



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การอบแห้งกุ้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด
Shrimp drying with fluidized bed drier

ขวัญชัย หนาแน่น
และคณะ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ
ปี พ.ศ.2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

กิตติกรรมประกาศ

ไม่มีความสำเร็จใดที่ปราศจากเบื้องหลัง งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560 ตามมติคณะรัฐมนตรี ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ที่สนับสนุนสถานที่สำหรับการทำวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และบุคคลที่เกี่ยวข้องทั้งหลายสำหรับการให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนเกิดความสำเร็จของงานวิจัยฉบับนี้ขึ้น

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันสำคัญให้ผู้ทำวิจัยประสบความสำเร็จมาได้จนถึงทุกวันนี้ สุดท้ายนี้ คุณงามความดีอันใดที่พึงมีจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้ทำวิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ขวัญชัย หนาแน่น และคณะ
เมษายน พ.ศ.2561

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	6
2.2 พื้นฐานของการอบแห้ง	6
2.3 การวิเคราะห์และทดสอบหาความชื้นของวัสดุอบแห้ง	7
2.4 กลไกของการอบแห้ง	8
2.5 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกรอบแห้ง	9
2.6 เทคโนโลยีเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ	9
2.7 ฟลูอิดซ์เซชัน	15
2.8 หลักการถ่ายเทความร้อน	17
2.9 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	19
2.10 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	22
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	22
3.1.1 ชุดหัวเผา	23
3.1.2 เซ็นเซอร์อุณหภูมิ	23
3.1.3 พัดลม	24
3.1.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส	24
3.1.5 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	25
3.1.6 อินเวอร์เตอร์	25
3.1.7 เครื่องวัดความชื้น	25
3.1.8 ตาชั่ง	26
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	28
4.1 การทำแห้งกึ่งด้วยวิธีแบบดั้งเดิม (ตากแดด)	28
4.2 การเปลี่ยนแปลงสีของกึ่งอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด	33
4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนและความสูงเบดในห้องอบแห้ง	35
4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ความสูงเบด $h/D=1/3$	35
4.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ความสูงเบด $h/D=2/3$	39
4.3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ความสูงเบด $h/D=1$	43
4.4 อิทธิพลของอากาศร้อนและความสูงเบดต่ออัตราการผลิตกึ่งแห้ง	50
4.5 อิทธิพลของขนาดกึ่ง	51
4.6 อิทธิพลของขนาดกึ่งต่ออัตราการผลิตกึ่งแห้ง	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	57
5.1 สรุปผลการทดลอง	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
5.3 ความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่	60

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 อาหารทะเลแห้งจังหวัดเพชรบุรี	1
1.2 กรรมวิธีการทำกุ้งแห้งด้วยวิธีตากแดด	2
1.3 ชนิดของกุ้งแห้ง	3
2.1 กระบวนการทำกุ้งแห้ง	6
2.2 ผลของความชื้นและอัตราการอบแห้งต่อเวลาในการอบแห้ง	9
2.3 เครื่องอบแห้งแบบถาด	10
2.4 เครื่องทำแห้งแบบ Tunnel dryer	10
2.5 เครื่องทำแห้งแบบสายพานเคลื่อนที่ต่อเนื่อง	11
2.6 เครื่องทำแห้งสุญญากาศ	12
2.7 เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	12
2.8 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย	14
2.9 เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด	14
2.10 ลักษณะของชุดฟลูอิดไชน์เบด	15
2.11 พฤติกรรมของฟลูอิดไชน์เบด	16
2.12 ชุดทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟโดยการใช้เทคนิคฟลูอิดไชน์เบด [6]	20
2.13 การอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดในหอตดลองผิวคลื่น [7]	21
2.14 ชุดทดลองการอบแห้งมะพร้าวเกล็ดแบบชั้นบางด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด [8]	21
3.1 แผนภาพอุปกรณ์การทดลอง	22
3.2 เครื่องอบแห้งกุ้งแบบฟลูอิดไชน์เบด	22
3.3 หัวเผา	23
3.4 ถังแก๊ส LPG	23
3.5 เซ็นเซอร์อุณหภูมิ	24
3.6 พัดลม	24
3.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส	24
3.8 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	25
3.9 อินเวอร์เตอร์	25
3.10 เครื่องวิเคราะห์ความชื้น Kett FD-660	26
3.11 ตาชั่ง	26
4.1 แสดงพลั๊กความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์เทียบกับเวลา	28
4.2 กุ้งขนาดเล็กต้มสุกตากแดด (วันที่ 13 เม.ย. 2560)	29
4.3 กุ้งขนาดกลางต้มสุกตากแดด (วันที่ 13 เม.ย. 2560)	30
4.4 กุ้งขนาดใหญ่ต้มสุกตากแดด (วันที่ 13 เม.ย. 2560)	31
4.5 การลดลงของความชื้นเทียบกับระยะเวลาในการตากแดดกุ้งต้มสุก	32
4.6 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงสีของกุ้งขนาดใหญ่อบแห้ง ($h/D=2/3$) ที่อุณหภูมิ 60 °C	33
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกุ้งต้มสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบด สำหรับ ($h/D=1/3$) และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ	49
4.23 อัตราการผลิตกุ้งแห้งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.7012-2551) ประเภท กุ้งแห้ง ของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตร และอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (กุ้งขนาดใหญ่)	50
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกุ้งต้มสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด สำหรับ (h/D)=1/3, 2/3 และ 1 ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 80°C	52
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมวลกุ้งต้มสุกกับเวลาในการอบแห้ง ด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบดสำหรับ (h/D)=1/3, 2/3 และ 1 ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 80°C	53
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกุ้งต้มสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด สำหรับ (h/D)=1/3, 2/3 และ 1 ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 80°C	54
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกุ้งต้มสุกกับเวลาในการอบแห้ง ด้วยเครื่องฟลูอิดซ์-เบด สำหรับ (h/D)=1/3, 2/3 และ 1 ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 80°C	55
4.28 อัตราการผลิตกุ้งแห้งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.7012-2551) ประเภท กุ้งแห้ง ของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตร และอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จังหวัดเพชรบุรีเป็นจังหวัดที่มีพื้นที่ติดกับชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกที่ติดกับอ่าวไทยซึ่งครอบคลุมเนื้อที่ตั้งแต่อำเภอบ้านลาดไปจนถึงอำเภอชะอำ รวมระยะทางประมาณ 82 km จึงทำให้จังหวัดเพชรบุรีมีการทำประมงเป็นอาชีพหลักๆ ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากที่สามารถช่วยสร้างรายได้ให้กับจังหวัดและยังเป็นแหล่งส่งออกอาหารทะเลที่สำคัญของประเทศอีกด้วย ไม่ว่าจะเป็นการส่งออกอาหารทะเลสด แช่แข็ง และอาหารทะเลแปรรูปที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ในการรักษาคุณภาพ หนึ่งในวิธีการของกระบวนการถนอมอาหารที่นิยมคือ การทำแห้ง (การลดความชื้น) เช่น ปลาแห้ง ปลาหมึกแห้ง หอยตากแห้ง และกุ้งแห้ง ดังภาพที่ 1.1 ซึ่งนิยมทำให้แห้งด้วยวิธีการตากแดดเพราะกระบวนการไม่ซับซ้อน จากวิธีการทำแห้งด้วยการตากแดดโดยตรงมีข้อเสียหลายประการที่ก่อให้เกิดปัญหาในด้านการส่งออกคือเรื่องของคุณภาพที่ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการการตากแดดที่ส่งผลให้มีสิ่งเจือปนบนผลิตภัณฑ์สูง อีกทั้งจากกระบวนการดังกล่าวยังต้องการพื้นที่ในการตากแห้ง ดังภาพที่ 1.2 และยังใช้เวลาในการลดความชื้นนาน ซึ่งส่งผลให้กำลังการผลิตของแห้งมีค่าต่ำ ด้วยเหตุดังที่กล่าวข้างต้นผู้วิจัยจึงได้เสนอโครงการวิจัย “การอบแห้งกุ้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด” เพื่อช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีการตากแดด เพราะเทคนิคฟลูอิดไชน์เซชันเป็นกระบวนการที่มีความสามารถในการไล่ความชื้นสูงและถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย [1-14]



กุ้งแห้ง



ปลาเค็มแห้ง



ปลาหมึกแห้ง



หอยตากแห้ง

ที่มา: www.moc.go.th/petchaburi

ภาพที่ 1.1 อาหารทะเลแห้งจังหวัดเพชรบุรี



ภาพที่ 1.2 กรรมวิธีการทำกุ้งแห้งด้วยวิธีตากแดด

กุ้งแห้ง เป็นวัตถุดิบที่ได้รับความนิยมมากในการบริโภค ซึ่งการเรียกชนิดของกุ้งแห้งของแต่ละภาคจะเรียกและเข้าใจไม่เหมือนกัน ดังภาพที่ 1.3 ภาคใต้ กุ้งเสียบคือกุ้งแห้งติดเปลือกที่นิยมใช้ทำน้ำพริก กุ้งเสียบ กุ้งแก้วทำจากกุ้งขาวทะเลตัวเล็กไม่มีเปลือก นิยมใส่ในเมนูยำ ส่วนกุ้งฝอยเป็นกุ้งตัวเล็กที่ผ่านการอบแห้งทั้งตัวซึ่งนิยมใช้ในการประกอบอาหารประเภทยำ ซึ่งเทคนิคฟลูอิดไชน์เซชันในการอบแห้งเป็นเทคนิคที่มีความสามารถในการลดความชื้นสูงเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ จึงทำให้เวลาในการอบแห้งและพื้นที่ในการใช้ตากแดดลดลง อีกทั้งกระบวนการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เซชันเป็นการอบแห้งในระบบปิด จึงทำให้สามารถลดสิ่งที่จะเจือปนในกุ้งมีค่าลดลง โดยข้อดีและข้อเสียของกรรมวิธีการอบแห้งที่ได้จากการตากแดดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคฟลูอิดไชน์เซชันสามารถสรุปได้เป็นข้อๆ ดังนี้

การอบแห้งด้วยวิธีตากแดด

ข้อดี

- ❖ กระบวนการอบแห้งง่ายและไม่มีความซับซ้อน
- ❖ พลังงานความร้อนได้มาฟรี
- ❖ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อเสีย

- ❖ อัตราการอบแห้งต่ำ
- ❖ ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งได้
- ❖ อบแห้งได้เฉพาะเวลากลางวันที่มีแสงแดดเท่านั้น
- ❖ มีสิ่งสกปรกเจือปนในวัตถุดิบอบแห้งสูง
- ❖ ใช้พื้นที่ในการตากแดดสูง
- ❖ ไม่สามารถควบคุมอัตราการหดตัวของวัตถุดิบอบแห้งได้

การอบแห้งด้วยวิธีฟลูอิดซ์เซชัน

ข้อดี

- ❖ อบแห้งได้รวดเร็ว
- ❖ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการอบ
- ❖ สามารถควบคุมสิ่งเจือปนในวัตถุที่อบแห้งได้
- ❖ สีของวัตถุดิบแห้งเป็นธรรมชาติ
- ❖ มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง
- ❖ สามารถเลือกระยะเวลาที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องอบได้ตามต้องการ
- ❖ การใช้งานและการดูแลรักษาเครื่องทำได้ง่าย
- ❖ สามารถปรับกระบวนการให้เป็นแบบอัตโนมัติได้ง่าย
- ❖ สามารถใช้ในการส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

ข้อเสีย

- ❖ เวลาของการไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูงๆ หรือเบดหลายชั้น
- ❖ ที่ช่วงความเร็วของของไหลสูงๆ เม็ดของแข็งจะลอยออกนอกเบดพร้อมกับของไหล
- ❖ เกิดการสั่นสะเทือนของหอยทดลอง หรือเกิดการกัดกร่อนอันเนื่องจากเม็ดของแข็งมากระทบกับผนังของหอยทดลอง
- ❖ ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปราะหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอน



กุ้งฝอย



กุ้งเสียบ



กุ้งแก้ว

ที่มา: www.weloveshopping.com/

ภาพที่ 1.3 ชนิดของกุ้งแห้ง

จากข้อเสียของกรรมวิธีการตากแดดสามารถแก้ปัญหาเหล่านั้นให้หมดไปได้ด้วยกระบวนการอบแห้งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไซเซชันซึ่งมีข้อดีอยู่หลายประการดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งเงื่อนไขของการอบแห้งกึ่งชนิดต่างๆ นั้นไม่เหมือนกัน เช่นขนาดของกึ่งผ้อยที่มีขนาดเล็กและเบา ความเร็วของอากาศที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไซเซชันนั้นจะต่ำกว่ากึ่งที่มีขนาดใหญ่ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้เพื่อหาเงื่อนไขของ อุณหภูมิ ความเร็ว และความหนาของชั้นเบดที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งกึ่งแต่ละขนาด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไซเซชันที่สามารถลดการใช้พลังงาน ลดระยะเวลาในการอบแห้ง ลดพื้นที่สำหรับการอบแห้ง และเพิ่มคุณภาพกึ่งแห้ง โดยใช้เทคนิคฟลูอิดไซเซชัน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศร้อน ความเร็วอากาศร้อน และความสูงของเบด ที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง สี และความชื้นกึ่งแห้ง
2. ห้องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 0.3 m และสูง 1.0 m
3. กึ่งที่ใช้ในการทดลองคือ กึ่งขนาดเล็ก กึ่งขนาดกลาง และกึ่งขนาดใหญ่
4. อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าเท่ากับ 60, 70 และ 80 °C ตามลำดับ
5. ความเร็วอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งมี Inverter ควบคุมมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ 40 Hz
6. ความสูงของเบดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเบด (H/D) มีค่าเท่ากับ 1/3, 2/3 และ 1.0 ตามลำดับ
7. ในการทดลองใช้หัวเผาแก๊ส LPG สำหรับสร้างอากาศร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลของอุณหภูมิของอากาศร้อน ความเร็วของอากาศร้อน และความสูงของชั้นเบดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งกึ่ง สี และความชื้น
2. สามารถช่วยประหยัดเวลาและพื้นที่สำหรับการอบแห้งกึ่ง
3. สามารถช่วยเพิ่มคุณภาพของกึ่งแห้งทั้งในเรื่องของสิ่งสกปรกเจือปน สี และอายุการเก็บรักษา
4. ช่วยประหยัดพลังงาน

1.5 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่ 1 ต.ค. 2559 – 30 ก.ย. 2560 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

แผนการดำเนินงาน	ระยะเวลา											
	ต.ค. 59	พ.ย. 59	ธ.ค. 59	ม.ค. 60	ก.พ. 60	มี.ค. 60	เม.ย. 60	พ.ค. 60	มิ.ย. 60	ก.ค. 60	ส.ค. 60	ก.ย. 60
1. ศึกษาข้อมูลจากชุมชนและจากงานวิจัยที่ผ่านมา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ออกแบบชุดทดลองและวิธีการทดลอง	↔											
2. จัดหาอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้างชุดทดลองพร้อมเตรียมการสร้างจริง		↔										

3.ดำเนินการสร้างชุดทดลอง ตามแผนการออกแบบ			↔									
4. ทดลองเก็บผลภายใต้ เงื่อนไขการทดลองต่างๆ พร้อมทั้งแก้ไขข้อบกพร่อง				↔								
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง					←	→						
6. สรุปผลการทดลองและ เผยแพร่ผลงานวิจัย						←	→					
7. เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์												↔

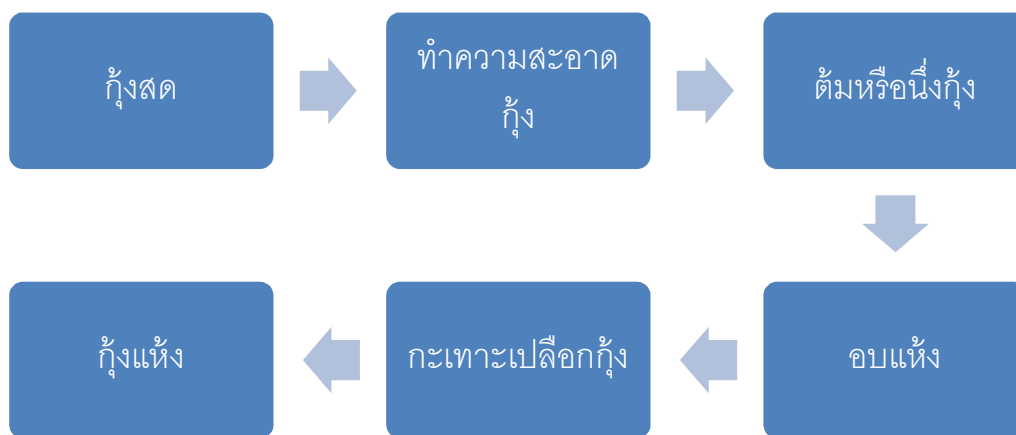
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

กรรมวิธีในการผลิตกุ้งแห้งซึ่งในปัจจุบันมีการผลิตกุ้งแห้งตามท้องถิ่นของจังหวัดที่ติดชายทะเลเป็นจำนวนมาก โดยกระบวนการผลิตกุ้งแห้งเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นความคิดของคนในท้องถิ่นและมักผลิตอยู่ในบ้านของตัวเองเป็นส่วนใหญ่ โดยกระบวนการผลิตกุ้งแห้งส่วนใหญ่ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักคือ 1. ขั้นตอนการล้างกุ้ง เป็นการนำกุ้งสดมาชำระล้างสิ่งสกปรกที่ติดมากับกุ้ง 2. ขั้นตอนการต้มกุ้ง เป็นการนำกุ้งที่ผ่านการล้างแล้วต้มในน้ำเดือดที่บรรจุอยู่ในหม้อต้มซึ่งได้มีการใส่เกลือเพียงเล็กน้อยโดยใช้เวลาในการต้มไม่นานนักเพียงแค่ให้กุ้งสุก 3. ขั้นตอนการอบแห้งกุ้ง เมื่อได้กุ้งที่ต้มสุกแล้ว หลังจากนั้นจะนำมาผ่านการทำให้แห้ง ซึ่งมีอยู่ 2 วิธีหลักๆ คือ การตากแดด และการใช้เครื่องอบแห้ง 4. ขั้นตอนการกะเทาะเปลือกกุ้ง คือหลังจากอบแห้งจนได้กุ้งที่แห้งแล้วจึงสามารถนำมากะเทาะเปลือกออกโดยใช้เครื่องมือทางกลและอาศัยลมเป่าแยกเปลือกออกจากเนื้อกุ้ง

กระบวนการผลิตกุ้งแห้งนี้ส่วนใหญ่ของชาวบ้านมักประสบปัญหามากในกระบวนการอบแห้งทั้งจากวิธีการตากแดดและจากการใช้เครื่องอบแห้งที่ยังไม่มีประสิทธิภาพในเรื่องของการใช้พลังงานและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาถึงเทคโนโลยีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งทั้งเทคโนโลยีด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้ง



