลังงานอินฟราเรดที่ 600 และ 700 วัตต์ อุณหภูมิลมร้อน 60 และ 70 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการอบ 25 และ 30 นาทีทำการวัดคุณภาพด้านสีเนื้อสัมผัส ร้อยละความชื้นและ a_w โดยมีกล้วยอบด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมงเป็นตัวอย่างควบคุม พบว่า กล้วยน้ำว้าอบด้วยลมร้อนจะมีค่าความสว่าง L^* ต่ำกว่า และมีค่าสีแดง a^* ค่าสีเหลือง b^* สูงกว่ากล้วยน้ำว้าที่อบด้วยรังสีอินฟราเรดทุกการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับการอบด้วยอินฟราเรด พบว่าที่พลังงานอินฟราเรด อุณหภูมิของลมร้อนสูงกว่าจะมีค่า L^* ต่ำ ค่า a^* และ b^* สูง ส่วนเวลาในการอบคือที่ 25 และ 35 นาทีจะไม่ผลต่อค่าสี และพบว่าค่าความเปรี้ยวและความแข็งของกล้วยที่อบด้วยลมร้อนจะสูงกว่า กล้วยที่อบด้วยอินฟราเรดทุกการทดลอง และการใช้อินฟราเรดที่พลังงาน อุณหภูมิ ลมร้อน และเวลาในการอบ ต่างกันจะไม่มีผลต่อค่าความเปรี้ยวและความแข็ง ค่าความชื้นและ a_w มีค่าต่ำที่สุด ส่วนกล้วยน้ำว้าที่อบด้วยตู้อบลมร้อนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นและ a_w เท่ากับ 9.33 และ 0.81 ตามลำดับ กล้วยอบด้วยอินฟราเรดจะมีความชื้นและ a_w อยู่ระหว่าง 5.18-8.23 และ 0.55-0.81 ตามลำดับซึ่งกล้วยที่อบด้วยอินฟราเรดจะมีค่าต่ำกว่า โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มพลังงานอินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อน และเวลาในการอบ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ทั้งหมดมาทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏสีกลิ่นรสชาติเนื้อสัมผัสและความชอบรวมพบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบกล้วยน้ำว้าอบด้วยสภาวะใช้พลังงานอินฟราเรด 700 วัตต์อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส เวลา 25 นาทีมากที่สุด ดังนั้นสภาวะที่ดีในการอบด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนคือที่พลังงานอินฟราเรด 700 วัตต์ อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียสเวลา 25 นาที

Onwude และคณะ (2019) การศึกษานี้เป็นการศึกษาการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานการอบแห้งมันเทศด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 4 ประเภท ดังนี้ การทดลองที่หนึ่งเป็นการทดลองโดยเปิดทั้งลมร้อนและอินฟราเรดพร้อมกัน การทดลองที่สองเป็นการทดลองแบบเปิดลมร้อนสลับกับอินฟราเรด การทดลองที่สามเป็นการทดลองแบบเปิดอินฟราเรดสลับกับลมร้อน และการทดลองที่สี่เป็นการอบแบบอินฟราเรดและปล่อยลมร้อนออกมาเป็นระยะ ๆ ทั้ง 4 แบบเป็นการทดลองในเครื่องอบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดระดับห้องปฏิบัติการ ตัวแปรต้นที่ใช้ในการศึกษาคือ อุณหภูมิอากาศที่แตกต่างกันระหว่าง 50 และ 70 องศาเซลเซียส, ความเข้มของแสงอินฟราเรดคือ 1,100 วัตต์ต่อตารางเมตร, ความเร็วลมคือ 1.5 เมตรต่อวินาที และกำหนดอัตราจังหวะการปล่อยลมร้อนและอินฟราเรดในการทดลองที่หนึ่งถึงสามให้อยู่ในช่วงเดียวกัน ผลจากงานวิจัยพบว่าอัตราการอบแห้ง, ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, ประสิทธิภาพการแพร่กระจายความชื้น, การหดตัว, พลังงานจำเพาะ คุณสมบัติของสี, ผลกระทบจากการอบแห้งที่มีผลต่อสารพฤกษเคมีในมันเทศ, จลนพลศาสตร์การอบแห้ง, การหดตัวของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิตัวอย่างมีอิทธิพลต่อ

ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอุณหภูมิอากาศ สำหรับการอบแห้งแบบที่สอง และสามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งของมันเทศได้อย่างเพียงพอ ในการอบแห้งที่ใช้วิธีที่แตกต่างกัน โดยการทดลองการอบแห้งแบบที่สี่เป็นการอบแบบใช้อินฟราเรดพร้อมกับปล่อยลมร้อนออกมาเป็นระยะๆ ถือว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุด เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้ง 113 - 120 นาที, ค่าพลังงานจำเพาะ 27.67 - 41.44 kWh/kg การเปลี่ยนสีโดยรวมอยู่ในช่วง 17.15 - 26.48 และพบว่าหลังจากการอบแห้งแล้วยังคงมีสารประกอบทางชีวภาพอยู่

ฉันทบูรณ์ และเชาวฤทธิ์ (2559) ศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเอาหลักการและวิธีการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) มาเป็นเครื่องมือ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกตันผิวเรียบในสองมิติ โดยได้มีการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ คือ การกระจายตัวของความเร็วอากาศ สัมประสิทธิ์การดูด (Re_d) และ เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) ที่ค่าความเร็วอากาศเริ่มต้นที่ 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 10, 30 และ 50 เมตรต่อวินาที โดยมีเงื่อนไขเลขเรย์โนลด์ที่ $Re_d \leq 10^3$ เป็นการไหลแบบราบเรียบและใช้แบบจำลองความหนืด แบบ Laminar เงื่อนไขเลขเรย์โนลด์ที่ $10^3 \leq Re_d \leq 10^5$ การไหลเป็นแบบปั่นป่วนและใช้แบบจำลองความหนืดแบบ k-epsilon และเงื่อนไขเลขเรย์โนลด์ที่ $Re_d > 10^5$ การไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบและใช้แบบจำลองความหนืดแบบ k-epsilon และสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองจากการสร้างแบบจำลองตามทฤษฎีชั้นขอบเขต ซึ่งมีผลที่ได้จากการทดลองสร้างแบบจำลองจะมีความสอดคล้องกันในช่วงค่าของเรย์โนลด์ที่ 103 ถึง 105 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดเฉลี่ยโดยการทดลองสร้างแบบจำลอง CFD จะมีค่า 1.62 และค่าสัมประสิทธิ์การดูดเฉลี่ยโดยการคำนวณตามทฤษฎี จะมีค่า 1.03 และค่าสัมประสิทธิ์การดูดของอากาศที่ไหลผ่านทรงกระบอกตันผิวเรียบที่ใช้จริงตามทฤษฎีจะมีค่าอยู่ที่ 1.20

ปรีดา (2562) ศึกษาแบบจำลอง DFD-DEM สำหรับพลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็งในระบบฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่อง เพื่อจำลองพฤติกรรมและอันตรกิริยาระหว่างของไหลกับอนุภาคของแข็งในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่อง แบบจำลอง DEM ถูกใช้เพื่อจำลองระบบอนุภาคแบบเม็ด ในขณะที่ CFD ใช้ในการจำลองการไหลของของไหลโดยการแก้สมการ Navier-Stokes อิทธิพลของความเร็วอากาศ อัตราการไหลเชิงมวล อุณหภูมิของอนุภาคและระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในห้องอบแห้ง (Residence time) ที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้ง และจากการทดลองพบว่าการทำนายระยะเวลาของอนุภาคที่อยู่ในห้องอบแห้งสามารถช่วยในการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการฟลูอิดซ์เบดชนิดทำงานแบบต่อเนื่อง

2.12 สรุปกรอบแนวคิด

จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่ได้กล่าวไปเบื้องต้น ทำให้ทราบแนวทางในการดำเนินการ และการประยุกต์ใช้ทฤษฎีบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยการแสวงหาคำก่อนการรอบแหว่งเพื่อให้สี ของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังอบแห้งมีสีสวย ไม่คล้ำ จากการศึกษางานวิจัยของ (Sado et al., 2015) ได้ศึกษาทฤษฎีและการทดลองสำหรับจลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วง โดยศึกษาระดับความสูงของ มะม่วง ความหนาของชิ้นมะม่วง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง จากงานวิจัยของ (Villa-Corrales et al., 2010) ศึกษากลยุทธ์และแนวทางที่ใช้ในการพัฒนาวิธีการอบแห้งให้มี ประสิทธิภาพมากขึ้นจากงานวิจัยของ (Onwude et al., 2019) โดยกลยุทธ์ที่ศึกษานี้สามารถนำมา ประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาการอบแห้งได้ ศึกษาพฤติกรรมการไหลโดยการนำหลักการ และวิธีการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) จาก งานวิจัยของ (ฉันทบุรณ์ และเชาวฤทธิ์, 2559) มาเป็นเครื่องมือ เพื่อเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการแก้ไข ปัญหาประสิทธิภาพการอบแห้ง ศึกษาคุณภาพสีของมะม่วง ความแตกต่างของสี (ΔE), ค่า Chroma (ค่าความอิ่มตัวของสี) จากงานวิจัยของ (Elamin O.M. Akoy., 2014) โดยสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดัง แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
Villa-Corrales et al.	Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango	มะม่วง	ทฤษฎีและการทดลองของ จลนพลศาสตร์การอบแห้งของ มะม่วง	- อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50-70°C - ความหนา 2-5 mm - ระดับความสุก 13.2-22°Brix
อนุสรานาดี และคณะ	จลนพลศาสตร์การอบแห้ง ใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน	ใบเตย	เปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อนเพียงอย่างเดียว	สมการที่ใช้ทำนายการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อนเพียงอย่างเดียว
สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ และคณะ	จลนศาสตร์ของการอบแห้งสำหรับสไปรูลินาด้วยวิธีการแผ่รังสีอินฟราเรดร่วมกับการพาความร้อน	สำหรับสไปรูลินา	จลนศาสตร์ของการอบแห้งด้วยวิธีการแผ่รังสีอินฟราเรดร่วมกับการพาความร้อนสำหรับการอบแห้งสำหรับสไปรูลินา	- อุณหภูมิหลอดอินฟราเรด 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส - ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับชิ้นทดสอบ 15, 20 และ 25 เซนติเมตร - ความเร็วอากาศ 0.25, 0.50 และ 0.75 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
Guy et al.	Numerical Simulation of Convective Drying of Mangoes (<i>mangifera Indica L.</i>) Under Variable Thermal Conditions	มะม่วง	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วง ในการทำนาย จลนพลศาสตร์การอบแห้งภายใต้ตัวแปรความร้อน	อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 40, 50 และ -40 °C
Kabiru et al.	Effect of Slice Thickness and Temperature on The Drying Kinetics of Mango (<i>Mangifera Indica</i>)	มะม่วง	ความหนาของชิ้นมะม่วงและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งเพื่อใช้ออกแบบเครื่องอบแห้ง	- อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 60, 70 และ 80°C - ความหนาของชิ้นมะม่วง 3, 6 และ 9 มิลลิเมตร - ความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้ง 3.5 เมตรต่อวินาที
Elamin O.M. Akoy	Effect of Drying Temperature on Some Quality Attributes of Mango Slices	มะม่วง	อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อคุณภาพของมะม่วงอบแห้ง	- อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 60, 70 และ 80 °C - ความหนาชิ้นมะม่วง 3 มิลลิเมตร - มะม่วงสุกที่อุณหภูมิ 25 ± 2 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 50 %

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
พิรุฬรัชย์ ไทยสมัคร	แบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับการอบแห้งพริกไทย ดำด้วยเทคนิคการสลับลม ร้อน	พริกไทยดำ	การอบแห้งพริกไทยดำแบบชั้นหนา อยู่กับที่โดยแบบจำลองถูกนำเสนอ ในรูปแบบอัตราส่วนอุณหภูมิไรมิตี และอัตราส่วนความชื้นไรมิตีซึ่ง เปลี่ยนแปลงตามเวลาและชั้นความ หนา	- อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100 และ 115 องศาเซลเซียส - ความหนาของชั้นพริกไทย 20, 30 และ 40 เซนติเมตร - รูปแบบการไหลอากาศ
ณัฐพล กระจ่าง และคณะ	จลนพลศาสตร์และ แบบจำลองการอบแห้ง ไขมันชั้นด้วยลมร้อนและรังสี อินฟราเรด	ไขมันชั้น	จลนพลศาสตร์การอบแห้งไขมันชั้น และหาแบบจำลองการอบแห้งชั้น บางที่เหมาะสมสำหรับทำนาย จลนพลศาสตร์การอบแห้งไขมันชั้น ด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด	- อุณหภูมิลมร้อน 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส - กำลังของรังสีอินฟราเรด 300, 400 และ 500 วัตต์ - ความเร็วของลมร้อน 0.5 เมตรต่อ วินาที
พัชรี ทับทิมศรี และคณะ	การผลิตกล้วยน้ำว้าอบด้วย อินฟราเรดรวมลมร้อน	กล้วยน้ำว้า	สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิต กล้วยน้ำว้าอบ โดยลักษณะของ ผลิตภัณฑ์คล้ายกับกล้วยฉาบแต่ไม่ มีการใช้น้ำมันในกระบวนการผลิต	- กำลังของรังสีอินฟราเรด 600 และ 700 วัตต์ - อุณหภูมิลมร้อน 60 และ 70 องศาเซลเซียส - เวลาในการอบ 25 และ 30 นาที

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
Daniel l Onwude et al.	The effectiveness of combined infrared and hot – air drying strategies sweet potato	มันเทศ	เปรียบเทียบกลยุทธ์ที่ใช้ในการอบแห้ง เพื่อหาประสิทธิภาพในการอบแห้งมันเทศด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด	- อุณหภูมิลมร้อน 50 และ 70 องศาเซลเซียส - กำลังของรังสีอินฟราเรด 1,100 วัตต์ - ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที
ฉันทบูรณ์ ถาวรธรรมณ์	การศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ		ศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกตันผิวเรียบในสองมิติ โดยศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ คือ การกระจายตัวของความเร็วอากาศ, สัมประสิทธิ์การดูด และ เลขเรย์โนลด์	- ค่าความเร็วอากาศเริ่มต้น 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 10, 30 และ 50 m/s - เลขเรย์โนลด์ที่ $Re_d \leq 10^3$ - เลขเรย์โนลด์ที่ $10^3 \leq Re_d \leq 10^5$ - เลขเรย์โนลด์ที่ $Re_d > 10^5$
ปรีดา ปรากูมมาก	แบบจำลอง CFD-DEM สำหรับพลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็งในระบบฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่อง	ข้าวสาร	ศึกษาการเคลื่อนที่ พฤติกรรมและอันตรกิริยาระหว่างของไหลกับอนุภาคของแข็งในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่อง	สร้างแบบจำลองโดยใช้ CFD เป็นเครื่องมือในการทดสอบหาการเคลื่อนที่ พฤติกรรมและอันตรกิริยาระหว่างของไหลกับอนุภาค

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในการศึกษาวิจัยเรื่องการพัฒนากลยุทธ์การวางแผนใช้งานสำหรับตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์สลับทิศทางก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อนสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนได้ใช้วัสดุและอุปกรณ์ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง		
มะม่วงสุกพันธุ์มหาชนก		
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์สลับทิศทางด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน		
ตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วย	1	เครื่อง
ก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน		
เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control)	1	เครื่อง
3. อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคุณภาพของชิ้นผลไม้อบแห้ง		
เครื่องวัดสี (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunterlab	1	เครื่อง
รุ่น MiniScan XE plus		
เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยรังสีอินฟราเรด	1	เครื่อง
ยี่ห้อ AND รุ่น AD - 4714A		
เครื่องมือวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w)	1	เครื่อง
ยี่ห้อ AQUA lab รุ่น 3 TE		
เครื่องวัดค่าเนื้อสัมผัส (Texture analyzer)	1	เครื่อง
รุ่น TA.XT2i.plus		
เครื่อง Anemometer	1	เครื่อง
ยี่ห้อ BENETECH รุ่น GM8903		

3.2 วิธีการเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบ

1) นำมะม่วงมหาชนก ที่มีความสุก ขนาด สีเปลือก และความหนาแน่นใกล้เคียงกัน โดยที่ความหนาแน่นหาได้จากการลอยผลมะม่วงในสารละลายน้ำเกลือ (NaCl) ความเข้มข้น 4-5 %w/w และปริมาณของแข็งละลายได้อยู่ในช่วง 16-17 °Brix (อุบล และคณะ, 2561) นำมาปอกเปลือก และล้างให้สะอาด จากนั้นนำไปแช่สารละลายกรดซิตริก ความเข้มข้น 2 %w/w, กรดแอสคอร์บิก ความเข้มข้น 1 %w/w และเกลือแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 %w/w เป็นเวลา 5 นาที (Sado et al., 2015) เพื่อให้มะม่วงมีกลิ่นรส และความเป็นกรด-ด่างเหมาะสม ช่วยยืดอายุผลิตภัณฑ์ ทำให้สีมีความคงตัวมากขึ้น (Gardner, 1996)

2) หั่นมะม่วงตามแนวยาว โดยกำหนดให้มีความหนา 1-1.5 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 4

3) เรียงชั้นมะม่วงบนถาดสแตนเลสที่มีขนาด 30 x 30 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 5

4) นำถาดเรียงบนรถเข็น โดยรถเข็น 1 คันจะสามารถใส่ถาดมะม่วงได้ทั้งหมด 10 ถาด ซึ่งแต่ละถาดใช้เนื้อมะม่วงสด 5 กิโลกรัม รวมทั้งหมดแล้วใช้เนื้อมะม่วงสด 50 กิโลกรัม (คิดเป็น 50% ของวัตถุดิบ) แสดงดังภาพที่ 6

5) กำหนดสภาวะอุณหภูมิและเวลาตามที่กำหนดในแต่ละการทดลอง



ภาพที่ 4 ชิ้นมะม่วงมีความหนา 1 - 1.5 เซนติเมตร



ภาพที่ 5 แสดงลักษณะการเรียงมะม่วงบนถาดสแตนเลส



ภาพที่ 6 แสดงลักษณะการบรรจุถาดบนรถเข็น

3.3 ศึกษากระบวนการและกลยุทธ์การอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน

ทำการศึกษาเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อนของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านล่ำม้าง ได้มีการแบ่งขั้นตอนการอบแห้งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ตู้สำหรับที่ใช้ในการไล่ความชื้น หรือตู้อุณหภูมิสูงโดยอุณหภูมิที่อบแห้งภายในตู้นี้อยู่ในช่วง 75 - 80 °C พร้อมทั้งระบุเลขหน้าตู้เป็นหมายเลข 1 และ 2 แสดงดังภาพที่ 7 และตู้ที่ใช้ในการอบแห้งปกติมีอุณหภูมิที่ 70 °C ซึ่งจะใช้สำหรับอบแห้งผลไม้ที่ต้องใช้ระยะเวลาการอบแห้งนาน พร้อมทั้งแสดงหมายเลขหน้าตู้เป็นหมายเลข 3 ถึง 8 แสดงดังภาพที่ 7

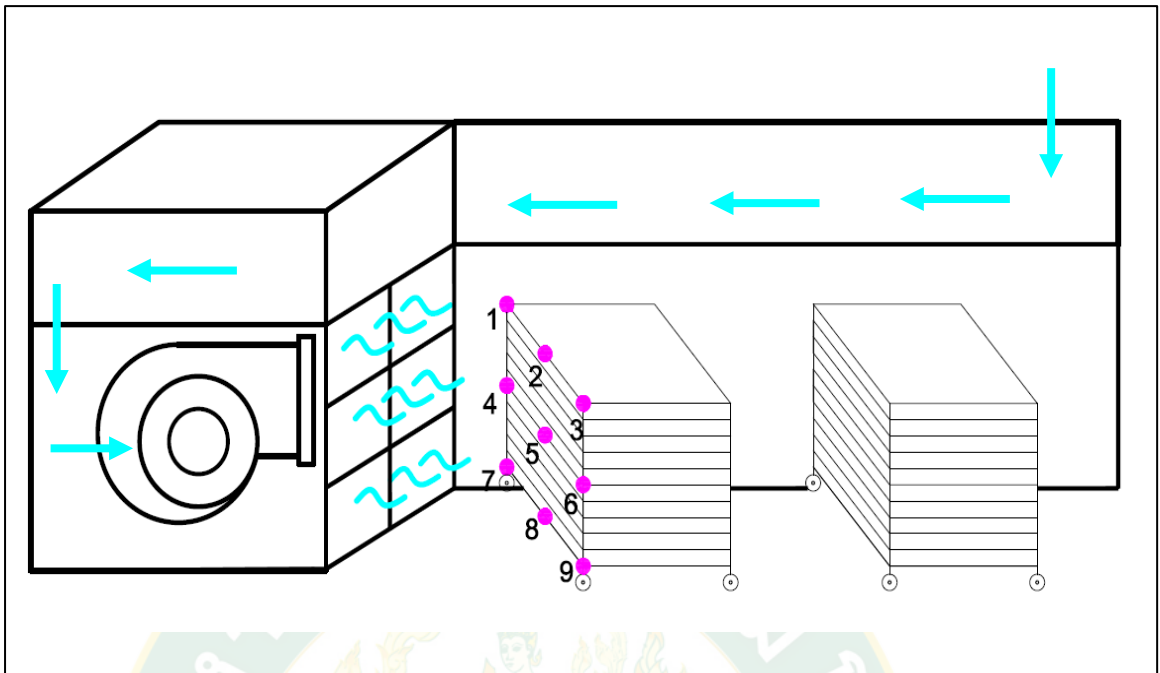


ภาพที่ 7 เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน แบบใช้อุณหภูมิสูง
หมายเลขตู้ 1 และ 2

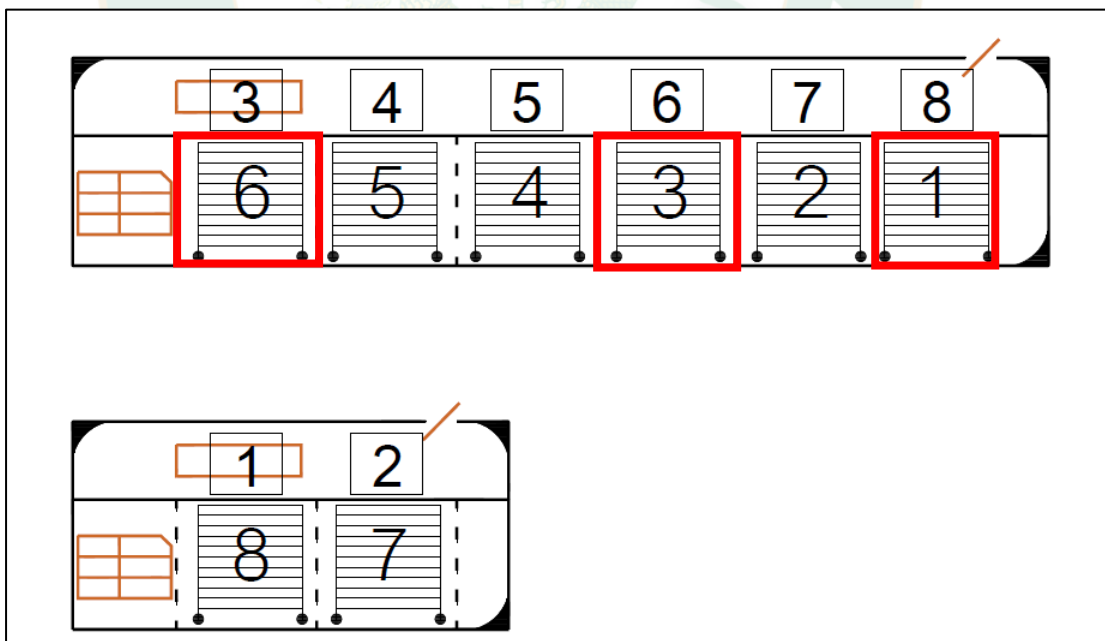


ภาพที่ 8 เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อนของกลุ่มวิสาหกิจ
หมายเลขตู้ 3 ถึง 8

วัดความเร็วลมและอุณหภูมิภายในเครื่องระหว่างการอบแห้ง เพื่อศึกษาการกระจายความเร็วลมและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งภายในตู้ การวัดค่าความเร็วลมจะทำการวัดบริเวณ 9 ตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 9 โดยตำแหน่งของรถเข็นที่วางจะอยู่บริเวณตู้อบแห้งหมายเลข 3, 5 และ 8 ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งเป็นตัวแทนของรถเข็นที่สัมผัสโดนลมร้อนในระยะที่ใกล้ ปานกลาง และไกลตามลำดับ พร้อมบันทึกข้อมูลในแบบบันทึกข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2 และค่าอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งหมายเลข 3, 5 และ 8 พร้อมบันทึกข้อมูลในแบบบันทึกข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3



ภาพที่ 9 แบบจำลองวิธีการวัดความเร็วลมภายในเตาอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน



ภาพที่ 10 ตัวแทนรถเซ็นที่ใช้ในการเก็บข้อมูลการวัดความเร็วลมภายในตู้อบแห้ง

แบบบันทึกการจัดการเก็บข้อมูลความเร็วลม (m/s) และอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ที่แต่ละตำแหน่งในเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน

ตารางที่ 2 แบบบันทึกการจัดการเก็บข้อมูลความเร็วลม (m/s) ที่แต่ละตำแหน่งในเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน

ตำแหน่งที่	ตู้หมายเลข 3	ตู้หมายเลข 5	ตู้หมายเลข 8
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			

ตารางที่ 3 แบบบันทึกการจัดการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ที่แต่ละตำแหน่งในเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน

ตำแหน่งที่	ตู้หมายเลข 3	ตู้หมายเลข 5	ตู้หมายเลข 8
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			

3.4 วางแผนการทดลอง

ขั้นตอนในการวางแผนการทดลองนี้จะศึกษาการอบแห้งแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยการศึกษาระเบียงเป็น 3 การศึกษา ดังนี้

3.4.1 ศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน

กรณีศึกษาในกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำช้าง และพบปัญหาที่เกิดขึ้นกับตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อนขนาดยาว 10 เมตร จำนวน 6 รถเข็น (ผลิตภัณฑ์บรรจุ 10 ถาดต่อรถเข็น จำนวนรวมประมาณ 300 กิโลกรัมเปียกผลิตภัณฑ์) ซึ่งพบว่าลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังการอบแห้งมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอโดยขึ้นมะม่วงที่บรรจุในรถเข็นด้านหน้าเครื่องจะมีลักษณะแห้งกว่าขึ้นมะม่วงที่อยู่ในรถเข็นบริเวณทางออก นอกจากนี้ยังใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นาน จึงทำให้สิ้นเปลืองทั้งด้านพลังงาน แรงงานและเวลา ทางผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำปัญหาไปศึกษาเพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่อไป

นอกจากนี้ทางกลุ่มวิสาหกิจชุมชนขาดการวางแผนงานในการลำเลียงรถเข็นเข้า-ออกสำหรับการอบแห้ง อาศัยเพียงประสบการณ์ในการอบแห้งเท่านั้น การอบแห้งจะเริ่มทำการอบเมื่อเตรียมวัตถุดิบแล้ว ทำให้ไม่มีระยะเวลาในการเข้า-ออกรถเข็นที่แน่นอน ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งออกมาจึงมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอโดยแสดงดังภาพที่ 11 พร้อมทั้งคำอธิบายรูปภาพ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 หลังจากเตรียมวัตถุดิบตามหัวข้อที่ 3.2 แล้ว นำรถเข็นคันแรกเข้าตู้อบแห้งตู้ที่ 1 และทำการอบแห้งในแต่ละตู้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 หลังจาก 1 ชั่วโมงผ่านไป รถเข็นคันที่ 2 เตรียมวัตถุดิบเสร็จ ทำการเตรียมรถที่จะเข้าตู้อบแห้ง

ขั้นตอนที่ 3 นำรถเข็นคันที่ 2 เข้าตู้อบแห้ง โดยรถเข็นคันที่ 2 เข้าตู้อบแห้งตู้ที่ 1 และรถเข็นคันแรกย้ายไปตู้อบแห้งตู้ที่ 2 พร้อมทั้งคันที่ 3 เตรียมรถเข้าตู้อบแห้ง

ขั้นตอนที่ 4 ย้ายรถเข็นคันที่ 1, 2 และ 3 เข้าตู้อบแห้งตู้ที่ 3, 2 และ 1 ตามลำดับ โดยมีรถเข็นคันที่ 4 เตรียมรถที่จะเข้าตู้อบแห้งต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อนำรถเข็นเข้าตู้อบพร้อมกันทั้ง 8 ตู้ จะได้รถเข็นที่เรียงกันในแต่ละตู้ ดังภาพในขั้นตอนที่ 5 โดยรถเข็นคันที่ 1 จะอยู่ตู้อบแห้งตู้ที่ 8 และเรียงกันมาตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อบรรจุรถเข็นคันที่ 1 อบแห้งในตู้สุดท้ายแล้วครบ 1 ชั่วโมง จึงนำคันที่ 1 ออกมาบรรจุต่อไป โดยการอบแห้งทั้งหมดทั้ง 8 คัน ใช้เวลาทั้งหมด 15 ชั่วโมง

Diagram illustrating the sequence of notes and corresponding xylophone positions for a four-stage exercise:

ขั้นตอนที่ 1 (Stage 1): Notes 3, 4, 5, 6, 7, 8. Xylophone position 1.

ขั้นตอนที่ 2 (Stage 2): Notes 1, 2. Xylophone positions 1 and 2.

ขั้นตอนที่ 3 (Stage 3): Notes 3, 4, 5, 6, 7, 8. Xylophone positions 2 and 1.

ขั้นตอนที่ 4 (Stage 4): Notes 3, 4, 5, 6, 7, 8. Xylophone positions 3 and 2.

ภาพที่ 11 แบบจำลองการไหลของรถเข็นโดยเรียงตามลำดับหมายเลขหน้าตู้

ชั้นตอนที่ 5

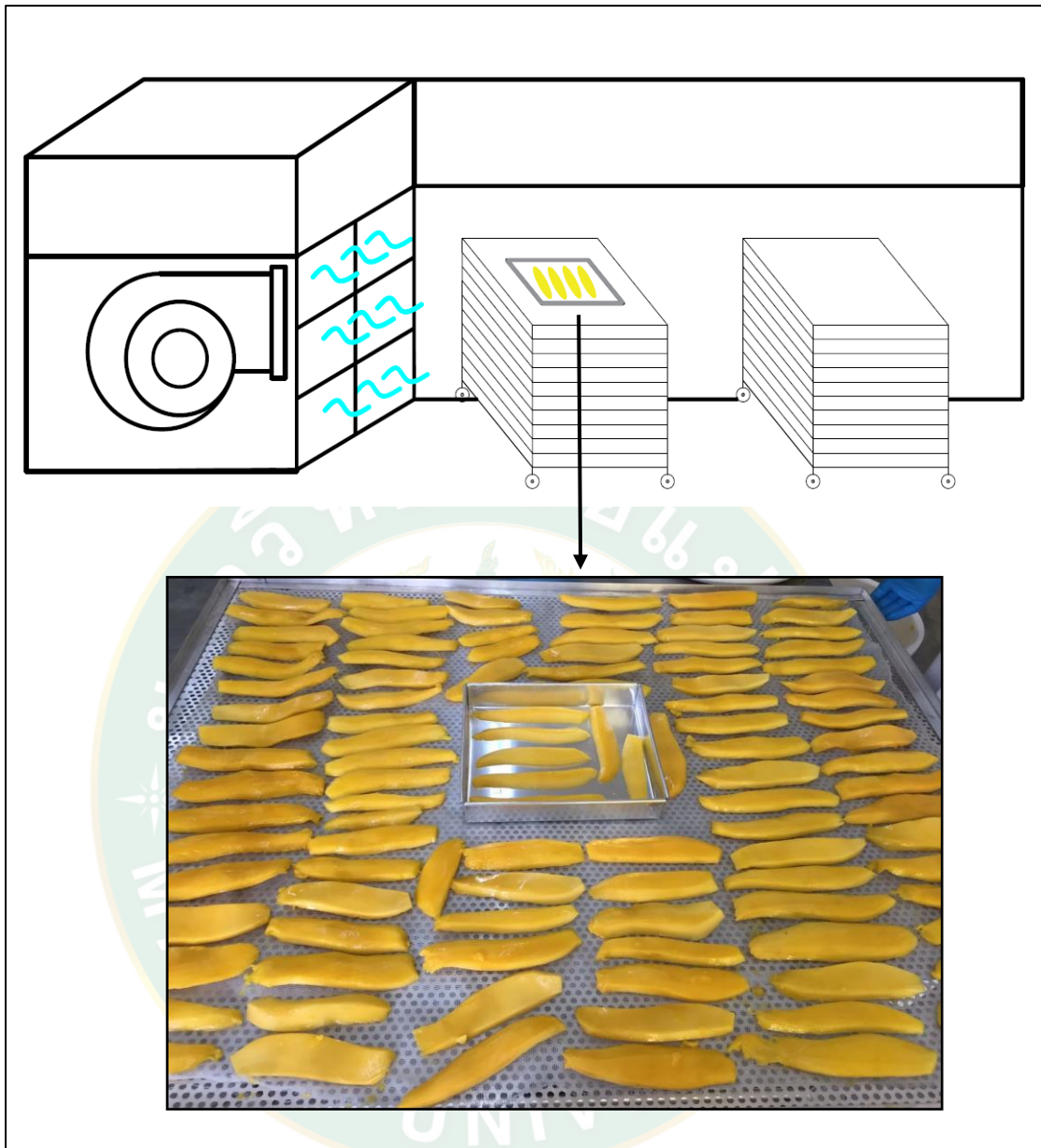
ชั้นตอนที่ 6

ภาพที่ 11 แบบจำลองการไหลของรถขึ้นโดยเรียงตามลำดับหมายเลขหน้าต่าง (ต่อ)

ดังนั้นจึงได้ทำการเก็บข้อมูลระหว่างการอบแห้งโดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างในชั้นบน ชั้นกลาง และชั้นล่าง ในการอบแห้งที่อุณหภูมิในการอบ 70 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดคือ 15 ชั่วโมง โดยแต่ละคันจะอยู่ในตู้อบแห้งตู้ละ 1 ชั่วโมง และทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 12 โดยได้มีการออกแบบการบันทึกข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นวิเคราะห์ผลโดยแบ่งข้อมูลเป็น 2 ส่วนดังนี้ ข้อมูลส่วนที่หนึ่งวิเคราะห์ด้านจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ข้อมูลส่วนที่สองวิเคราะห์ด้านคุณภาพหลังการอบแห้ง

ตารางที่ 4 การเก็บข้อมูลเบื้องต้นในการนำมาวิเคราะห์ปัญหาของรถเข็นคันที่ 1 และคันที่ 8

ตู้อบแห้ง	หมายเลข ตู้อบแห้ง	เวลาที่เก็บ ข้อมูล (min)	น้ำหนัก (g)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์ (°C)	ภาพถ่าย ผลิตภัณฑ์
ตู้อบไล่ความชื้น อุณหภูมิ 75 °C	1	30			
		60			
		90			
		120			
	2	150			
		180			
		210			
		240			
ตู้อบแห้ง อุณหภูมิ 70 °C	3	270			
		300			
		330			
		360			
	4	390			
		420			
		450			
		480			
ตู้อบแห้ง อุณหภูมิ 70 °C	5	510			
		540			
		570			
		600			
	6	630			
		660			
		690			
		720			



ภาพที่ 12 แบบจำลองการเก็บข้อมูลเบื้องต้นของรถเข็นคันที่ 1 ภายในเตาอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิด
อุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน

3.4.2 การพัฒนากลยุทธ์การวางแผนใช้งานตู้อบแห้งสำหรับมะม่วงมหาชนก

จากตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน และปัญหาที่กล่าวมา คือ ผลผลิตที่ได้อาจไม่ดีหลังจากการอบแห้งมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ โดยด้านหน้าเครื่องจะแห้งกว่าด้านหลังเครื่อง ใช้เวลาในการอบแห้งนาน ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน และต้นทุนในการผลิต ใช้แรงงานในการเคลื่อนย้ายรถเข็น ทางผู้วิจัยจึงได้หาแนวทางในการทดลอง โดยเป็นการจัดระเบียบการเข้า-ออกรถเข็น และได้กลยุทธ์ในการทดลองเป็น 3 กลยุทธ์ ดังนี้

กลยุทธ์ที่ 1 ปรับอุณหภูมิในการอบแห้งใหม่ โดยอุณหภูมิตู้อบแห้งอุณหภูมิสูงคงเดิมที่ 75 °C ทำการปรับอุณหภูมิตู้อบแห้งอุณหภูมิต่ำเท่ากันโดยจากเดิมใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 70 °C แต่ทำการปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นเป็น 75 °C และ 80 °C เพื่อลดระยะเวลาในการอบแห้ง ไม่ให้เกิดการค้างงาน หรือการรอกงาน และเพิ่มรอบในการอบแห้งได้มากขึ้น

กลยุทธ์ที่ 2 ปรับเวลาการเข้า-ออกรถเข็นใหม่ โดยปรับเวลาให้รถเข็นแต่ละคันอยู่ในตู้อบแห้งเพิ่มขึ้นจากเดิมตู้ละ 1 ชั่วโมง ระยะเวลาอบแห้งทั้งหมด 15 ชั่วโมง เพิ่มเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง เมื่อครบทั้งหมด 8 ตู้ จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมดเป็น 22.5 และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับ

กลยุทธ์ที่ 3 ทำการอบแห้งใหม่แบบวนซ้ำ จากเดิมเมื่อเต็ม 8 เข็น รถเข็นคันแรกจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเป็นเวลา 8 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบแห้ง แต่การอบแห้งแบบเดิมทำให้ผลผลิตที่ได้อาจไม่ดีหลังจากการอบแห้งมีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ จึงได้หาแนวทางในการแก้ไขโดยการนำรถเข็นคันที่ 1 ออกจากตู้อบแห้งตู้ที่ 8 แล้วทำการคัดส่วนที่แห้งและนำส่วนที่ไม่แห้ง เข้าตู้อบแห้งตู้ที่ 1 ใหม่ เป็นการอบวนซ้ำไปเรื่อย ๆ เพื่อให้คุณภาพหลังจากการอบแห้งดีขึ้น พร้อมทั้งช่วยแก้ปัญหาในการเกิดการรอกงาน

3.4.3 การปรับปรุงตู้อบแห้งเชิงแนวคิด

จากตัวแปรเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.4.2 จึงได้หาแนวคิดการทดลองโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) มาช่วยในการสร้างแบบจำลอง โดยเทคนิคนี้จะเป็นเทคนิคที่ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหล โดยแนวทางนี้จะนำหลักการและวิธีการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) มาเป็นเครื่องมือ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้หาแนวคิดการทดลองดังนี้

แนวคิดที่ใช้ในการทดลอง คือ เปลี่ยนเปลี่ยนเทคนิคการอบแห้งจากการอบแห้งในแบบเดิมให้เป็นแบบสลับทิศทางลม โดยการอบแห้งแบบสลับทิศทางลม (Switching airflow drying) เป็นการอบแห้งที่ถูกพัฒนาจากการอบแห้งแบบ Batch ซึ่งการอบแห้งแบบ Batch จะมีกรไหลของอากาศร้อนไปในทิศทางเดียวคือ จากด้านบนลงด้านล่าง หรือจากด้านซ้ายไปด้านขวาเท่านั้น ส่วนการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน (ศุภศักดิ์ ลิ้มปิติ, 2544) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งลำไยทั้งเปลือกด้วยระบบหมุนเวียนลมร้อน เพื่อแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอความชื้นของลำไย และใช้แรงงานคนในการพลิกกลับ ซึ่งเครื่องอบแห้งที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นเครื่องอบแห้งแบบเป็นชุด (batch type) ถูกออกแบบให้ลมร้อนเข้า และออกได้ 2 ด้าน คือ หากลมร้อนเข้าทางด้านบนของเครื่องอบแห้ง ทางลมออกจะอยู่ทางด้านล่างของเครื่องอบแห้ง ในขณะที่เดียวกันก็สามารถสลับให้ลมร้อนเข้าทางด้านล่างของเครื่องอบแห้ง และออกทางด้านบนได้ ซึ่งการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้งได้รับความร้อนทั้งส่วนบนและส่วนล่าง ทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปได้อย่างทั่วถึง อากาศร้อนที่ไหลผ่านผลิตภัณฑ์จะมีความชื้นปะปนอยู่ การพาความร้อนออกสามารถทำได้ทั้งสองทิศทาง โดยอาศัยการบังคับของระบบท่อส่งลมและพัดลม โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการสลับทิศทางลม คือ วาล์วควบคุมลงที่ละด้าน โดยทำการออกแบบห้องบรรจุวัตถุดิบเป็นลิ้นชัก ซึ่งแยกออกเป็น 3 ชั้นคือ บน กลาง และล่าง รวม 12 ลิ้นชัก ผลการพัฒนา พบว่า คุณภาพของการอบแห้งลำไยทั้งเปลือกไม่แตกต่างจากการอบลำไยด้วยวิธีพลิกกลับผลลำไย

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลม โดยทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และนำการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์แก้ไขปัญหานี้ เพื่อเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจหากมีการปรับปรุงเครื่องอบแห้งเกิดขึ้น

3.4.4 การวิเคราะห์คุณภาพมะม่วงหลังจากการอบแห้ง

โดยการวิเคราะห์คุณภาพมะม่วงหลังจากการอบแห้ง ได้ทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 2 รถเข็น คือ รถเข็นคันที่ 1 และคันที่ 8 เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพและหาสาเหตุในการอบแห้ง

1. ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w)

ค่า a_w วัดค่าโดยใช้เครื่องวัด a_w meter ยี่ห้อ AQUA lab รุ่น 3 TE หลักการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติ โดยการแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขไม่มีหน่วย มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยสุ่มมะม่วงออกมาจากรถเข็นในแต่ละชั้น ชั้นละ 5 กรัม เครื่องวัด a_w จะทำการอ่านค่า a_w ออกมา โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2558 กำหนดว่าผักและผลไม้อบแห้งมีค่าวอเตอร์แอกทिवิตีไม่เกิน 0.6 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558)

2. การทดสอบคุณภาพด้านสี

การทดสอบคุณภาพด้านสี วัดค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสี Spectrophotometer ยี่ห้อ Hunterlab รุ่น MiniScan XE plus การตรวจวัดค่าสีตรวจโดยใช้ระบบ CIE Lab scale โดยการตรวจวัดค่าสีจะเป็นการแสดงผลออกมาในระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยแกน L^* จะบรรยายถึงค่าความสว่าง (Lightness) แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีเขียวและสี ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีน้ำเงินและสีเหลือง พร้อมทั้งคำนวณหาค่าความแตกต่างของสี (Total color difference, ΔE)

3. การตรวจสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การตรวจสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสความแข็ง (Hardness) ทำได้โดยใช้เครื่อง Texture analyser รุ่น TA.XT.plus (Stable microsystems texture technologies Inc., UK) ทำการทดสอบด้วยแรงกดและใช้ความเร็วในการกด 1 มิลลิเมตรต่อวินาที

4. การตรวจสอบปริมาณความชื้น (Moisture content, MC)

การตรวจสอบปริมาณความชื้นสามารถตรวจสอบได้โดยใช้เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยรังสีอินฟราเรด โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.136/2558 กำหนดว่ามะม่วงอบแห้งมีความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558)

3.5 การวิเคราะห์ต้นทุนโดยใช้หลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

วิเคราะห์วิธีในการปรับปรุงเครื่องอบแห้งในแต่ละแนวทางในหัวข้อที่ 3.4.3 แนวทางที่กล่าวมานั้นเป็นการทดลองแบบเชิงแนวคิด โดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computation Fluid Dynamic, CFD) จึงต้องทำการประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น พร้อมทั้งหาระยะเวลา ค่าใช้จ่ายในการแก้ไขปรับปรุงเครื่อง และระยะเวลาในการคืนทุน ช่วยประกอบในการตัดสินใจให้กับผู้ประกอบการ หากต้องมีการปรับปรุงเครื่องตามแนวคิดจริง

3.6 งบประมาณที่ใช้ในการวิจัย

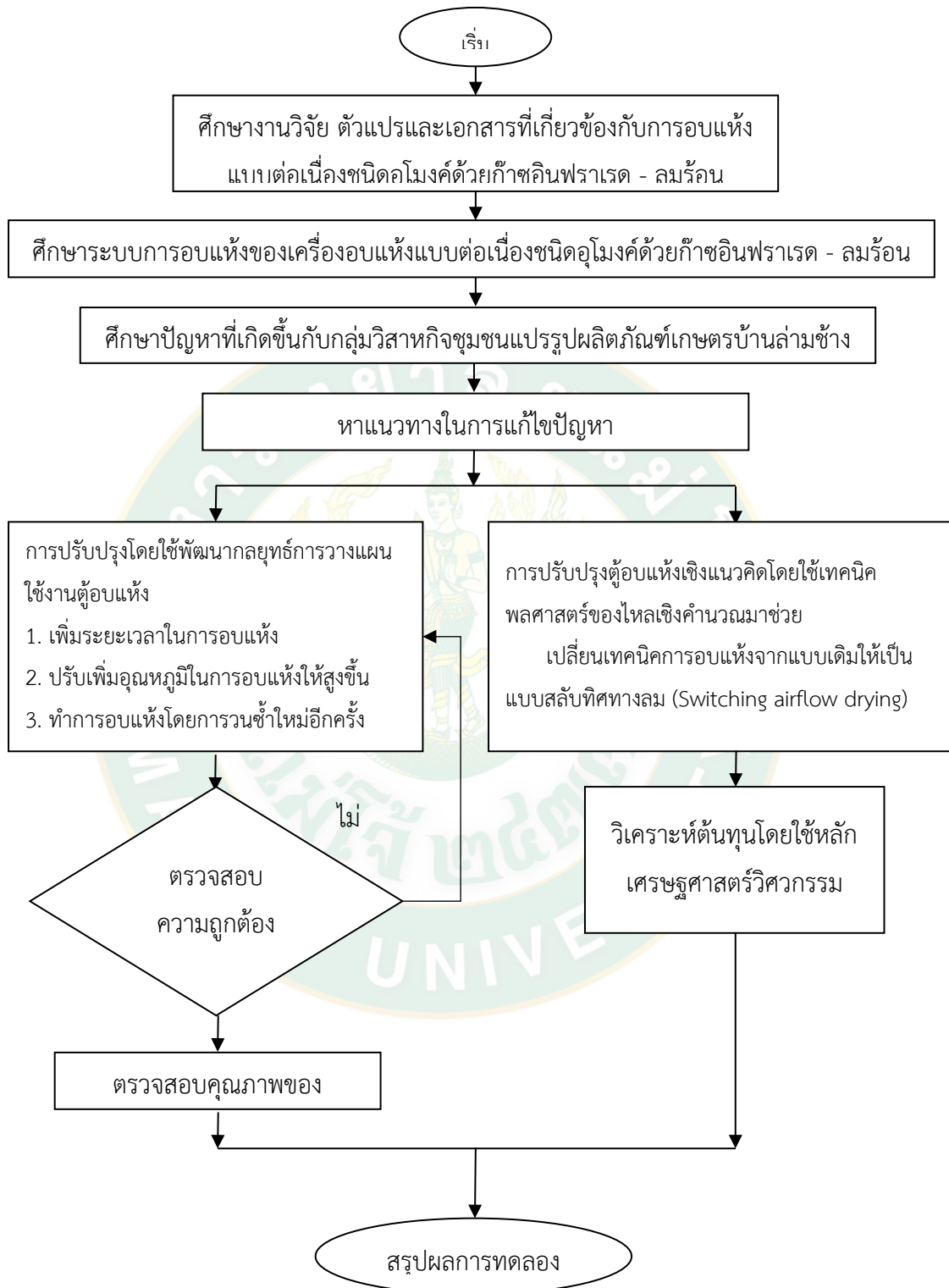
การวิจัยครั้งนี้คาดว่าจะใช้งบประมาณมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ค่าวัสดุดิบ	85,000	บาท
- ค่าเชื้อเพลิง	13,000	บาท
- ค่าจ้างเหมาตรวจสอบอาหารสำคัญ	5,000	บาท
- ค่าจ้างเหมาตรวจวิเคราะห์ด้านจุลชีววิทยา	5,000	บาท
งบประมาณรวม	108,000	บาท

3.7 สถานที่ดำเนินการวิจัย

ดำเนินการทดสอบที่โรงงานอบผลไม้อบแห้งของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำม้าง จังหวัดลำพูน และห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมอาหารอาคารเรียนรวมสาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร

3.8 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาพที่ 13 แผนภาพการดำเนินงาน

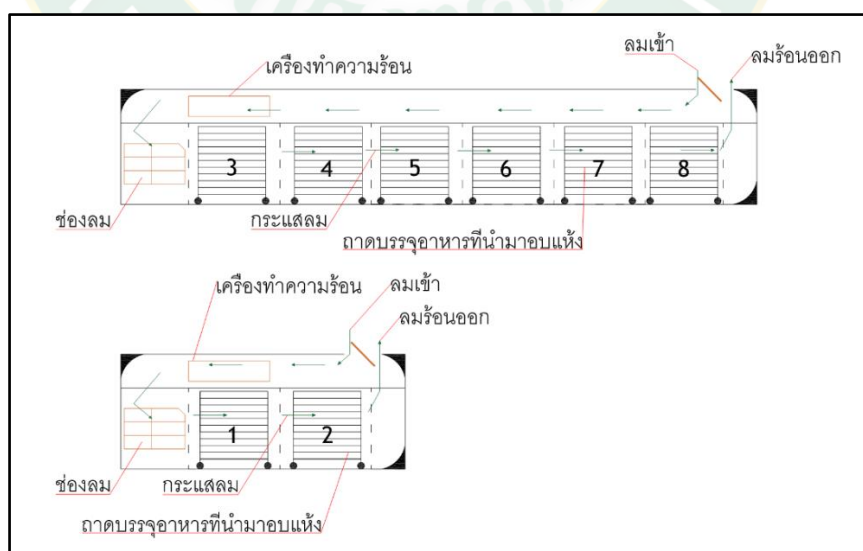
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากงานวิจัยนี้สามารถแบ่งการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ การวิเคราะห์คุณภาพมะม่วงอบแห้งและตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งก่อนทำการปรับปรุง, การแก้ไขปัญหาโดยใช้การพัฒนากลยุทธ์การวางแผนใช้งานตู้อบแห้งมะม่วงมหาชนก และวิเคราะห์แก้ไขปัญหาโดยใช้การปรับปรุงตู้เชิงแนวคิด ได้ผลดังนี้

4.1 ผลของการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน

จากการศึกษาตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อนของวิสาหกิจชุมชนโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหากลยุทธ์ในการอบแห้ง ลักษณะเครื่องอบแห้งแบ่งเป็น 2 ตู้ใหญ่ ๆ แบ่งเป็นตู้ไล่ความชื้น ประกอบด้วยตู้อบแห้งเล็ก 2 ตู้ คือตู้หมายเลข 1 และ 2 อีกตู้คือตู้อบแห้งประกอบด้วยตู้อบแห้งเล็ก 6 ตู้ คือตู้หมายเลข 3 ถึง 8 โดยหลักการของเครื่องอบแห้ง มีหลักการการทำงานคล้าย ๆ กับการอบลมร้อนทั่ว ๆ ไป แต่มีก๊าซอินฟราเรดเป็นตัวให้ความร้อน โดยก๊าซอินฟราเรดจะมีกล่องควบคุมเพื่อสั่งหัวเตาจุดแบบอัตโนมัติ และเมื่อก๊าซอินฟราเรดทำงาน อากาศร้อนก็จะผ่านห้องอบตามแนวลูกศรดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ทิศทางการไหลลมร้อนภายในตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน

จากนั้นอากาศร้อนจะพาความชื้นจากผลไม้อบแห้งลอยขึ้นไปยังช่องระบายความชื้น โดยความชื้นจะถูกปล่อยทิ้งทั้งหมดพร้อมทั้งอากาศร้อนส่วนหนึ่งและอากาศร้อนอีกส่วนหนึ่งจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ โดยอุณหภูมิภายในห้องอบถูกควบคุมโดยโซลินอยด์วาล์วเมื่ออุณหภูมิในห้องให้ความร้อนสูงขึ้นถึงอุณหภูมิที่เรากำหนด โซลินอยด์วาล์วจะทำการตัดก๊าซทำให้เตาแก๊สดับและเมื่ออุณหภูมิในห้องความร้อนลดลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิที่เรากำหนดกล่องควบคุมหัวก๊าซอินฟราเรดจะทำหน้าที่จุดหัวก๊าซขึ้นโดยอัตโนมัติ โดยก๊าซอินฟราเรดจะมีส่วนประกอบแต่ละอย่าง ดังนี้

1) หัวพ่นแบบอินฟราเรดชนิดใช้ก๊าซ คือหัวเตาอินฟราเรดแบบชนิดใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนโดยการแผ่รังสี หัวเตาแบบนี้ให้ความร้อนสูง จึงทำให้การสูญเสียความร้อนไปกับอากาศน้อยกว่าเตาทั่วๆไปถึง 30-40 เปอร์เซ็นต์