ภาพที่ 2.1 กระบวนการทำกุ้งแห้ง

2.2 พื้นฐานของการอบแห้ง

การอบแห้งคือกระบวนการที่ความร้อนจะถ่ายเทด้วยวิธีการใดวิธีหนึ่งไปสู่วัตถุที่มีความชื้น เมื่อวัตถุได้รับความร้อนก็จะเกิดกระบวนการถ่ายเทมวลจากวัสดุไปยังกระแสอากาศซึ่งกระบวนการอบแห้งนั้นก็จะขึ้นอยู่กับเทคนิคหรือชนิดของการถ่ายเทความร้อน เช่น การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสี และการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งกระบวนการทั้งสองจะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน การที่ความร้อนถูกถ่ายเทหลักการของการอบแห้งโดยทั่วไป คือ การใช้ความร้อนมาทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งจะทำให้ความชื้นในวัสดุนั้นระเหยออกไปสู่บรรยากาศรอบข้าง ทำให้สามารถเก็บรักษาวัสดุได้ยาวนานขึ้น การลดลงของความชื้นภายในวัสดุอบแห้งถูกแบ่งออกเป็น 3 ระยะคือ

1 ระยะเริ่มต้นของการอบแห้ง (setting down period) เป็นระยะเริ่มต้นของการอบ ดังนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนเข้าไปแก่วัสดุ ผิวนอกของวัสดุอบแห้งจะเป็นส่วนแรกที่ได้รับพลังงานความร้อนนี้ และทำให้โมเลกุลของวัสดุมีการคายน้ำในรูปแบบของความชื้นออกมา

2 ระยะอัตราการระเหยของไอน้ำคงที่ (constant rate period) ช่วงนี้บริเวณพื้นผิวของวัสดุจะมีอุณหภูมิคงที่ และความชื้นจะมีเหลือในปริมาณที่น้อยและการกระจายตัวสม่ำเสมอ ทว่าพื้นผิวอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในวัสดุที่ถูกส่งผ่านออกมายังบริเวณพื้นผิวนี้ จะมีค่าเท่ากับอัตราการระเหยของความชื้นที่พื้นผิวระเหยออกสู่บรรยากาศ

3 ระยะอัตราการระเหยของไอน้ำลดลง (falling rate period) ช่วงนี้อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในวัสดุออกมายังบริเวณพื้นผิวจะมีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยของความชื้นที่พื้นผิวระเหยออกสู่บรรยากาศ จุดที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากระยะอัตราการระเหยของไอน้ำคงที่เข้ามาสู่ระยะนี้เรียกว่า จุดวิกฤตความชื้น (critical moisture content)

2.3 การวิเคราะห์และทดสอบหาความชื้นของวัสดุอบแห้ง

ในการอบแห้งวัสดุหรือผลผลิตต่างๆ ปริมาณที่สำคัญที่สุดที่จะต้องคำนึงถึงคือความชื้นของวัสดุ หลังผ่านการอบแห้งแล้วความชื้นของวัสดุอบแห้งเป็นตัวบอกถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือวัสดุแห้ง การบอกค่าความชื้นโดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบคือ

เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก

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

เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง

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

เมื่อ

M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, %w.b.

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, %d.b.

w คือ มวลของกึ่ง, kg

d คือ มวลของกึ่งแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

อัตราการอบแห้ง

เป็นตัวแปรที่บอกถึงความเร็วของการลดค่าความชื้นของตัวกึ่ง

$$\text{Drying rate} = \frac{dX}{dt} = \frac{x_0 - x}{t - t_0} \quad (3)$$

เมื่อ

$x_0 - x$ คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้น

$t - t_0$ คือ การเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลา

การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption)

คือดัชนีการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตของผลิตภัณฑ์กึ่งแห้ง คำนวณมีประโยชน์ซึ่งช่วยบอกการใช้พลังงานการสร้างอากาศร้อนสำหรับการผลิตกึ่งแห้ง การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งคืออัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่ใช้ในการสร้างอากาศร้อนสำหรับอบแห้งกึ่งต่อมวลของน้ำที่หายไปในตัวกึ่ง ซึ่งหาได้จากสมการ (4)

$$SEC = \frac{P_{input}}{w - d} \quad (4)$$

เมื่อ

SEC คือ การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)

P_{input} คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)

อัตราการผลิตกึ่งแห้ง

การอัตราการผลิตกึ่งอบแห้งในการทดลองได้อ้างอิง การผลิตกึ่งแห้งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช. 7012-2551) ประเภท กึ่งแห้ง ของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนมวลกึ่งเริ่มต้นต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ระดับค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง 30%d.b. ดังแสดงในสมการที่ (5)

$$PR = \frac{w}{t_p} \quad (5)$$

เมื่อ

PR คือ อัตราการผลิตกึ่งแห้ง (kg/hr)

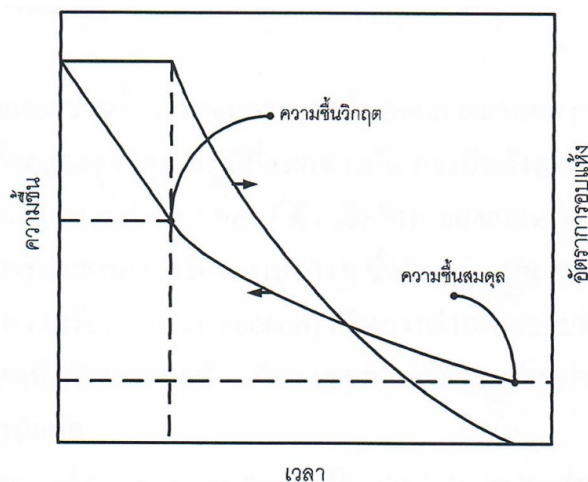
t_p คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งที่ค่าความชื้น 30%d.b. (hr)

2.4 กลไกของการอบแห้ง

การทำแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นวัสดุ จนถึงระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เพื่อให้วัสดุมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา ด้วยการถ่ายเทความร้อนและมวลสารไปพร้อมๆกัน โดยทั่วไปแล้วการทำแห้งมักจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลาง (Drying medium) ในการพาความชื้นออกไปจากวัสดุ ดังนั้นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแห้งจึงได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศร้อน ด้วยเหตุปรากฏการณ์หลักที่เกิดขึ้นกับการทำแห้งด้วยลมร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างวัสดุกับของไหล โดยอาศัยแรงขับเคลื่อนจากความต่างศักย์ของอุณหภูมิและความชื้น กล่าวคือ ความร้อนสัมผัสจากของไหลจะถูกถ่ายเทสู่วัสดุ ทำให้ความชื้นระเหยออกไปกับอากาศ ในขณะเดียวกันไอน้ำก็จะเคลื่อนที่จากผิวหน้าวัสดุไปยังอากาศด้วยความเข้มข้นของความชื้นด้วย การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากวัสดุนั้นมี 2 วิธี ด้วยกัน คือ การเคลื่อนที่ด้วยแรง Capillary จะเกิดกับวัสดุที่มีเซลล์โปร่ง ความพรุนสูง และมีความต่อเนื่องระหว่างเซลล์ โดยมักจะเกิดขึ้นในช่วงต้นของการทำแห้ง และการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (Diffusion) ผ่านเซลล์ จะเกิดกับวัสดุที่มีเนื้อแน่นไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์หรือเกิดกับวัสดุที่ผ่านการทำแห้งไประยะหนึ่ง เซลล์ที่เกิดจากการหดตัวทำให้แรง Capillary หดไป น้ำจึงต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่

การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุจะมีผลต่ออัตราการแห้ง (Drying rate) คือ ถ้าวัสดุมีเนื้อโปร่ง การเคลื่อนที่ด้วยการไหลแบบ Capillary น้ำจะเคลื่อนที่มาที่ผิวได้เร็วกว่าการระเหยกลายเป็นไอทำให้วัสดุเปียกชุ่มไปด้วยน้ำ การระเหยเป็นไปอย่างอิสระด้วยความเร็วคงที่จึงเรียกการทำแห้งช่วงนี้ว่าช่วงอัตราทำ

แห้งคงที่ (Constant rate period) ต่อมาเมื่อมีการไหลแบบ Capillary หมดไป น้ำต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ ซึ่งช้าลงมากจนมาสู่ผิวหน้าไม่ทัน ผิวของวัสดุจึงแห้ง การระเหยเกิดขึ้นได้ช้า ทำให้อัตราเร็วลดลง จึงเรียกการทำให้แห้งช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราทำให้แห้งลดลง (Falling rate period) สำหรับวัสดุที่มีเนื้อแน่น น้ำเคลื่อนที่ได้ช้าจะมีเฉพาะช่วงอัตราการทำให้แห้งลดลงเท่านั้น และเมื่อความชื้นของอากาศภายในตู้อบสมดุลกับความชื้นของวัสดุ การทำให้แห้งจะสิ้นสุดลง และเรียกความชื้นของวัสดุขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ซึ่งจุดเปลี่ยนแปลงระหว่างอัตราทำให้แห้งคงที่และอัตราการทำให้แห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ลักษณะของกราฟอัตราการอบแห้งแสดงในภาพที่ 5 [1]



ภาพที่ 2.2 ผลของความชื้นและอัตราการอบแห้งต่อเวลาในการอบแห้ง

2.5 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการอบแห้ง

- 1 ธรรมชาติอาหาร
- 2 ขนาดและรูปร่าง
- 3 ตำแหน่งของอาหารในเตา
- 4 อุณหภูมิของอากาศร้อน
- 5 ความเร็วของลมร้อน

2.6 เทคโนโลยีเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ

ในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งชนิดต่างๆอย่างมากมาย สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างหลายชนิดกันโดยเครื่องอบแห้งในสมัยก่อนจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่และประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำแต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งให้มีขนาดเล็กกะทัดรัดและมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์มากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสูง และช่วยประหยัดพลังงานมากขึ้นอีกด้วย สำหรับเครื่องอบแห้งที่มีอยู่หลากหลายชนิดยกตัวอย่างเช่น

เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray Drying)

เป็นการอบแห้งโดยนำผลิตภัณฑ์วางใส่ถาดเรียงเป็นชั้นๆ ในตู้อบ ที่มีการเป่าลมร้อนผ่านคอยล์ร้อน เหมาะสำหรับโรงงานขนาดเล็ก ใช้ระยะเวลาในการอบประมาณ 10 ถึง 12 hr เหมาะสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่



ภาพที่ 2.3 เครื่องอบแห้งแบบถาด

เครื่องทำแห้งแบบ Tunnel dryer

เครื่องอบแห้งแบบกึ่งอัตโนมัติที่ยังคงใช้งานอยู่ในปัจจุบันถึงแม้ว่าจะมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องมาใช้เพิ่มมากขึ้นก็ตาม เนื่องจากเป็นเครื่องแบบง่าย สามารถอบผลิตภัณฑ์ไม่จำกัดขนาดและรูปร่าง วิธีการใช้งานคือนำผลิตภัณฑ์ใส่ถาดที่อยู่ในรถซึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านอุโมงค์ลมร้อนตามความยาวจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง อาจออกแบบการเคลื่อนที่ของลมร้อนได้หลายรูปแบบ เช่น เคลื่อนที่สวนทางกับรถ ขนานกับรถ ดูดออกตรงกลาง แบบผสม ฯลฯ ระบบการอบแห้งทั่วไปจะอบแห้ง 3 ช่วงในอุโมงค์ขนาดความยาว 9 m แต่ละช่วงยาวประมาณ 2.1 m กว้าง 1.87 m ลมเคลื่อนที่แบบสวนทางอุณหภูมิตั้งที่ 82-93 °C ลมที่ออกมาจะมีอุณหภูมิกระเปาะเปียก 32 °C ความเร็วลมประมาณ 180-360 m/min สามารถอบแห้งชิ้นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา 6-8 mm ที่มีความชื้นเริ่มต้น 23-24 %d.b. เหลือ 2.5 %d.b. ในเวลา 2-3 hr มีกำลังการผลิต 1,000 lb/hr การใช้ลมร้อนแบบขนานมีข้อดีในการเพิ่มอัตราการระเหยในช่วงแรกและลดการเกิดความเสียหายจากความร้อนได้ แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะสัมผัสกับลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำลงเรื่อยๆ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลงในภายหลังและไม่สามารถลดความชื้นให้ต่ำลงต่อไปได้



ภาพที่ 2.4 เครื่องทำแห้งแบบ Tunnel dryer

เครื่องทำแห้งแบบสายพานเคลื่อนที่ต่อเนื่อง (Belt dryer)

ใช้หลักการเดียวกับ tunnel dryer แต่เปลี่ยนจากถาดเป็นสายพานเคลื่อนที่ต่อเนื่องจึงช่วยลดแรงงานในขั้นตอนการนำเข้าและเอาผลิตภัณฑ์ออก สายพานที่ใช้เป็นสายพานโปร่งความยาวประมาณ 22.5 m กว้าง 2.4 m ใช้เวลาอยู่บนสายพาน 2 hr วิธีการทำงานเริ่มต้นนำผลิตภัณฑ์ใส่บนสายพานความหนาประมาณ 10-15 cm ปรับความเร็วของสายพานให้เหมาะกับผลิตภัณฑ์และความร้อนที่ใช้การอบแห้งสามารถแบ่งเป็นช่วงๆ ได้เช่นเดียวกับ tunnel dryer โดยปรับความเร็วลมความชื้น และ อุณหภูมิของอากาศในแต่ละช่วงให้เหมาะสม และออกแบบให้มีการกลับผลิตภัณฑ์เมื่อมีการเปลี่ยนช่วงได้ ในช่วงแรกของการอบแห้งมักใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าแบบ tunnel dryer เนื่องจากลมร้อนที่ผ่านผลิตภัณฑ์ในสายพานจะผ่านได้ทั่วถึงผลิตภัณฑ์ในขณะที่แบบ tunnel dryer ลมร้อนจะผ่านที่ผิวหน้าเท่านั้นจึงต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการไหม้ การแข็งตัวของผิวหน้า (case hardening) และการเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีน (protein denaturation) อุณหภูมิในช่วงที่สองและสามควรใช้ในระดับที่ต่ำกว่าในช่วงแรกประมาณ 9-12 °C และ 9 °C ตามลำดับ ในกรณีที่อบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้ำตาลสูงซึ่งมักเกิดการติดกับสายพานจึงควรมีแปรงหมุนหรืออุปกรณ์อื่นๆ เพื่อช่วยชะให้ผลิตภัณฑ์ออกมา การลดการเกาะติดสามารถทำได้โดยทาขี้ผึ้งเกรดที่ใช้กับอาหารหรือฉีดพ่นน้ำมันแร่(mineral oil) บนสายพาน



ภาพที่ 2.5 เครื่องทำแห้งแบบสายพานเคลื่อนที่ต่อเนื่อง

การทำแห้งสุญญากาศ (Vacuum drying)

เป็นการระเหยน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดภายใต้บรรยากาศปกติ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพดีแต่กระบวนการนี้จำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและดำเนินการสูง จึงเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีความชื้นต่ำโดยไม่เกิดการทำลายของตัวผลิตภัณฑ์ชนิดของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศมี 4 ชนิดได้แก่

Vacuum shelf dryer เป็นระบบที่ง่ายที่สุดสำหรับเครื่องอบแห้งสุญญากาศเครื่องประกอบด้วยตู้สุญญากาศ ซึ่งภายในมีชั้นรองรับถาดวางผลิตภัณฑ์ ตัวชั้นอาจได้รับความร้อนจากไฟฟ้าซึ่งจะถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารโดยการนำความร้อนหรือใช้อากาศร้อนเป็นตัวพาความร้อนไปยังชั้นผลิตภัณฑ์ตัวตู้สุญญากาศจะต่อกับอุปกรณ์สร้างระบบสุญญากาศที่อยู่ภายนอกตู้ ซึ่งอาจเป็นปั๊มสุญญากาศหรือ steam ejector อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับระบบ คือคอนเดนเซอร์ซึ่งเป็นตัวเก็บไอน้ำอาจอยู่ภายในหรือภายนอกตู้แต่ควรติดตั้งอยู่ก่อนหน้าปั๊มสุญญากาศเพื่อป้องกันไม่ให้ไอน้ำเข้าไปในปั๊ม เครื่องนี้จะเหมาะสำหรับการผลิต

แบบ batch สามารถบำรุงรักษาได้ง่าย เหมาะสำหรับการใช้ระดับสุญญากาศสูงๆสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ในทุกรูปแบบ ตั้งแต่รูปของเหลว ของเหลวข้น ผง ขึ้นๆ



ภาพที่ 2.6 เครื่องทำแห้งสุญญากาศ

- Conical rotating vacuum dryer เป็นการผลิตแบบ batch เป็นถังสุญญากาศทรงกระบอกหมุน ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นไถลอย่างนุ่มนวลผ่านผนังของถังที่หุ้มด้วยชั้นของน้ำร้อนรอบๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์อย่างทั่วถึงเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง และขึ้น และไม่มีการเกาะติดกันหรือติดผนังซึ่งจะทำให้ลดอัตราการถ่ายเทความร้อนและการอบแห้ง
- Rotary vacuum dryer เป็นเครื่องที่มีประสิทธิภาพสูง มีลักษณะเป็นลูกกลิ้งแนวนอนไม่เคลื่อนที่หุ้มด้วยชั้นของน้ำร้อน เป็นการทำงานแบบ batch ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลากหลายและต้องการระดับสุญญากาศสูงๆ
- Continuous vacuum drying เป็นการผลิตแบบต่อเนื่องโดยการอบด้วยระบบด้วยสุญญากาศร่วมกับ belt dryer ให้ความร้อนโดยใช้ infrared heater หรือให้ความร้อนจากแผ่นร้อนด้านบนหรือล่าง จะมีการกลับผลิตภัณฑ์ระหว่างการลำเลียง จากสายพานหนึ่งไปสายพานอีกอันหนึ่งเพื่อให้ผลิตภัณฑ์แห้งอย่างทั่วถึง เหมาะสำหรับผลไม้เป็นชิ้นๆ เม็ดๆต้องใช้เงินลงทุนสูงกว่าแบบ batch เมื่อใช้กำลังการผลิตที่เท่ากัน

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying)