2) โซลินอยด์วาล์วก๊าซ คือ วาล์วควบคุมทิศทางโดยใช้คอยล์ไฟฟ้าสั่งการร่วมกับสปริงหรือคอยล์ไฟฟ้าอีกตัวเมื่อต้องการให้วาล์วอยู่อีกตำแหน่ง โดยโซลินอยด์วาล์วทำหน้าที่เป็นลิ้นวาล์วในการเปิดหรือปิด เพื่อให้ก๊าซไหลผ่าน

3) กล่องจุดก๊าซอัตโนมัติ เป็นอุปกรณ์สำหรับจุดก๊าซ โดยการทำงานเริ่มจากเปิดวาล์วก๊าซพร้อมกับจุดสปาร์คที่ปลายก้านเซรามิก เมื่อหัวเผาติดมีเปลวไฟเกิดขึ้น หากเป็นชุดอัตโนมัติ อุปกรณ์จะสามารถตรวจจับเปลวไฟได้ และจะหยุดสปาร์คขณะจ่ายก๊าซอยู่ขณะที่หัวเผายังคงติดอยู่หากมีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้น เช่น เปลวขาด หัวเผาแตกเสียหาย ก๊าซหมดหรือก๊าซรั่ว อุปกรณ์ชนิดนี้จะทำการสปาร์คซ้ำอีก 10 วินาที หากยังไม่สามารถตรวจจับเปลวไฟได้จะทำการสั่งตัดก๊าซเข้าหัวเผาทันที เพื่อป้องกันการสะสมของก๊าซในระบบ ลดความเสี่ยงในการเกิดก๊าซระเบิด

4) วาล์วพร้อมเซ็นเซอร์ตรวจจับเปลวไฟ อุปกรณ์ชนิดนี้มีหน้าที่ในการเปลี่ยนความร้อนจากเปลวไฟเป็นกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ตั้งทูนสปริงใช้ในการเปิดวาล์ว หากเซ็นเซอร์ไม่ได้รับความร้อนจะไม่เกิดกระแสไฟฟ้าส่งผลให้วาล์วจะปิดอัตโนมัติ ช่วยป้องกันการเกิดอันตรายจากก๊าซที่ไม่ได้เผาไหม้สะสมในเตา

โดยกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรได้ใช้หัวพ่นอินฟราเรดชนิดใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิง รุ่น A 2602 ดังภาพที่ 15 พร้อมทั้งมีรายละเอียดของหัวพ่นดังนี้

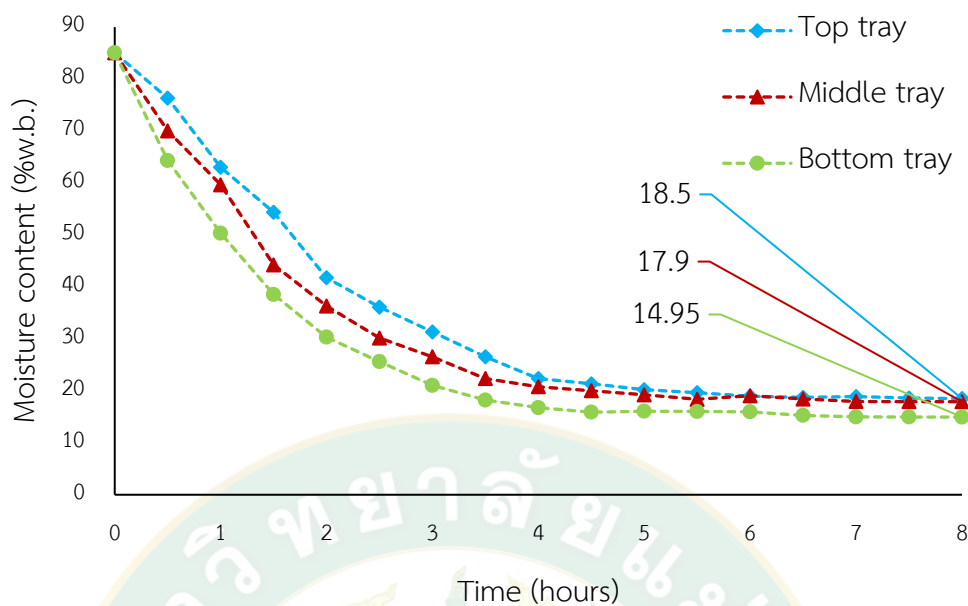


ภาพที่ 15 หัวฟืนอินฟราเรดชนิดใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ในวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตร

บ้านลำมช้าง

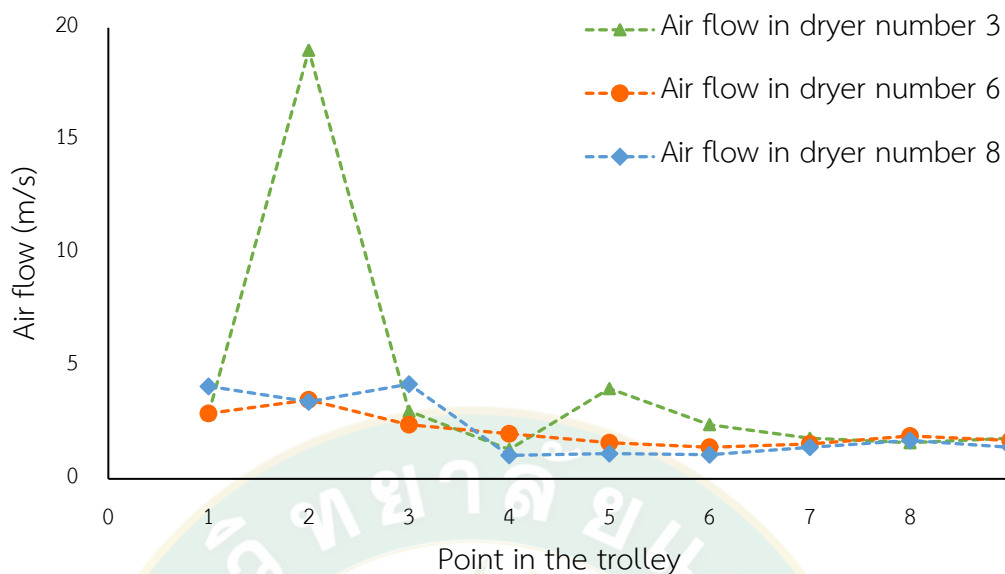
การสิ้นเปลืองพลังงานก๊าซ LPG (Consumption LPG)	547.10 kg/hr.
ปริมาณการใช้ LPG	0.74 m ³ /hr.
ความร้อน (Heat)	9,360 kcal/hr.
ช่วงอุณหภูมิ	0-800 °C

จากการศึกษาการอบแห้งมะม่วงของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำมช้าง ด้วยตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน วิธีการอบแห้งมะม่วงของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำมช้างแบบเดิม พบว่าการอบแห้งจะใช้แรงงานคนนำรถเข็นเข้าอบแห้งทีละคัน โดยจะใช้ระยะเวลาการอบแห้งในแต่ละตู้านาน 60-90 นาที แล้วจึงทำการย้ายรถเข็นไปตู้ถัดไปโดยตู้อบแห้งมีทั้งหมด 8 ตู้ ซึ่งจะใช้ระยะเวลาการอบแห้งทั้งหมดรวม 8-12 ชั่วโมง หลังจากนั้นพบว่าเมื่อทำการสูมตัวอย่างมะม่วงมาตรวจวัดค่าความชื้นที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างของชั้นรถเข็น ให้ข้อมูลแสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชื้นฐานแห้งของรถเข็นคันที่ 1 ในถาด
ชั้นบน กลาง และล่างสุด

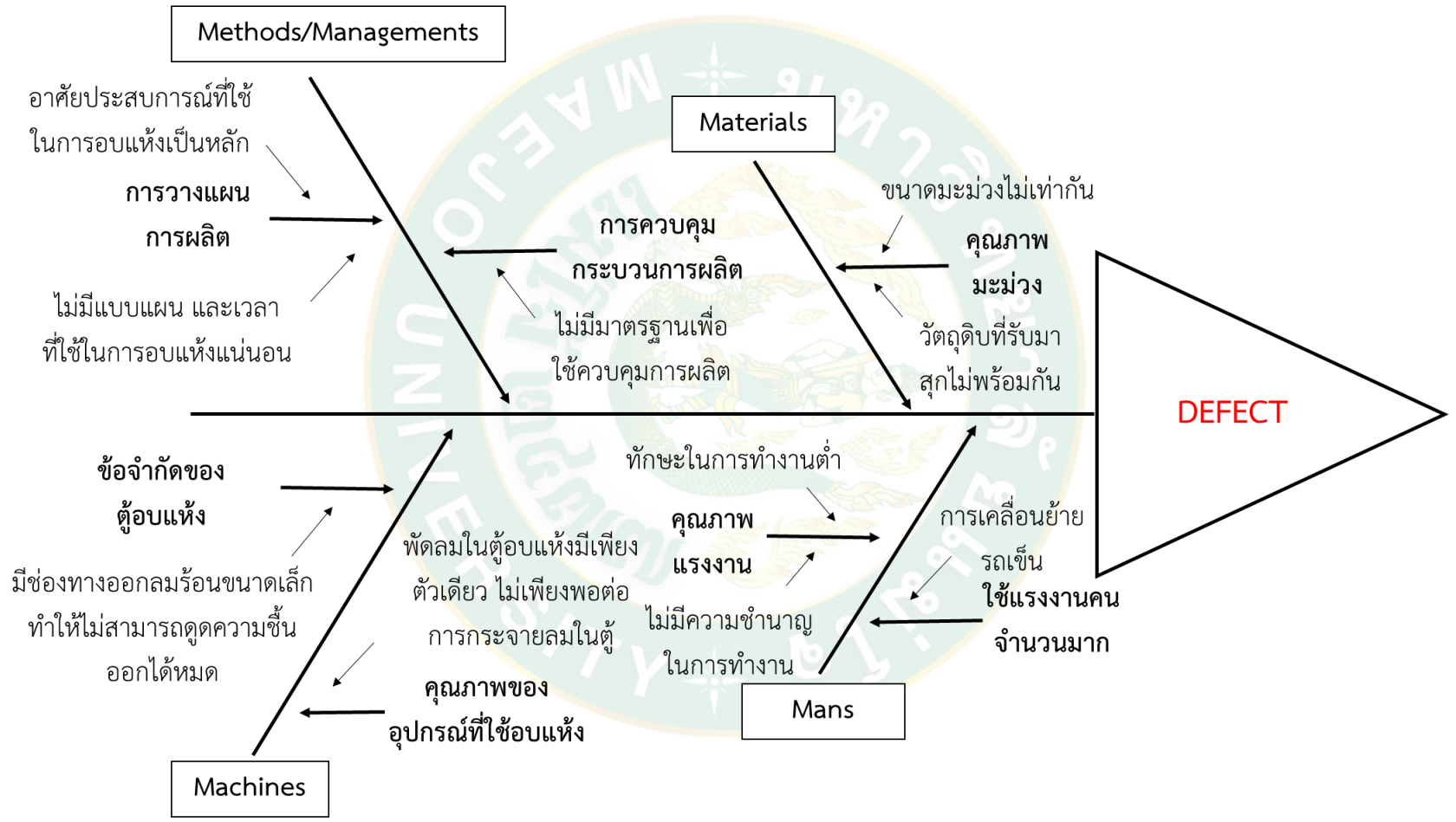
จากภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชื้นฐานแห้งของรถเข็นคันที่ 1 พบว่ากราฟมีแนวโน้มการลดลงของความชื้นฐานแห้งและเวลาของตัวอย่างมะม่วงในถาดบน กลาง และล่างของรถเข็น จากกราฟพบว่า ค่าความชื้นของมะม่วงมีลักษณะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ในตำแหน่งถาดล่างสุด โดยมีการลดลงของความชื้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าใกล้เคียงที่มาตรฐานกำหนด (ต่ำกว่า 12% wet basis) ในส่วนของถาดกลางและถาดบนพบว่าความชื้นมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยและความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มพช. กำหนด โดยภาพรวมแสดงให้เห็นว่าชั้นที่มีการระเหยความชื้นไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องจากการกระจายลมที่ไม่สม่ำเสมอภายในตู้อบแห้ง ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง จึงได้ทำการเก็บข้อมูลการกระจายลมภายในตู้อบแห้ง และได้กราฟรูปแบบการกระจายความเร็วลมจำนวน 9 จุด ที่ตำแหน่งตู้อบแห้งที่ 3, 6 และ 8 ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (m/s) และเวลาของตู้อบแห้งหมายเลข 3, 6 และ 8

จากภาพที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและเวลาของตู้อบแห้ง จากกราฟแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการไหลของลมร้อนในตู้อบแห้งอุณหภูมิต่ำ มีรูปแบบการไหลของลมร้อนจากตู้อบแห้งที่ 3 ไปยังตู้อบแห้งที่ 8 ผลของการเก็บข้อมูลความเร็วลมในแต่ละจุดของรถเข็น จำนวน 3 ตู้ ซึ่งเป็นตู้ที่ 3, 6 และ 8 ที่ตั้งอยู่ที่ตำแหน่งต้น กลาง และท้ายของตู้อบแห้งอุณหภูมิต่ำ ผลการเก็บข้อมูลและสร้างกราฟเพื่อดูปริมาณการกระจายลม พบว่าความเร็วลมตำแหน่งตู้อบแห้งที่ 3 ในภาคชั้นบนสุด มีค่าความเร็วลมมากกว่าที่ตำแหน่งตู้อบแห้งอื่น ๆ และความเร็วลมค่อย ๆ ลดลงในตู้อบแห้งที่ 6 ซึ่งเป็นส่วนกลางของเครื่องอบแห้ง ซึ่งผลของการกระจายลมที่ไม่สม่ำเสมอ เป็นผลให้คุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งไม่สม่ำเสมอ สอดคล้องกับผลของความชื้นที่กล่าวไป

เมื่อทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาการอบแห้งของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแบบเดิม ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับสาเหตุ และปัญหา ของคุณภาพหลังการอบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอกันด้วยการวิเคราะห์สาเหตุปัญหาด้วยแผนผังการแสดงเหตุและผล ด้วยหลักการ 4M ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การวิเคราะห์สาเหตุด้วยผังก้างปลา

จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้านบุคลากรพบว่า

- 1) คุณภาพของแรงงานมีทักษะในการทำงานต่ำ ไม่มีความชำนาญในการทำงาน
- 2) ใช้แรงงานคนเป็นจำนวนมากในเคลื่อนย้ายรถเข็นในแต่ละรอบ

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาทางด้านเครื่องจักรพบว่า

1) เครื่องจักรมีข้อจำกัดในคือ มีช่องทางออกของลมร้อนขนาดเล็ก ทำให้ไม่สามารถดูความชื้นออกจากตู้อบแห้งในช่วงแรกของการอบแห้งได้หมด

2) คุณภาพของอุปกรณ์ที่ใช้อบแห้ง พัดลมในตู้อบแห้งมีเพียงตัวเดียว ทำให้การกระจายลมร้อนในตู้อบแห้งไม่ทั่วถึง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาทางด้านวัตถุดิบพบว่า

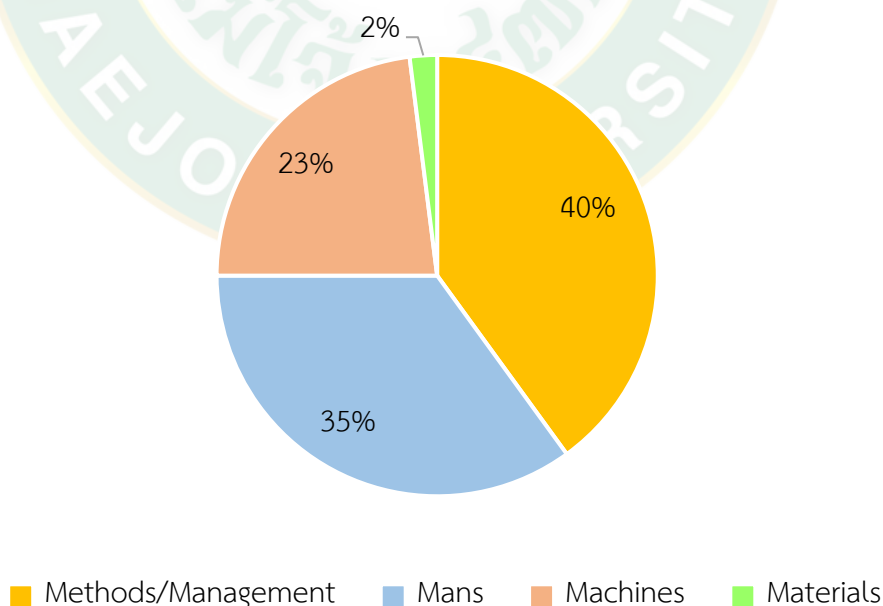
1) วัตถุดิบรับมามีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ ขนาดของมะม่วงมีขนาดไม่เท่ากัน มะม่วงที่รับมาสุกไม่พร้อมกัน

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาทางด้านวิธีการและการจัดการพบว่า

1) วิธีการวางแผนการผลิตอาศัยเพียงประสบการณ์ที่ใช้ในการอบแห้งเป็นหลัก และไม่สามารถควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งให้แน่นอนได้

2) ในการผลิตไม่มีการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีมาตรฐาน

เมื่อได้สาเหตุของปัญหาทั้งหมดแล้ว ผู้วิจัยจึงทำการแบ่งสัดส่วนของปัญหาที่พบดังแสดงในภาพที่ 19 เพื่อเป็นแนวทางในการหากลยุทธ์ในการแก้ไขปัญหา



ภาพที่ 19 สัดส่วนของปัญหาจากการวิเคราะห์สาเหตุด้วยผังก้างปลา

จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในข้างต้น ได้แบ่งสัดส่วนของปัญหาจากการวิเคราะห์สาเหตุด้วยผังก้างปลาพบว่า ความสูญเสียที่เกิดจากงาน (Defect) คือ คุณภาพมะม่วงที่ได้หลังจากการอบแห้งมีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ โดยสาเหตุหลัก อาจเกิดจากการวางแผนการผลิตที่อาศัยเพียงแค่ประสบการณ์ที่ใช้ในการผลิตเพียงเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งให้แน่นอนได้ พร้อมทั้งไม่มีมาตรฐานในการผลิตที่แน่นอน โดยปัญหานี้ผู้วิจัยได้คิดจากทั้งหมด 4 ปัญหาพบว่าปัญหานี้คิดเป็นร้อยละ 40 และปัญหาด้านบุคลากรคิดเป็นร้อยละ 35 โดยสาเหตุของปัญหานี้ อาจเกิดจากคุณภาพของแรงงานมีทักษะในการทำงานต่ำ ไม่มีความชำนาญในการทำงาน อีกทั้งต้องใช้แรงงานคนเป็นจำนวนมากในเคลื่อนย้ายรถเข็นในแต่ละรอบ เมื่อพบปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้หาแนวทางในการแก้ไขปัญหา โดยใช้การแก้ไขปัญหาโดยกลยุทธ์ที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นการจัดระเบียบการเข้า-ออกรถเข็นของโรงงาน โดยมุ่งเน้นไปทางปัญหาด้านวิธีการและการจัดการ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการจัดระเบียบการเข้า-ออกรถเข็นมากขึ้น จากนั้นจึงทำการศึกษาปัญหาด้านเครื่องจักรพบว่าคิดเป็นร้อยละ 23 โดยสาเหตุของปัญหานี้คือ เครื่องจักรมีข้อจำกัดในคือ มีช่องทางออกของลมร้อนขนาดเล็ก ทำให้ไม่สามารถดูดความชื้นออกจากตู้อบแห้งในช่วงแรกของการอบแห้งได้หมด และคุณภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ออบแห้ง พัดลมในตู้อบแห้งมีเพียงตัวเดียว ทำให้การกระจายลมร้อนในตู้อบแห้งไม่ทั่วถึง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ ซึ่งการแก้ไขปัญหาด้านเครื่องจักรนี้ไม่สามารถแก้ไขปัญหาโดยการจัดการได้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการแก้ไขปัญหานี้โดยนำเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เข้ามาเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา โดยการสร้างแบบจำลองให้ขนาดและสภาวะภายในตู้อบแห้งใกล้เคียงกับตู้อบแห้งจริงมากที่สุด พร้อมทั้งใช้เทคนิคนี้ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหล เพื่อเป็นแนวทางในหาสาเหตุและแก้ไขด้านปัญหาเครื่องจักร เมื่อทำการวิเคราะห์ปัญหาทั้งหมดที่กล่าวมา ผู้วิจัยจึงได้สรุปแนวทางที่ใช้ในการจัดการได้ โดยทำการแบ่งการทดลองเป็น 3 กลยุทธ์ พร้อมทั้งนำเสนอกลยุทธ์ที่สามารถใช้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพดังแสดงในหัวข้อถัดไป

4.2 ผลของการพัฒนากลยุทธ์การวางแผนใช้งานตู้อบแห้งสำหรับมะม่วงมหาชนก

จากการอบแห้งแบบเดิมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปเกษตรบ้านลำช้าง จึงได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ผังก้างปลาแสดงเหตุและผลแสดงดังภาพที่ 18 เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา และพบว่ามะม่วงอบแห้งที่ออกมาหลังจากการอบแห้งมีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ โดยในหนึ่งรถเข็นมีส่วนที่แห้งอยู่บริเวณด้านล่าง และถาดด้านบนยังคงมีความชื้นอยู่ จึงได้หากลยุทธ์ในการวางแผนรูปแบบการแก้ไขปัญหาการบริหารจัดการการเข้า-ออกรถเข็น ได้ 3 กลยุทธ์ ดังนี้ ปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง, ปรับเวลาการเข้า-ออกรถเข็น และทำการอบแห้งแบบวนซ้ำ

4.2.1 ผลการพัฒนากลยุทธ์ที่ 1 การปรับอุณหภูมิในการอบแห้งใหม่

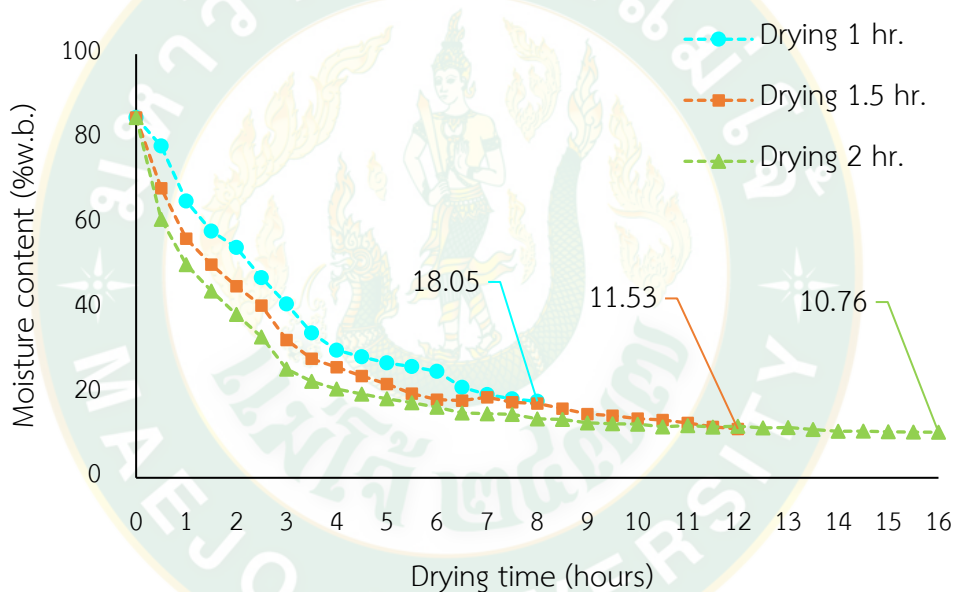
ปรับอุณหภูมิในการอบแห้งใหม่ โดยคงตู้อบแห้งอุณหภูมิสูงที่ 75 °C และทำการปรับเพียงตู้อบแห้งอุณหภูมิต่ำเท่านั้นโดยจากเดิมใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 70 °C พบว่าใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ มีส่วนที่ยังไม่แห้งในปริมาณมาก จึงทำการปรับอุณหภูมิตู้อบแห้งอุณหภูมิต่ำเพิ่มขึ้นเป็น 75 °C และ 80 °C เพื่อลดระยะเวลาในการอบแห้ง และทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพหลังจากการอบแห้งดียิ่งขึ้น แต่เมื่อทำการทดลองอบแห้งตู้อบแห้งอุณหภูมิต่ำที่ 75 และ 80 °C พบว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้งที่ได้มีสีเข้มขึ้น มีบางส่วนไหม้ เนื่องจากใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้ง น้ำที่อยู่ภายในมะม่วงยังออกมาไม่หมด ผิวด้านนอกของมะม่วงเกิดการระเหยน้ำก่อนจึงแห้งกว่าด้านใน และเมื่อโดนความร้อนนาน ๆ จึงเกิดการไหม้แสดงในภาพที่ 20 ผู้วิจัยจึงได้หากลยุทธ์ในการอบแห้งใหม่เป็นกลยุทธ์ที่ 2 และ 3 ดังแสดงในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 20 คุณภาพมะม่วงที่อบแห้งในอุณหภูมิ 70, 75 และ 80 °C

4.2.2 ผลการพัฒนากลยุทธ์ที่ 2 การปรับระยะเวลาในการเข้า-ออกรถเข็น

จากแนวทางการพัฒนากลยุทธ์ที่ 1 การปรับอุณหภูมิในการอบแห้งใหม่ พบว่าวิธีนี้เกิดการสูญเสียมะม่วง เนื่องจากการไหม้เป็นจำนวนมาก ผู้วิจัยจึงทำการวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามกลยุทธ์ที่ 2 การปรับระยะเวลาในการเข้า-ออกรถเข็น โดยจากเดิมใช้ระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ (Holding time) 1 ชั่วโมง และระยะเวลาอบแห้ง (Drying time) 15 ชั่วโมง เพิ่มเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง เมื่อครบทั้งหมด 8 ตู้ จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมด (Operation time) เป็น 22.5 และ 30 ชั่วโมงตามลำดับ ได้ทำการเก็บข้อมูลความชื้นและเปรียบเทียบผลของการศึกษาอัตราการอบแห้งของมะม่วงในกรณีที่มีการระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้เป็น 1, 1.5 และ 2 ดังแสดงในภาพที่ 21