ภาพที่ 2.7 เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ในการอบแห้งทั่วไปจะใช้ความร้อนในการทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยเป็นไอแต่ในกระบวนการนี้ น้ำจะระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยการระเหิดน้ำเป็นไอ ดังนั้นจึงไม่มีการเคลื่อนที่ของน้ำจากกึ่งกลางชั้น ไปยังผิวหน้า ในระหว่างกระบวนการระเหิดชั้นน้ำแข็งจะลดลงจากผิวหน้าไปหาจุดกึ่งกลางเหลือแต่ ช่องว่างเดิมที่เคยมีน้ำแข็งแทรกอยู่ ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถรักษากลิ่นรสและคุณค่าทางโภชนาการได้ดี มาก เกิดการทำลายโครงสร้างและเนื้อสัมผัสน้อยมาก เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสี และลักษณะภายนอก น้อย เกิดโพรงในโครงสร้างทำให้เกิดการดูดน้ำกลับได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์สำหรับข้อเสียของวิธีนี้คือ ลงทุนสูง ใช้ค่าใช้จ่ายสูงในการทำแห้ง จำเป็นต้องทำการหั่นเป็นชิ้นลูกเต๋าและแผ่นเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ แห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้างเปิดจำเป็นต้องใช้ภาชนะบรรจุพิเศษเพื่อป้องกันการดูดน้ำกลับและการ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในการทำแห้งแบบนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือการนำผลไม้มาแช่แข็งปกติ และ ทำแห้งให้เหลือความชื้น 2% d.b. ในห้องสุญญากาศขณะที่ผลไม้ยังแข็งอยู่อัตราการแช่แข็งอาจจะส่งผลต่อ คุณสมบัติในการดูดน้ำกลับของผลิตภัณฑ์ที่แห้ง เนื่องจากลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัย ดังกล่าวโดยทั่วไปอัตราการแช่แข็งที่เร็วจะทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กกว่าอัตราการแช่แข็งที่ช้าทั่วไปสำหรับ ผลไม้จะแช่แข็งโดยใช้ air blast freezer หรือ cryogenic freezing โดยจุ่มผลไม้ในโตรเจนเหลวหรือ คาร์บอนไดออกไซด์เหลวในภาชนะสแตนเลสหุ้มฉนวนการแช่แข็งด้วยวิธี cryogenic freezing จะทำให้ เกิดผลเสียต่อเนื้อสัมผัสน้อยกว่าวิธีแช่แข็งโดยใช้ air blast ผลไม้อาจทำการลดความเย็นเบื้องต้นก่อน นำมาจุ่มในไนโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์เหลวปัจจุบันได้พัฒนาระบบ cryogenic freezing ในเชิง พาณิชย์โดยการพ่นไนโตรเจนเหลวลงบนผลิตภัณฑ์นอกจากนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกของผลิตภัณฑ์ที่ เปราะบาง จึงได้มีการพัฒนาเครื่องที่สร้างหยดของไนโตรเจนเหลวในสถานะของไอแทนของเหลว เครื่องที่ ใช้ทั่วไปจะมีลักษณะเป็นตู้ซึ่งมีลักษณะเหมือนตู้อบสุญญากาศแต่มีลักษณะเฉพาะซึ่งจำเป็นสำหรับ กระบวนการ freeze drying ผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาทำแห้งจะวางบนถาดซึ่งมีแผ่นนำความร้อนคั่นระหว่าง ถาด แผ่นนำความร้อนอาจทำความร้อนโดยใช้ไฟฟ้าหรือใช้ไอน้ำน้ำร้อน หรือน้ำมัน ก่อนที่จะเริ่มให้ความ ร้อนจะต้องมีการดึงอากาศออกจากตู้เพื่อสร้างสุญญากาศโดยใช้ปั๊มสุญญากาศหรือ steam ejector การ ดึงอากาศออกจะต้องทำอย่างรวดเร็วทันทีที่นำผลิตภัณฑ์ใส่เข้าไปในตู้เพื่อให้แน่ใจว่าผลิตภัณฑ์ไม่มีการ ละลายก่อนการระเหิดของน้ำแข็ง ควรรักษาระดับสุญญากาศไว้ที่ต่ำกว่า 1 Torr เพื่อให้ไอน้ำยังคงเป็น น้ำแข็งก่อนที่จะระเหิด น้ำที่ระเหิดออกจากถูกควบแน่นและทำให้เป็นน้ำแข็งด้วยคอนเดนเซอร์เย็นที่รักษา อุณหภูมิที่ผิวหน้าให้ต่ำกว่าอุณหภูมิของน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์จึงมักจะ แทนที่อากาศในสภาพสุญญากาศด้วยแก๊สไนโตรเจนเพื่อป้องกันการดูดออกซิเจนจากรูพรุนของผลิตภัณฑ์ แห้ง จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์บรรจุภายใต้แก๊สไนโตรเจนในภาชนะบรรจุที่ป้องกันการถ่ายเทอากาศและไอน้ำ กระบวนการนี้ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งผลไม้หลายชนิดเช่น สตอเบอรี่ เชอรี่ บลูเบอรี่ ขนุน มะม่วง กล้วย สับปะรด ฝรั่ง ส้ม มะนาว ฯลฯแต่ยังมีปัญหาในเรื่องต้นทุนที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบรรจุ กระป๋องหรือการแช่เยือกแข็งและเทคนิคการทำแห้งอื่นๆและมีข้อจำกัดสำหรับขนาดชิ้นของผลิตภัณฑ์ที่ นำมาทำแห้ง

การทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying)

เป็นการทำให้น้ำผลไม้กลายเป็นผงโดยการพ่นน้ำผลไม้เข้าไปใน chamber ที่มีการพ่นลมร้อนเพื่อทำ ให้ความชื้นระเหยออกไป Drum dryer ใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ น้ำผลไม้ น้ำผลไม้เข้มข้นจนถึง puree โดยการทำให้ผลิตภัณฑ์เคลือบที่ผิวลูกกลิ้งร้อนเป็นแผ่นบางเพื่อระเหิดน้ำในผลิตภัณฑ์ระยะเวลาที่ ผลิตภัณฑ์อยู่บนลูกกลิ้งอยู่ในช่วงระหว่าง 2 วินาทีจนถึง 2-3 นาที เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งมีทั้งแบบ ลูกกลิ้งคู่และเดี่ยวทั้งภายใต้บรรยากาศธรรมดาและสุญญากาศ วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้ต้นทุนต่ำ แต่ใช้ได้ เฉพาะกับผลิตภัณฑ์ที่ทนทานต่อความร้อนไม่ค่อยเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ผลไม้ เนื่องจากมักทำให้เกิด

กลืนสุก และการที่มีปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์มากมักทำให้เกิดการเกาะติดกันที่ผิวของลูกกลิ้งเอาออกได้ยากจึงอาจต้องใช้อากาศเย็นพ่นไปยังแถบเล็กๆ ของผลิตภัณฑ์ก่อนการชูดอก จะทำให้ชูดอกได้ง่ายขึ้น ภาชนะบรรจุ หลังจากการอบแห้งควรทิ้งผลไม้นี้ให้เย็น 30-60 min ก่อนการบรรจุ หลีกเลี่ยงการบรรจุขณะผลิตภัณฑ์ยังร้อนหรืออุ่นเพื่อป้องกันการเกิดเหงื่อเกิดขึ้นภายในภาชนะแต่หากทิ้งไว้นานเกินไปอาจทำให้ความชื้นถูกดูดกลับเข้ามาในผลิตภัณฑ์อีกได้ ระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แห้งจะขึ้นอยู่กับภาชนะบรรจุเป็นหลักภาชนะบรรจุที่เหมาะสมควรจะสามารถป้องกันผลิตภัณฑ์จากความชื้น แสง อากาศ ฝุ่น เชื้อจุลินทรีย์กลิ่น สัตว์ ฯลฯ ได้ดี แข็งแรงทนทาน สามารถสัมผัสกับผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างปลอดภัย ราคาเหมาะสม ภาชนะบรรจุประเภทโพลีเอทิลีน กระจก โลหะที่มีฝาปิดมิดชิดจะเป็นวัสดุที่ดีถุงพลาสติกสามารถใช้ได้แต่ไม่สามารถป้องกันหนูและแมลงได้ การบรรจุควรใช้ปริมาณการบรรจุที่เหมาะสมเนื่องจากการเหลือผลิตภัณฑ์ในถุงเมื่อเปิดใช้แล้วมักทำให้เกิด การดูดความชื้นกลับและทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้อยลง



ภาพที่ 2.8 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไซ์เบด (Fluidized bed dryer)

เป็นการอบแห้งโดยการใช้ลมร้อนเป่า ขึ้นของอาหารขนาดเล็กให้ลอยขึ้นจากด้านล่างของชั้นอาหารออกทางด้านบนเป็นกระบวนการอบแห้งแบบต่อเนื่อง เวลาที่ชั้นอาหารอยู่ในเครื่องอบจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นอาหาร



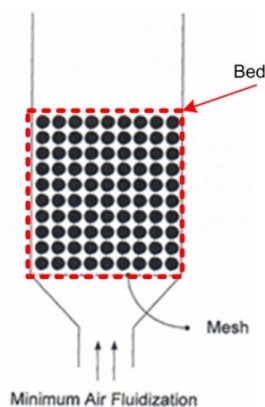
ภาพที่ 2.9 เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไซ์เบด

2.7 ฟลูอิดิเซชัน

คำว่า ฟลูอิดิเซชัน เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีคุณสมบัติคล้ายอนุภาคของไหล ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดหรือชิ้นของแข็งดังกล่าว โดยเริ่มจะถูกวางไว้บนตะแกรงในหอทอดลองที่มักจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ปัจจุบันดัดแปลงให้อยู่ในแนวนอนก็มี ของไหลที่นิยมใช้คือก๊าซ หรือของเหลวที่ปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็งที่มีของไหลจะผ่านชั้นเม็ดของแข็ง แล้วไหลออกทางส่วนบนของหอทอดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้เม็ดของแข็งขยับตัว และลอยขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน เม็ดของแข็งที่อยู่ในลักษณะแบบนี้ จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล กล่าวคือ มีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในหอทอดลอง หรือระหว่างเบตต่อบेतก็ได้ เราจึงเรียกเม็ดของแข็งในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดิเซชัน [9]

1 ลักษณะของฟลูอิดิเซชันเบต

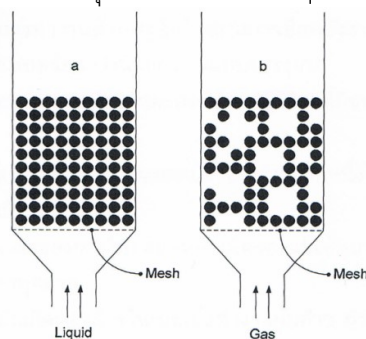
คำว่า เบต (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอทอดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทอดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือ ผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอทอดลองดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ลักษณะของชุดฟลูอิดิเซชันเบต

โดยเมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอทอดลองตามต้องการแล้ว เมื่อปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอทอดลองอย่างช้าๆ ขณะที่ความเร็วของไหลยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบตเช่นนี้เรียกว่า เบตนิ่ง (Fixed bed) เมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดิเซชัน ในภาษาอังกฤษเขียนได้หลายแบบคือ fluidizing point หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เบตขยายตัวขึ้นตามความเร็วของของไหลเม็ดของแข็งยังชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับเป็นกลุ่มก้อน เบตลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดิเซชันเบตแบบหนาแน่น (dense-phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอทอดลอง เบตลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดิเซชันเบตเจือจาง (diluted-phase fluidized bed) และหลังจากเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งจะหลุดลอยออกจากหอทอดลองไป ลักษณะนี้เราใช้ในการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ ถ้าใช้อากาศก็เป็นการขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatics transport) เช่นการลำเลียงผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ เป็นต้น ถ้าเป็นของเหลวก็เรียกว่าขนส่งด้วยของเหลว (Hydraulics transport) ตัวอย่างเช่นการขนส่งเม็ดแร่

ฟลูอิดไชน์เบดที่ไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบด เป็นไปอย่างสม่ำเสมอการลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบดนี้ว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Particulated bed of Homogeneously bed or smoothly fluidized bed or liquid fluidized bed) ดังภาพที่ 2.11a ฟลูอิดไชน์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไชน์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อให้เกิดฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซจะแทรกตัวเองขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดแล้วแตกตัวเองในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไปด้วยภายในเบดจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างสุ่มวนวุ่นวายเบดชนิดนี้เรียกว่าฟลูอิดไชน์เบดวุ่นวาย หรือเรียกสั้นๆ ว่าเบดวุ่นวาย ดังภาพที่ 2.11b



ภาพที่ 2.11 พฤติกรรมของฟลูอิดไชน์เบด

2 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไชน์เซชัน

จากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นทำให้เราเห็นได้ว่า ฟลูอิดไชน์เบดนั้นแตกต่างไปจากระบบอื่นๆ อาทิเช่น เบดนิ่ง (Fixed bed) หรือเบดบรรจุ (Packed bed) เป็นต้น ซึ่งข้อได้เปรียบและเสียเปรียบระหว่างการใช้นี้เทคนิคฟลูอิดไชน์เบดกับเทคนิคอื่นๆ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ข้อได้เปรียบ

- 1 เนื่องจากเม็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอดซึ่งต่างจากเบดนิ่งหรือเบดบรรจุอุณหภูมิจะไม่เท่ากัน
- 2 มีการจัดเรียงตัวกันของเม็ดของแข็งที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก
- 3 จากคุณสมบัติที่คล้ายกับของไหลจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเติมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำงานง่าย
- 4 การที่เม็ดของแข็งไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบด เม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวทำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่าเพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบความเร็วให้กับของไหลอันเดียวกัน ฟลูอิดไชน์เบดจึงเหมาะสมกับขบวนการที่มีปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนหรือดูดความร้อนจำนวนมากๆ
- 5 พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบดนิ่งที่ใช้จำพวกเม็ดของแข็งเท่ากันจึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร

6. การทำงานด้วยฟลูอิดจะสูญเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทานและความดันตกคร่อมของเบตน้อยกว่าในแบบบรรจุมาก
7. สามารถกำจัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้โดยไม่ต้องหยุดทำงาน
8. สามารถใช้ในการส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

ข้อเสียเปรียบ

1. เวลาของการไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบตสูงๆ หรือเบตหลายชั้น ซึ่งเปลืองเงินทุนมาก
2. มักเกิดฟองก๊าซในเบตเมื่อทำงานกับก๊าซ ทำให้การสัมผัสไม่ดี เป็นการสูญเสียเปล่า ถ้ายังเป็นขบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว จะทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง
3. เนื่องจากการผสมกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งเม็ดของแข็งมีช่วงเวลาอยู่ในเบตสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องจะทำให้ผลลัพธ์เลวลง หรือเม็ดของแข็งมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ตรงตามกำหนด
4. การทำงานมีข้อกำหนดเพราะถ้าให้ความเร็วของของไหลสูงเกินไป เม็ดของแข็งก็จะลอยออกเบตไปพร้อมกับของไหล
5. ในปฏิกิริยาที่ทำให้ตัวเร่งมีขนาดลดลง เราต้องคอยปรับความเร็วของก๊าซเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปลิวไป ทำให้เกิดผลผลิตน้อยลง
6. เกิดการสันดาปของหอตลอด หรือเกิดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากเม็ดของแข็งมากระทบกับผนังของหอตลอด
7. ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปราะหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบต

2.8 หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer)

คือ การที่ความร้อนเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้จะเกิดขึ้นก่อก่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น แต่กลไกในการที่จะทำให้การเคลื่อนที่ของความร้อนแต่ละวิธีแตกต่างกัน

การพาความร้อน (convection)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนเกิดขึ้นระหว่างผิวของแข็งและของไหลในบริเวณใกล้เคียงกันที่มีอุณหภูมิต่างกัน ทั้งนี้ของไหลที่กล่าวถึง ได้แก่ ก๊าซ หรือ ของเหลว เป็นต้น ของไหลนี้เปรียบเสมือนตัวพาความร้อน เกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ

1. การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection)

คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลไม่ถูกทำให้เคลื่อนไหวโดยกลไกภายนอก วัตถุซึ่งมีผิวเรียบอยู่ในของไหลซึ่งอยู่นิ่งถ้าอุณหภูมิของผิวสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล ความร้อนจะเริ่มเคลื่อนที่มายังของไหลที่ติดกับผนัง ทำให้ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ติดผนังต่ำลง ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักดันให้ของไหลที่ต่ำกว่า ก็จะเคลื่อนเข้ามาแทนที่ และทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหล

เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในกรณีนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณต่างๆหลายปริมาณ เช่น คุณสมบัติต่างๆของของไหล ขนาดและลักษณะของของแข็ง อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างของไหลและพื้นผิว นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของสาร ซึ่งมีผลต่อแรงลอยตัวของสารก็ยังมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนด้วย

2. การพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)

ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อของไหลมีความเร็วอยู่แล้วด้วยกลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือสูบน้ำ เมื่อของไหลมีความเร็ว เราจะต้องทราบกลไกในการเคลื่อนที่ของของไหลก่อน โดยปกติ เราจะแบ่งการไหลของของไหลเป็นสองแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในกรณีไหลแบบราบเรียบ ซึ่งของไหลไหลเป็นชั้นๆ ขนานกับความร้อน จะถ่ายเทจากผิวของของแข็ง โดยการนำและถ่ายเทต่อกันไปในของไหลโดยการนำผ่านชั้นของของไหล ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่มีการเรียงแบบการเคลื่อนที่ที่ตรงกันกับทิศทางของการไหลด้วย การเคลื่อนที่ของความร้อนส่วนใหญ่ จะเกิดจากอนุภาคของของไหลที่ได้รับความร้อนมาแล้วเคลื่อนที่นำความร้อนไปยังที่อื่น ดังนั้นยิ่งการไหลแบบปั่นป่วนมากเท่าใด การเคลื่อนที่ของความร้อนจะยิ่งมากขึ้นเท่านั้นในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง การพาโดยการบังคับของการเคลื่อนที่ของของไหล

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนหาได้จากสมการที่ 2.6 ซึ่งเขียนได้ดังนี้คือ

$$Q_a = hA(T_h - T_c) \quad (2.6)$$

โดยที่	Q_a	= พลังงานจากการพาความร้อน (W)
	h	= สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศ ($W/m^2\text{ }^{\circ}C$)
	A	= พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
	T_h	= อุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}C$)
	T_c	= อุณหภูมิของของไหล ($^{\circ}C$)

สมการนี้เป็นสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ในกรณีทั่วๆไป ปริมาณที่สำคัญที่สุดในสมการนี้ก็คือ (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน)

ถ้ารู้ค่าของ h จะคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ จะเห็นว่า มีปริมาณต่างๆมากมายที่มีอิทธิพลต่อการพาความร้อน เช่น ลักษณะและการวางตัวของพื้นผิว ความเร็วของของไหล (ในกรณีของการพาโดยบังคับ) ความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างพื้นผิวและของไหล (ในกรณีของการพาตามธรรมชาติ) เพราะปริมาณนี้จะทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหลขึ้น คุณสมบัติต่างๆของของไหล เช่น ความหนาแน่น (ρ) ความหนืด (μ) ค่าการนำความร้อน (k) ความร้อนจำเพาะ (C_p) เป็นต้น

การนำความร้อน (Conduction)

กลไกของการนำความร้อน เกิดจากการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงไปยังโมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เกิดขึ้นในสสารที่มีสภาพเป็นของแข็งที่มีการสัมผัสกันซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแต่ละวัสดุนั้น ดังสมการที่ 2.7 ซึ่งอธิบายการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน

$$Q_b = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.7)$$

โดยที่	Q_b	= พลังงานจากความร้อน (W)
	k	= สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m^2\text{ }^{\circ}C$)
	A	= พื้นที่หน้าตัด (m^2)
	$\partial T / \partial x$	= การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหล ($^{\circ}C$)

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

กลไกการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีมีความแตกต่างจากการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำและการพาความร้อน เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนไม่ต้องอาศัยตัวกลาง โดยถ่ายเทความร้อนในรูปของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) ดังสมการที่ 2.8

$$Q_c = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_r^4) \quad (2.8)$$

โดยที่	Q_c	= พลังงานจากการแผ่รังสีความร้อน (W)
	σ	= ค่าคงที่ของสเตฟานและโบลซ์แมน ($W/m^2 K^4$)
	ε	= ค่าสัมประสิทธิ์การคายรังสีความร้อน
	A	= พื้นที่ผิว (m^2)
	T_s	= อุณหภูมิผิววัตถุ (K)
	T_r	= อุณหภูมิอากาศในห้องปฏิบัติการ (K)

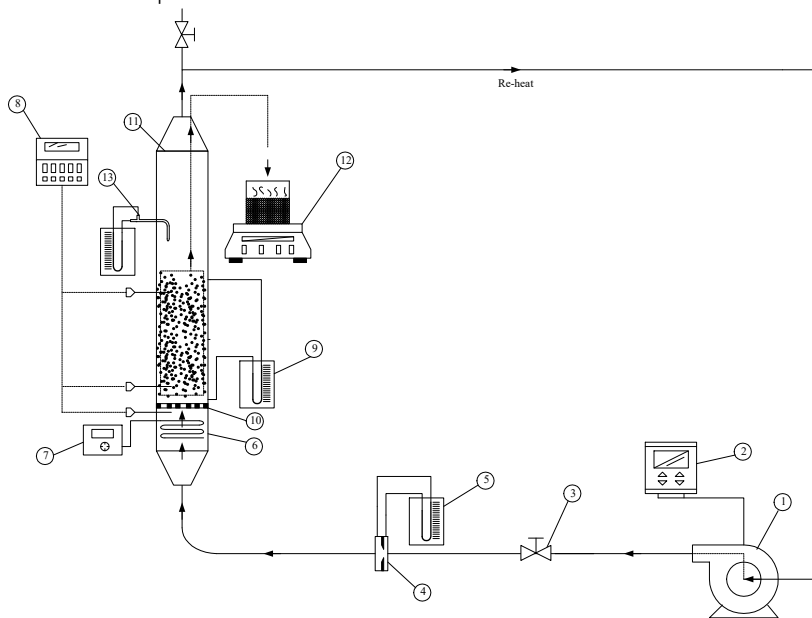
2.9 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

จากปัญหาของการทำแห้งกุ้งด้วยวิธีการตากแดดที่ต้องใช้พื้นที่และระยะเวลาในการตากแห้งนาน อีกทั้งยังไม่สามารถควบคุมคุณภาพได้ งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยอาศัยการทำแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เซชันในเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการอบแห้งกุ้งฝอย กุ้งขาวขนาดกลาง และกุ้งขาวขนาดใหญ่ ด้วยขนาดของกุ้งที่ใช้ในการอบแห้งไม่เท่ากัน เจือปนของอุณหภูมิอากาศร้อน ความเร็วของอากาศร้อน และความหนาเบด ที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งกุ้งแต่ละขนาดจึงไม่เหมือนกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดหาความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งกุ้งที่เหมาะสม ซึ่งอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าเท่ากับ 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ โดยพิจารณาที่ความสูงของเบด (H/D) มีค่าเท่ากับ 1/3, 2/3 และ 1.0 ตามลำดับ เพื่อให้ทราบถึงเงื่อนไขของการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องอบแห้งกุ้งแบบฟลูอิดซ์เบด

Input	Process	Output	Outcome
- กุ้งสด - พลังงานความร้อน - อากาศร้อน - เทคนิคฟลูอิดซ์เซชัน	- กำหนดตัวแปรอุณหภูมิของอากาศร้อน ความเร็วที่ใช้ในการอบแห้ง และความหนาของชั้นเบด - ออกแบบชุดอบแห้งฟลูอิดซ์เบด ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน ระบบจ่ายอากาศ และระบบควบคุม - สร้างเครื่องอบแห้งกุ้งแบบฟลูอิดซ์เบด - ทดลองอบแห้งกุ้งตามขอบเขตเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของ เวลาในการอบแห้ง พื้นที่ในการอบแห้ง คุณภาพของกุ้งแห้ง และต้นทุนด้านพลังงาน - วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และจุดคุ้มทุน - สรุปผล ข้อดีข้อเสีย พร้อมทั้งคำแนะนำ เพื่อการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการอบแห้ง	- ได้เงื่อนไขของอากาศร้อนที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งกุ้ง - ได้เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบด ที่มีประสิทธิภาพสูง - ลดการใช้พลังงาน ลดระยะเวลาในการอบแห้ง ลดพื้นที่สำหรับการอบแห้ง และเพิ่มคุณภาพกุ้งแห้ง - ได้วิธีและหลักการสำหรับประยุกต์ใช้ในการอบแห้งอุตสาหกรรมอาหารชนิดอื่นๆ	- ได้เครื่องต้นแบบอบแห้งกุ้งสำหรับให้ประชาชนและผู้ประกอบการด้านอาหารทะเลแห้งมาศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้ได้ตามความเหมาะสม - จดสิทธิบัตร

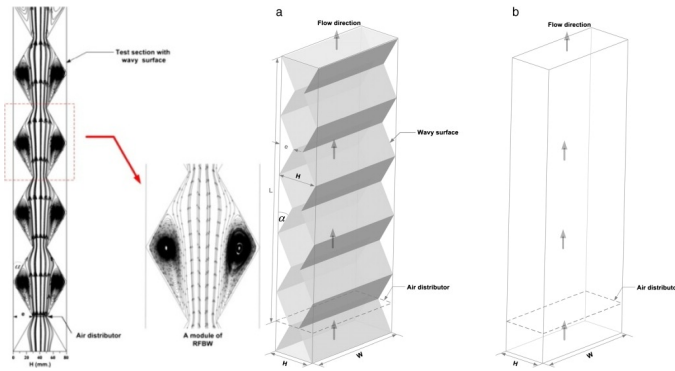
2.10 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่องการอบแห้งหรือการทำแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เซชันกับอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีการผลิตที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ควบคุมกระบวนการผลิตให้มีมาตรฐานได้ง่าย มีการคลุกเคล้าและสัมผัสกับลมร้อนอย่างสม่ำเสมอ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสูง สามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้อย่างรวดเร็ว และเก็บรักษาได้นาน ที่ผ่านมานักวิจัยได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องจากการใช้แบบทดสอบมาตรฐาน Abid *et al.* [2], Kaensup *et al.* [3], Reyes *et al.* [4] and Soponronnarit *et al.* [5] ดังเช่นในงานของ Tudtong *et al.* [6] ได้ทำการศึกษารอบแห้งเม็ดกาแฟโดยการใช้เทคนิคฟลูอิดไรซ์เบด (ดังภาพที่ 2.12) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิการอบแห้งและความเร็วของอากาศภายในหอทดลองที่ต่างๆ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับนักวิจัยท่านต่างๆที่ศึกษามาในอดีต



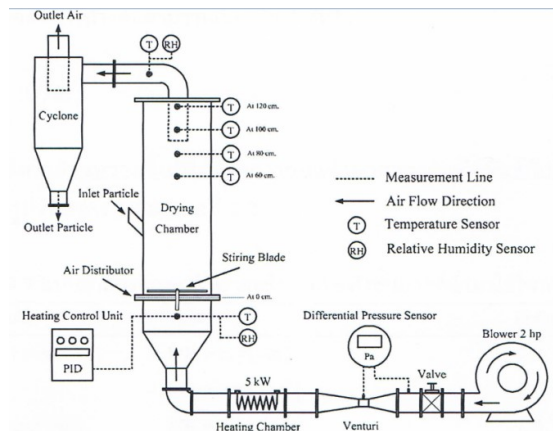
ภาพที่ 2.12 ชุดทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟโดยการใช้เทคนิคฟลูอิดไรซ์เบด [6]

ทั้งนี้ในงานนักวิจัยบางท่านได้ทำการปรับปรุงร่างกายในหอทดลองใหม่เพื่อให้เกิดการคลุกเคล้าดีขึ้น ดังเช่นงานของ Promvong *et al.* [7] (ดังภาพที่ 2.13) ซึ่งได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดและแบบผิวคลื่นโดยทำการอบในหอทดลองที่ภายในหอจะใส่ผิวคลื่น การทดลองพบว่าในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดธรรมดาความเร็วลมไม่มีผลต่อการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย แต่ในการอบแห้งด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่มีการใส่ผิวคลื่นในหอทดลองพบว่าความเร็วลมมีผลต่อการลดความชื้นของเมล็ดพริกไทยและช่วยให้ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดพริกไทยระเหยออกได้เร็วขึ้นเนื่องจากผิวคลื่นทำให้เมล็ดพริกไทยมีการสั่น และไหลอย่างปั่นป่วนของลมร้อนจะช่วยให้เกิดการกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยในหอทดลองเพิ่มมากขึ้น ทำให้เพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน ส่งผลให้การอบแห้งเร็วขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 เทคนิคจะพบว่าการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่มีการใส่ผิวคลื่นให้ผลที่ดีกว่าแบบฟลูอิดไรซ์เบดธรรมดา โดยสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ถึง 30 %d.b.



ภาพที่ 2.13 การอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซนต์ในหอดทดลองผิวดคลื่น [7]

นอกจากนั้น Madhiyanon et al. [8] ได้นำเสนอโมเดลการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของอัตราการอบแห้งของมะพร้าวเกล็ดแบบบาง ซึ่งได้ทำการทดลองการอบแห้งจากเครื่องฟลูอิดไคเซนต์ ดังแสดงในภาพที่ 2.14 โดยได้ศึกษาถึงผลของความชื้นอากาศและอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งระหว่าง $70-120^{\circ}\text{C}$ และ $0-40\%$ ตามลำดับ โดยผลเบื้องต้นมีแนวโน้มเดียวกันกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือ ค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อหารูปแบบที่สามารถทำนายความชื้นสมดุลได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการอบแห้งของมะพร้าวเกล็ดยังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 2.14 ชุดทดลองการอบแห้งมะพร้าวเกล็ดแบบชั้นบางด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซนต์ [8]

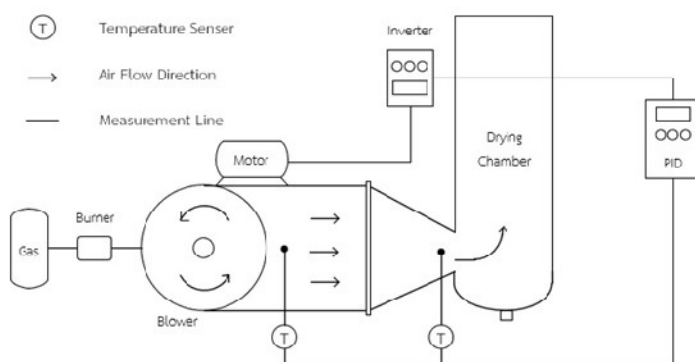
นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายๆ ท่านได้ใช้เทคนิคฟลูอิดไคเซนต์สำหรับการให้ความร้อนกับถั่วเหลืองโดย ปัญญา ตีระกิจวัฒนา [10] อีกทั้ง คะเน็งนิตย์ จัปใจเหมาะ [11] ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซนต์ ซึ่งข้าวเปลือกพันธุ์ กข. 10 ข้าวเปลือกหอมมะลิ และข้าวโพดเป็นผลงานวิจัยของ มานิต สุจ้านงค์, วชรินทร์ ดงบัง และ กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย [12], สมบัติ กำมอญ, สมเกียรติ ปรีชญารากร, ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์, พชร ตั้งตระกูล และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ [13] และ อนันต์ พงศ์ธกรกุลพานิช [14] ตามลำดับ ซึ่งล้วนแล้วเป็นที่ช่วยยืนยันให้เห็นถึงความสามารถของการอบแห้งจากการใช้เทคนิคฟลูอิดไคเซนต์ได้เป็นอย่างดี

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

ในการศึกษาการอบแห้งกึ่งด้วยระบบฟลูอิดไชน์เบด ที่ประกอบด้วยชุดทดลองและอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงส่วนประกอบของชุดอบแห้งกึ่งด้วยระบบฟลูอิดไชน์เบด และหลักการทำงานของอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งกึ่งด้วยระบบฟลูอิดไชน์เบดโดยชุดทดลองเครื่องอบแห้งกึ่งด้วยระบบฟลูอิดไชน์เบด ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้



ภาพที่ 3.1 แผนภาพอุปกรณ์การทดลอง



ภาพที่ 3.2 เครื่องอบแห้งกึ่งแบบฟลูอิดไชน์เบด

3.1.1 ชุดหัวเผา (Burner)

หัวเผา ที่ออกแบบให้หัวจ่ายแก๊สอยู่ภายในท่อกลมใจกลางเตาที่มีหัวจ่ายมีรูจ่ายเป็นไปในทิศทางเดียวกันในแนววงกลม การจัดวางดังกล่าวทำให้เปลวไฟลุกโชนเป็นไปตามร่องที่ช่วยดูดดึงเอาอากาศเข้ามาผสมกับแก๊ส LPG ได้เต็มที่ ทำให้เกิดการลุกไหม้ที่สมบูรณ์แบบ ได้เปลวไฟที่เป็นสีฟ้าความร้อนสูง



ภาพที่ 3.3 หัวเผา



ภาพที่ 3.4 ถังแก๊ส LPG

3.1.2 เซ็นเซอร์อุณหภูมิ (TEMPERATURE SENSOR)

คือ เซ็นเซอร์เพื่อการรับรู้หรือตรวจวัดระดับอุณหภูมิ เริ่มแรกการพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมินั้นมาจากความต้องการในอุตสาหกรรม เครื่องปรับอากาศต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจวัดที่มีคุณสมบัติหลายอย่าง (Multisensor)



ภาพที่ 3.5 เซ็นเซอร์อุณหภูมิ

3.1.3 พัดลม

โดยปกติพัดลมจะแบ่งตามลักษณะการไหลของของไหลที่ไหลผ่านใบพัดและลักษณะโครงสร้างของพัดลม ซึ่งแบ่งตามลักษณะการไหลของของไหลที่ไหลผ่านใบพัดจะมี 2 แบบคือ พัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแบบไหลตามแนวแกน ในการทดลองครั้งนี้ใช้พัดลมแบบริงโบลเวอร์ ซึ่งเป็นพัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง



ภาพที่ 3.6 พัดลม

3.1.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส (A.C. Three phase Motor) เป็นมอเตอร์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมต้องใช้ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ใช้แรงดัน 380 โวลต์ มีสายไฟเข้ามอเตอร์ 3 สาย จะขั้วสายพานเพื่อส่งกำลังไปให้พัดลมทำงาน



ภาพที่ 3.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส

3.1.5 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

เครื่องควบคุมอุณหภูมิ หรือ Temperature Controller คือ อุปกรณ์สำหรับวัดและควบคุมอุณหภูมิ ในบริเวณที่ใช้งานซึ่งเหมาะสำหรับห้องควบคุมอุณหภูมิ, อุตสาหกรรมอาหาร, ห้องอบ, ห้องแช่เย็น ที่มีปัญหาในการควบคุมอุณหภูมิ ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ หรือวัสดุที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิ



ภาพที่ 3.8 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

3.1.6 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) จะแปลงไฟกระแสสลับ (AC) จากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปที่มีแรงดันและความถี่คงที่ ให้เป็นไฟกระแสตรง (DC) โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter Circuit) จากนั้นไฟกระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟกระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) วงจรทั้งสองนี้จะเป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่น และผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์

โดยทั่วไปแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับมีรูปคลื่นไซน์ แต่เอาต์พุตของ Inverter จะมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปไซน์ นอกจากนั้นยังมีชุดวงจรควบคุม (Control Circuit) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของ 3-phase Induction motor



ภาพที่ 3.9 อินเวอร์เตอร์

3.1.7 เครื่องวัดความชื้น

การวัดความชื้นในกึ่งมีความสำคัญอย่างมากเพราะปริมาณความชื้นในกึ่งมีผลต่อน้ำหนัก คุณภาพ ความสดหรือการเก็บรักษา ในการรับซื้อกึ่ง จะพิจารณาตรวจสอบน้ำหนัก ความชื้นสิ่งเจือปน และคุณภาพกึ่งอื่นๆ เพื่อกำหนดราคาซื้อขาย

ถ้ากุ้งมีความชื้นเกินขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับความสดหรือการเก็บรักษาก็จะหักลดราคาหรือหักลดน้ำหนักกุ้งที่นำมาขายเพราะผู้ซื้อจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลดความชื้นกุ้งที่ซื้อให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับความสดหรือการเก็บรักษา และเสียน้ำหนักของกุ้งที่ซื้อไปในการลดความชื้น



ภาพที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์ความชื้น Kett FD-660

3.1.8 ตาชั่ง

ความสามารถของการชั่งน้ำหนัก โดยค่าน้ำหนักที่ได้ต้องมีค่าเท่าเดิมภายในสภาพแวดล้อมเดิมเมื่อเวลาผ่านไป ในความเป็นจริงทำได้ยากมากโดยทั่วไปแล้วเครื่องชั่งที่มีความละเอียด สูงมากๆ การวัดความเสถียรไม่ได้ขึ้นอยู่กับเครื่องชั่งเท่านั้น ยังมีสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อค่าน้ำหนักอีก เช่น กระแสลม อุณหภูมิ แรงสั่นสะเทือน ซึ่งขึ้นอยู่กับทักษะของผู้ชั่งว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้อย่างไรให้ส่งผลกระทบน้อยที่สุด



ภาพที่ 3.11 ตาชั่ง

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

โครงการวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งกึ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดิเซชันของกึ่งแต่ละขนาดซึ่งมีวิธีการดำเนินการวิจัยเป็นขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการอบแห้ง
2. กำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่ออัตราการอบแห้งเช่น อุณหภูมิของอากาศร้อน ความเร็วที่ใช้ในการอบแห้ง และความหนาของชั้นเบด
3. ออกแบบชุดอบแห้งฟลูอิดิเซชันซึ่งประกอบไปด้วย

13.3.1 ออกแบบหอบแห้ง

13.3.2 ออกแบบชุดแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้สำหรับสร้างอากาศร้อน

13.3.3 ออกแบบระบบจ่ายอากาศและระบบควบคุม

4. สร้างชุดอบแห้งแบบฟลูอิดิเซชัน

5. ทดลองอบแห้งกึ่งตามขอบเขตเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดโดยเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมของผู้ประกอบการเช่น