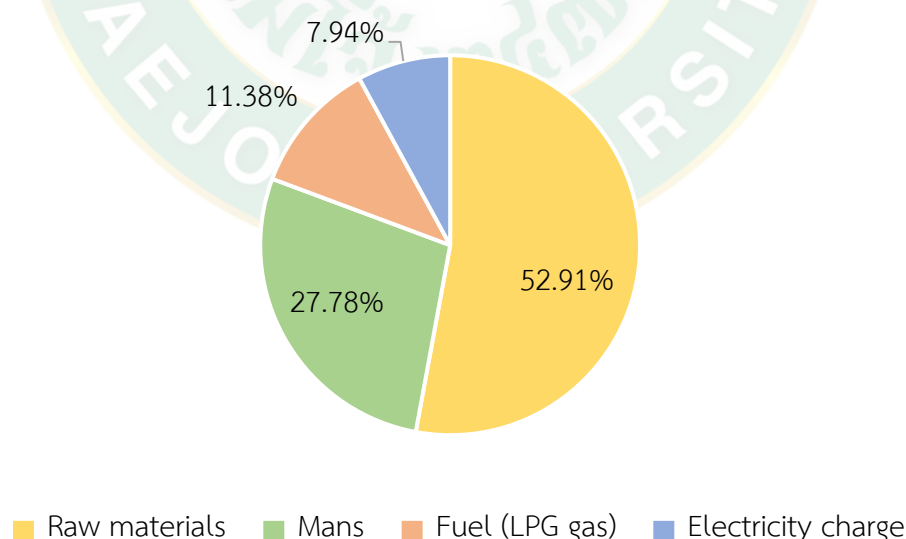
ภาพที่ 21 อัตราการอบแห้งจากการวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามกลยุทธ์ที่ 2

จากภาพที่ 20 พบว่ากราฟมีแนวโน้มการลดลงของความชื้นฐานเปียก โดยค่าความชื้นสุดท้ายของมะม่วงในระยะเวลาการอบแห้งต่อตู้ที่ 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง มีค่าความชื้นสุดท้ายที่ 18.05, 11.53 และ 10.76 %wet basis ตามลำดับ พบว่าในระยะเวลาการอบแห้งต่อตู้ที่ 1.5 และ 2 มีการลดลงของความชื้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด (ต่ำกว่า 12 %wet basis) ผู้วิจัยจึงได้จัดเก็บผลผลิตที่ได้ทั้งหมดมาพิจารณาค่าเฉลี่ยผลผลิตหลังจากการอบแห้ง (Average %yield) พร้อมทั้งคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิต (Cost) ต่อรอบ เพื่อดูต้นทุนในการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลจากการศึกษาผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งในกลยุทธ์ที่ 2 ส่วนของร้อยละผลผลิตที่ได้ (Average %yield) และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิต (Cost) ต่อรอบ (Batch)

Holding time	Drying time	Operation time	Average %yield	Consumption LPG	LPG cost	Total cost	Cost
hours	hours	hours		kg.	THB/batch	THB/batch	THB/kg.
1.0	8	15.0	50	11.10	500	6,300	284
1.5	12	22.5	75	16.65	700	6,900	207
2.0	16	30.0	90	22.20	900	7,600	190

ตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยผลผลิตหลังจากการอบแห้ง พบว่าการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง ได้ค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้งคือ 50, 75 และ 90% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้งแล้วพบว่าระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 2 ชั่วโมง มีค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้งมากที่สุด แต่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมดนานกว่าเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่เวลาอื่น ๆ คือ 30 ชั่วโมง และใช้ค่าใช้จ่ายต่อรอบถึง 7,600 บาท ผู้วิจัยจึงนำวิธีที่ดีที่สุดทำการจำแนกค่าใช้จ่ายในแต่ละประเภท เพื่อดูสัดส่วนค่าใช้จ่ายแต่ละประเภทดังแสดงในภาพที่ 22



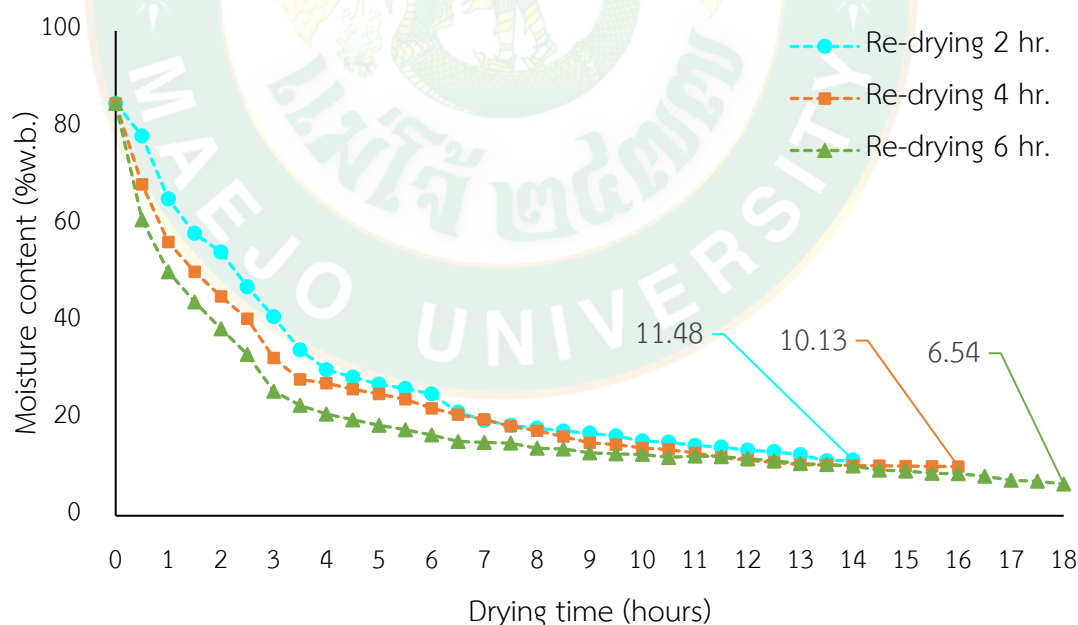
ภาพที่ 22 การจำแนกค่าใช้จ่ายในการอบแห้งต่อรอบ

จากภาพพบว่า ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งส่วนใหญ่สูญเสียไปกับค่าวัตถุดิบที่ใช้การอบแห้งถึง 52.91% ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้หากกลยุทธ์เพิ่มโดยทำการอบแห้งแบบวนซ้ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการ

อบแห้ง และลดค่าใช้จ่ายในการอบแห้งต่อรอบ จากการนำค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้งที่ระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 1 และ 1.5 ชั่วโมง เปรียบเทียบกัน พบว่าที่ระยะเวลาในการอบแห้งที่ 1 ชั่วโมง ได้ค่าผลผลิตเฉลี่ยคือ 50% เมื่อคำนวณมะม่วงที่ต้องทำการอบแห้งแบบวนซ้ำแล้วนั้น พบว่าจำนวนมะม่วงที่ต้องนำมาอบแห้งแบบวนซ้ำมีปริมาณเท่ากับจำนวนมะม่วงที่แห้ง หากนำมาอบแห้งแบบวนซ้ำอีกรอบต้องรอมะม่วงที่อบแห้งที่อยู่ในตู้อบแห้งออกมาก่อน ดังนั้นจึงเลือกนำวิธีการอบแห้งต่อตู้ที่ 1.5 ชั่วโมง ทำการอบแห้งแบบวนซ้ำ โดยการอบแห้งแบบวนซ้ำนี้ได้เพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ดังแสดงต่อไปในกลยุทธ์ที่ 3

4.2.3 ผลการพัฒนากลยุทธ์ที่ 3 การอบแห้งแบบวนซ้ำ

จากกลยุทธ์ที่ 2 การเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น พบว่าระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 2 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพดีที่สุด ให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตหลังจากการอบแห้งมากที่สุด แต่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำมะม่วงอบแห้งทำการอบแห้งแบบวนซ้ำ เนื่องจากต้องการหาระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด และมีคุณภาพที่สม่ำเสมอ จึงได้ทำการเก็บข้อมูลการอบแห้งแบบวนซ้ำที่เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 23



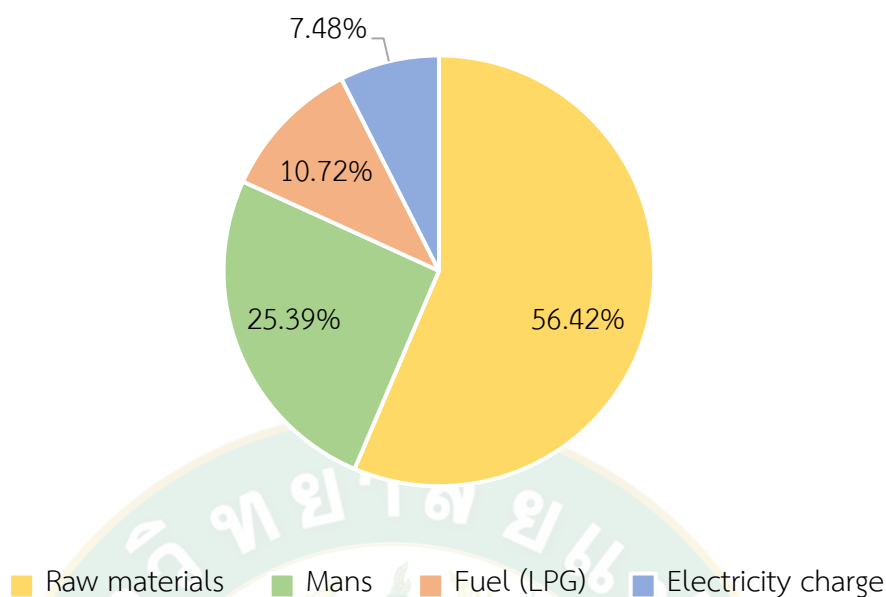
ภาพที่ 23 อัตราการอบแห้งจากการวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามกลยุทธ์ที่ 3

จากภาพที่ 23 แนวโน้มการลดลงของความชื้นฐานเปียก โดยค่าความชื้นสุดท้ายของมะม่วง การอบแห้งแบบวนซ้ำที่เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่าความชื้นสุดท้ายที่ 11.48, 10.13 และ 6.54 %wet basis ตามลำดับ พบว่าในการอบแห้งแบบวนซ้ำที่เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีการลดลงของความชื้นต่ำกว่ามาตรฐาน และใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 14, 16 และ 18 ชั่วโมง ตามลำดับ ผู้วิจัย จึงได้จัดเก็บผลผลิตที่ได้ทั้งหมดมาพิจารณาระยะเวลาการอบแห้งแบบวนซ้ำ (Re-drying time) ระยะเวลาการอบแห้ง ระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมด ค่าเฉลี่ยผลผลิตหลังจากการอบแห้ง (Average %yield) ค่าความสิ้นเปลืองแก๊ส (Consumption LPG) พร้อมทั้งคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิต (Total cost) ต่อรอบ เพื่อดูต้นทุนในการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลจากการศึกษาผลิตภัณท์มะม่วงอบแห้งในกลยุทธ์ที่ 3 ส่วนของร้อยละผลผลิตที่ได้ (Average %yield) และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิต (Cost) ต่อรอบ (Batch)

Re-drying time	Drying time	Operation time	Average %yield	Consumption LPG	LPG cost	Total cost	Cost
hours	hours	hours		kg.	THB/batch	THB/batch	THB/kg.
2	14	24.5	86	18.13	700	6,700	175
4	16	26.5	93	19.61	800	7,000	169
6	18	28.5	80	21.09	900	7,500	211

จากตารางที่ 6 เมื่อนำมะม่วงที่อบแห้งโดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 1.5 ชั่วโมง ทำการอบแห้งแบบวนซ้ำต่อตู้ที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมงแล้วนั้น ได้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด คือ 24.5, 26.5 และ 28.5 ชั่วโมง และค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้งคือ 86, 93 และ 80 ตามลำดับ พบว่าที่ระยะเวลาการอบแห้งแบบวนซ้ำที่ 4 ชั่วโมงให้ค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้งมากที่สุด คือ 93% และเมื่อเทียบกับระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 2 ชั่วโมง จากกลยุทธ์ที่ 2 พบว่าการอบแห้งแบบวนซ้ำในกลยุทธ์ที่ 3 มีประสิทธิภาพดีกว่า ใช้ระยะเวลาในการน้อยกว่า 3.5 ชั่วโมง และค่าความสิ้นเปลืองแก๊สน้อยกว่า 2.59 กิโลกรัม พร้อมทั้งสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งที่ดีที่สุด ในกลยุทธ์ที่ 2 สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 600 บาทต่อรอบ โดยค่าใช้จ่ายทั้งหมด ผู้วิจัยได้ทำการจำแนกค่าใช้จ่ายแต่ละประเภท ดังแสดงในภาพที่ 24 จากภาพพบว่าค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ คือ วัตถุดิบ เช่นเดียวกับกับกลยุทธ์ที่ 2 แต่วิธีนี้สามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนองแรงงานคนลงได้ถึง 2.39% และค่าใช้จ่ายในส่วนองเชื้อเพลิงและไฟฟ้าได้ถึง 0.66 และ 0.46% ตามลำดับ



ภาพที่ 24 การจำแนกค่าใช้จ่ายในการอบแห้งต่อรอบ

เมื่อทำการทดลองทั้ง 3 กลยุทธ์ที่กล่าวมา พบว่ากลยุทธ์ที่ 3 เป็นกลยุทธ์ที่ดีที่สุด สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และค่าความสิ้นเปลืองแก๊ส และค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อรอบได้ แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งวิธีนี้ยังต่อใช้แรงงานคนเป็นจำนวนมากในการย้ายรถเข็นเข้า-ออกเพื่อ และ คัดมะม่วงที่แห้งและไม่แห้งเพื่อนำมาอบแบบวนซ้ำ ผู้วิจัยจึงได้หาแนวทางโดยเป็นการแก้ไขปัญหาเชิงแนวคิด ออกแบบปรับปรุงเครื่องอบแห้งเพื่อลดจำนวนแรงงานลง โดยใช้โปรแกรม Autodesk CFD 2018 เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงเครื่องต่อไปในอนาคต

4.3 ผลคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

จากการสำรวจผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่วางขายตามท้องตลาดเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์อ้างอิง (Reference product) โดยทำการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คือ ปริมาณความชื้น เนื้อสัมผัส ค่าปริมาณน้ำอิสระ และค่าสี ดังแสดงในตารางที่ 7 ผู้วิจัยจึงนำค่าทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์อ้างอิงในการทดสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งในการอบแห้งแบบกึ่งอินฟราเรด-ลมร้อน

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์อบแห้งมะม่วงในท้องตลาด

Sample	MC (%w.b.)	H (N)	a_w	Color			ΔE
				L*	a*	b*	
Ref. Product	10.4	5.03	0.332	75.23	10.12	50.32	-

จากการทดสอบการแก้ไขปัญหาการอบแห้งผลิตภัณฑ์มะม่วง พบว่ากลยุทธ์ที่ประสิทธิภาพมากที่สุดคือ การปรับปรุงการอบแห้งในกลยุทธ์ที่ 3 การอบแห้งแบบวนซ้ำ ผู้วิจัยจึงทำการสุ่มมะม่วงอบแห้งในกลยุทธ์ที่ 3 ตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ พร้อมทั้งนำค่าทั้งหมดเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อ้างอิงดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบคุณสมบัติมะม่วงหลังการอบแห้ง

Replicate	a_w	Color			ΔE	H N
		L*	a*	b*		
1	0.325	67.25	7.32	48.82	8.59	4.96
2	0.332	67.87	7.54	49.01	7.91	4.89
3	0.327	68.34	7.25	49.22	7.54	4.94
Mean	0.328	67.82	7.37	49.02	8.01	4.93

จากการสังเกตคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังจากการปรับปรุงและเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อ้างอิงพบว่า มีลักษณะภายนอกที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อวัดคุณภาพของมะม่วงหลังการอบแห้งและหาค่าเฉลี่ยในการอบแห้งทั้ง 3 ซ้ำแล้วได้ผลดังตารางที่ 8 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อ้างอิง พบว่า ค่าปริมาณน้ำอิสระ ค่าสี และค่าเนื้อสัมผัส ไม่มีความแตกต่างกันทางนัยสำคัญ ผู้วิจัยจึงนำผลิตภัณฑ์

หลังจากการปรับปรุงตรวจวิเคราะห์ด้านจุลชีววิทยา และสารอาหารสำคัญดังแสดงในตารางที่ 9 และ 10

ตารางที่ 9 ผลการตรวจวิเคราะห์ด้านจุลชีววิทยามะม่วงหลังการอบแห้ง

List	Result	Standard	Unit	LOD	Experimentation
Escherichia coli	< 3.0	< 3	MPN/g	-	FDA BAM Online, 2002 ; update 2017 (Chapter 4)
Total Bacteria Count	1.1×10^2	$< 1 \times 10^5$	CFU/g	-	FDA BAM Online, 2001 (Chapter 3)
Yeast and Molds	< 10	< 1,000	CFU/g	-	FDA BAM Online, 2001 (Chapter 18)

จากการตรวจวิเคราะห์ด้านจุลชีววิทยามะม่วงหลังอบแห้ง พบว่ามะม่วงอบแห้งมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกชนิด โดย *Escherichia coli* มีค่าน้อยกว่า 3 MPN/g ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด คือ 1.1×10^2 CFU/g และค่ายีสต์และโมล น้อยกว่า 10 CFU/g โดยผลรายงานการทดสอบดังแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 10 ผลการตรวจสารอาหารสำคัญมะม่วงหลังการอบแห้งเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อ้างอิง

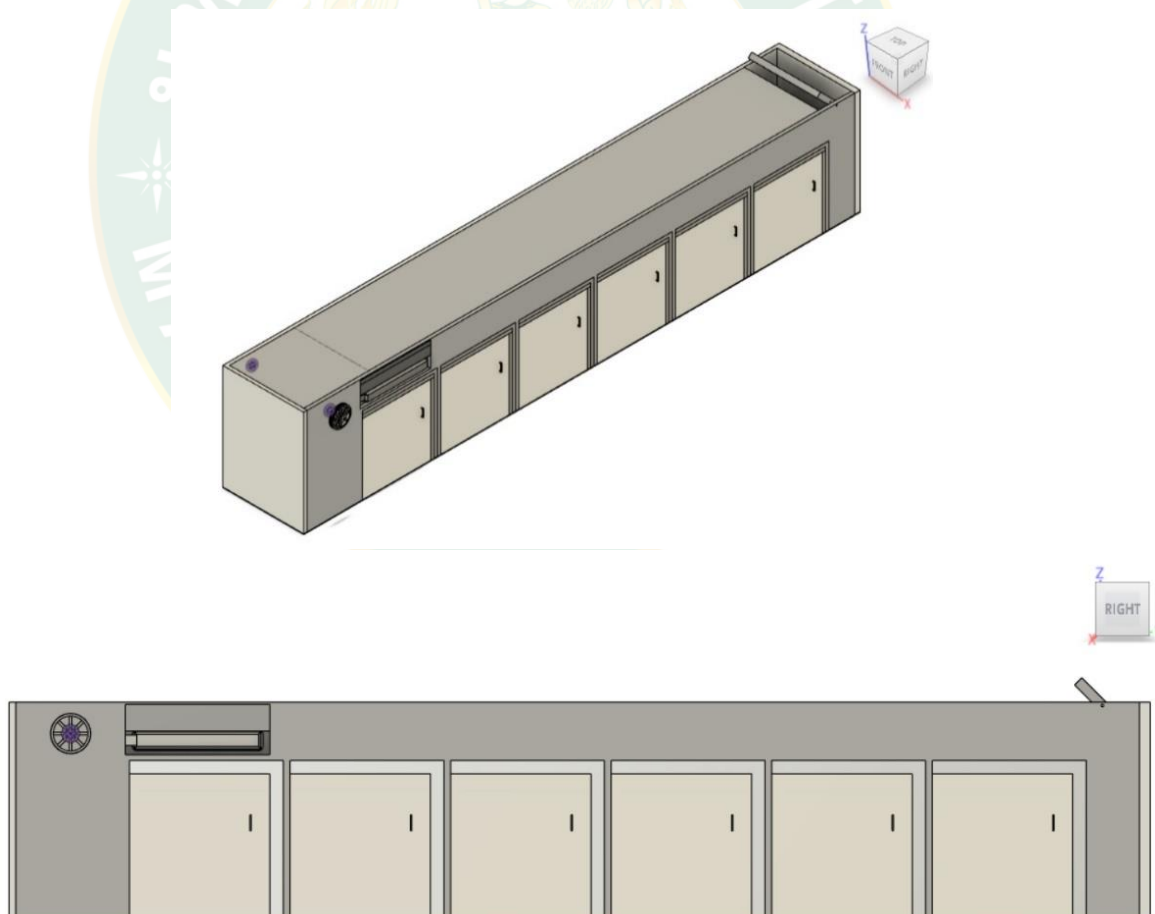
List	Reference product per 30 g.	Product after adjust drying method per 30 g.	Unit	Experimentation
Total energy	110	110	kcal.	Method of Analysis for Nutrition Labeling AOAC International; 1993,p8.
Energy from fat	-	0	kcal	Method of Analysis for Nutrition Labeling AOAC International; 1993,p8.
Total Fat.	0.5	0.5	g.	In-house methods TE-CH-014 based on AOAC (2019) 948.15
Saturated Fat.	0	0	g.	In-house methods TE-CH-177 based on AOAC (2007) celb-89
Cholesterol	0	0	mg.	In-house methods TE-CH-143 based on AOAC (2019) 994.10
Protein	1	>1	g.	In-house methods TE-CH-179 based on AOAC (2019) 918.10

Total carbohydrate	26	25	g.	Method of Analysis for Nutrition Labeling AOAC International; 1993,p106
Dietary fiber	0	2	g.	In-house methods TE-CH-076 based on AOAC (2019) 985.29
Sugars	17	21	g.	In-house methods TE-CH-164 based on AOAC (2019) 925.35(B)
Sodium	15	10	mg.	In-house methods TE-CH-134 based on AOAC (2019) 984.27
Vitamin A	-	7.31	µg.	Calculated from Beta carotene
Beta - carotene	-	43.85	µg.	KHON KAEN AGR.J. 42 SUPPL.1; (2014)
Vitamin B1	-	0.01	mg.	In-house methods TE-CH-057 based on AOAC (2019) 942.23
Vitamin B2	-	0.03	mg.	Journal Agricultural Food Chemistry (1984),32,p1326-1331
Calcium	21	59.65	g.	In-house methods TE-CH-134 based on AOAC (2019) 984.27
Iron	1	0.47	g.	In-house methods TE-CH-134 based on AOAC (2019) 984.27

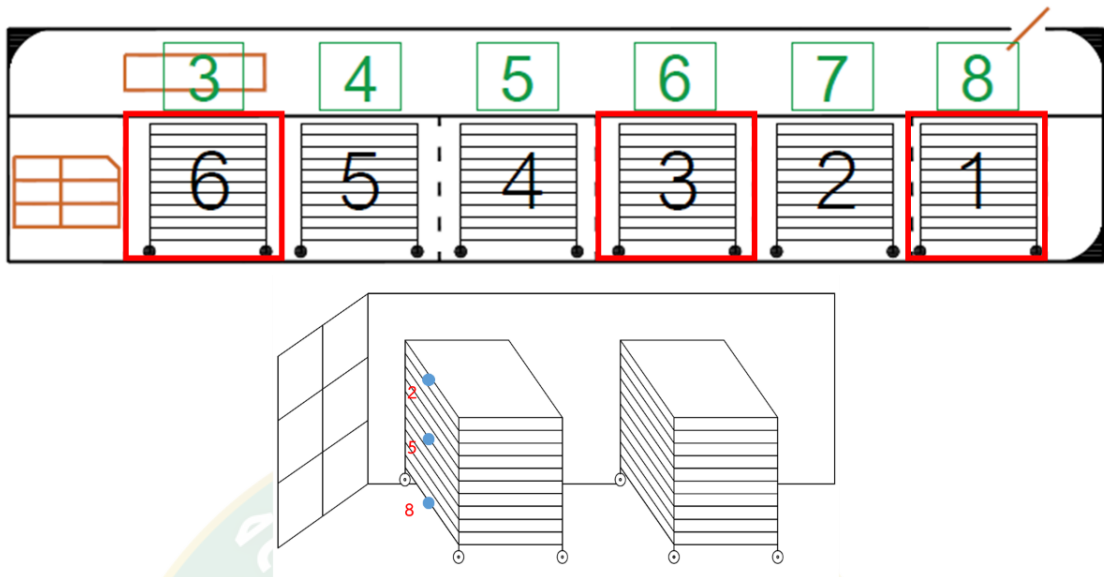
จากการตรวจตรวจสอบสารอาหารสำคัญมะม่วงหลังการอบแห้งและเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อ้างอิง พบว่าค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกับผลิตภัณฑ์อ้างอิง มีความใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์อ้างอิง และพบว่าบางค่ามีคุณค่าทางโภชนาการมากกว่ากับผลิตภัณฑ์อ้างอิง เช่น แคลเซียม มีค่ามากกว่าผลิตภัณฑ์อ้างอิงถึง 38.65 กรัม ผู้วิจัยจึงได้ข้อสรุปเกี่ยวกับการปรับปรุงการอบแห้งในกลยุทธ์ที่ 3 การอบแห้งแบบวนซ้ำ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งแบบอินฟราเรด-ลมร้อนได้จริง และยังมีคุณค่าทางโภชนาการหลงเหลืออยู่เป็นจำนวนมาก แต่วิธีนี้ไม่สามารถแก้ไขปัญหาในการใช้แรงงานคนเป็นจำนวนมากเพื่อขนย้ายรถเข็นเข้า-ออกตู้อบแห้งได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้แนวคิดที่ 2 คือ การปรับปรุงตู้อบแห้งเชิงแนวคิด โดยนำเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเข้ามาเป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหา ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4.4 ผลการแก้ไขปัญหโดยใช้การปรับปรุงตู้เชิงแนวคิด