- เวลาในการอบแห้ง
- พื้นที่ที่ใช้ในการอบแห้ง
- คุณภาพของกึ่งแห้ง

โดยการทดลองเริ่มจากต้มกึ่ง 5-10 min เมื่อต้มเสร็จแล้วนำกึ่งมาชั่งมวล หลังจากนั้นจึงนำกึ่งที่วัดมวลเรียบร้อยแล้วมาใส่ในเบดของเครื่องอบแห้ง โดยมีมอเตอร์ที่มีขนาด 2 HP เป็นตัวขับสายพานส่งกำลังไปยัง Blower เป็นตัวจ่ายลมเข้าไปที่ทรงกรวยโดยควบคุมความเร็วด้วยชุดควบคุมความเร็ว โดยที่อากาศในเครื่องอบแห้งถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยชุดหัวเผาแก๊ส LPG เป็นตัวให้ความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ในการทดลองกึ่งจะถูกชั่งมวลที่ลดลงจากค่าน้ำหนักของกึ่งแห้งที่เปลี่ยนไปซึ่งจะทำการวัดทุกๆ 10 min โดยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลที่มีค่าความละเอียด 0.001 g โดยใช้เวลาในการอบแห้งแต่ละเงื่อนไขของการทดลองที่ $h/D=1/3$, $2/3$ และ 1 ที่อุณหภูมิของอากาศที่ 60, 70 และ 80 °C และกึ่งขนาดเล็ก กลาง และ ใหญ่ ตามลำดับ ในการควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนด และภายใต้การจ่ายกำลังขับเคลื่อนที่ของมอเตอร์ซึ่งผ่านชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 40 Hz ที่ความเร็วรอบ 2,800 rpm

6. วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และระยะคุ้มทุน

7. สรุปผล ข้อดีข้อเสีย พร้อมทั้งคำแนะนำเพื่อการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการอบแห้ง

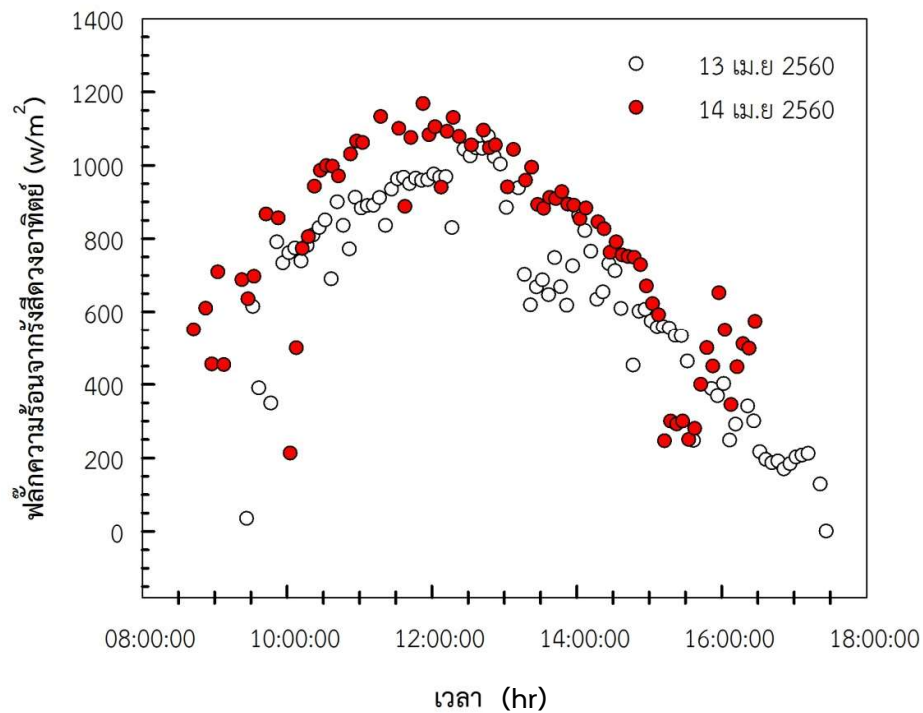
8. เผยแพร่ผลการวิจัยตามเป้าหมาย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทำแห้งกึ่งด้วยวิธีแบบดั้งเดิม (ตากแดด)

การตากแห้งกึ่งด้วยวิธีธรรมชาติ(ตากแดด) นั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสียซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยที่ได้ปรับปรุงกระบวนการอบแห้งกึ่งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไคเซเบด เบื้องต้นได้ดำเนินการทดลองการตากแห้งกึ่งต้มสุกที่มี 3 ขนาดแตกต่างกันคือ กึ่งขนาดเล็ก กึ่งขนาดกลาง และกึ่งขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นวิธีเดียวกันกับชาวบ้านคือ นำกึ่งสดมาต้มในน้ำเดือดเป็นระยะเวลา 10 min จากนั้นนำกึ่งที่ต้มสุกไปตากแดดบนตะแกรงลวด ซึ่งในการทดลองเบื้องต้นได้ทำการตากแดดเป็นระยะเวลา 2 วัน คือ วันที่ 13 เมษายน 2560 และ 14 เมษายน 2560 ซึ่งเป็นช่วงที่อากาศร้อนจัดของประเทศไทยดังภาพที่ 4.1 แสดงพลักรความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์ในช่วงวันที่ทำการทดลองตากแห้งกึ่งต้มสุกซึ่งเผยให้เห็นถึงค่าความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์มีค่าสูงมากในช่วงเวลาใกล้กับ 12.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ให้อัตราการอบแห้งกึ่งต้มสุกมีค่าสูงซึ่งส่งผลให้มวลน้ำในตัวกึ่งลดลงอย่างรวดเร็ว การทดลองทำแห้งด้วยการตากแดดได้เริ่มตั้งแต่วันที่ 8.00 น. จนถึงเวลา 17.00 น. ของทั้ง 2 วัน จากภาพที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของกึ่งขนาดเล็ก กึ่งขนาดกลาง และกึ่งขนาดใหญ่ ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองพบว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงสีของกึ่งในช่วงระยะเวลาแรกๆ ที่สูงมาก (1-4 ชั่วโมงแรกของการตากแดด) ในขณะที่ผลของการเปลี่ยนแปลงสีของกึ่งแห้งหลังจากตากแดด 4 ชั่วโมงจะมีการเปลี่ยนแปลงสีที่ไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับระยะแรกๆ อันเนื่องมาจากความชื้นที่อยู่ในตัวกึ่งทั้ง 3 ขนาดมีค่าลดลงอย่างช้าๆ



ภาพที่ 4.1 แสดงพลักรความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์เทียบกับเวลา



เวลา 8.00 น.



เวลา 10.00 น.



เวลา 11.00 น.



เวลา 12.00 น.



เวลา 13.00 น.



เวลา 15.00 น.



เวลา 17.00 น.

ภาพที่ 4.2 กุ้งขนาดเล็กต้มสุกตากแดด (วันที่ 13 เม.ย. 2560)



เวลา 8.00 น.



เวลา 10.00 น.



เวลา 11.00 น.



เวลา 12.00 น.



เวลา 13.00 น.



เวลา 15.00 น.



เวลา 17.00 น.

ภาพที่ 4.3 กุ้งขนาดกลางต้มสุกตากแดด (วันที่ 13 เม.ย. 2560)



เวลา 8.00 น.



เวลา 10.00 น.



เวลา 11.00 น.



เวลา 12.00 น.



เวลา 13.00 น.



เวลา 15.00 น.

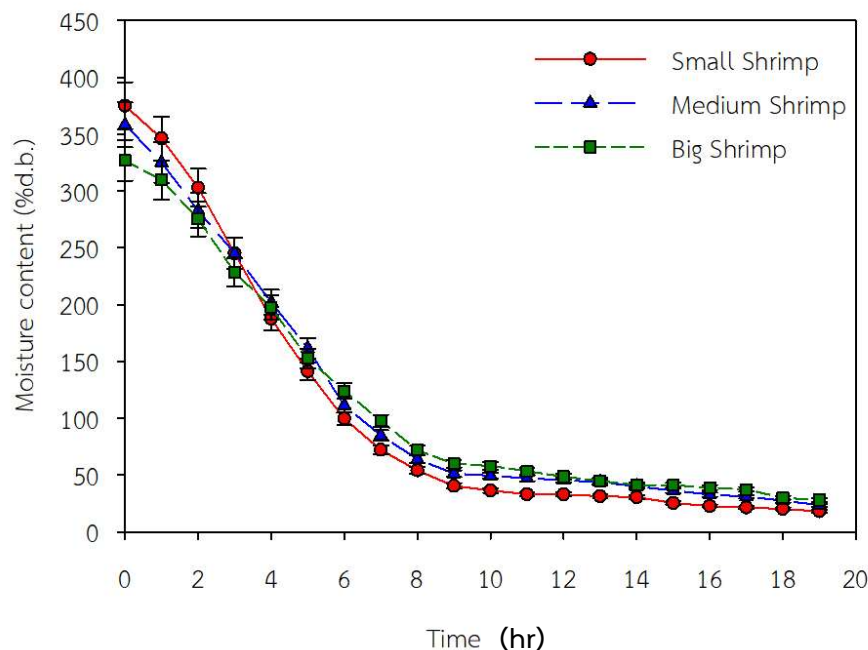


เวลา 17.00 น.

ภาพที่ 4.4 กุ้งขนาดใหญ่ต้มสุกตากแดด (วันที่ 13 เม.ย. 2560)

ในแง่ของการวิเคราะห์ผลทางด้านความชื้นกึ่งต้มสุกทั้ง 3 ขนาดได้ใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าความชื้นแบบอินฟราเรดรุ่น Kett FD-660 จากประเทศญี่ปุ่น ที่มีความละเอียดในการชั่งมวลถึง 0.001 กรัม ซึ่งให้ค่าความน่าเชื่อถือมากในแง่ผลการทดลอง ซึ่งผลของค่าความชื้นที่แสดงได้ถูกตั้งค่าไว้ที่ เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง

จากภาพที่ 4.5 แสดงผลของค่าความชื้นกึ่งต้มสุกตากแดด(แกนตั้ง) และระยะเวลาการตากแดด (แกนนอน) ตั้งแต่เวลา 8.00 – 17.00 ของวันที่ 13 -14 เมษายน 2560 ผลที่ได้เบื้องต้นแสดงถึงค่าความชื้นในตัวกึ่งต้มสุกจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการตากแดดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความชื้นเริ่มต้น(0 hr) ของกึ่งขนาดเล็ก กึ่งขนาดกลาง และกึ่งขนาดใหญ่ที่ได้จากการทดลองมีค่าประมาณ 370, 353 และ 324 %d.b. ตามลำดับ โดยเมื่อสังเกตความแตกต่างของกึ่งต้มสุกทั้ง 3 ขนาดก่อนการตากแดด พบว่าเนื้อของตัวกึ่งขนาดเล็กและกึ่งขนาดกลางจะมีการหดตัวมากกว่ากึ่งขนาดใหญ่ ส่งผลให้มีน้ำที่ใช้ต้มกึ่งแทรกแทนที่ปริมาตรของเนื้อกึ่งที่หดตัว ผลของค่าความชื้นเริ่มต้นจึงมีค่าไม่เท่ากัน ในขณะที่ทำการตากแดดกึ่งทั้ง 3 ขนาดพบว่าการลดลงของความชื้นในตัวกึ่งจะมีค่าสูงมากในช่วงแรกของการตากแดด (0-6 ชั่วโมง) จนได้ค่าความชื้นที่ใกล้เคียงกันประมาณ 80 %d.b. อันเป็นผลจากกลไกการถ่ายเทความร้อนของรังสีดวงอาทิตย์สู่น้ำในตัวกึ่งที่ง่ายต่อการแพร่ความชื้นสู่เปลือกกึ่ง แต่เมื่อเวลาผ่านไปหลังจาก 6 ชั่วโมงแรกของการตากแดดพบว่าค่าความชื้นของตัวกึ่งทั้ง 3 ขนาดจะมีอัตราการลดลงที่ต่ำมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เนื้อกึ่งเกิดการหดตัวและทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อกึ่งกับเปลือกกึ่ง ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของรังสีดวงอาทิตย์สู่เนื้อกึ่งเป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้อัตราการแพร่ความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อกึ่งสู่บรรยากาศมีค่าต่ำลง เมื่อได้ทำการตากแห้งกึ่งต้มสุกทั้ง 3 ขนาดเป็นระยะเวลา 2 วัน (18 hr) ค่าความชื้นสุดท้ายของกึ่งแห้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18, 23 และ 28 %d.b. สำหรับกึ่งขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นด้วยวิธีการทำแห้งตามธรรมชาตินี้แสดงให้เห็นถึงข้อเสียในเรื่องของระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่นานถึงแม้จะตากแห้งในช่วงที่บรรยากาศมีค่าความร้อนสูงสุดของปีก็ตาม



ภาพที่ 4.5 การลดลงของความชื้นเทียบกับระยะเวลาในการตากแดดกึ่งต้มสุก

4.2 การเปลี่ยนแปลงสีของกุ้งอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด

จากภาพที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของกุ้งต้มสุกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบดที่พัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาการผลิตกุ้งแห้งด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งได้แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงสีของกุ้งต้มสุกภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ความสูงของกุ้งต้มสุกในหีบอบแห้ง (h/D)=2/3 ที่อุณหภูมิอากาศร้อนสำหรับการอบแห้งเท่ากับ 60 °C โดยได้บันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงสีกุ้งทุกๆ 20 min และทำการอบแห้งเป็นเวลา 220 min ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า ที่เวลาเท่ากับ 0 min กุ้งที่ผ่านการต้มสุกจะมีสีของตัวกุ้งเป็นสีส้มสดซึ่งภายในตัวกุ้งจะชุ่มไปด้วยน้ำ เมื่อกุ้งต้มสุกผ่านการอบแห้งจนถึงเวลาที่ 80 min จะเห็นได้ว่าสีของตัวกุ้งจะซีดลงซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีตัวกุ้งอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนั้นในช่วงเวลาดังกล่าวจะมีการลดลงของมวลรวมในเบดซึ่งเกิดการลดลงของความชื้นที่สูง (จะกล่าวในภายหลัง) แต่หลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งตั้งแต่ 100 min จนถึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง (220 min) การเปลี่ยนแปลงสีของตัวกุ้งจะลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของค่าความชื้นที่มีการเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ต่ำ อันเป็นผลมาจากการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในตัวกุ้งลดลง



0 min



20 min



40 min



60 min

ภาพที่ 4.6 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงสีของกุ้งขนาดใหญ่อบแห้ง (h/D)=2/3 ที่อุณหภูมิ 60 °C



80 min



100 min



120 min



140 min



160 min



180 min



200 min



220 min

ภาพที่ 4.6 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงสีของกุ้งขนาดใหญ่ออบแห้ง ($h/D=2/3$) ที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ต่อ)

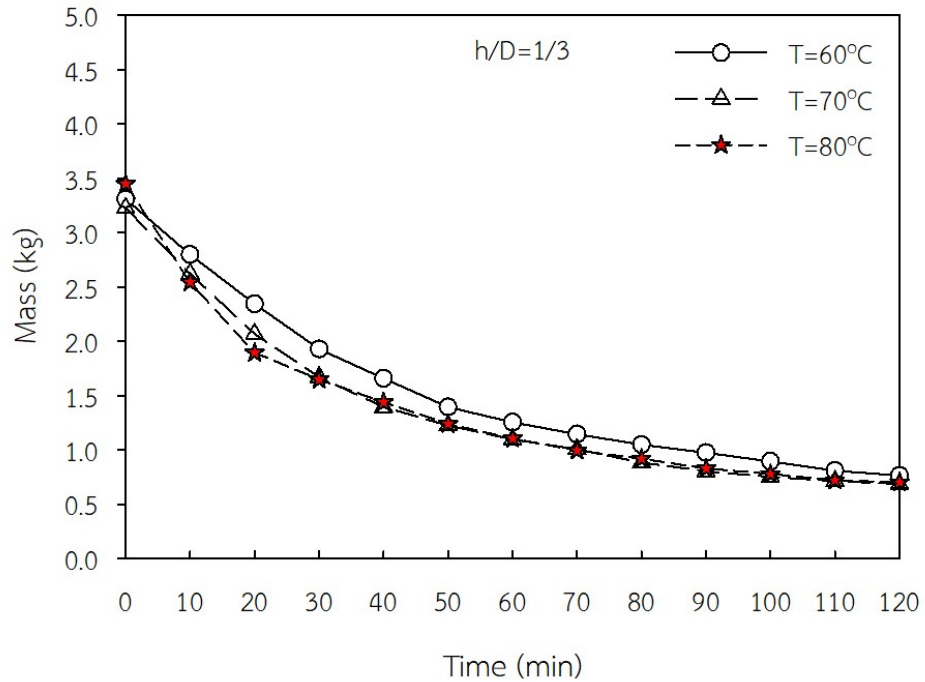
4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนและความสูงเบตในห้องอบแห้ง

การอบแห้งกึ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เซชันมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่การไหลของอากาศร้อนมีกำลังมากเพียงพอที่จะสามารถไหลผ่านและยกตัวกึ่งให้ลอยได้อย่างอิสระเสมือนของไหล เบื้องต้นของงานวิจัยได้ทำการหาลำดับของไหลร้อนที่จะสามารถทำให้กึ่งลอยตัวได้อย่างอิสระโดยได้ทำการทดลองอบแห้งกึ่งขนาดใหญ่สุดก่อน เนื่องจากกึ่งขนาดใหญ่จะมีมวลกึ่งแต่ละตัวที่หนักกว่ากึ่งขนาดกลางและขนาดเล็ก ส่งผลให้กำลังของไหลร้อนที่ใช้ในการอบแห้งต้องการมากที่สุด จากผลการทดลองพบว่าการใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 2 HP ที่ความเร็วรอบ 2,800 rpm จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ในช่วงความถี่ 40 Hz มีความเหมาะสมที่ทำให้กึ่งลอยตัวได้อย่างอิสระ

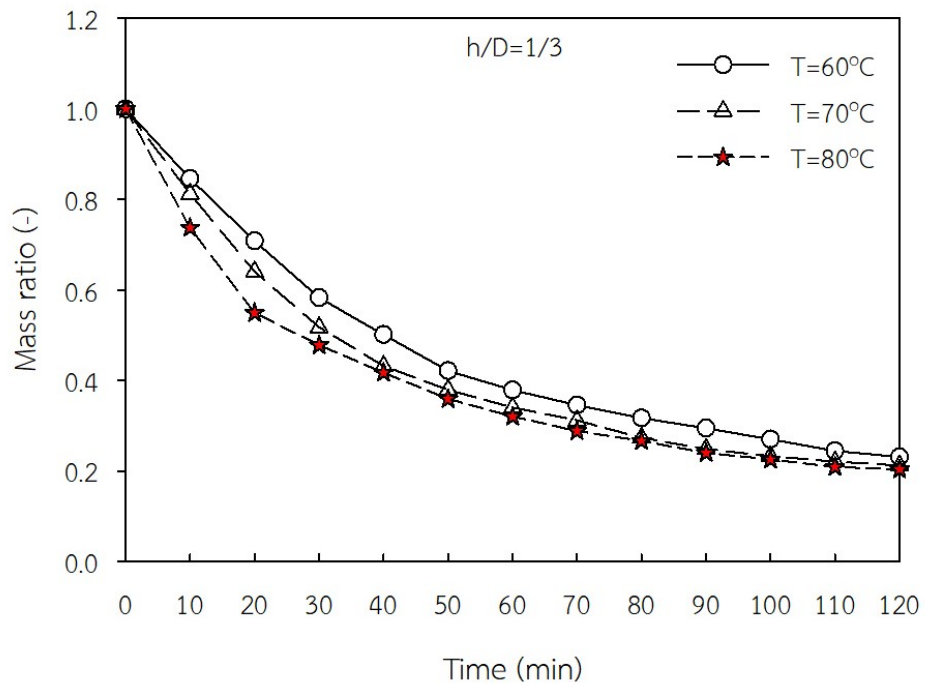
4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ความสูงเบต $h/D=1/3$

จากภาพที่ 4.7 และ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของมวลกึ่งขนาดใหญ่ และ อัตราส่วนมวลกึ่งที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบตโดยทดลองที่ความสูงเบต $h/D=1/3$ และใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ เบื้องต้นพบว่าก่อนทำการอบแห้งมวลกึ่งต้มสุกเริ่มต้นจะมีค่าประมาณ 3.3 kg (ที่เวลาเท่ากับ 0 min) เมื่อเริ่มกระบวนการอบแห้งโดยป้อนอากาศร้อนให้ไหลผ่านและกระทบกับตัวกึ่ง กลไกการอบแห้งจะเริ่มจากความร้อนของอากาศร้อนถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่บริเวณเปลือกกึ่งซึ่งมีความชื้นที่สูง น้ำที่เปลือกกึ่งจะมีอุณหภูมิสูงและเกิดการระเหยไปกับอากาศร้อน ส่งผลให้ความชื้นที่เปลือกของตัวกึ่งมีค่าลดลง ในขณะเดียวกันน้ำที่อยู่ชั้นด้านในของเปลือกกึ่งและผิวของเนื้อกึ่งจะเกิดการถ่ายเทมวลให้กับเปลือกกึ่งที่มีความชื้นต่ำกว่า ส่งผลให้มวลกึ่งในเบตมีการลดลงอย่างรวดเร็ว จนเวลาที่ใช้ในการอบแห้งผ่านไป 60 min มวลกึ่งเหลือประมาณ 1.1 kg ดังแสดงในภาพที่ 4.7 หลังจากนั้นมวลกึ่งในเบตจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงอันเนื่องมาจากความชื้นของเปลือกและที่ผิวด้านนอกของเนื้อกึ่งมีค่าต่ำ ขณะนั้น น้ำที่อยู่ชั้นในเนื้อกึ่งจะเกิดกลไกการแพร่สู่ชั้นนอกและผิวดังกล่าวอย่างช้าๆ ส่งผลให้มวลของกึ่งในเบตค่อยๆ ลดลงและคงที่ที่เวลา 120 min ซึ่งจะได้มวลกึ่งอบแห้งประมาณ 0.7 kg

ในการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งต่อการลดลงของมวลกึ่งพบว่าค่ามวลเริ่มต้นของกึ่งต้มสุกแต่ละกรณีศึกษามีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นสิ่งที่ควบคุมไม่ได้อันเนื่องจากลักษณะจำเพาะของกึ่งแต่ละตัวที่ไม่เหมือนกัน จึงได้นำเสนอผลการลดลงของมวลกึ่งแบบสัดส่วน ดังแสดงในภาพที่ 4.8 เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบกรณีการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีผลต่อการลดลงของมวลกึ่ง จากผลการทดลองพบว่าอัตราการลดลงของมวลกึ่งเมื่อเทียบกับเวลาจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งกึ่ง อันเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของระดับอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนกับตัวกึ่ง ค่าการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนสู่น้ำที่อยู่ในตัวกึ่งยังมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในตัวกึ่งสู่อากาศร้อนเพิ่มสูงขึ้นด้วย ผลที่ได้จากการทดลองเผยให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80°C อัตราส่วนมวลของกึ่งมีการเปลี่ยนแปลงมากและลดลงสูงสุด ซึ่งสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟในช่วงเวลา 0 – 30 min มีค่าสูงสุด โดยมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 60°C และ 70°C ตามลำดับ หลังจากช่วงเวลาดังกล่าว อัตราส่วนมวลกึ่งจะมีการลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งเป็นไปตามกลไกการอบแห้งที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้



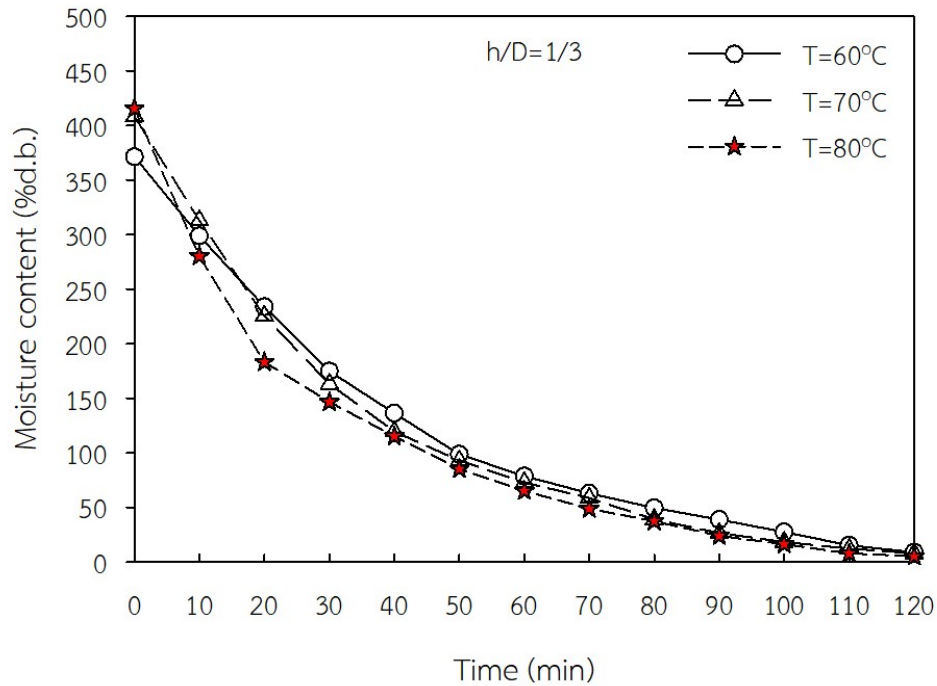
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกึ่งต้มสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบต สำหรับ $(h/D)=1/3$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ



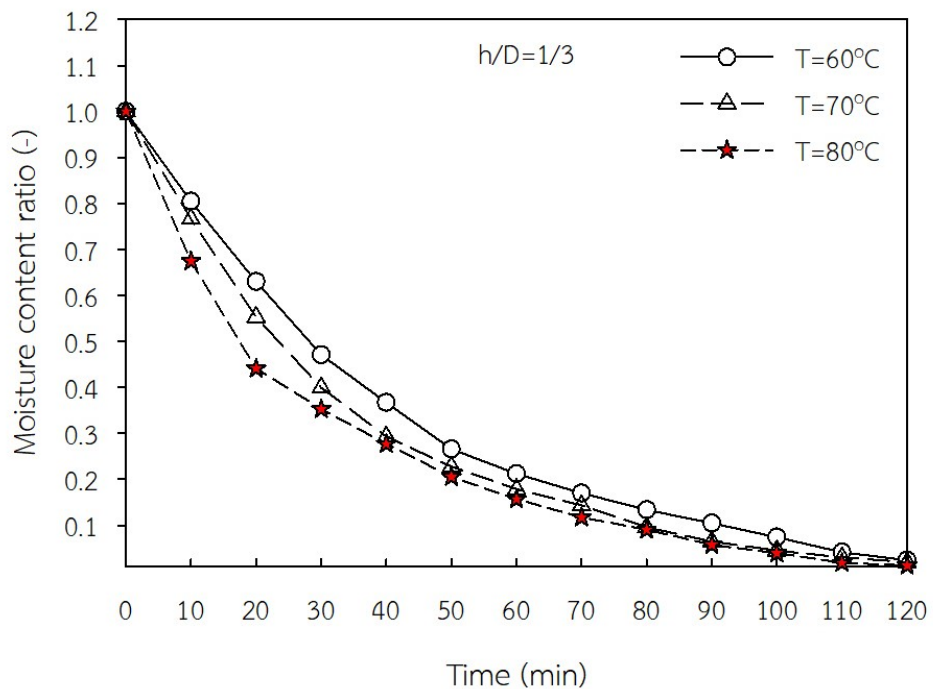
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมวลกึ่งต้มสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบต สำหรับ $(h/D)=1/3$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ

สำหรับภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกึ่งอิ่มตัว(แกนตั้ง) เทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง(แกนนอน) ที่ความสูงเบต $h/D=1/3$ โดยได้ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศร้อนอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าค่าความชื้นเริ่มต้นของกึ่งอิ่มตัว(ที่เวลา 0 min) จะมีค่าประมาณ 400 %d.b. และมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้นำเสนอในหัวข้อก่อนหน้านี้ที่มวลของกึ่งอิ่มตัวจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยอัตราการลดลงของค่าความชื้นสำหรับการใช้อากาศร้อนในการอบแห้งกึ่งอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C จะมีค่าสูงมากในช่วงระยะเวลาเริ่มต้น (ที่เวลา 0-60 min) ซึ่งเป็นผลจากความชื้นหรือมวลของน้ำที่อยู่ในตัวกึ่งอิ่มตัวบริเวณชั้นผิวนอกมีค่าที่สูงจึงเกิดการระเหยไปกับอากาศร้อนได้โดยง่าย โดยเฉลี่ยค่าความชื้นหลังจากผ่านการอบแห้งไปเป็นเวลา 60 min จะมีค่าความชื้นประมาณ 70 %d.b. หลังจากนั้นค่าความชื้นจะยังคงมีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆจนมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 7 %d.b. (ที่เวลาการอบแห้ง 120 min) ในเบื้องต้นผลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งอิ่มตัวกับ 80°C ให้อัตราการลดลงของค่าความชื้นที่สูงกว่าที่อุณหภูมิ 60°C และ 70°C ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนและตัวกึ่งอิ่มตัวที่สูง ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นไปได้ง่ายส่งผลให้มวลของน้ำในตัวกึ่งอิ่มตัวเกิดการถ่ายเทสู่อากาศได้ดียิ่งขึ้น(สังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ) จากการอบแห้งกึ่งอิ่มตัวด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบตที่อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 60°C, 70°C และ 80°C การผลิตกึ่งอิ่มตัวตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช. 7012-2551) ประเภท กึ่งอิ่มตัว ของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งอิ่มตัวที่ระดับค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง 30%d.b. จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งกึ่งอิ่มตัวประมาณ 98, 87 และ 85 min ตามลำดับ

ด้วยค่าความชื้นเริ่มต้นของกึ่งอิ่มตัวที่ไม่เท่ากับจึงได้นำเสนอผลของค่าความชื้นกึ่งอิ่มตัวในรูปของอัตราส่วนความชื้นกึ่งอิ่มตัว เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C ดังแสดงในภาพที่ 4.10 ในการนำเสนออัตราส่วนความชื้นกึ่งอิ่มตัวของแต่ละกรณีศึกษาได้พิจารณาภายใต้ค่าความชื้นเริ่มต้นของกึ่งอิ่มตัวต่อค่าความชื้นกึ่งอิ่มตัวที่เวลาใดๆ พบว่าอัตราส่วนความชื้นกึ่งอิ่มตัวเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 1 เท่ากันทุกกรณีศึกษา โดยค่าอัตราส่วนความชื้นจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศร้อน 80°C หลังจากผ่านการอบแห้งเป็นเวลา 20 min พบว่าจะมีอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงสูงสุดและมีค่าเท่ากับ 0.43 ซึ่งเผยให้เห็นว่าค่าความชื้นของกึ่งอิ่มตัวมีค่าลดลงเกินเท่าตัว โดยเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C และ 70°C พบว่าอัตราส่วนความชื้นเมื่อเวลาผ่านไป 20 min ให้อัตราส่วนความชื้นเพียง 0.62 และ 0.55 ตามลำดับ นอกจากนั้นผลของอุณหภูมิอากาศร้อน 80°C ยังคงมีอัตราส่วนความชื้นที่ต่ำกว่าผลของอุณหภูมิอากาศร้อน 60 และ 70°C ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ในขณะที่หลังจากผ่านการอบแห้งไปเป็นเวลา 60 min สำหรับอุณหภูมิอากาศร้อน 80°C จะเห็นได้ว่ามีอัตราส่วนการลดลงของความชื้นกึ่งอิ่มตัวอย่างรวดเร็วจนเหลืออัตราส่วนมวลกึ่งอิ่มตัวประมาณ 0.18 หลังจากนั้นอัตราส่วนความชื้นกึ่งอิ่มตัวจะมีการลดลงอย่างช้าๆ และเริ่มเข้าใกล้กันที่เวลา 110 min จนกระทั่งเวลา 120 min จะได้อัตราส่วนความชื้นกึ่งอิ่มตัวประมาณ 0.018 โดยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 7 %d.b.



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด สำหรับ $(h/D)=1/3$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ

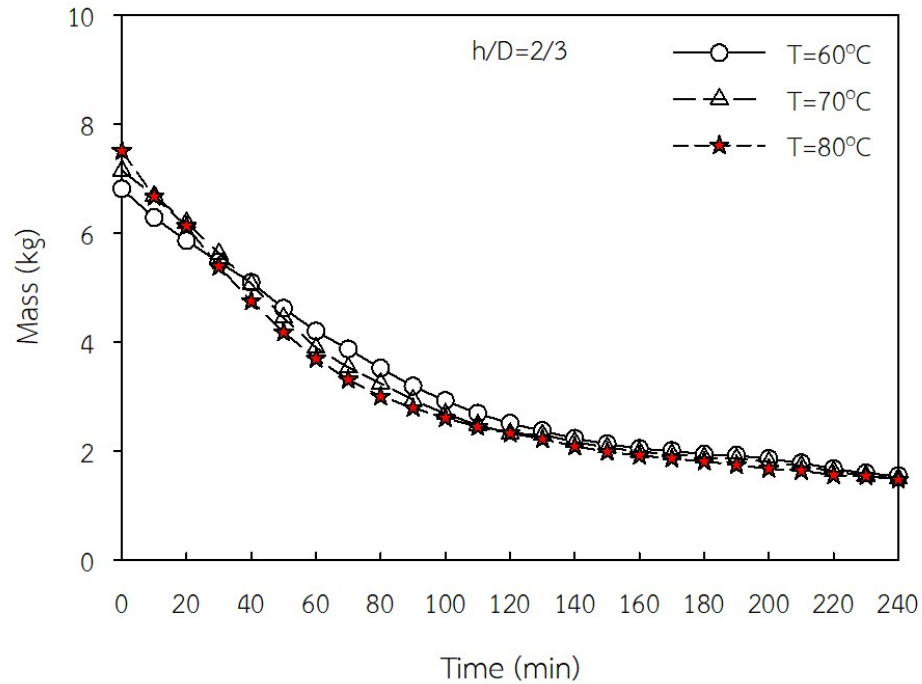


ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด สำหรับ $(h/D)=1/3$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ

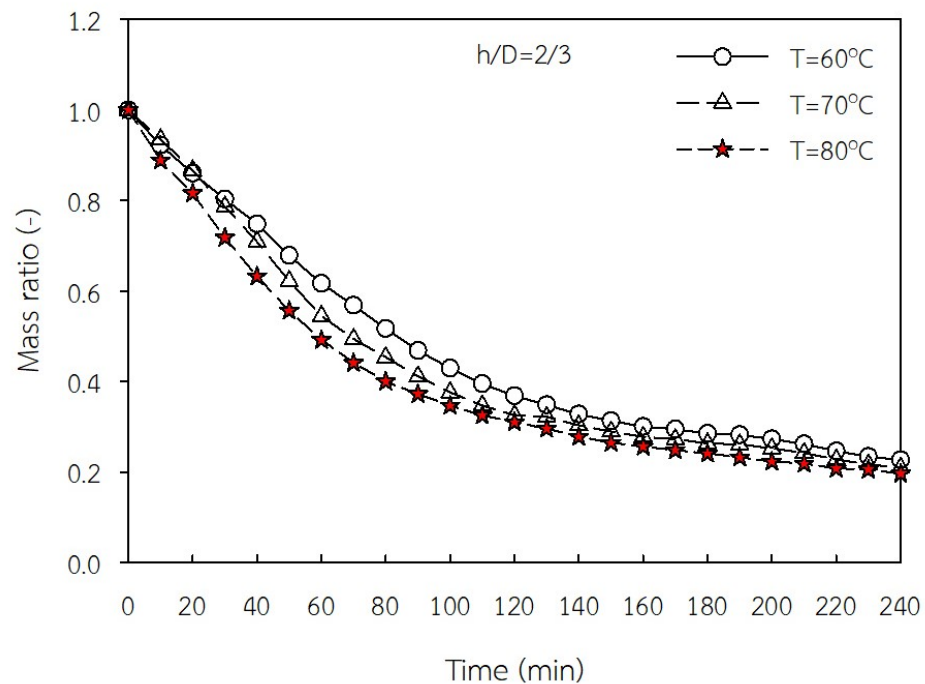
4.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ความสูงเบต $h/D=2/3$

ในหัวข้อเป็นการนำเสนอผลของการอบแห้งกุ้งด้วยอากาศร้อนที่ค่าความสูงเบต $h/D=2/3$ สามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าความสูงของกุ้งในเบตอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกันคือการอบแห้งกุ้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ ในส่วนของภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของมวลกุ้งเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ผลการทดลองเบื้องต้นพบว่า ที่ค่าความสูงเบต $h/D=2/3$ มวลของกุ้งต้มสุกที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีค่าเริ่มต้นประมาณ 7 kg โดยมีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ผลที่ได้จากการทดลองยังคงมีแนวโน้มเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้านี้คือเมื่ออากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งกุ้งไหลกระทบตัวกุ้ง จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนสู่ตัวกุ้งที่มีความชื้นอยู่ น้ำที่อยู่ผิวภายนอกของตัวกุ้งจะเกิดการระเหย ทำให้เวลาในช่วงเริ่มต้นถึงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 140 min มีการเปลี่ยนแปลงมวลของกุ้งลดลงอย่างรวดเร็วจนมวลกุ้งเหลือประมาณ 2.2 kg หลังจากนั้นมวลกุ้งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง เพราะผิวภายนอกของตัวกุ้งเริ่มแห้ง น้ำที่อยู่ภายในตัวกุ้งจะเกิดการแพร่ออกสู่ผิวภายนอกของตัวกุ้งอย่างช้าๆ และเริ่มเข้าใกล้กันที่เวลา 220 min จนกระทั่งที่เวลา 240 min จะได้มวลกุ้งอบแห้งประมาณ 1.5 kg นอกจากนั้นยังสังเกตได้ว่าระยะเวลาของการอบแห้งกุ้งภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิเดียวกันของค่า $h/D=2/3$ จะมีเวลานานกว่าที่ $h/D=1/3$ พอสมควร ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของกุ้งที่อยู่ในเบตมีค่ามากกว่า ทำให้มวลของน้ำที่อยู่ในตัวกุ้งมีปริมาณมากกว่าตามไปด้วย ผลจากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนพบว่าการอบแห้งกุ้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80°C มวลของกุ้งจะมีการเปลี่ยนแปลงมาก/ลดลงในอัตราที่สูงที่สุด อันเนื่องจากผลของอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำที่อยู่ในตัวกุ้งมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 60°C และ 70°C ตามลำดับ