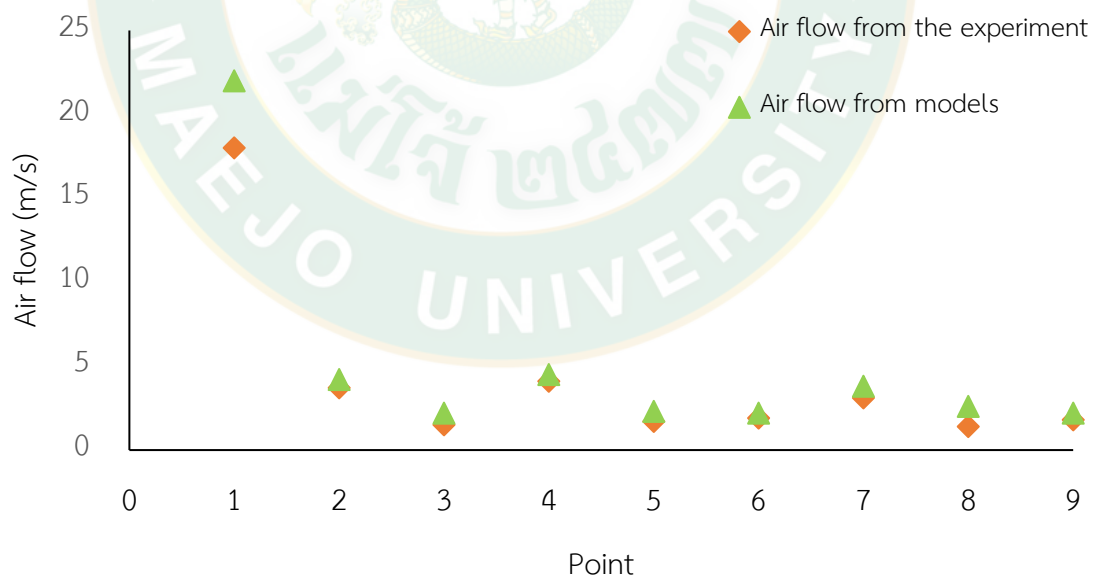
จากวิธีการแก้ไขปัญหในหัวข้อที่ 4.2 เนื่องจากการแก้ไขปัญหโดยการปรับกลยุทธ์การเข้า-ออกรถเข็นภายในตู้อบแห้ง จึงได้ผู้วิจัยจึงได้หาแนวทางในการแก้ไขปัญหโดยนำเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเข้ามาเป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญห และจำลองสถานการณ์เบื้องต้นเพื่อช่วยลดแรงงานคนในการเคลื่อนย้ายรถเข็น และช่วยลดค่าใช้จ่ายหากมีการปรับปรุงตู้อบแห้งจริง โดยก่อนการปรับปรุงได้มีการจำลองสร้างตู้อบแห้งให้ขนาดและสภาวะภายในตู้อบแห้งใกล้เคียงกับตู้อบแห้งจริงมากที่สุด ทำการตรวจวัดความเร็วลมแสดงดังภาพที่ 17 เพื่อสร้างแบบจำลองตู้อบแห้งในแบบเดิมโดยใช้โปรแกรม Autodesk fusion360 ดังแสดงในภาพที่ 25 และนำค่าความเร็วลมที่วัดได้ ทำการจำลองการกระจายของอากาศภายในตู้อบแห้งโดยใช้โปรแกรม Autodesk CFD 2018 ดังแสดงในภาพที่ 26 และวิธีการประมวลผลดังแสดงในภาคผนวก ก เพื่อตรวจสอบการกระจายความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอภายในตู้อบแห้ง ดูการกระจายความเร็วลมภายในตู้อบแห้ง



ภาพที่ 25 แบบจำลองตู้อบแห้งก่อนทำการปรับปรุง



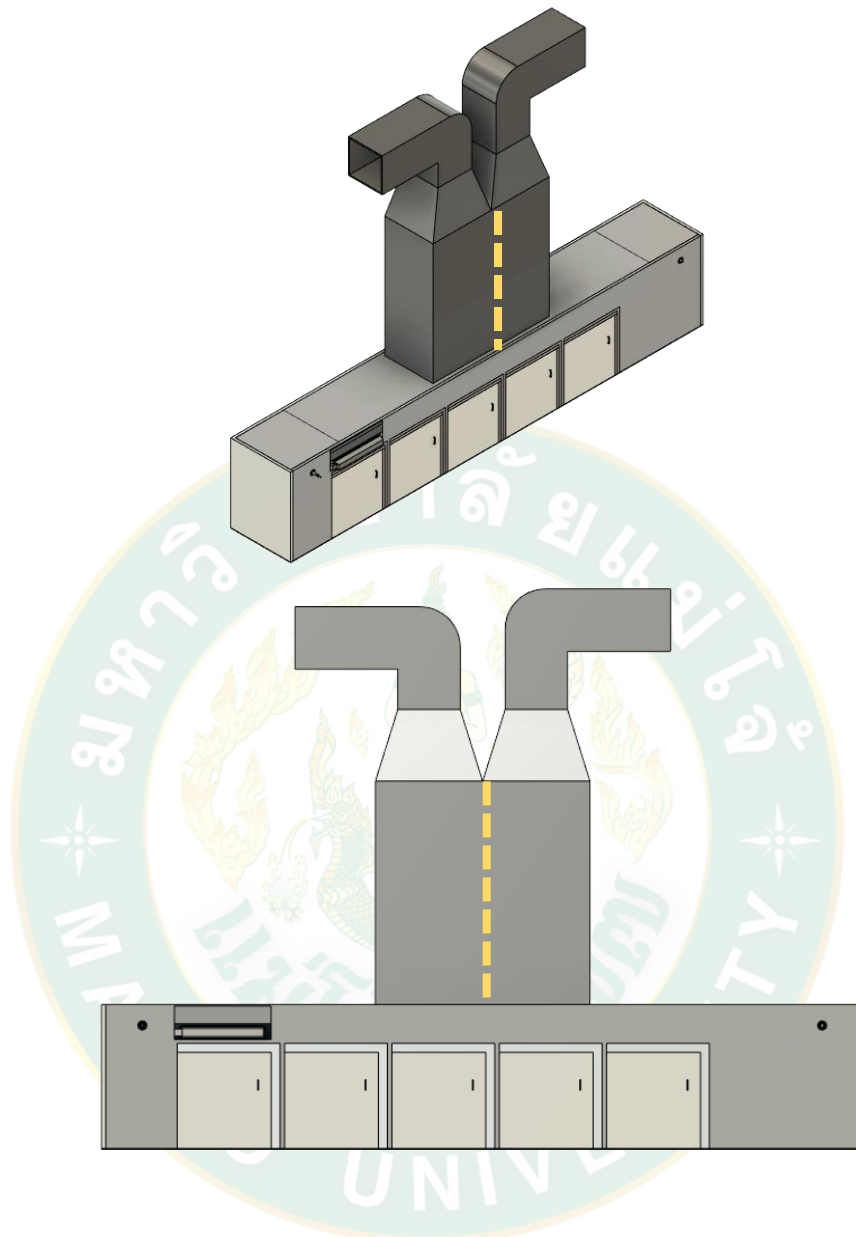
ภาพที่ 27 ตำแหน่งตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองการไหลรูปแบบการกระจายอากาศ
ในรูปแบบเดิม



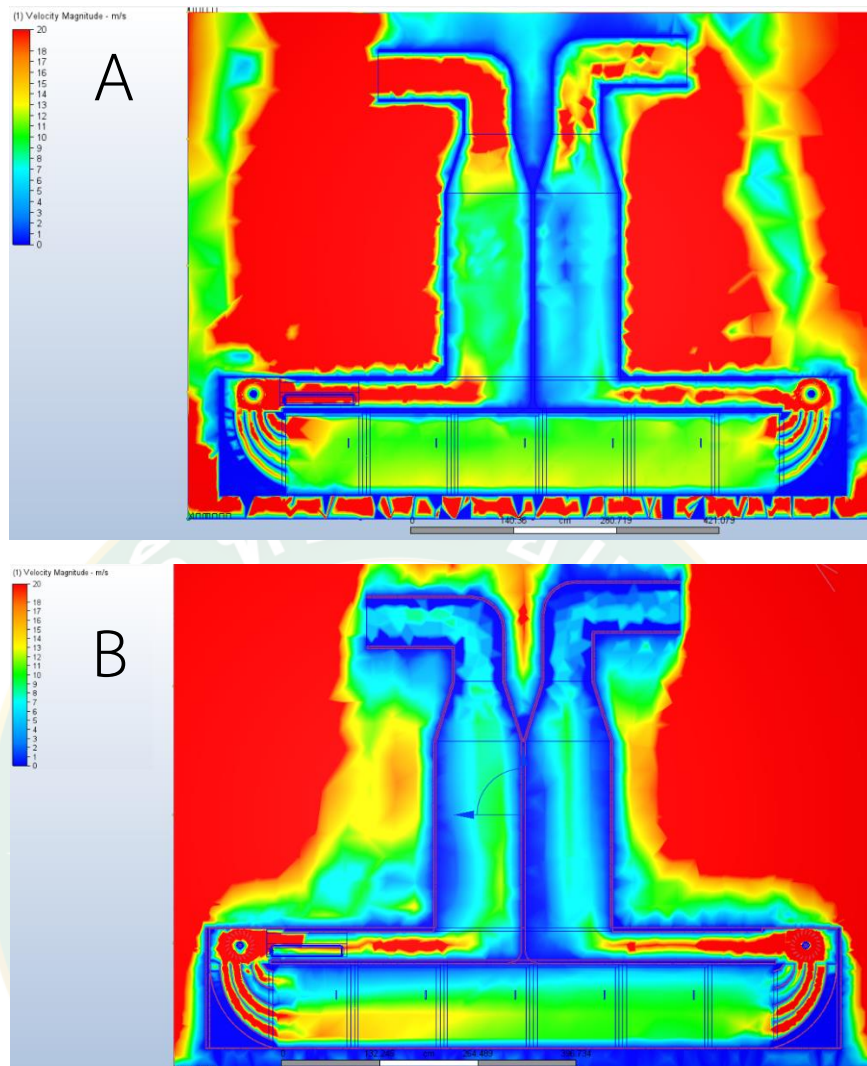
ภาพที่ 28 การเปรียบเทียบการกระจายอากาศระหว่างความเร็วอากาศจากการจำลอง
และผลจากการทดลอง

จากภาพ พบว่าความเร็วอากาศจากการทดลองในเส้นสีส้มพบว่ามีค่าต่ำกว่าความเร็วอากาศจากแบบจำลอง ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการกระจายอากาศอยู่ระหว่าง 4.0 ถึง 0.3 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.98 เปอร์เซ็นต์ โดยสาเหตุที่ค่าความเร็วอากาศจากแบบจำลองสูงกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง อาจเกิดจากลักษณะการไหลของอากาศของการทดลองและแบบจำลองมีความแตกต่างกัน เนื่องจากรูปร่างของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาไม่ซับซ้อนเท่าของจริงจึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ เมื่อได้ทำการตรวจสอบแบบจำลอง และพบสาเหตุของตู้อบแห้ง ผู้วิจัยจึงตั้งสมมติฐานว่ามีการกระจายความเร็วลมไม่สม่ำเสมอภายในตู้อบแห้ง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้คุณภาพที่ได้หลังจากการอบแห้งมีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ จึงได้นำแนวทางในการปรับปรุงตู้เชิงแนวคิดมาช่วยเป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหาเบื้องต้น เพื่อให้ได้วิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการปรับปรุงตู้อบแห้ง และลดแรงงานเพื่อใช้ในการย้ายรถเข็นเข้า-ออกตู้อบแห้งลง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาดังนี้

การเปลี่ยนเทคนิคการอบแห้งจากแบบเดิม ให้เป็นการอบแห้งแบบสลับทิศทางลม (Switching airflow drying) ศุภศักดิ์ (2554) ได้กล่าวไว้ว่า การอบแห้งด้วยวิธีนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้งได้รับความร้อนทั้งส่วนบนและส่วนล่างทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปได้อย่างทั่วถึง ผู้วิจัยจึงทำการสร้างแบบจำลองตู้อบแห้งที่ทำการปรับปรุงแล้วด้วยโปรแกรม Autodesk Fusion กำหนดรายละเอียดในการคำนวณ และแบบจำลองทางกายภาพ และใช้โปรแกรม Autodesk CFD 2018 เป็นเครื่องมือช่วยในการสร้างแบบจำลองการกระจายอากาศภายในตู้อบแห้ง จากการทดลองพบว่าวิธีในแนวคิดนี้เป็นวิธีที่สามารถอธิบายการกระจายความเร็วลมภายในตู้อบแห้งได้ดีที่สุด โดยการปรับปรุงวิธีนี้จะทำการสร้างปล่องทางเข้าและออกของลมร้อนให้อยู่ตรงกลาง ซึ่งจากเดิมทางเข้าและออกของลมร้อนใช้ปล่องเดียวกัน และอยู่ในช่วงท้ายเครื่อง โดยสร้างปล่องทั้งสองติดกันและทำการติดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนในระหว่างการเข้าตู้อบแห้ง และเพิ่มพัดลมอีกหนึ่งชุดเพื่อให้มีพัดลมทั้งด้านซ้าย-ขวา จากการสร้างแบบจำลองตู้อบแห้งแบบใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 29 หลังจากการสร้างจึงทำการกระจายความเร็วอากาศของตู้อบแห้งแบบใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 29 แบบจำลองตู้อบแห้งหลังการปรับปรุง



ภาพที่ 30 รูปแบบการสร้างแบบจำลองการกระจายอากาศหลังจากการปรับปรุง
(A) ทิศทางการไหลจากขวา-ซ้าย (B) ทิศทางการไหลจากซ้าย-ขวา

จากภาพที่ 30 แสดงให้เห็นการกระจายอากาศภายในตู้อบแห้งหลังจากการปรับปรุงทิศทางการไหลอากาศแล้ว โดยค่าสีแดงซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าความเร็วลมที่มากที่สุด และสีน้ำเงินแสดงให้เห็นถึงค่าความเร็วลมที่น้อยที่สุด จากแบบจำลองรูป A แสดงทิศทางการไหลของลมเข้าทางด้านขวาและออกทางด้านซ้าย ส่วนรูป B แสดงทิศทางการไหลของลมเข้าทางด้านซ้ายและออกทางด้านขวาจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเปลี่ยนเทคนิคการอบแห้งให้เป็นแบบสลับทิศทางการไหล พบว่าการกระจายความเร็วลมภายในตู้อบแห้งดีขึ้น ทำให้ช่วยในการดึงอากาศขึ้นออกจากตู้อบแห้งได้ดี อีกทั้งช่วยลดแรงงานคนเพื่อเข็นรถเข็นเข้าและออกตู้อบแห้งทุกชั่วโมง

4.5 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนโดยใช้หลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

การวิเคราะห์ต้นทุนโดยใช้หลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมในการคำนวณตามแนวคิดการออกแบบการปรับปรุงตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรดลมร้อน ด้วยวิธีการแก้ไข ปัญหาเชิงแนวคิด โดยใช้โปรแกรม Autodesk Fusion เป็นเครื่องมือในการออกแบบเครื่อง รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 11 และสามารถประมาณราคาตู้อบแห้งแบบใหม่หลังการปรับปรุงได้ ประมาณ

ตารางที่ 11 รายละเอียดและต้นทุนการปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบสไลด์ลมร้อนได้สองทิศทาง

รายละเอียด	คำอธิบาย	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย	ราคา
1. ชุดโบลเวอร์	- กำลังวัตต์ 3 HP 2 P - ความเร็วรอบ 2,950 RPM - แรงดันไฟฟ้า 380 V. 3 เฟส - ปริมาณอากาศ 1,455 CFM	1	เครื่อง	44,833.00	44,833.00
2. แผ่นสแตนเลส	- เกรด SUS304 - ความหนาขนาด 3 mm.	15	แผ่น	4,340.00	65,100.00
3. ฉนวนกันความร้อน	- Food grade	20	ฟีน	750.00	15,000.00
4. ชุดควบคุมทิศทางลม	- เซนเซอร์สลับทิศทางลม - ชุดตรวจจับอุณหภูมิ และ ความเร็วลมเพื่อสลับทิศทาง	1	ชุด	85,000.00	85,000.00
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด					207,833.00
บริการหลังการขายและการบริหาร 30% ของหน่วยงานทั้งหมด					62,349.90
ราคารวม					270,182.90
ราคาในการปรับปรุงเครื่องอบแห้ง					280,000.00

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการพัฒนากลยุทธ์และการวางแผนใช้งานตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแบบอุโมงค์สลับทิศทางการไหลของอากาศในฟรอนต์-ลัมบ์ร้อนสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ทำการแบ่งการพัฒนาปรับปรุงเครื่องอบแห้งเป็น 2 แบบคือ การแก้ไขปัญหาคือการใช้การปรับปรุงตู้เชิงกลยุทธ์ และการแก้ไขปัญหาคือการใช้การปรับปรุงตู้เชิงแนวคิด

1. จากการศึกษาการปรับปรุงตู้อบแห้งเชิงกลยุทธ์ พบว่าการปรับปรุงโดยการอบแห้งแบบวนซ้ำให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งดีที่สุด เป็นการอบแห้งโดยการนำมะม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมด 16 ชั่วโมง ทำการคัดส่วนที่แห้งและไม่แห้งนำมาอบแบบวนซ้ำใหม่อีกครั้ง พบว่าสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และค่าความสิ้นเปลืองแก๊สได้ แต่อย่างไรก็ตาม การอบแห้งวิธีนี้ยังต้องใช้แรงงานคนเป็นจำนวนมากในการย้ายรถเข็นเข้า-ออกเพื่อคัดมะม่วงที่แห้งและไม่แห้งเพื่อนำมาอบแบบวนซ้ำ ผู้วิจัยจึงได้หาแนวทางโดยเป็นการแก้ไขปัญหาคือเชิงแนวคิด ออกแบบปรับปรุงเครื่องอบแห้งเพื่อลดจำนวนแรงงานลง โดยใช้โปรแกรม Autodesk CFD 2018 เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงเครื่องต่อไปในอนาคต

2. จากการศึกษาการปรับปรุงตู้อบแห้งตู้เชิงแนวคิด พบว่าการปรับปรุงโดยการเพิ่มพัดลมเพื่อและทำการสลับทิศทางการลม เป็นวิธีที่สามารถอธิบายการกระจายความเร็วลมภายในตู้อบแห้งได้ดีที่สุด เนื่องจาก วิธีนี้สร้างปล่องทางเข้าและออกของลมร้อนให้อยู่ตรงกลาง ซึ่งจากเดิมทางเข้าและออกของลมร้อนใช้ปล่องเดียวกัน และอยู่ในช่วงท้ายเครื่อง ทั้งสองปล่องติดกันเพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนในระหว่างการเข้าตู้อบแห้ง และเพิ่มพัดลมอีกหนึ่งชุดเพื่อให้มีพัดลมทั้งด้านซ้าย-ขวา จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเปลี่ยนเทคนิคการอบแห้งให้เป็นแบบสลับทิศทางการกระจายความเร็วลมภายในตู้อบแห้งดีขึ้น ทำให้ช่วยในการดึงอากาศขึ้นออกจากตู้อบแห้งได้ดี อีกทั้งช่วยลดแรงงานคนเพื่อเข็นรถเข็นเข้าและออกตู้อบแห้งทุกชั่วโมง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลการศึกษากลยุทธ์ที่ใช้ในการปรับปรุงการอบแห้งควรนำมาประยุกต์ใช้กับผลไม้ชนิดอื่นได้
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการอบแห้งแบบสลับทิศทางการลม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ระยะเวลาในการสลับทิศทาง

บรรณานุกรม

- กรรมนิการ์ เบญจรัฐพงศ์. 2558. การประยุกต์ใช้ซิกซ์ ซิกม่าในกระบวนการผลิตไว้ออต. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- กอบพัชรกุล เป็นบุญ, รัตนา อัดตปัญญา และสายลม สัมพันธ์เวชโสภา. 2550. การทำแห้งลำไยแผ่นโดยใช้เตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเตาอบลมร้อน. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร.**, 309 - 312(35).
- กาญจนา สุทธิกุล. 2548. โอกาสทองของตลาดมะม่วงไทย. **เคหการเกษตร.**, 29(11), 77-96.
- เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต และอัญชิสา ยี่สุนแซม. 2554. การศึกษาการวางมุมเหมาะสมของหัวเตาเผาที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาปูนขาวโดยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม. **วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น.**, 16(3), 225-239.
- ชญาณิช รัตนมงคล, สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ, ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร, พิสุทธิ กลิ่นขจร และหยาดฝน ทนงการกิจ. 2561. **จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด.** ใน การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ครั้งที่ 17, ลำปางรีสอร์ท อำเภอมือง จังหวัดลำปาง.
- ชาลีตา บรมพิชัยชาติกุล. 2555. เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน: การนำมาใช้เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.**, 269 - 283(35).
- ณัฐพล กระจ่าง และณรงค์ อังกิมบัว. 2559. จลนพลศาสตร์และแบบจำลองการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด. **วิทยาศาสตร์บูรพา.**, 21(3), 239 - 248.
- ฉันทบูรณ์ ถาวรธรรม. และเชาวฤทธิ์ วันเสาร์. 2559. การศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านแถวทรงกระบอกตันในอุโมงค์ลมความเร็วลมต่ำ ด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. **วารสารวิชาการ มทร.สุวรรณภูมิ.**, 4(1), 32-45.
- ธวัชรัตน์ สัมฤทธิ์. 2558. **การลดความสูญเสียเปล่าในกระบวนการผลิตอาหารแช่แข็งของบริษัท ลานนาเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- นิตยา รัตนาปนนท์ และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2552. **Phase diagram/แผนภาพเฟส.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.foodnetworksolution.com>. (1 มกราคม 2562).
- ปราโมทย์ เตชะอำไพ. 2553. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.

- ปรีดา ปรากฎมาก. 2562. แบบจำลอง CFD-DEM สำหรับพลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็งในระบบพลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่อง. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา**, 30(3), 73-89.
- พัชรี ทับทิมศรี, รัศมีจันทร์ เกงขุนทด และแดนชัย เครื่องเงิน. 2559. **การผลิตกล้วยน้ำว้าอบด้วยอินฟราเรดร่วมลมร้อน**. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 3, มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร.
- พิรุฬรัชย์ ไทยสมัคร. 2557. **แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งพริกไทยดำด้วยเทคนิคการสลับลมร้อน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2560. มะม่วงมหาชนก ผลไม้ต้านมะเร็ง สรรพคุณเด่นหลายอย่าง. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.health.kapook.com>. (1 มกราคม 2562)
- รื่นฤดี โยธาคุณ, วรณกร นามนุ และสุพรรณิ อังปัญสัตวงศ์. 2560. การลดความสูญเสีย 7 ลักษณะ ในโรงงานอุตสาหกรรม. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://sc2.kku.ac.th/stat/statweb/images/Eventpic/60/Seminar/01_15_7waste.pdf. (20 มกราคม 2563)
- ศุภศักดิ์ ลิ้มปิติ. 2544. **การพัฒนาเครื่องอบแห้งลำไยที่เลือกด้วยระบบสลับหมุนเวียนลมร้อน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ และจาทุงศ์ วาฤทธิ. 2556. **จลนพลศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุไปรูลินาด้วยวิธีการแผ่รังสีอินฟราเรดร่วมกับการพาความร้อน**. ใน การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ครั้งที่ 12, โรงแรมอิมพีเรียลโกลเด้นไทรแองเกิ้ล รีสอร์ท อำเภอเชียงแสน จังหวัดเชียงราย.
- สมชาติ โสภณธณฤทธิ. 2537. **การอบแห้งอาหารและเมล็ดพืช**. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาติ โสภณธณฤทธิ. 2540. **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท**. กรุงเทพมหานคร.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2558. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน: ผักและผลไม้แห้ง**. มผช., 136/2558
- เหมือนหมาย อภินทนาพงศ์. 2550. การอบแห้ง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา www.slideshare.net. (5 มกราคม 2562)
- อนุสรานาดี, ยุทธนา ภูริระวณิชกุล และสุภวรรณ ภูริระวณิชกุล. 2012. **จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน**. **วิทยาศาสตร์บูรพา**, 17(2), 86 - 94.
- อาทิตยา พัฒนิบูลย์ และอมรชัย อารณวิธานพ. 2557. เทคโนโลยีการอบแห้ง. **Technology Promotion**, 41(234), 64-67.

- อีลีเย่ สนิโซ, สะอูดี ฟารามี่ และรัชดาภรณ์ ฮานาฟี. 2558. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นความ
 สิ้นเปลืองพลังงาน และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากด้วยพลังงานความ
 ร้อนร่วม. **วิทยาศาสตร์บูรพา**, 17(1), 142 - 149.
- อุบล ชินวัง, ทินน์ พรหมโชติ, สาธิต พสุวิทย์กุล และเปลี่ยมสติ จุฑาทิพย์. 2561. อิทธิพลของความร้อน
 และอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อคุณภาพและระยะเวลาการสุกของมะม่วงพันธุ์มหาชนก. **วารสาร
 เกษตรพระจอมเกล้า**, 36(2), 85-97.
- เอกรงค์ สุขจิต, วรากรณ์รัตน์ จันทสาโร และเอกชัย จันทสาโร. 2547. การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหล
 ของอากาศ อุณหภูมิ และความชื้นภายในห้องสะอาด. **สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่ง
 ประเทศไทย**, 9, 45-52.
- Aremu Ademola. Kabiru, Adedokun Adetayo Joshua and Abdulganiy Olayinka Raji. 2013.
 Effect of slice thickness and temperature on the drying kinetics of mango
 (*Mangifera Indica*). **International Journal of Recent Research and Applied
 Studies**, 15(1), 41-50.
- Elamin O.M. Akoy. 2014. Effect of Drying Temperature on Some Quality Attributes of
 Mango Slices. **Innovative Space of Scientific Research Journals**, 4(2), 91-99
- Kar, A. and Gupta, DK. 2003. Air drying of osmosed button mushrooms. **Journal of food
 science and technology**, 40(1), 23-27.
- Gardner, W. H. 1996. **Food acidulants**. Allied chemical crop, New York.
- Giovanni Cortella. 2002. CFD-aided retail cabinets design. **Computers and Electronics
 in Agriculture**, 34, 43-66.
- Guy Takamte, Marcel Edoun, Louis Monkam, Alexis Kuitche and Kamga Richard. 2013.
 Numerical Simulation of Convective Drying of Mangoes (*mangifera Indica* L.)
 Under Variable Thermal Conditions. **International Journal of Thermal
 Technologies**, 3(2), 48-52.
- Onwude Daniel I., Hashim Norhashila, Abdan Khalina, Janius Rimfiel and Chen
 Guangnan. 2019. The effectiveness of combined infrared and hot-air drying
 strategies for sweet potato. **Journal of Food Engineering**, 241, 75-87.
- Sado Kamdem, Sylvain L., Kuate Kamga, Blaise Essia Ngang, Jean J. and Etoa Francois-
 Xavier. 2015. Effect of Processing Parameters on the Stability of Nonpasteurized

Mango Slice Preserves. **Journal of Food Processing and Preservation**, 39(6), 2249-2258.

Villa-Corrales, L., Flores-Prieto, J. J., Xamán-Villaseñor, J. P. & García-Hernández, E. 2010. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango. **Journal of Food Engineering**, 98(2), 198-206.