ในส่วนของ ภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมวลกุ้งต้มสุกเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ในทำนองเดียวกัน จากผลการทดลองพบว่ามวลเริ่มต้นของกุ้งต้มสุกที่ใช้ในการทดลองมีค่าไม่เท่ากัน จึงต้องทำการเปรียบเทียบในแง่ของอัตราส่วนมวลเพื่อสามารถเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนมวลกุ้งต้มสุกเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1 ทุกกรณีศึกษา และเมื่อกลไกการอบแห้งเริ่มขึ้น(เวลาการอบแห้งเพิ่ม) อัตราส่วนมวลกุ้งจะเริ่มมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยเมื่อสังเกตผลของอัตราส่วนมวลกุ้งสำหรับการใช้อุณหภูมิ 60°C พบว่าอัตราการลดลงของอัตราส่วนมวลจะมีค่าที่ต่ำที่สุด ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนให้มีค่าสูงขึ้นพบว่า การลดลงของอัตราส่วนมวลจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยผลการทดลองอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาประมาณ 140 min จะเห็นได้ว่ามีอัตราส่วนการลดลงของมวลกุ้งอย่างรวดเร็วจนเหลืออัตราส่วนมวลกุ้งประมาณ 0.3 หลังจากนั้นอัตราส่วนมวลกุ้งอบแห้งจะมีลดลงอย่างช้าๆ และเริ่มเข้าใกล้กันที่เวลา 220 min จนกระทั่งที่เวลา 240 min จะได้อัตราส่วนมวลกุ้งอบแห้งประมาณ 0.21 โดยมีมวลกุ้งแห้งสุดท้ายประมาณ 1.5 kg ภายใต้การอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80°C อัตราส่วนมวลกุ้งอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด จึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว เนื่องจากมีการระเหยของน้ำภายในตัวกุ้งดีกว่าอุณหภูมิ 60°C และ 70°C ตามลำดับ



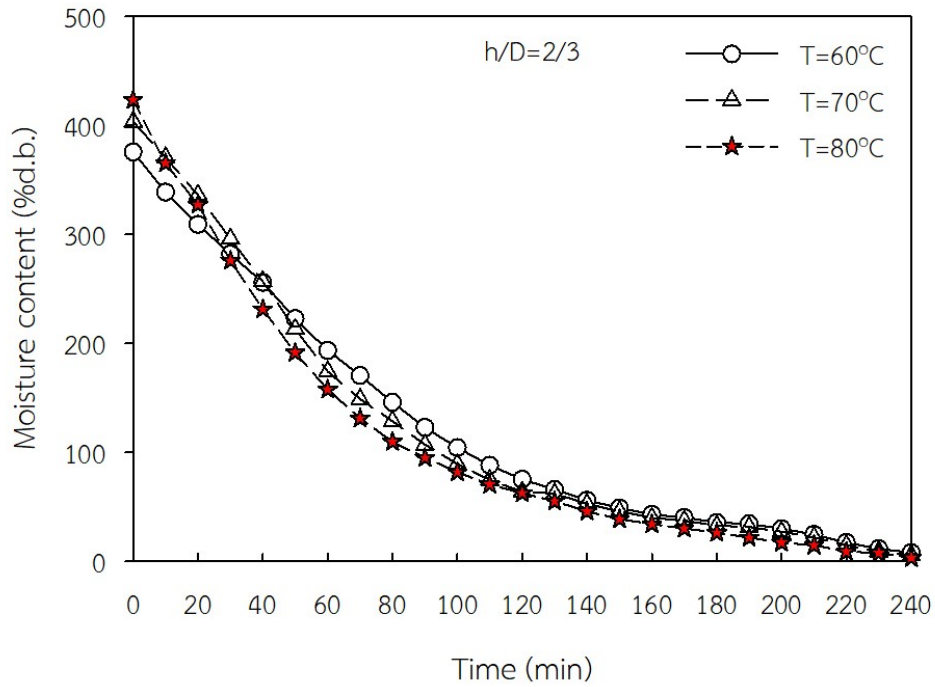
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกึ่งต้มสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบต สำหรับ $(h/D)=2/3$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ



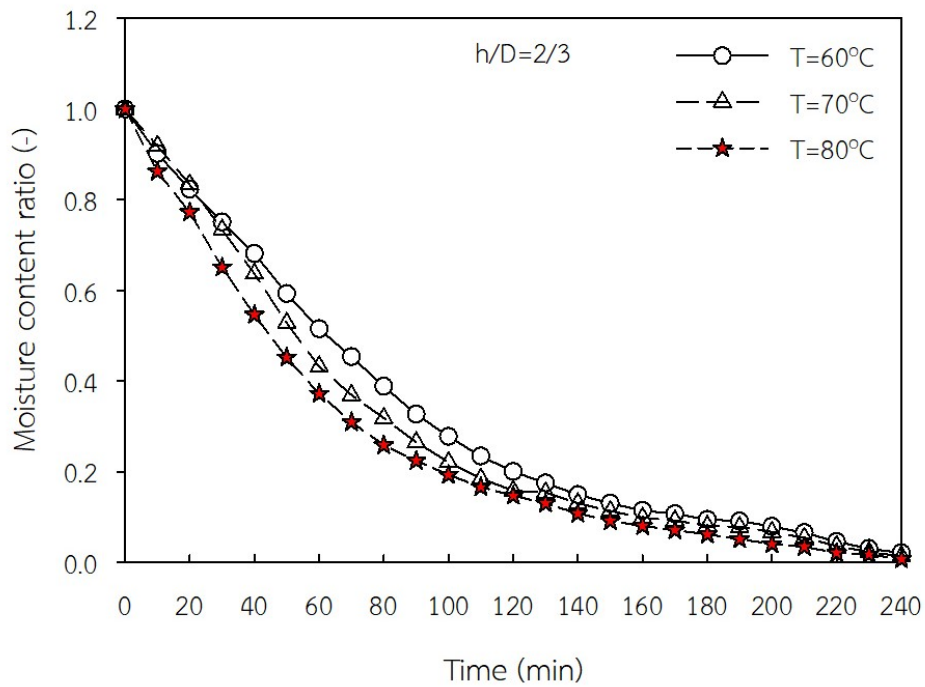
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมวลกึ่งต้มสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบต สำหรับ $(h/D)=2/3$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของความชื้นกึ่งตมสุกเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จากการวิเคราะห์โดยอ้างอิงจากมวลกึ่งตมสุกมาทำการหาค่าความชื้นมาตรฐานแห้งสำหรับการอบแห้งกึ่งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นของกึ่งตมสุกเริ่มต้นประมาณ 400 %d.b. ซึ่งเริ่มต้นตัวกึ่งตมสุกนั้นมีค่าความชื้นอยู่สูงมาก จึงต้องไล่ความชื้นที่อยู่ภายในตัวกึ่งออก เมื่ออากาศร้อนมากระทบกับตัวกึ่ง จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนสู่ตัวกึ่งที่มีความชื้นอยู่ น้ำที่อยู่ผิวภายนอกของตัวกึ่งจะเกิดการระเหย ทำให้เวลาในช่วงเริ่มต้นถึงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 140 min จะมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในตัวกึ่งลดลงอย่างรวดเร็วเหลือประมาณ 51.4 %d.b. เพราะน้ำเกิดการระเหยออกไปจากตัวกึ่ง หลังจากนั้นค่าความชื้นของกึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง เพราะผิวภายนอกของตัวกึ่งเริ่มแห้ง น้ำที่อยู่ภายในตัวกึ่งจะเกิดการแพร่ออกสู่ผิวภายนอกของตัวกึ่งอย่างช้าๆและเริ่มเข้าใกล้กันที่เวลา 220 min จนคงที่ที่เวลา 240 min จะได้ค่าความชื้นของกึ่งอบแห้งประมาณ 5.5 %d.b. จากผลการทดลองพบว่าการอบแห้งกึ่งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80°C ค่าความชื้นของกึ่งมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว เนื่องจากมีการระเหยของน้ำภายในตัวกึ่งดีกว่าในแต่ละอุณหภูมิ จากการอบแห้งกึ่งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบดที่อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 60°C, 70°C และ 80°C เมื่อพิจารณาการผลิตกึ่งแห้งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช. 7012-2551) ประเภท กึ่งแห้ง ของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งที่ระดับค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง 30%d.b. จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งกึ่งประมาณ 200, 193 และ 170 min ตามลำดับ

ในขณะที่ผลการนำเสนออัตราส่วนความชื้นดังแสดงในภาพที่ 4.14 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของอัตราส่วนความชื้นกึ่งตมสุกกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่าความชื้นเริ่มต้นกึ่งตมสุกไม่เท่ากัน จึงต้องเทียบอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นกึ่งตมสุกให้เท่ากันเพื่อสามารถเปรียบเทียบความชื้นกึ่งตมสุกที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C เมื่อเริ่มทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C จากการทดลองพบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งผ่านไป 140 min จะเห็นได้ว่ามีอัตราส่วนการลดลงของความชื้นกึ่งอย่างรวดเร็วจนเหลืออัตราส่วนมวลกึ่งประมาณ 0.13 หลังจากนั้นอัตราส่วนมวลกึ่งอบแห้งจะมีลดลงอย่างช้าๆ และเริ่มเข้าใกล้กันที่เวลา 220 min จนคงที่ที่เวลา 240 min จะได้อัตราส่วนความชื้นกึ่งอบแห้งประมาณ 0.014 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้านี้ โดยความชื้นกึ่งเริ่มต้นประมาณ 400 %d.b. จะได้อัตราส่วนความชื้นกึ่งอบแห้งเท่ากับ 1 และความชื้นกึ่งสุดท้ายประมาณ 5.5 %d.b. จะได้อัตราส่วนความชื้นกึ่งอบแห้งประมาณ 0.014 จากการทดลองพบว่า การอบแห้งกึ่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C อัตราส่วนความชื้นกึ่งอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว เนื่องจากมีการระเหยของน้ำภายในตัวกึ่งดีกว่าในแต่ละอุณหภูมิ



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์-เบต สำหรับ $(h/D)=2/3$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ

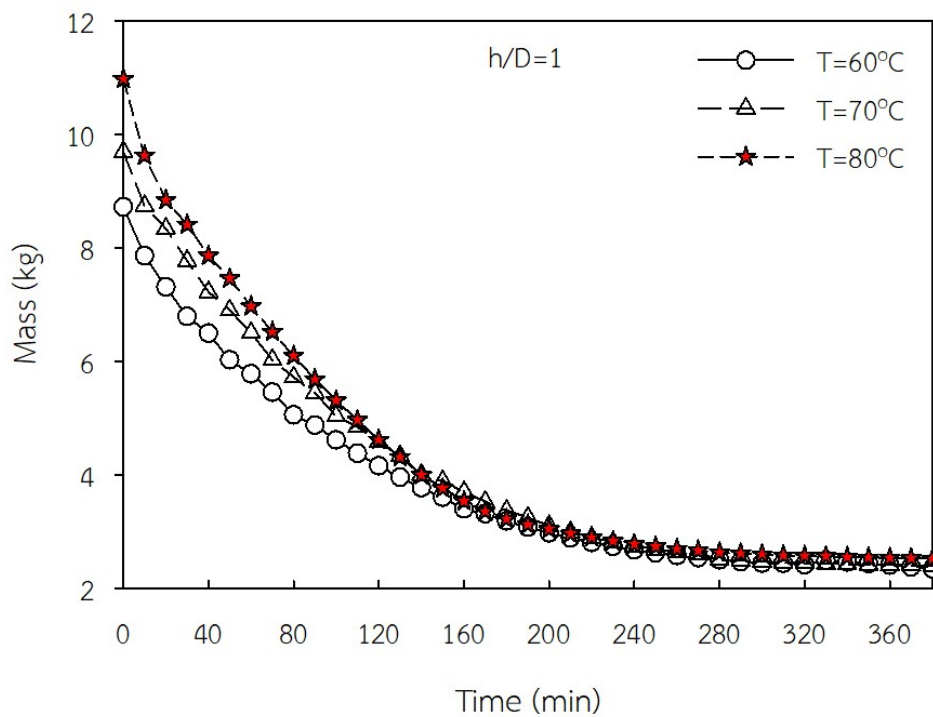


ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์-เบต สำหรับ $(h/D)=2/3$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ

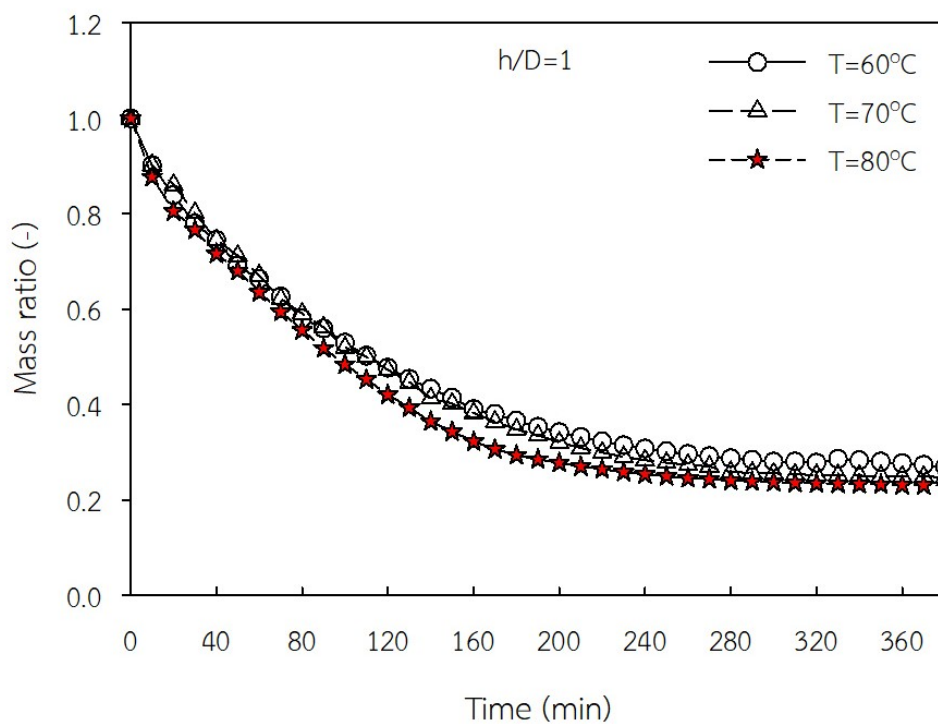
4.3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ความสูงเบต $h/D=1$

สำหรับเงื่อนไขการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศร้อนภายใต้เงื่อนไขความสูงของเบต $h/D=1$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขของความสูงกึ่งในเบตที่มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีก่อนหน้านี้ จากภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของมวลกึ่งต้มสุกเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยได้ทำการอบแห้งกึ่งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ เบื้องต้นพบว่า ที่เวลาเริ่มต้นมวลของกึ่งต้มสุกเริ่มต้นจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 9.8 kg ซึ่งมีความแตกต่างกันในเรื่องของมวลเริ่มต้น หลังจากผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนผ่านกลไกการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนสู่ตัวกึ่งที่มีความชื้นสูง มวลกึ่งจะมีแนวโน้มลดลงและมีค่าใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาในการอบแห้ง (380 min) โดยในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งจนถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 220 min การเปลี่ยนแปลงมวลของกึ่งจะมีค่าสูงที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของน้ำที่อยู่รอบๆตัวกึ่งที่ค่าสูง ความชื้นที่อยู่ในตัวกึ่งจึงง่ายต่อการระเหยและถ่ายเทมวลไปในอากาศ จนทำให้มวลของกึ่งที่ได้จากการทดลองในแต่ละเงื่อนไขอุณหภูมิเหลือใกล้เคียงกันประมาณ 2.9 kg หลังจากนั้นมวลกึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง เพราะผิวภายนอกของตัวกึ่งเริ่มแห้ง น้ำที่อยู่ภายในตัวกึ่งจะเกิดการแพร่ออกสู่ผิวภายนอกของตัวกึ่งอย่างช้าๆ และเริ่มมีมวลใกล้เคียงกันที่เวลา 220 min และมีค่าคงที่ที่เวลา 380 min ซึ่งจะได้มวลกึ่งอบแห้งประมาณ 2.43 kg ผลจากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนพบว่า การอบแห้งกึ่งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80°C ยังคงเป็นค่าที่ให้อัตราการลดลงของมวลกึ่งที่สูงที่สุด ซึ่งช่วยยืนยันผลที่ได้จากการทดลองที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้ ที่ผลของการใช้อากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำที่อยู่ภายในตัวกึ่งมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 60°C และ 70°C ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของอัตราส่วนมวลกึ่งต้มสุกเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่ามวลเริ่มต้นกึ่งต้มสุกไม่เท่ากัน จึงต้องเทียบอัตราส่วนมวลเริ่มต้นกึ่งต้มสุกให้เท่ากันเพื่อสามารถเปรียบเทียบมวลกึ่งต้มสุกที่อุณหภูมิ 60°C , 70°C และ 80°C ได้อย่างเหมาะสม เมื่อเริ่มทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60°C , 70°C และ 80°C จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนมวลกึ่งต้มสุกเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 1 ในทุกกรณี ในเบื้องต้นแนวโน้มของอัตราส่วนมวลยังคงมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยเมื่อสังเกตผลของการใช้อุณหภูมิอบแห้งกึ่งเท่ากับ 60°C และ 70°C อัตราการลดลงของอัตราส่วนมวลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณมวลของน้ำในเบตที่มีค่าสูง ผลของอุณหภูมิดังกล่าวมีอิทธิพลไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งยังคงมีแนวโน้มเดิมคือที่อุณหภูมิอากาศร้อน 70°C ยังคงมีอัตราการลดลงของอัตราส่วนมวลที่สูงกว่าอุณหภูมิ 60°C ในขณะที่การใช้อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 80°C จะเห็นอัตราการลดลงของอัตราส่วนมวลที่สูงและชัดเจนกว่าอุณหภูมิ 60°C และ 70°C ตามลำดับ ในกรณีผลของความสูงเบต $h/D=1$ ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนมวลที่สูงจะอยู่ในช่วงเวลาที่ผ่านการอบแห้งประมาณ 220 min ซึ่งยังคงใช้เวลานานที่สุดเมื่อเทียบกับที่ความสูงอื่นๆ โดยอัตราส่วนการลดลงของมวลเฉลี่ยที่ได้ทั้งสามกรณีมีค่าประมาณ 2.8 หลังจากนั้นอัตราส่วนมวลกึ่งอบแห้งจะมีผลลดลงอย่างช้าๆ จนคงที่ที่เวลา 380 min จะได้อัตราส่วนมวลกึ่งอบแห้งประมาณ 0.2 ซึ่งจะได้มวลกึ่งสุดท้ายประมาณ 2.43 kg