Yao Wei, Wang Jian and Liao Guangxuan. 2006. Grid-Independent Issue in Numerical Heat Transfer. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://arxiv.org/ftp/math-ph/papers/0609/0609066.pdf>. (25 กุมภาพันธ์ 2563)





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศภายในตู้อบแห้งด้วยโปรแกรม Autodesk CFD 2018

โปรแกรม Autodesk CFD 2018 เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ใช้ในงานด้านออกแบบและการจำลองทางด้านวิศวกรรม สามารถใช้แสดงผลปรากฏการณ์ทางด้านของไหล ความร้อน ไฟฟ้า และทางกล

ในการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนก่อนการประมวลผล เป็นขั้นตอนการสร้างแบบจำลองก่อนทำการประมวลผล โดยใช้โปรแกรม Autodesk Fusion 360 สร้างแบบจำลองทางกายภาพของตู้อบแห้งและกำหนดรายละเอียดในการคำนวณ

2. ขั้นตอนการประมวลผลและขั้นตอนหลังการประมวลผล ใช้โปรแกรม Autodesk CFD 2019 ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เลือกวิธีในการคำนวณ และทำการประมวลผลรวมถึงแสดงผลหลังการประมวลผล ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ จะแสดงตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนก่อนการประมวลผล

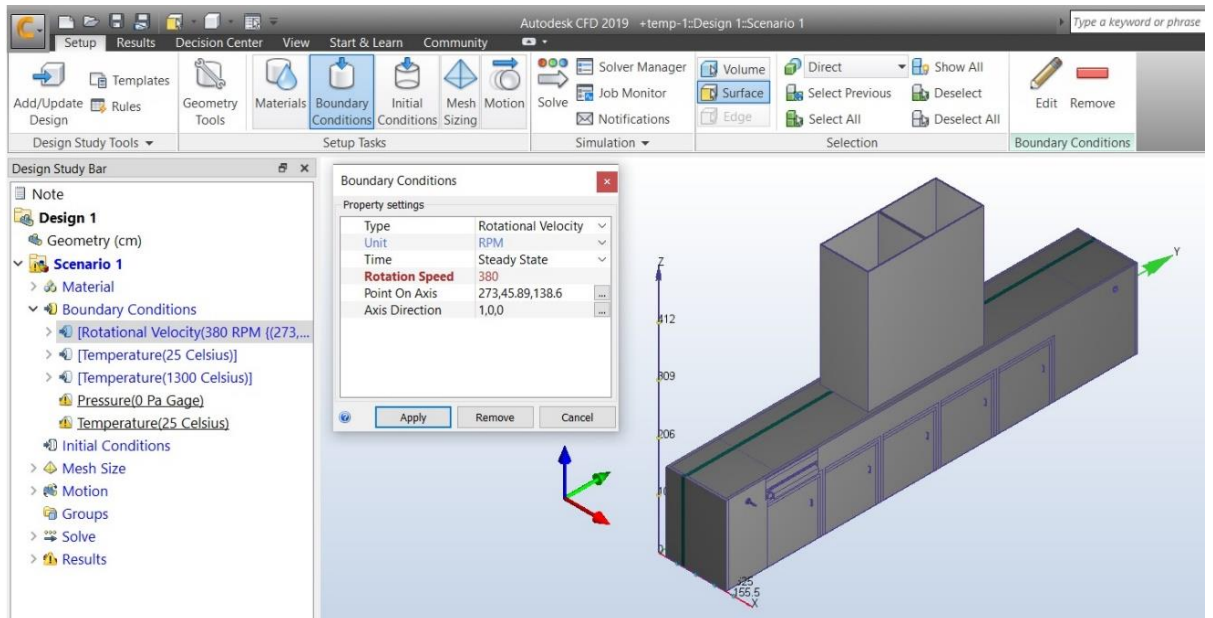
การสร้างแบบจำลองทางกายภาพของตู้อบแห้ง สร้างโดยโปรแกรม Autodesk Fusion 360 ซึ่งสร้างตามขนาดจริงได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 31 สร้างแบบจำลองตู้อบแห้งที่ทำการปรับปรุงแล้วด้วยโปรแกรม Autodesk Fusion กำหนดรายละเอียดในการคำนวณ และแบบจำลองทางกายภาพ

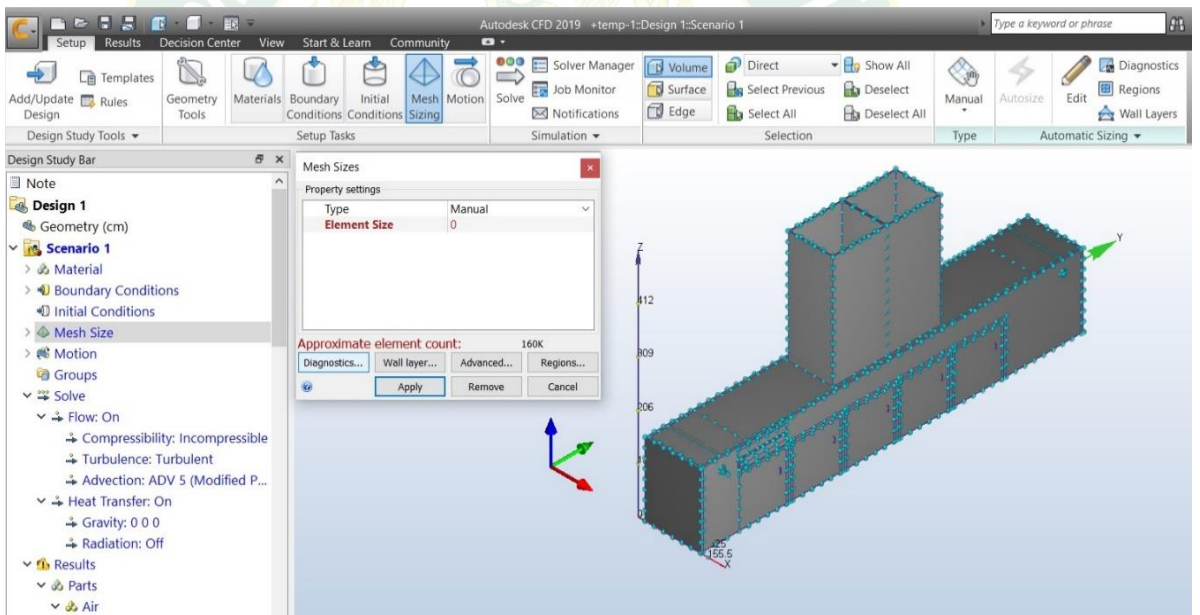
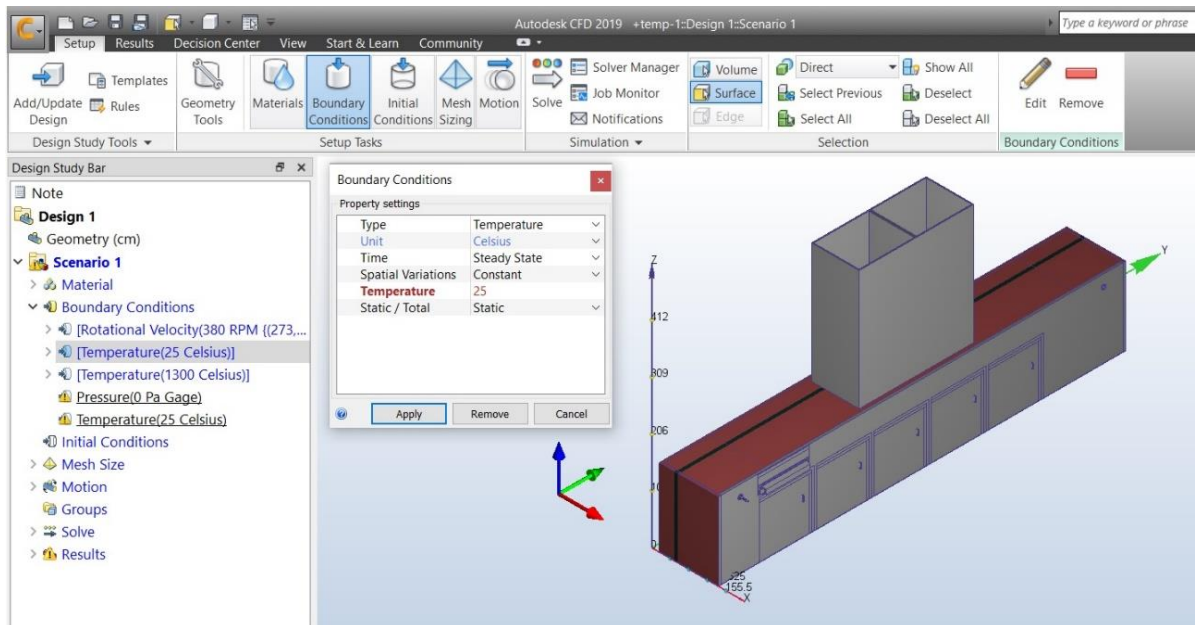
ขั้นตอนการประมวลผล

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และเลือกวิธีการคำนวณ



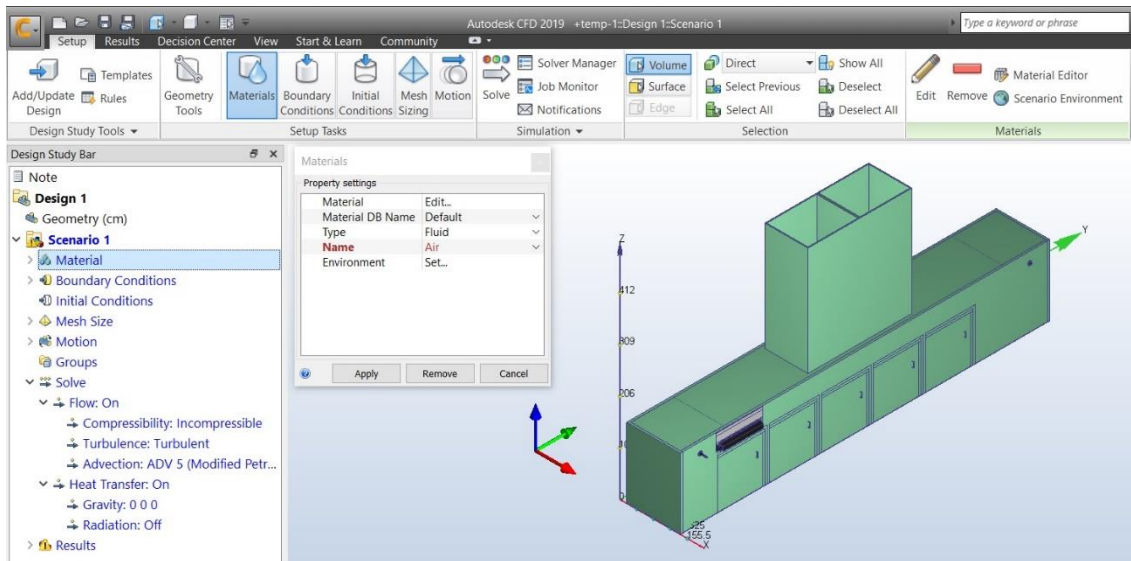
ภาพที่ 32 การกำหนดเงื่อนไขของชนิดของคุณสมบัติ

ทำการตั้งค่าคุณสมบัติและกำหนดเงื่อนไขของชนิดคุณสมบัติใช้แบบความเร็วในการหมุน (Rotational Velocity) ไม่มีการแปรผันตามเวลา ความเร็วรอบที่ใช้ในการหมุนคือ 380 RPM



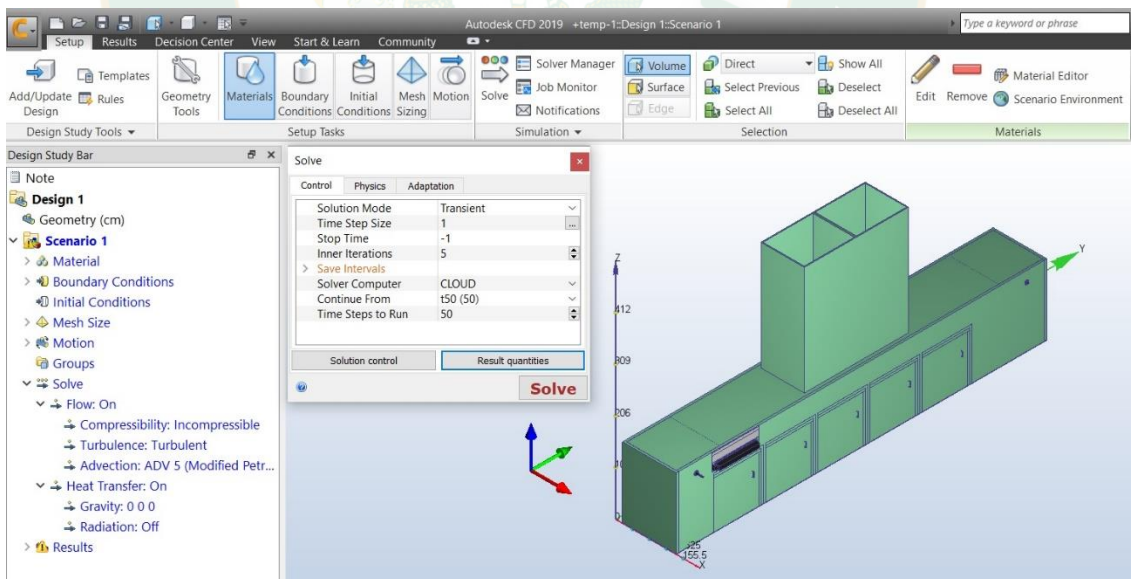
ภาพที่ 33 การกำหนดสภาวะภายในตู้อบแห้ง

ทำการตั้งค่าคุณสมบัติ ทำการทดลองในสภาวะที่คงที่ (Steady state condition) มีตัวแปรที่ควบคุมคืออุณหภูมิภายในคือ 25 องศาเซลเซียส



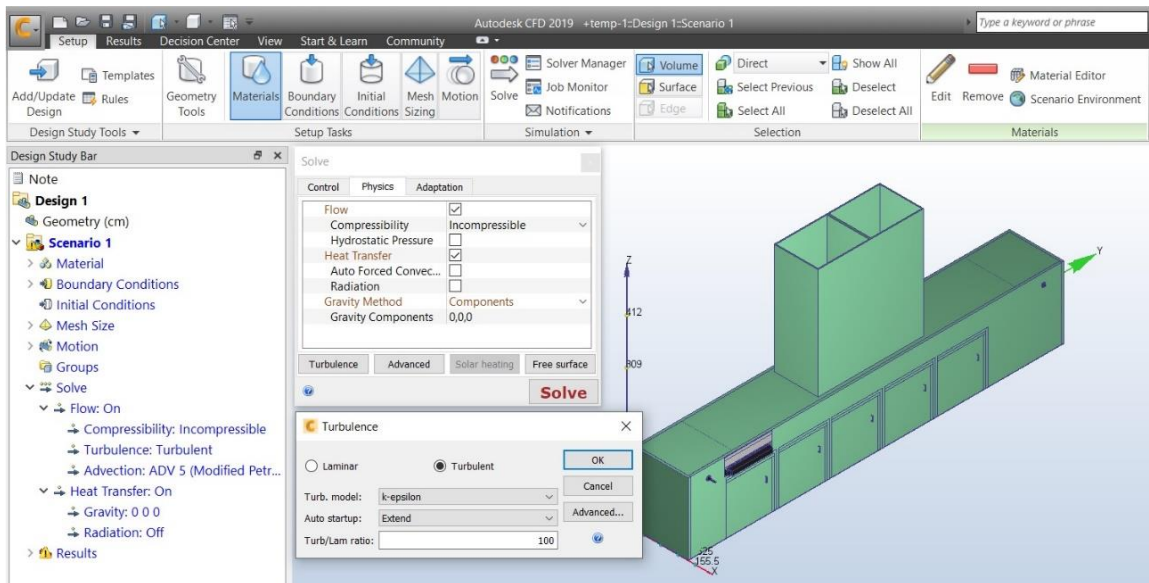
ภาพที่ 34 การกำหนดวัสดุที่ใช้ให้เสมือนวัสดุจริง

ทำการตั้งค่าคุณสมบัติ กำหนดเงื่อนไขของชนิดคุณสมบัติ กำหนดค่าวัสดุที่ใช้ให้เหมือนกับวัสดุจริง



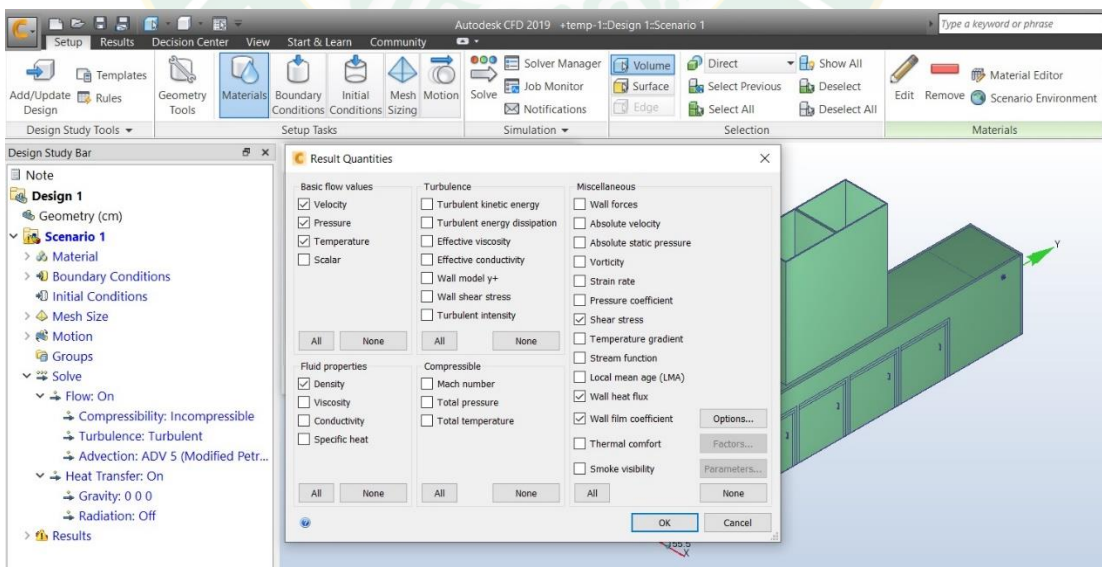
ภาพที่ 35 การกำหนดค่าในการ solve ด้านตัวแปรควบคุม

ตั้งค่าวิธีการ solve ด้านตัวควบคุม กำหนดให้ควบคุมในสถานะที่ไม่คงตัว มีการแปรผันตามช่วงเวลาคือ -1



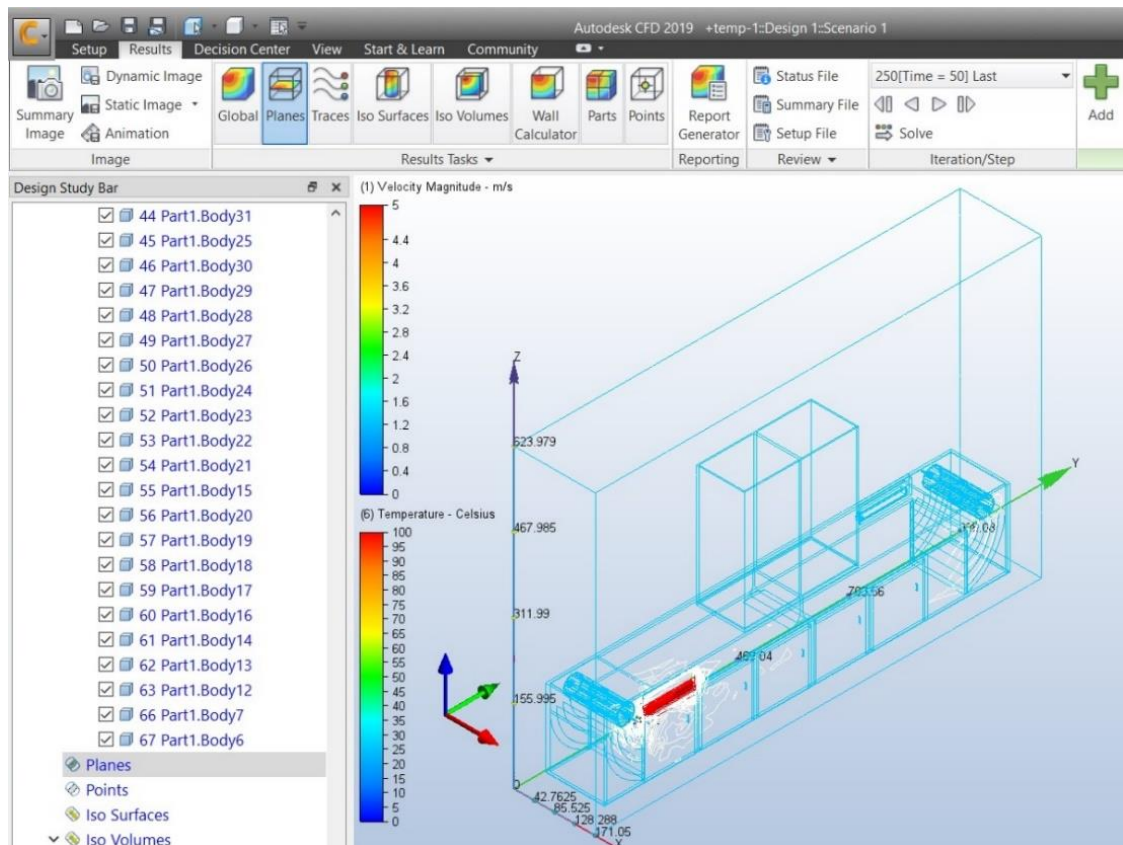
ภาพที่ 36 การกำหนดค่าในการ solve ด้านทางกายภาพ

ตั้งค่าวิธีการ solve ด้านทางกายภาพ มีการถ่ายเทพลังงานความร้อน เป็นแบบการพาความร้อนแบบบังคับอัตโนมัติ (Auto force convective) ใช้ส่วนประกอบเป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงโน้มถ่วง การไหลของอากาศภายในตู้อบแห้งเป็นแบบปั่นป่วน และเป็นการไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible flow)

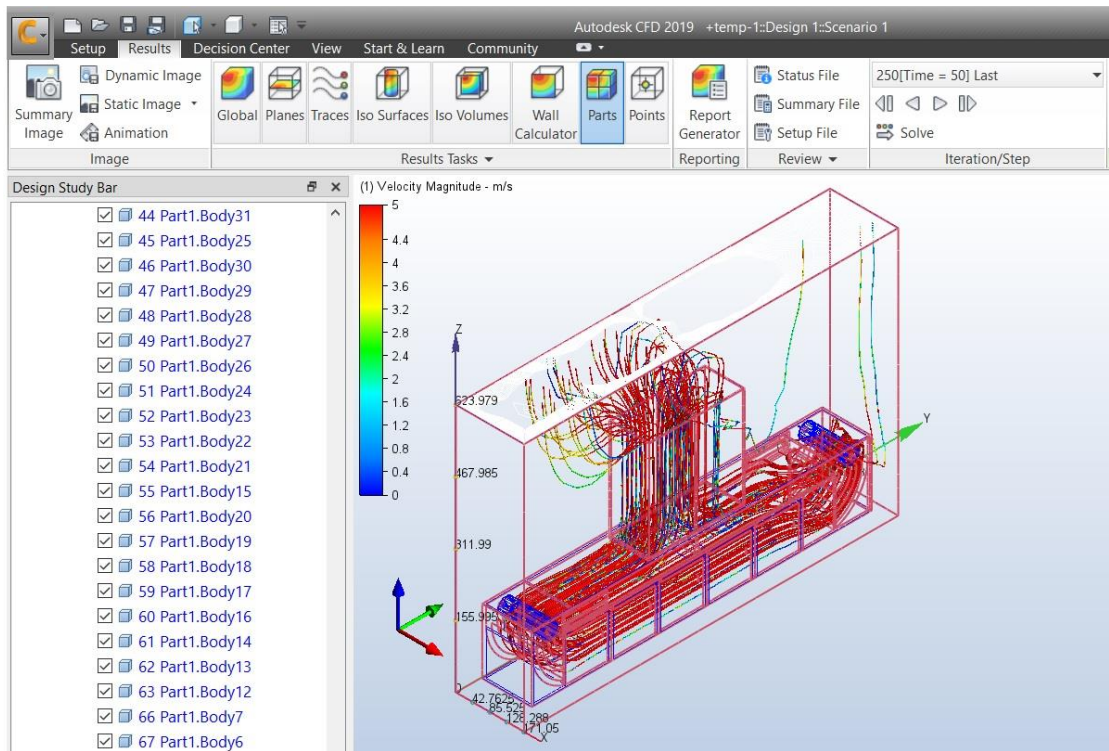


ภาพที่ 37 การกำหนดผลการวิเคราะห์

แสดงการกำหนดการวิเคราะห์ผลที่ออกมา ค่าการอัตราการไหลพื้นฐาน แสดงค่าความเร็วของอากาศ ความดัน และอุณหภูมิ, ด้านคุณสมบัติของแข็ง แสดงค่าความหนาแน่น และด้านอื่น ๆ แสดงค่า ความเค้นเฉือน (Shear stress), ฟลักซ์ความร้อน (Wall heat flux) และ สัมประสิทธิ์ความร้อน



ภาพที่ 38 แบบจำลองอุณหภูมิและความเร็วลม หลังจากทำการกำหนดค่า



ภาพที่ 39 แบบจำลองของความเร็วลมภายในตู้อบแห้ง

แสดงแบบจำลองของความเร็วลมภายในตู้อบแห้ง หลังจากทำการกำหนดค่า พบว่าความเร็วลมภายในตู้อบแห้งที่ทำการปรับปรุงแล้วมีการกระจายด้วยดีขึ้น และทั่วบริเวณภายในตู้อบแห้ง



ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ด้านจุลชีววิทยาและผลการวิเคราะห์สารอาหารสำคัญในมะม่วงอบแห้ง



บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
Central Laboratory (Thailand) Co., Ltd.
 สาขาเชียงใหม่ : 164/86 หมู่ที่ 3 ต.ดอนแก้ว อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่ 50180
 Chiangmai Branch : 164/86 Moo 3 Donkaew, Maeim, Chiangmai 50180 Thailand
 Tel : (66) 0 5389 6131, (66) 0 5389 6133 Fax : (66) 0 5389 6052, (66) 0 5389 6131 ต่อ 705
 http://www.centralabthai.com



Accreditation No. 1079/48

Central Lab
 One-Stop & Fast Services

รายงานผลการทดสอบ

วันที่ออกรายงาน 18 กุมภาพันธ์ 2564
 เลขที่รายงาน TRCM64/04705
 หน้า 01/01

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (นางสาวพิไลณี เสือสืบพันธุ์)
 (ข้อมูลจากลูกค้า) 63 ม. 4 ต. หนองหาร อ. สันทราย จ. เชียงใหม่ 50290
 รายละเอียดตัวอย่าง มะม่วงอบแห้ง
 (ข้อมูลจากลูกค้า)
 รหัสตัวอย่าง CM64/02157-001
 ลักษณะและสภาพตัวอย่าง ประเภทตัวอย่าง : มะม่วงอบแห้ง
 ภาชนะบรรจุ : ถุงพลาสติก (ถุงซิปล็อค), จำนวน : 3 ถุง, น้ำหนัก/ปริมาตรรวม : 1.04 กิโลกรัม
 อุณหภูมิขณะรับ : อุณหภูมิห้อง, สภาพตัวอย่างปกติ

วันที่รับตัวอย่าง 11 กุมภาพันธ์ 2564
 วันที่ทดสอบ 11 กุมภาพันธ์ 2564 - 18 กุมภาพันธ์ 2564

ผลการทดสอบ

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	หน่วย	LOD	วิธีทดสอบอ้างอิง
<i>Escherichia coli</i>	< 3.0	< 3	MPN/g	-	FDA BAM Online, 2002 ; update 2017 (Chapter 4)
Total Bacteria Count	1.1×10^2	$< 1 \times 10^6$	CFU/g	-	FDA BAM Online, 2001 (Chapter 3)
Yeast and Molds	< 10	< 1,000	CFU/g	-	FDA BAM Online, 2001 (Chapter 18)

หมายเหตุ : ค่ามาตรฐาน : ประกาศกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ เรื่อง เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่ 3/2560 ข้อ 2.2.2

~End of Report~



รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่ได้รับเท่านั้น

รายงานผลการทดสอบต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ ยกเว้นทำทั้งฉบับ

FM-QP-24-01-001-R05(18/01/64)P1/1-CM



ภาพที่ 40 ผลการวิเคราะห์ด้านจุลชีววิทยาในมะม่วงอบแห้ง



บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
 Central Laboratory (Thailand) Co., Ltd.
 สาขาสมาทรสาคร : 23/13 หมู่ 9 ต.โคกขาม อ.เมือง จ.สมุทรสาคร 74000 ประเทศไทย
 Samutsakhon Branch : 23/13 Moo 9, Khokkham, Muang, Samutsakhon 74000 Thailand
 Tel : (66) 0 3441 0881-83 Fax : (66) 0 3441 0884
 http://www.centralabthai.com



Accreditation No. 1078/48

Central Lab
 One Stop & Fast Services

รายงานผลการทดสอบ

วันที่ออกรายงาน 03 มีนาคม 2564
 เลขที่รายงาน TRSS64/05195
 หน้า 01/03
 ชื่อและที่อยู่ลูกค้า มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (นางสาวพิสิณี เสือสืบพันธุ์)
 (ข้อมูลจากลูกค้า) 63 ม.4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290
 รายละเอียดตัวอย่าง มะม่วงอบแห้ง
 (ข้อมูลจากลูกค้า) Net Weight : 100 g ; Serving Size : 30 g.
 รหัสตัวอย่าง SS64/01810-001
 ลักษณะและสภาพตัวอย่าง ภาชนะบรรจุ : ถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ ปิดสนิท, จำนวน : 3 ถุง, น้ำหนัก/ปริมาตร : รวม 840 กรัม.
 อุณหภูมิ : อุณหภูมิห้อง, สภาพตัวอย่างปกติ
 วันที่รับตัวอย่าง 15 กุมภาพันธ์ 2564
 วันที่ทดสอบ 15 กุมภาพันธ์ 2564 - 03 มีนาคม 2564

ผลการทดสอบ

รายการทดสอบ	ต่อ 100 กรัม	ต่อหนึ่งหน่วยบริโภค	%RDI	วิธีทดสอบอ้างอิง
พลังงานทั้งหมด(กิโลแคลอรี)	352.05	110	-	Method of Analysis for Nutrition Labeling AOAC International; 1993.p8
พลังงานจากไขมัน(กิโลแคลอรี)	15.21	0	-	Method of Analysis for Nutrition Labeling AOAC International; 1993.p8
ไขมันทั้งหมด (ก.) *	1.69	0.5	1	In-house method TE-CH-014 based on AOAC (2019) 948.15
ไขมันอิ่มตัว (ก.)	0.68	0	0	In-house method TE-CH-177 based on AOCS (2007) Cclb-89
โคเลสเตอรอล (มก.)	น้อยกว่า 6.00	0	0	In-house method TE-CH-143 based on AOAC (2019) 994.10
โปรตีน (ก.) (%N x 6.25) *	2.26	น้อยกว่า 1	-	In-house method TE-CH-179 based on AOAC (2019) 981.10
คาร์โบไฮเดรต (ก.)	81.95	25	8	Method of Analysis for Nutrition Labeling AOAC International; 1993.p106
ใยอาหาร (ก.)	5.29	2	8	In-house method TE-CH-076 based on AOAC (2019) 985.29
น้ำตาล (ก.)	70.86	21	-	In-house method TE-CH-164 based on AOAC (2019) 925.35(B)
โซเดียม (มก.)	37.61	10	0	In-house method TE-CH-134 based on AOAC (2019), 984.27
วิตามินเอ (มก.) *	24.36	(7.31)	0	Calculated from Beta carotene
เบต้า-แคโรทีน (มก.) *	146.16	(43.85)	-	KHON KAEN AGR.J.42 SUPPL.1.(2014)
วิตามินบี 1 (มก.)	0.047	(0.01)	0	In-house method TE-CH-057 in connection with AOAC (2019) 942.23
วิตามินบี 2 (มก.)	0.084	(0.03)	0	Journal Agriculture Food Chemistry (1984),32,p1326-1331
แคลเซียม (มก.)	198.82	(59.65)	8	In-house method TE-CH-134 based on AOAC (2019), 984.27
เหล็ก (มก.)	1.58	(0.47)	4	In-house method TE-CH-134 based on AOAC (2019), 984.27
เถ้า (ก.) *	1.41	-	-	In-house method TE-CH-178 based on AOAC (2019) 938.08
ความชื้น (ก.) *	12.69	-	-	AOAC (2019) 925.45(A)

หมายเหตุ: * รายการทดสอบนอกขอบข่ายการรับรองของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่ได้รับเท่านั้น

รายงานผลการทดสอบต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ ยกเว้นที่แจ้งฉบับ
 FM-QP-24-01-020-R03(15/09/63)P1/3-SS



ภาพที่ 41 ผลการวิเคราะห์สารอาหารสำคัญในมะม่วงอบแห้ง



บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
Central Laboratory (Thailand) Co.,Ltd.
สาขาสมาทรสาคร : 23/13 หมู่ 9 ต.โคกขาม อ.เมือง จ.สมุทรสาคร 74000 ประเทศไทย
Samutsakhon Branch : 23/13 Moo 9, Khokkham, Muang, Samutsakhon 74000 Thailand
Tel : (66) 0 3441 0881-83 Fax : (66) 0 3441 0884
http://www.centralabthai.com



Accreditation No. 1078/48

Central Lab
One Stop & Fast Services

รายงานผลการทดสอบ

วันที่ออกรายงาน 03 มีนาคม 2564

เลขที่รายงาน TRSS64/05195

หน้า 02/03

ข้อมูลโภชนาการ			
หนึ่งหน่วยบริโภค : 30 กรัม			
จำนวนหน่วยบริโภคต่อถุง : ประมาณ 3.5			
คุณค่าทางโภชนาการต่อหนึ่งหน่วยบริโภค			
พลังงานทั้งหมด 110 กิโลแคลอรี (พลังงานจากไขมัน 0 กิโลแคลอรี)			
ร้อยละของปริมาณที่แนะนำต่อวัน *			
ไขมันทั้งหมด	0.5 ก.		1%
ไขมันอิ่มตัว	0 ก.		0%
โคเลสเตอรอล	0 มก.		0%
โปรตีน	น้อยกว่า 1 ก.		
คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด	25 ก.		8%
ใยอาหาร	2 ก.		8%
น้ำตาล	21 ก.		
โซเดียม	10 มก.		0%
ร้อยละของปริมาณที่แนะนำต่อวัน *			
วิตามินเอ	0%	วิตามินบี 1	0%
วิตามินบี 2	0%	แคลเซียม	8%
เหล็ก	4%		
* ร้อยละของปริมาณสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคต่อวันสำหรับคนไทยอายุตั้งแต่ 6 ปีขึ้นไป (Thai RDI) โดยคิดจากความต้องการพลังงานวันละ 2,000 กิโลแคลอรี			
ความต้องการพลังงานของแต่ละบุคคลแตกต่างกัน ผู้ที่ต้องการพลังงานวันละ 2,000 กิโลแคลอรี ควรได้รับสารอาหารต่าง ๆ ดังนี้			
ไขมันทั้งหมด	น้อยกว่า	65	ก.
ไขมันอิ่มตัว	น้อยกว่า	20	ก.
โคเลสเตอรอล	น้อยกว่า	300	มก.
คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด		300	ก.
ใยอาหาร		25	ก.
โซเดียม	น้อยกว่า	2000	มก.
พลังงาน(กิโลแคลอรี) ต่อกรัม : ไขมัน = 9; โปรตีน = 4; คาร์โบไฮเดรต = 4			

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่ได้รับเท่านั้น

รายงานผลการทดสอบต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ ยกเว้นทำทั้งฉบับ
FM-QP-24-01-020-R03(15/09/63)P2/3-SS



ภาพที่ 42 ฉลากการวิเคราะห์สารอาหารสำคัญในมะม่วงอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยบริโภค



บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
 Central Laboratory (Thailand) Co.,Ltd.
 สาขาสุมทรสาคร : 23/13 หมู่ 9 ต.โคกคราม อ.เมือง จ.สมุทรสาคร 74000 ประเทศไทย
 Samutsakhon Branch : 23/13 Moo 9, Khokkham, Muang, Samutsakhon 74000 Thailand
 Tel : (66) 0 3441 0861-83 Fax : (66) 0 3441 0884
 http://www.centralabthai.com



Accreditation No. 107848

Central Lab
 One Stop & Fast Services

รายงานผลการทดสอบ

วันที่ออกรายงาน 03 มีนาคม 2564
 เลขที่รายงาน TRSS64/05195
 หน้า 03/03

คุณค่าทางโภชนาการต่อ 1 ถูง
 ควรแบ่งกิน ประมาณ 3.5 ครั้ง

พลังงาน	น้ำตาล	ไขมัน	โซเดียม
380	74	2	35
กิโลแคลอรี	กรัม	กรัม	มิลลิกรัม
*19%	*114%	*3%	*2%

* คิดเป็นร้อยละของปริมาณสูงสุดที่บริโภคได้ต่อวัน

~End of Report~


 (หญิงสาวสุวิมล ศรีสุทนต์)
 ผู้มีอำนาจลงนาม
 บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด สาขาสุมทรสาคร

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่ได้รับเท่านั้น

รายงานผลการทดสอบต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ ยกเว้นทำทั้งฉบับ

FM-QP-24-01-020-R03(15/09/63)P3/3-SS



ภาพที่ 43 ฉลากการวิเคราะห์สารอาหารสำคัญในมะม่วงอบแห้งต่อหนึ่งถูง



ภาคผนวก ค
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ประชุมวิชาการเรื่อง
การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล
 ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 19
 ระหว่างวันที่ 12-13 มีนาคม 2563
 ณ เจ้าหลาว คานาน่า รีสอร์ท
 จังหวัดจันทบุรี

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า	
บทความที่ 29	การวางแผนใช้งานและพัฒนาระบบปรุงด้วยแก๊สพลาสมาที่เกษตรแบบต่อเนื่อง ชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน สำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน DEVELOPMENT OF PLANNING FOR AGRICULTURAL PRODUCTS WITH GAS INFRARED-HOT AIR TUNNEL DRYER INWARD COMMUNITY ENTERPRISE:	211
บทความที่ 30	สมรรถนะและประสิทธิภาพของด้วยตู้อบแห้งลมร้อนขนาดเล็ก PERFORMANCE AND EFFICIENCY OF A SMALL HOT AIR DRYER	218
บทความที่ 31	การศึกษาสมรรถนะของตู้แช่แข็งพาณิชย์อุณหภูมิปานกลาง PERFORMANCE STUDY OF MEDIUM TEMPERATURE COMERCIAL REFRIGERATOR	222
บทความที่ 32	การศึกษาเชิงทดลองการกระจายความร้อนและการซึมผ่านของน้ำร้อนในวัสดุพรุนที่มี สองชั้น (เปรียบเทียบการจัดเรียงแบบ F-C กับแบบ F-bed) EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSPORT AND HOT WATER INFILTRATION IN DOUBLE LAYERS POROUS MEDIA (COMPARE F-C ARRANGMENT WITH F-BED)	226
บทความที่ 33	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการให้ความร้อนอย่างง่ายสำหรับเตาหุงต้มเหนียว ภายในครัวเรือนบนพื้นฐานวงจรคลาสอีเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ THE SIMPLE HEATING EFFICIENCY ANALYSIS FOR DOMESTIC INDUCTION COOKER BASED ON CLASS-E RESONANT INVERTER	230
บทความที่ 34	การทดสอบสมรรถนะเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีพีโรแบบเปลือกท้อ THERMAL PERFORMANCE TEST OF SHELL-TYPE GASIFIER	236
บทความที่ 35	การศึกษารูปแบบการไหลที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน แบบปิดสองสภาวะ A STUDY OF FLOW PATTERNS ON HEAT TRANSFER OF TWO-PHASE CLOSED THERMOSYPHON (TPTC)	242
บทความที่ 36	การศึกษากลไกการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ทำความร้อนแบบรังสีอินฟราเรดไกล INVESTIGATING THE HEAT TRANSFER MECHANISM OF FAR INFRARED RADIATION HEATER	247
บทความที่ 37	เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชต้นฤดูต่ำที่ควบคุมแสงกับข้อมูล สภาพแวดล้อมเฉพาะปลูกโดยใช้อินเทอร์เน็ตออฟติง OPTIMAL TECHNOLOGY FOR GROWING LOW-COST CROPS CONTROL AND COLLECT FARMING ENVIRONMENT WITH IOT	257
บทความที่ 38	การศึกษาสมรรถนะความร้อนเชิงตัวเลขและการผลิตเอนโทรปีในท่อที่มี ครีบนวงแหวนเอียง NUMERICAL STUDY ON THERMAL PERFORMANCE AND ENTROPY GENERATION IN A TUBE WITH INCLINED RING RIBS	263
บทความที่ 39	การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ระหว่างระยะพิชของแนวเส้นความร้อน A STUDY OF TEMPERATURE DISTRIBUTION BETWEEN THE PITCH AREA IN HEATING LINE	271



การวางแผนใช้งานและพัฒนาปรับปรุงตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์
ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน สำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน
DEVELOPMENT OF PLANNING FOR AGRICULTURAL PRODUCTS WITH
GAS INFRARED-HOT AIR TUNNEL DRYER INWARD COMMUNITY ENTERPRISE

พิสิณี เสือสืบพันธุ์

สมเกียรติ จตุรงค์คำเลิศ*

ชนวิวัฒน์ นันทน์วิจิตร

จตุรภัทร วาฤทธิ์

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

* Corresponding Author: yaidragon@mju.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวางแผนการใช้งานและพัฒนาปรับปรุงตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อนของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน โดยใช้กรณีศึกษาเป็นผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือ แนวทางที่ 1 เป็นการวางแผนการใช้งาน และหาแนวทางการจัดการเพื่อปรับปรุงกระบวนการอบแห้งมะม่วงให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนแนวทางที่ 2 เป็นการแก้ไขปัญหาการกระจายลมที่ไม่สม่ำเสมอในตู้อบแห้งเชิงแนวคิด โดยการใส่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ร่วมกับเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computation Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือช่วยในการแก้ไขปัญหา โดยการเก็บความเร็วลมเพื่อทำนายการกระจายความเร็วลมภายในตู้อบแห้ง จากผลการศึกษพบว่าแนวทางการศึกษาที่ 1 การวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามระยะเวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์ร่วมกับการบริหารจัดการด้วยการนำผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่แห้งมาอบซ้ำ ช่วยให้การอบแห้งผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและประสิทธิภาพดีขึ้น ส่วนแนวทางการศึกษาที่ 2 เมื่อทำการเก็บข้อมูลการกระจายลมระหว่างการอบแห้ง ร่วมกับการใช้ CFD เข้ามาช่วยแก้ปัญหา พบว่าเทคนิคนี้สามารถช่วยอธิบายการกระจายลมภายในตู้อบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอได้เป็นอย่างดี อีกทั้งสามารถจำลองการกระจายลมในตู้อบแห้งได้เมื่อมีการปรับปรุง ซึ่งทำให้สามารถนำไปประกอบการตัดสินใจการพัฒนาปรับปรุงเครื่องในอนาคตได้

คำสำคัญ : การวางแผนใช้งาน, การอบแห้งแบบอุโมงค์สลับทิศทางก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน, มะม่วง

Abstract

This research study was aimed to study the planning and development of the drying of the agricultural products with gas infrared - hot air tunnel dryer of the community enterprise group. This work was presented with the dried mango as the product case study. The study was divided into two approaches. First, planning and finding a solution to improve the drying management to achieve the effectiveness of drying mango. Second, finding the conceptual solution to improve the problem of hot air distribution in the dryer by using the Computation Fluid Dynamic (CFD) program as a tool, by collecting the air distribution data in the dryer during drying. The result of the first approach was found that the management of drying duration and looping the moist product to repeat the drying can improve the product quality and increase drying efficiency. For the second approach, the result was found the CFD can use as an effective tool for solving the problem and predicting the irregular air distribution in the dryer. Moreover, this approach could be simulated the air distribution of modify dryer which was applied as an option for further improvement.

Keyword: Development of planning, Gas infrared - hot air tunnel dryer, Mango

1. บทนำ

มะม่วง (*Mangifera indica* Linn.) มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดีย มีการปลูกในหลายประเทศที่มีอากาศร้อนเป็นผลไม้พื้นบ้านของไทย เป็นที่นิยมปลูกกันมากและมีการปลูกหลากหลายสายพันธุ์ มีคุณประโยชน์และมีสรรพคุณทางยาหลายอย่าง จัดเป็นผลไม้เขตร้อนที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย สามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศผลผลิตมะม่วงที่ได้ส่วนใหญ่ใช้บริโภคภายในประเทศ ส่วนการส่งออกมีปริมาณถึง 67.60 พันตัน และมูลค่ารวม 2,642.16 ล้านบาท (มะม่วงสดและผลิตภัณฑ์อบแห้ง) โดยในปีพ.ศ. 2556 ส่งออกในรูปแบบมะม่วงสดประมาณ 33.04 พันตัน คิดเป็นมูลค่า 28.20 ล้านดอลลาร์สหรัฐ [1] และการส่งออกแบบแปรรูป สามารถส่งออกในรูปแบบผลไม้สดแช่เย็นได้ประมาณ 81,000 ตัน คิดเป็นมูลค่า 4.4 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ส่งออกในรูปแบบมะม่วงกระป๋องประมาณ 95,000 ตัน มูลค่า 7.5 ล้านดอลลาร์สหรัฐและส่งออกในรูปแบบการแปรรูปอื่น ๆ เช่น น้ำมะม่วงคั้น น้ำมะม่วงเข้มข้น ฟรุ๊ตสลัด และมะม่วงอบแห้ง เป็นต้น แต่เนื่องจากผลไม้สดนี้ไม่สามารถเก็บอยู่ในรูปของผลไม้สดได้นาน จึงมีการนำเทคนิคการอบแห้งเข้ามาเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา และพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์มะม่วงได้หลากหลายมากขึ้น

การอบแห้ง เป็นวิธีการถนอมอาหาร (Food preservation) ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่วัสดุที่ใช้ออบจะอยู่ในสถานะของแข็งที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ น้ำหรือความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุอาจไม่ต่อระเหยที่จุดเดือด แต่ใช้หลักการการใช้อากาศร้อนไหลผ่านวัสดุ เพื่อพาความชื้นออกไป วัสดุจะแห้งได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุนั้นด้วย นอกจากนี้ การอบแห้งเป็นการลดปริมาณน้ำในอาหาร เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทุกชนิดที่เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย (Microbial spoilage) ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือชะลอปฏิกิริยาต่าง ๆ ทั้งทางเคมีและทางชีวเคมี [2] โดยวิธีการอบแห้งที่สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับวัตถุดิบเดิมมากที่สุดคือ การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry) เนื่องจากการอบแห้งวิธีนี้สามารถรักษาสภาพองค์ประกอบสำคัญของอาหารที่ถูกทำลายได้ง่ายด้วยความร้อน เช่น วิตามิน กลิ่น สี วัชสารรูปร่างและเนื้อสัมผัสของอาหารให้อยู่ใกล้เคียงกับของเดิม และอีกวิธีคือการอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum dry) เป็นวิธีที่ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์มีจุดเดือดต่ำลง ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงกับวัตถุดิบเดิม [3] แต่ข้อเสียทั้งสองวิธีนี้คือไม่เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็กเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง และใช้เวลานาน [4]

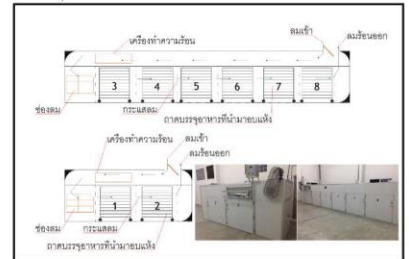
การอบแห้งแบบการใช้ก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน (Gas infrared-hot air drying) มีข้อดีคือ เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เช่น กลุ่มวิสาหกิจชุมชน สหกรณ์การเกษตร เป็นต้น เนื่องจากลงทุนต่ำ การดูแลง่าย และค่าใช้จ่ายบำรุงซ่อมแซมไม่สูงมาก อย่างไรก็ตามการอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน

ยังพบปัญหาด้านประสิทธิภาพการอบแห้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวางแผนการใช้งานและพัฒนาปรับปรุงตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อนสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน โดยใช้ผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งเป็นกรณีศึกษา เพื่อให้การใช้งานตู้อบแห้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการจัดการผลิตผล และต้นทุนการผลิต

2. อุปกรณ์และการวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

ในการศึกษาใช้อุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย ได้แก่ ตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำมาช้าง ที่ติดตั้งตามต้นแบบที่กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตรออกแบบ [5] มีขนาด 1.2 × 10 × 1.65 เมตร (ก×ย×ส) ตัวเครื่องอบแห้งประกอบด้วย ชุดควบคุมอุณหภูมิการอบแห้ง (Temperature control) ชุดพัดลมกระจายอากาศ และชุดสร้างพลังงานความร้อน (หลอดอินฟราเรดและก๊าซ LPG) แสดงดังรูปที่ 1 ในส่วนของการเก็บข้อมูลความชื้นอุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ ตู้อบแห้งลมร้อนยี่ห้อ Memmert รุ่น UNB100 สำหรับหาความชื้นเริ่มต้นของมะม่วงโดยวิธีมาตรฐาน AOAC และเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ GRAM รุ่น FC - 5000



รูปที่ 1 ตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน

2.2 วิธีการทดลอง

การเตรียมมะม่วงอบแห้ง เริ่มจากตัดมะม่วงลูกพันธุ์มหาชนก ที่มีขนาด สิบเปลือก ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน และปริมาณของแข็งที่ละลายได้อยู่ในช่วง 16-17 °Brix [6] ล้างสะอาดและปอกเปลือก หั่นมะม่วงตามแนวยาว โดยกำหนดให้มีความหนา 1 - 1.5 เซนติเมตร แช่สารละลายกรดซิตริก ($C_6H_8O_7$) ความเข้มข้น 2% w/w, กรดแอสคอร์บิก ($C_6H_8O_6$) ความเข้มข้น 1% w/w และเกลือแคลเซียม (KCl) ความเข้มข้น 1% w/w เป็นเวลา 5 นาที เพื่อยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลในเนื้อมะม่วง [7] จากนั้นเรียงชั้นมะม่วงบนตะแกรงสแตนเลส

และจัดวางตะแกรงตามชั้นของรถเข็นเพื่อเตรียมเข้าสู่ตู้อบแห้ง โดย ตะแกรง 1 ชั้น สามารถจัดวางชิ้นมะม่วงได้ปริมาณ 5 กิโลกรัม เมื่อจัดวางตะแกรงเต็มชั้นรถเข็น ปริมาณน้ำหนักรวมต่อหนึ่งรถเข็นเท่ากับ 50 กิโลกรัม (รถเข็นบรรจุตะแกรง 10 ชั้น) และเมื่อทำการอบแห้งเต็มความจุของตู้อบแห้ง จะใช้ปริมาณชิ้นมะม่วงทั้งหมดต่อรอบการอบแห้งเท่ากับ 400 กิโลกรัม (ตู้อบแห้ง 8 ตู้ × ปริมาณน้ำหนักชิ้นมะม่วงต่อรถเข็น 50 กิโลกรัม) นำเข้าสู่ตู้อบแห้งตามสภาวะอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด

3. การวิเคราะห์แนวทางการวางแผนการผลิต

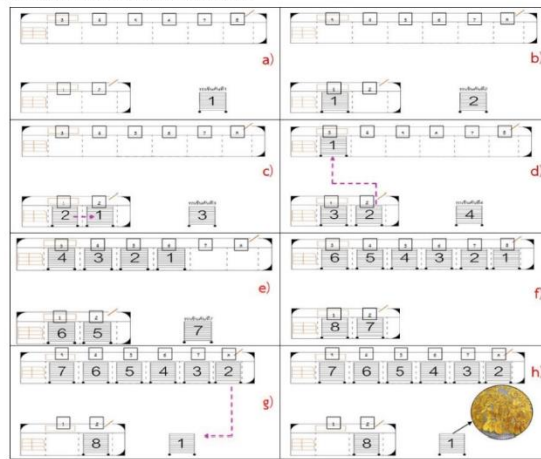
3.1 การศึกษากระบวนการใช้งานตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์คล้ายก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน

การศึกษาตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำน้ำซัง จังหวัดลำพูน เดิมทีตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน ถูกออกแบบให้มีกำหนดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งเป็น 2 ช่วงได้แก่ ตู้อบแห้งอุณหภูมิสูง อุณหภูมิอยู่ในช่วง 70-75°C (High temperature) จำนวน 2 ตู้ โดยระบุเลขในกล่องสี่เหลี่ยมด้านหน้าตู้อบแห้งเป็นหมายเลข 1 และ 2 และตู้อบแห้งอุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 60-70°C (Low temperature) จำนวน 6 ตู้ และระบุเลขในกล่องสี่เหลี่ยมด้านหน้าตู้อบแห้งเป็นหมายเลข 3 ถึง 8 แสดงดังรูปที่ 1

หลักการทำงานของตู้อบแห้ง มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับการอบลมร้อนทั่วไปแต่มีการใช้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม (LPG) เป็นตัวให้ความร้อนร่วมกับหลอดอินฟราเรด เพื่อให้หลอดอินฟราเรดแผ่รังสี

ความร้อนให้กับวัสดุอบแห้ง โดยมีกล่องควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้งผ่านกล่องควบคุมการจุดเชื้อเพลิงแบบอัตโนมัติ ทำงานผ่านตัวควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) ซึ่งสามารถสั่งให้โซลินอยด์วาล์วตัดต่อการจุดเชื้อเพลิง เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามที่กำหนด

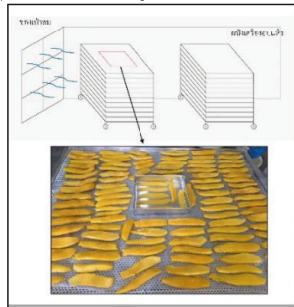
สำหรับรูปแบบการจัดการอบแห้งแบบเดิมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองการไหลของรถเข็นดังแสดงในรูปที่ 2 (a - b) หลังจากเตรียมวัตถุดิบ นำรถเข็นคันแรกเข้าสู่ตู้อบแห้ง ตู้ที่ 1 และทำการอบแห้งในแต่ละตู้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจาก 1 ชั่วโมงผ่านไป นำรถเข็นคันที่ 2 ที่เตรียมวัตถุดิบแล้วเสร็จ เข้าสู่ตู้อบแห้ง โดยรถเข็นคันที่ 1 จะถูกย้ายไปยังตู้อบแห้งห้องที่ 2 และรถเข็นคันที่ 2 จะเข้าสู่ตู้อบแห้งตู้ที่ 1 แทน ดังแสดงในรูปที่ 2c พร้อมทั้งเตรียมคันที่ 3 รอเข้าสู่ตู้อบแห้ง ย้ายรถเข็นคันที่ 1, 2 และ 3 เข้าสู่ตู้อบแห้งตู้ที่ 3, 2 และ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2d โดยเตรียมรถเข็นคันที่ 4 เข้าสู่ตู้อบแห้งต่อ ทำการเคลื่อนย้ายรถเข็นคันที่ 1 อยู่ตู้อบแห้งที่ 8 ดังแสดงในรูปที่ 2e โดยรูปแบบการไหลแบบเดิม ถูกกำหนดไว้รถเข็นทุกคันผ่านตู้อบแห้งอุณหภูมิสูง ก่อนนำไปอบแห้งในตู้อบแห้งอุณหภูมิต่ำ และกำหนดให้รถเข็นแต่ละคันอยู่ในตู้อบแห้งแต่ละตู้ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเรียกว่าเวลาในการอบแห้งแต่ละตู้ (Holding time) แต่เนื่องจากมีตู้อบแห้งจำนวน 8 ตู้ เวลาในการอบแห้ง (Drying time) ของรถเข็นแต่ละคันจึงเท่ากับ 8 ชั่วโมง และเมื่อครบกระบวนการอบแห้งรถเข็นทั้งหมด เวลาเดินตู้อบแห้ง (Operation time) จึงมีค่าเท่ากับ 15 ชั่วโมง ทั้งนี้ในการเคลื่อนย้ายรถเข็นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ใช้แรงงานคนในการดำเนินการเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 2 แบบจำลองการไหลของรถเข็นโดยเรียงลำดับตามหมายเลขหน้าตู้

3.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ภายในตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน

การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งด้วยวิธีการจัดการแบบดั้งเดิม ดำเนินการเก็บข้อมูลความชื้นและข้อมูลความเร็วลมระหว่างการอบแห้ง ดังนั้นทางวิจัยจึงได้ทำการเก็บข้อมูลระหว่างการอบแห้งมะม่วงโดยการซังน้ำหนักตัวอย่างชั้นบน ชั้นกลาง และชั้นล่างสุดทุก ๆ 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3



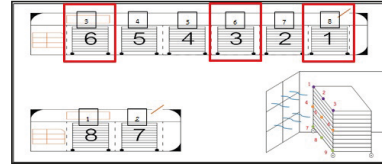
รูปที่ 3 แบบจำลองการเก็บข้อมูลเบื้องต้นของรถเดินคันที่ 1 ภายในตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน

ในระหว่างการทดลองทำการเก็บข้อมูลความชื้นทุก ๆ 30 นาที โดยเก็บข้อมูลความชื้นของผลิตภัณฑ์มะม่วงของรถเดินคันที่ 1 ตำแหน่งบน กลาง และล่างสุด ของรถเดินคันแสดงในรูปที่ 3 และทำการวัดความเร็วลมภายในตู้อบแห้งระหว่างการอบแห้งด้วยเครื่องวัดความเร็วลม ชนิด Anemometer ยี่ห้อ BENETECH รุ่น GMS903 เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับประเมินความสม่ำเสมอของลมภายในตู้อบแห้ง โดยทำการวัดความเร็วลมที่ตำแหน่งตู้อบแห้งหมายเลข 3, 6 และ 8 ดังแสดงในรูปที่ 4

3.3 การวางแผนใช้งานและพัฒนาปรับปรุงตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน

การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งในตู้ของวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านสามช้าง จากการศึกษารูปแบบการจัดการการอบแห้งแบบเดิม ตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้ง ได้แก่ ระยะเวลาในการอบแห้งในแต่ละตู้ (Tolding time) ซึ่งสามารถนำมาวางแผนและพัฒนาปรับปรุงการใช้งานตู้อบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพได้ 2 แนวทางดังนี้

แนวทางที่ 1 เป็นการวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามระยะเวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์ร่วมกับบริหารจัดการด้วยการนำผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4 ตำแหน่งวิธีการวัดความเร็วลมภายในตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด - ลมร้อน

ที่ยังไม่แห้งมาอบวนซ้ำ โดยเป็นการจัดการรูปแบบการเข้าและออกของรถเข้าภายในตู้อบแห้ง เนื่องจากกรอบแห้งแบบเดิมใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้งยังได้คุณภาพไม่สม่ำเสมอ จึงได้หาแนวทางในการแก้ไขเป็นการบริหารจัดการการเข้าและออกของรถเข้าภายในตู้อบแห้ง โดยจะทำการเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งขึ้นจากเดิมรถเข้าเข้าตู้อบแห้งตู้ละ 1 ชั่วโมง ทำการเพิ่มเวลาเพื่อชะลอให้รถเข้าอยู่ในตู้อบแห้งนานขึ้นเป็นตู้ละ 1.5 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ หลังจากทำการเพิ่มชั่วโมงในการอบแห้งแล้ว จึงทำการวิเคราะห์มะม่วงที่ได้หลังจากการอบแห้งในรอบแรก เพื่อทำการคัดแยกมะม่วงชิ้นที่แห้งและไม่แห้งออก โดยชิ้นที่แห้งคือเป็นผลผลิตที่ได้หลังจากการอบแห้งและชิ้นที่ไม่แห้งนำกลับมาอบแห้งวนซ้ำใหม่อีกกรอบ

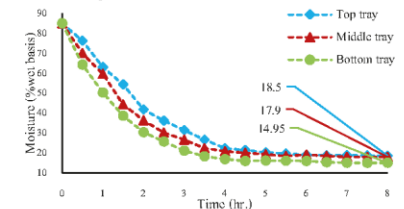
แนวทางที่ 2 เป็นการแก้ปัญหาการกระจายลมไม่สม่ำเสมอ โดยการใช้อัตราความเร็วลมที่มีเก็ทค่าระหว่างการอบแห้ง จำลองการกระจายลมในตู้อบแห้งโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computation Fluid Dynamics, CFD) โปรแกรม Autodesk CFD 2018 ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ที่สามารถมองเห็นลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสลมในสภาวะหนึ่ง ๆ และสามารถทำนายสภาวะเชิงความเร็ว หรือทิศทางของลมได้ และช่วยในการออกแบบทางอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งการจำลองการไหลในรูปแบบต่าง ๆ สามารถปรับเปลี่ยนสภาวะการจำลองได้ ทำให้กระบวนการออกแบบและพัฒนาประสิทธิภาพมากขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำมาประเมินการตัดสินใจในการปรับปรุงพัฒนาเครื่องอบแห้งได้ 18] โดยแนวทางที่ 2 มีแนวคิดในการปรับปรุง ดังนี้ คือการเปลี่ยนแปลงทิศการอบแห้งจากแบบเดิม ให้เป็นการอบแห้งแบบสลับทิศทางลม (Reversal airflow drying) เป็นการอบแห้งที่ถูกพัฒนามาจากการอบแห้งแบบ Batch ซึ่งการอบแห้งแบบ Batch จะมีการไหลของลมร้อนไปในทิศทางเดียวคือ จากด้านบนลงด้านล่าง หรือจากด้านซ้ายไปด้านขวา เท่านั้น 19] โดยจากการสร้างแบบจำลองนี้เป็นารสร้างแบบจำลองการอบแห้งสลับทิศทางจากด้านซ้ายไปด้านขวา และทำการตั้งสมมติฐานที่ใช้ในการจำลองการไหลดังนี้ กำหนดรูปแบบของแบบจำลองการไหล (Flow model) เป็นแบบบีบปวน (k - epsilon) กำหนดรายละเอียดและเงื่อนไขในการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ (Transient) ทางเข้าของแบบจำลองเป็นพัดลมกำหนดอากาศที่ออกจากพัดลมเท่ากับ 600

ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ปล่องอากาศผ่านพัดลมแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และกำหนดให้บริเวณผิวผนังพื้น เป็นของแข็ง (Solid) อุณหภูมิภายนอกห้องแห้งกำหนดให้ 30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอินฟราเรด 70 องศาเซลเซียส (กำหนดตามชุดควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่อง) จากนั้นกำหนดเงื่อนไขของการคำนวณการลุ้เข้าของค่าอุณหภูมิกำหนดให้จำนวนรอบของการคำนวณซ้ำไว้ที่ 100 รอบ และค่าความผิดพลาดที่เหลือของตัวแปรตามทุกตัวจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.005 หลังจากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ผลของคุณภาพมะม่วงอบแห้งและตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งก่อนทำการปรับรูป

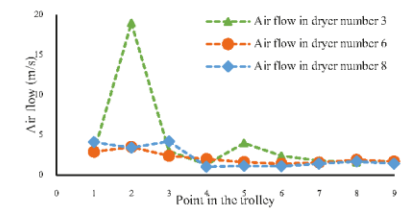
จากการศึกษาการอบแห้งมะม่วงของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำช้าง ด้วยตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ด้วยก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อนวิธีการจัดการการอบแห้งแบบเดิมเป็นวิธีการอบแห้งโดยใช้แรงงานคนนำรถเข็นเข้าตู้อบแห้งทีละคัน และทำการย้ายรถเข็นไปแต่ละตู้จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งแต่ละตู้อบแห้ง ตู้อบ 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการย้ายรถเข็นเข้าตู้อบแห้งตู้ใหม่ และทำการสูบลมคุณภาพของมะม่วงอบแห้งภายในรถเข็นให้ผ่านตามผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2558 การอบแห้งผักและผลไม้ [10] ในการเก็บข้อมูลความชื้นและความเร็วลมระหว่างการอบแห้ง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชื้นแสดงดังรูปที่ 5 และกราฟรูปแบบการกระจายความเร็วลมจำนวน 9 จุด ที่ตำแหน่งตู้อบแห้งที่ 3, 6, 8 แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชื้นฐานแห้งของรถเข็นคันที่ 1 ในถาดชั้นบน กลาง และด้านล่างสุด

โดยจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นฐานแห้งของมะม่วงในรูปที่ 5 พบว่า แนวโน้มการลดลงของความชื้นในตำแหน่งถาดล่างสุดมีการลดลงของความชื้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าความชื้นต่ำกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด (ต่ำกว่า 12 %wet basis) ในส่วนของถาดกลางและถาดบน พบว่าความชื้นมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยและความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่แห้งมาตรฐาน

มผช. กำหนด ภายโดยรวม แสดงให้เห็นว่า ชั้นที่มีภาระเหวี่ยงความชื้นไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องมาจากการกระจายลมที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง



รูปที่ 6 ความเร็วลมภายในตู้อบแห้ง ตู้ที่ 3, 6 และ 8

รูปแบบการไหลของลมร้อนในตู้อบแห้งอุณหภูมิต่ำ มีรูปแบบการไหลของลมร้อนจากตู้อบแห้งที่ 3 ไปยังตู้อบแห้งที่ 8 ผลของการเก็บข้อมูลความเร็วลมในแต่ละจุดของรถเข็น จำนวน 3 ตู้ ซึ่งเป็นตู้ที่ 3, 6 และ 8 ที่ตั้งอยู่ที่ตำแหน่งต้น กลาง และท้ายของตู้อบแห้งอุณหภูมิต่ำ ผลการเก็บข้อมูลและสร้างกราฟเพื่อดูปริมาณการกระจายลม พบว่าความเร็วลมตำแหน่งตู้อบแห้งที่ 3 มีค่ามากกว่าที่ตำแหน่งตู้อบแห้งอื่นๆ ซึ่งผลของการกระจายลมที่ไม่สม่ำเสมอ เป็นผลให้คุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งไม่สม่ำเสมอ สอดคล้องกับผลของความชื้นที่กล่าวไป

จากการศึกษารูปแบบการจัดการแบบเดิมกับการศึกษารูปแบบการกระจายลมในตู้อบแห้งนำไปสู่การวางแผนการใช้งาน และปรับปรุงพัฒนาเครื่องอบแห้ง ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

4.2 ผลการแก้ไขปัญหามันโดยใช้นวัตกรรมการศึกษาที่ 1

จากการอบแห้งแบบเดิม แต่คุณภาพที่ได้ออกมาหลังจากการอบแห้งพบว่ามีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอกัน โดยในหนึ่งรถเข็น มีส่วนที่แห้งอยู่บริเวณด้านล่าง และถาดด้านบนยังคงมีความชื้นอยู่ จึงได้นำแนวทางในการวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามระยะเวลาผลิตภัณฑ์ร่วมกับการบริหารจัดการด้วยการนำผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่แห้งมาอบซ้ำคือ

จากแนวทางที่ 1 เมื่อทำการวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามระยะเวลาอบผลิตภัณฑ์ (1.0, 1.5, 2.0 ชั่วโมง) โดยพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (Drying time) ของรถเข็นในแต่ละคันใช้เวลา 8, 12 และ 16 ชั่วโมงตามลำดับ และระยะเวลาเดินเครื่องรวมเท่ากับ 15.0, 22.5 และ 30.0 ชั่วโมงตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยผลผลิตหลังจากการอบแห้ง (Average %yield) พบว่าการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้เท่ากับ 2.0 ชั่วโมง ได้ค่า Average %yield มากที่สุด เมื่อเทียบกับเวลา 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิต (Cost) ต่อรอบแล้วนั้น พบว่าใช้ต้นทุน

ตารางที่ 1 ผลจากการศึกษาผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้ง ในส่วนของร้อยละผลผลิตที่ได้ (Average %yield) และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิต (Cost) ต่อรอบ (Batch)

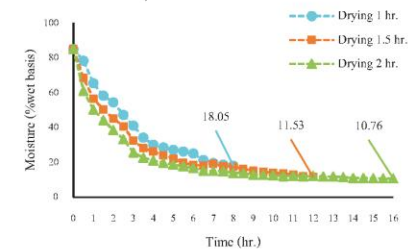
Holding Time (hr.)	Drying time (hr.)	Operation time (hr.)	Average %yield	Consumption LPG		Cost
				(kg)	(baht/batch)	
1.0	8	15.0	50	11.10	18,236.21	
1.5	12	22.5	75	16.65	22,704.31	
2.0	16	30.0	90	22.20	27,772.42	

ในการผลิตเป็นจำนวนมาก ใช้เวลาในการอบแห้งสะสม (Operation time) เป็นเวลาจำนวนมาก และเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลอีกกรอบพบว่าค่าที่อบแห้งที่ 1.5 และ 1 ชั่วโมง ได้ผลผลิตเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 75 และ 50 ตามลำดับ แต่ต้นทุนในการผลิตถูกลง และเวลาอบแห้งสะสมที่ใช้ทั้งหมดน้อยลง จึงนำการอบแห้งของแต่ละคู่ในสองเวลานี้ทำการอบแห้งแบบวนซ้ำใหม่ โดยการอบแห้งแบบวนซ้ำนี้จะทำการอบแห้งเพิ่มอีกคู่ละ 2 ชั่วโมง โดยคู่ที่อบแห้งที่ 1 ชั่วโมงนั้นได้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเท่ากับร้อยละ 50 และเมื่อตัดมะม่วงที่ยังไม่แห้งนำกลับมาอบแห้งใหม่อีกครั้ง จะได้มะม่วงที่นำกลับมาอบแห้งแบบวนซ้ำใหม่อีกครั้ง จะได้มะม่วงเต็มรถเป็น 4 รถขึ้น จึงทำการอบแห้งแบบวนซ้ำในครั้งนี้นอกจากนี้เข้าตู้อบแห้งอุณหภูมิต่ำ (Low temperature) วิธีนี้พบว่าใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลงแต่ในการอบแห้งแบบวนซ้ำของวิธีนี้เมื่อนำเข้าตู้อบแห้งก็ต้องใช้ตู้ยาวแล้วนั้น ทำให้สูญเสียพลังงานมากขึ้น เนื่องจากรถเข็นที่เข้าตู้อบแห้งนั้นไม่มีลิ้นชัก และเมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายแล้วนั้นพบว่าเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก และคู่ที่อบแห้งที่ 1.5 ชั่วโมงได้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเท่ากับร้อยละ 75 เมื่อตัดมะม่วงที่ยังไม่แห้งนำกลับมาอบแห้งแบบวนซ้ำใหม่อีกครั้ง จะได้มะม่วงเต็มรถเป็น 2 รถขึ้น และการอบแห้งโดยการวนซ้ำของวิธีนี้สามารถนำเข้าตู้อบแห้งแบบอุณหภูมิสูง (High temperature) ได้เต็มพอดี และเมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการอบแห้งแบบวนซ้ำในครั้งนี้นพบว่ามีความคุ้มค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการอบแห้งแบบวนซ้ำในการอบแห้งที่ 1 ชั่วโมง และคู่ที่อบแห้งที่ 2 ชั่วโมง เมื่อนำเวลาทั้งสามที่ใช้ในการอบแห้งมาเปรียบเทียบเพื่อดูค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการอบแห้งแล้วนั้น พบว่าวิธีการอบแห้งแบบวนซ้ำของคู่ที่อบแห้งที่ 1.5 ชั่วโมงนั้นใช้ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด เนื่องจากเมื่อนำกลับมาอบแห้งแบบวนซ้ำใหม่อีกครั้งนั้นสามารถนำเข้าตู้อบแห้งขนาดสั้นได้เต็มพอดี สามารถประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง พร้อมทั้งได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้งผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

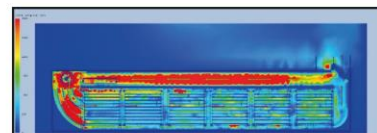
4.3 ผลการแก้ไขปัญหามันปัญหาโดยใช้แนวทางการศึกษาที่ 2

เมื่อทำการตรวจวัดความเร็วลมด้วยเครื่องมือแล้วภายในตู้อบแห้งแล้ว จึงได้สร้างแบบจำลองตู้อบแห้งในแบบเดิม ดังแสดงในรูปที่ 8 เพื่อตรวจสอบการกระจายความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอภายใน

ตู้อบแห้ง ดูการกระจายความเร็วลมภายในตู้อบแห้ง โดยค่าสีแดงจะแสดงให้เห็นถึงความเร็วลมที่มากที่สุด และสีน้ำเงินแสดงให้เห็นถึงความเร็วลมที่น้อยที่สุด



รูปที่ 7 อัตราการอบแห้งในตู้อบแห้งที่ 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ

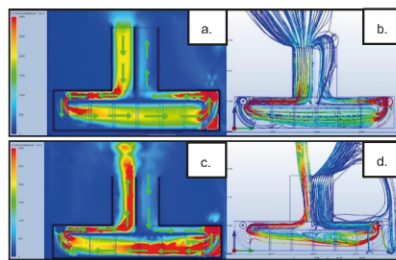


รูปที่ 8 รูปแบบการกระจายอากาศในรูปแบบเดิม

จากรูปที่ 8 พบว่าการกระจายของความเร็วลมไม่ทั่วถึงในบริเวณห้องอบแห้งโดยจะสังเกตเห็นได้จากสีแดงที่แสดงความเร็วลมมาก แต่มีการกระจายความเร็วลมเพียงด้านบนบริเวณช่องแลกเปลี่ยนความร้อนของตู้อบแห้ง และบริเวณภายในตู้อบแห้งที่แสดงให้เห็นแต่สีน้ำเงิน จึงตั้งสมมติฐานได้ว่ามีการกระจายความเร็วลมไม่สม่ำเสมอภายในตู้อบแห้ง และเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้คุณภาพที่ได้หลังจากการอบแห้งมีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ แนวทางที่ใช้ในการแก้ไขปัญหานี้คือ

จากแนวทางที่ 2 หลังจากการศึกษาการสร้างแบบจำลอง โดยการปรับทางออกของลมร้อนใหม่ให้มีขนาดใหญ่ พบว่าวิธีการเปลี่ยนเทคนิคการอบแห้งจากแบบเดิม ให้เป็นการอบแห้งแบบสลับทิศทางลม (Reversal Airflow Drying) เป็นวิธีที่สามารถอธิบายการ

กระจายความเร็วลมภายในตู้อบแห้งได้ดีที่สุด เนื่องจากวิธีนี้จะต้องใช้พัดลมตัวยกถึง 2 ชุด ชาย-ขวา และจะต้องทำการติดตั้งตู้อบแห้งในห้องสุดท้ายออกเพื่อทำการติดตั้งพัดลม และปรับทิศทางของลมร้อนใหม่จากเดิมทางออกของลมร้อนอยู่ในช่วงท้ายเครื่อง ทำการปรับเปลี่ยนใหม่ให้อยู่ในช่วงกลางของเครื่อง จากการสร้างแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยค่าสีจะแสดงให้เห็นถึงค่าความเร็วลมที่มากที่สุด และสีน้ำเงินแสดงให้เห็นถึงค่าความเร็วลมที่น้อยที่สุด



รูปที่ 9 รูปแบบการสร้างแบบจำลองการกระจายอากาศหลังจากการปรับปรุงทิศทางทางไหลอากาศ

จากแบบจำลองรูป a. และ b. แสดงทิศทางลมเข้าทางด้านซ้ายและออกทางด้านขวา ส่วนรูป c. และ d. แสดงทิศทางลมเข้าทางด้านขวาและออกทางด้านซ้ายจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเปลี่ยนทิศทางการอบแห้งให้เป็นแบบสลับทิศทางลม พบว่าการกระจายความเร็วลมภายในตู้อบแห้งดีขึ้น ทำให้ช่วยในการดึงอากาศชื้นออกจากตู้อบแห้งได้ดี อีกทั้งช่วยลดแรงงานคนเพื่อเข็นรถเข็นเข้าและออกตู้อบแห้งทุกครั้ง

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาพบว่า แนวทางการศึกษาที่ 1 ได้การวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามระยะเวลาการผลิตภัณฑ์ การบริหารจัดการการอบแห้งด้วยการนำผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่แห้งทำการอบวนซ้ำใหม่ เพื่อช่วยให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อีกทั้งประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ส่วนแนวทางการศึกษาที่ 2 เป็นการแก้ไขปัญหาเชิงแนวคิด โดยแนวทางนี้สามารถช่วยอธิบายการกระจายลมภายในตู้อบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอได้เป็นอย่างดี พร้อมทั้งสามารถใช้เป็นเครื่องมือหาแนวทางในการปรับปรุงเครื่องต่อไปได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ขอขอบพระคุณหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปเกษตร

บ้านลำปาง จังหวัดลำปาง ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ วัดอุณหภูมิ และสถานที่ในการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมส่งเสริมการเกษตร. 2557. รายงานสถิติการส่งออกผลไม้สดปี 2556. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมการส่งออก.
- [2] อาทิตยา พัฒนิบูลย์ และอมรชัย ยารณณวิธานพ. 2557. เทคโนโลยีการอบแห้ง. *Technology promotion*, 41(234), 64-67.
- [3] ขนุกานต์ รัตนมงคล, สมเกียรติ จรุงศักดิ์เลิศ, ชนวัฒน์ นิต์คนวีจิตร, พิสุทธิ กลิ่นขจร และหยดฝน ทนงการกิจ. 2561. จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. ใน การประชุมวิชาการการถ่ายทอดผลงานความรู้และนวัตกรรม ครั้งที่ 17, ลำปาง วิสอร์ท อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง.
- [4] ชาลิตา บรมพิชัยชาติกุล. 2555. เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน: การนำมาใช้เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 35(2), 269-283.
- [5] พิมล วุฒิสินธุ์, ชูศักดิ์ ขวประดิษฐ์, สุเทพ กลสิกรรม, พุทธิรินทร์ จารุวัฒน์, เวียง อากรณี, ตัญญา กองช้อง และสุภัท หนูสวัสดิ์. 2551. รายงานผลการวิจัยเรื่องเติม พัฒนาเครื่องอบแห้งลำไย. กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร.
- [6] อุบล ชินวัง, ทินน์ พรหมโชติ, สาธิต พสุวิทย์กุล และจุฑาทิพย์ เปลี่ยมสติ. 2561. อิทธิพลของความร้อนและอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อคุณภาพและระยะเวลาการสุกของมะม่วงพันธุ์มหาชนก. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า* 2561, 36(2), 85-97.
- [7] Sado Kamdem, Sylvain L., Kuate Kanga, Blaise Essia Ngang, Jean J. and Etoa Francois Xavier. 2015. Effect of Processing Parameters on the Stability of Nonpasteurized Mango Slice Preserves. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39(6), 2249 - 2258.
- [8] ปราโมทย์ เตชะอำไพ และวรสิทธิ์ กาญจนกิจเกษม. 2541. การคำนวณการหมุนวนของอากาศด้วย Computational Fluid Dynamics. ใน *วิจัยทัศนงานวิศวกรรมปรับอากาศในอนาคต*. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย. น.1-6.
- [9] Jing Xie, Xiao - Hua Qu, Jun - Yu Shi and Da - Wen Sun. 2006. Effects of Design Parameters on Flow and Temperature Fields of a Cold Storage by CFD Simulation. *Journal of Food Engineering* 77(1): 355 - 363.
- [10] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2558. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน: ผักและผลไม้อบแห้ง. มผช., 136/2558.