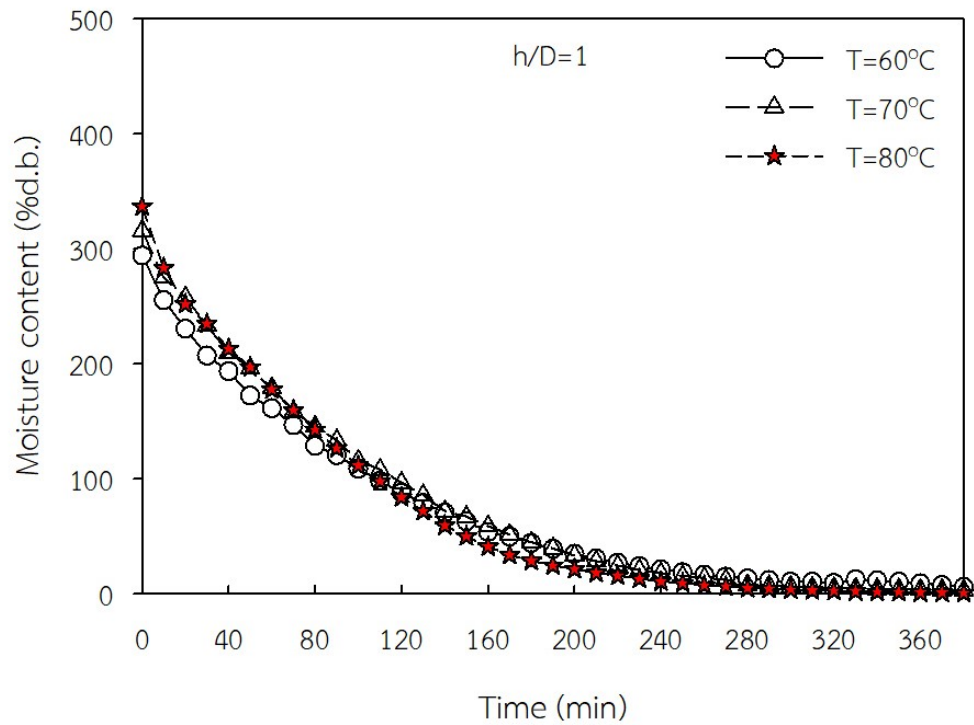
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด สำหรับ $(h/D)=1$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ



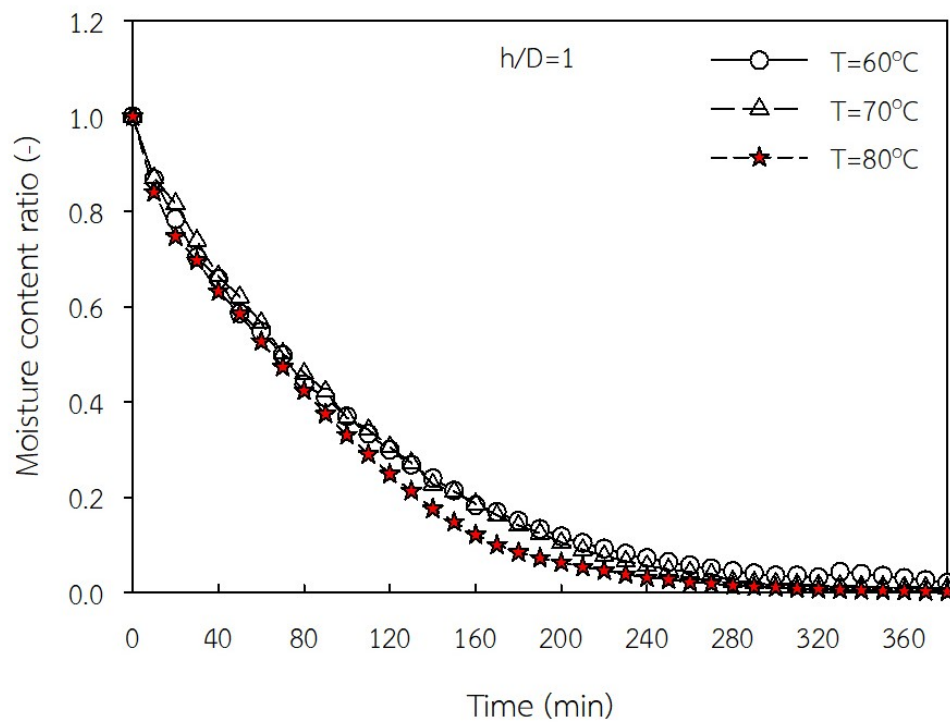
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมวลกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด สำหรับ $(h/D)=1$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของความชื้นกึ่งตัมสุกกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จากการวิเคราะห์โดยอ้างอิงจากมวลกึ่งตัมสุกมาทำการหาค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง ภายใต้การอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ เบื้องต้นค่าความชื้นของกึ่งตัมสุกก่อนทำการอบแห้งจะมีค่าประมาณ 315 %d.b. ซึ่งถือว่าภายในตัวกึ่งตัมสุกนั้นยังคงมีความชื้นที่สูงมาก การลดความชื้นที่อยู่ในตัวกึ่งในช่วงเริ่มต้นจึงเป็นไปได้โดยง่าย ผลที่ได้จากการทดลองเผยให้เห็นว่าการลดลงของค่าความชื้นมีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต้องใช้เวลาในการอบแห้งที่นานกว่ากรณีความสูงเบตอื่นๆ ในการลดลงของค่าความชื้นสำหรับการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C, 70°C และ 80°C พบว่ามีค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณน้ำที่อยู่ภายในเบตที่มีค่ามาก อัตราการระเหยของน้ำในตัวกึ่งจึงเกิดความแตกต่างไม่มากนัก แต่ยังคงให้แนวโน้มของผลการทดลองสอดคล้องกับผลก่อนหน้านี้ โดยช่วงระยะเวลาที่ให้ในการอบแห้งที่ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นที่มีค่าสูงคือในช่วงเริ่มต้นถึงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 220 min จะมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในตัวกึ่งลดลงอย่างรวดเร็วเหลือประมาณ 22 %d.b. ซึ่งหลังจากเวลาดังกล่าวค่าความชื้นของกึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลง/ลดน้อยลง ซึ่งเป็นผลจากผิวภายนอกของตัวกึ่งเริ่มแห้ง น้ำที่อยู่ภายในตัวกึ่งจะเกิดการแพร่ออกสู่ผิวภายนอกของตัวกึ่งอย่างช้าๆ โดยการทดลองได้ใช้เวลาทดลองเพื่อให้ค่าความชื้นเริ่มคงที่ที่เวลา 380 min ซึ่งจะได้ค่าความชื้นของกึ่งอบแห้งประมาณ 3.2 %d.b. ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มก.ช. 7012-2551) ประเภท กึ่งแห้ง ของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ระดับค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง 30%d.b. จากการอบแห้งกึ่งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบตที่อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 60°C, 70°C และ 80°C ภายใต้ค่าความชื้นเท่ากับ 30 %d.b. จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งกึ่งประมาณ 212, 207 และ 177 min ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของอัตราส่วนความชื้นกึ่งตัมสุกเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่าความชื้นเริ่มต้นกึ่งตัมสุกไม่เท่ากัน จึงต้องเทียบอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นกึ่งตัมสุกให้เท่ากันเพื่อสามารถเปรียบเทียบความชื้นกึ่งตัมสุกที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C ได้ เมื่อเริ่มทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าความชื้นกึ่งตัมสุกเริ่มต้นเท่ากับ 1 เวลาผ่านไป 220 min จะเห็นได้ว่ามีอัตราส่วนการลดลงของความชื้นกึ่งอย่างรวดเร็วจนเหลืออัตราส่วนความชื้นกึ่งประมาณ 0.07 หลังจากนั้นอัตราส่วนความชื้นกึ่งอบแห้งจะมีลดลงอย่างช้าๆ และเริ่มเข้าใกล้กันที่เวลา 220 min จนคงที่ที่เวลา 380 min จะได้อัตราส่วนความชื้นกึ่งอบแห้งประมาณ 0.01 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้านี้ ที่ความชื้นกึ่งเริ่มต้นประมาณ 315 %d.b. จะได้อัตราส่วนความชื้นกึ่งอบแห้งเท่ากับ 1 และความชื้นกึ่งสุดท้ายประมาณ 3.2 %d.b. จะได้อัตราส่วนความชื้นกึ่งอบแห้งประมาณ 0.01 จากการทดลองพบว่าการอบแห้งกึ่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C อัตราส่วนความชื้นกึ่งอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว เนื่องจากมีการระเหยของน้ำภายในตัวกึ่งดีกว่าในแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งยังคงต้องใช้เวลาในการอบแห้งเพื่อให้ได้ค่าความชื้นตามมาตรฐานที่นานกว่ากรณีความสูงเบตอื่นๆ



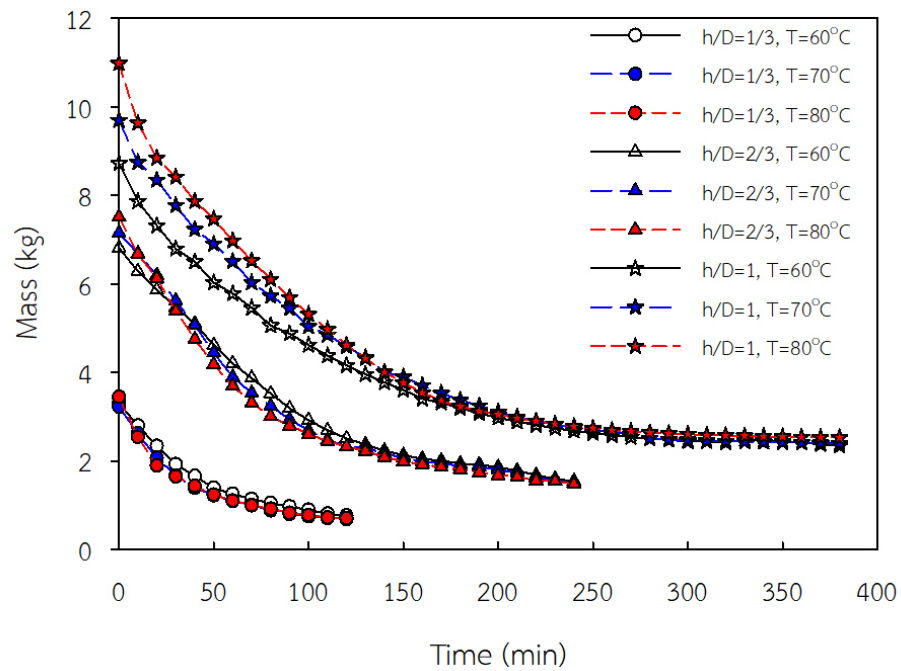
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบต สำหรับ $(h/D)=1$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ



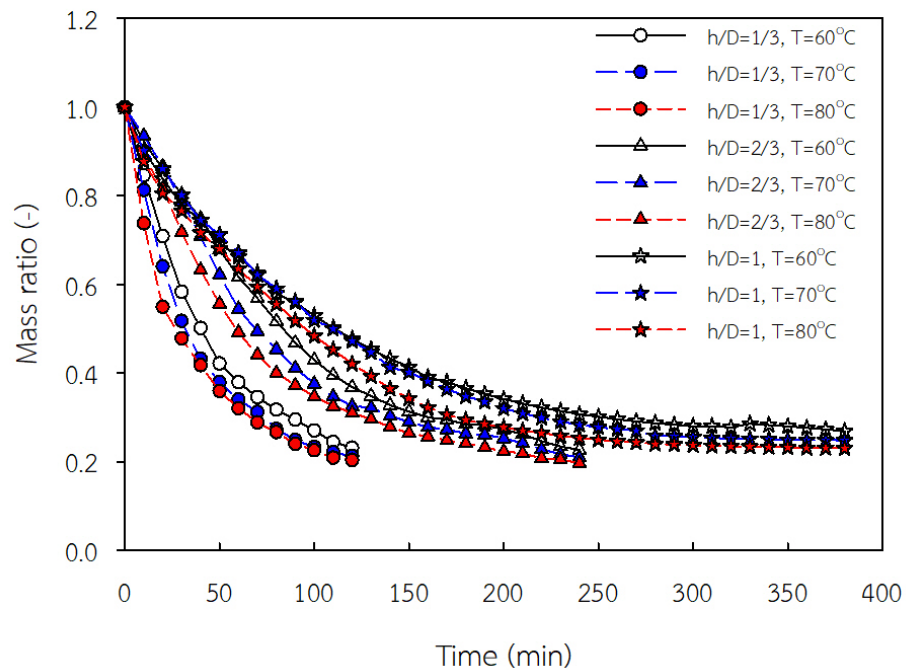
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบต สำหรับ $(h/D)=1$ และอุณหภูมิอากาศร้อน 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.19 และ 4.20 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมวลกึ่งต้มและอัตราส่วนมวลกึ่งต้มสุกต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งตามลำดับ โดยได้นำเสนอการทดลองอบแห้งกึ่งขนาดใหญภายใต้เงื่อนไขความสูงกึ่งในเบต (h/D)=1/3, 2/3 และ 1 และอุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ จากภาพที่ 4.19 แสดงการลดลงของมวลกึ่ง(แกนตั้ง)เมื่อเทียบกับเวลา(แกนนอน) เบื้องต้นพบว่าที่ความสูงเบตยิ่งมากการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งยิ่งมากตามไปด้วยโดยที่ความสูงเบต (h/D)=1/3, 2/3 และ 1 จะใช้เวลาในการอบแห้งเพื่อให้ได้ค่าความชื้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงประมาณ 120, 240 และ 360 min ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณมวลของน้ำในเบตที่ต้องทำระเหยมีค่ามากตามความสูงของเบต ในขณะที่ผลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ส่งผลต่อการอบแห้งพบว่า การใช้อุณหภูมิอากาศร้อนที่ 80°C จะให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการใช้อุณหภูมิของการอากาศร้อนที่ 60°C และ 70°C (โดยสังเกตได้จากการลดลงของมวลกึ่งในทุกกรณี) เนื่องจากผลของอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงทำให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้การระเหยของน้ำภายในตัวกึ่งเป็นไปได้โดยง่ายกว่าการใช้อากาศร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยเมื่อได้นำเสนอการลดลงของมวลด้วยเทอมของอัตราส่วนมวลดังแสดงในภาพที่ 4.20 พบว่า อัตราส่วนการลดลงของมวลกึ่งที่ค่าความสูงเบต $h/D=1/3$ จะมีการลดลงที่สูงกว่า $h/D=2/3$ และ 1 ซึ่งเป็นผลมาจากมวลรวมของกึ่งในเบตที่น้อยกว่าส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ต้องทำระเหยมีค่าน้อยตามไปด้วย การลดลงของมวลน้ำในเบตที่ค่าความสูง $h/D=1/3$ จึงลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นความหนาแน่นของตัวกึ่งเมื่อเทียบกับปริมาตรเบตอบแห้งมีค่าไม่สูง การเกิดฟลูอิดซ์เซชันของตัวกึ่งภายในเบตจึงเกิดอย่างสมบูรณ์

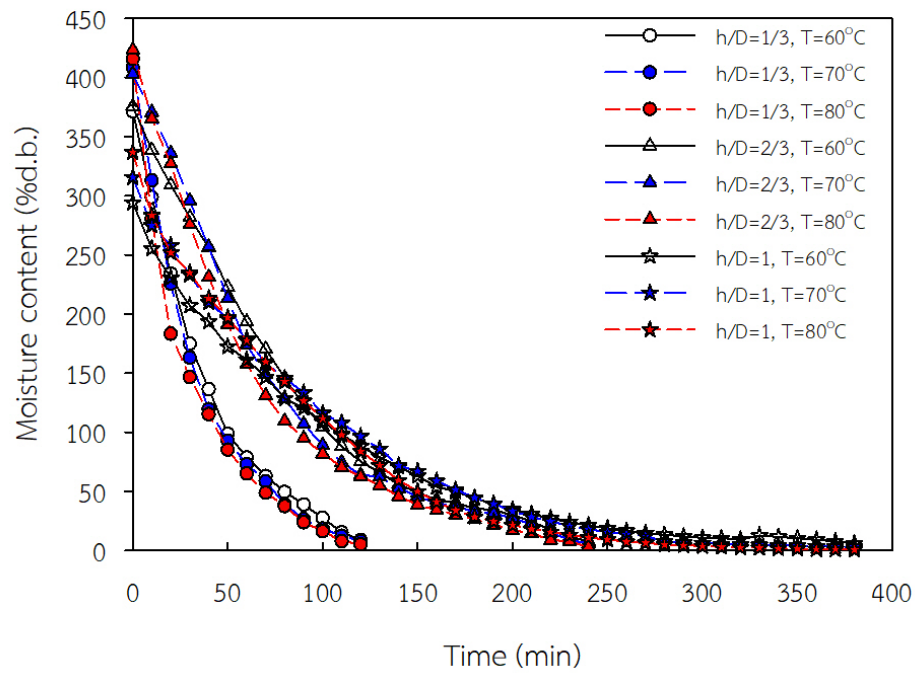
จาก ภาพที่ 4.21 และ ภาพที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของความชื้นกึ่งต้มสุกภายในเบต และความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของอัตราส่วนความชื้นกึ่งต้มสุกภายในเบต (h/D)=1/3, 2/3 และ 1 ที่อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าผลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ 80°C จะมีการลดลงของความชื้นกึ่งที่สูงกว่าการใช้อุณหภูมิของการอากาศร้อนที่ 60°C และ 70°C อันเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของระดับอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนกับตัวกึ่ง ค่าการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนสู่น้ำที่อยู่ในตัวกึ่งยังมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในตัวกึ่งสู่อากาศร้อนเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ผลของความสูงของกึ่งต้มสุกภายในเบตยิ่งสูงจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นานกว่า นอกจากนั้นยังมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำด้วย ซึ่งเกิดจากปริมาณของมวลน้ำที่อยู่ภายในตัวกึ่งมีค่ามาก จะเห็นได้ความสูงของกึ่งต้มสุกภายในเบตที่ (h/D)=1/3 มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นที่ลดลงเร็วกว่าความสูงของกึ่งต้มสุกภายในเบตที่ (h/D)=2/3 และ 1 เพราะปริมาณของน้ำที่ต้องทำการระเหยออกจากตัวกึ่งก็มีค่าน้อยกว่า จากการอบแห้งกึ่งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบตที่ความสูงของกึ่งต้มสุกภายในเบต (h/D)=1/3 โดยใช้อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 60°C, 70°C และ 80°C เพื่อให้ได้ค่าความชื้นมาตรฐานการผลิตกึ่งแห้งเท่ากับ 30 %d.b. จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งกึ่งประมาณ 98, 87 และ 85 min ตามลำดับ โดยผลของความสูงของกึ่งต้มสุกภายในเบต (h/D)=2/3 จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งกึ่งประมาณ 200, 193 และ 170 min ตามลำดับ และขณะที่ความสูงของกึ่งต้มสุกภายในเบต (h/D)=1 จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งกึ่งประมาณ 212, 207 และ 177 min ตามลำดับ



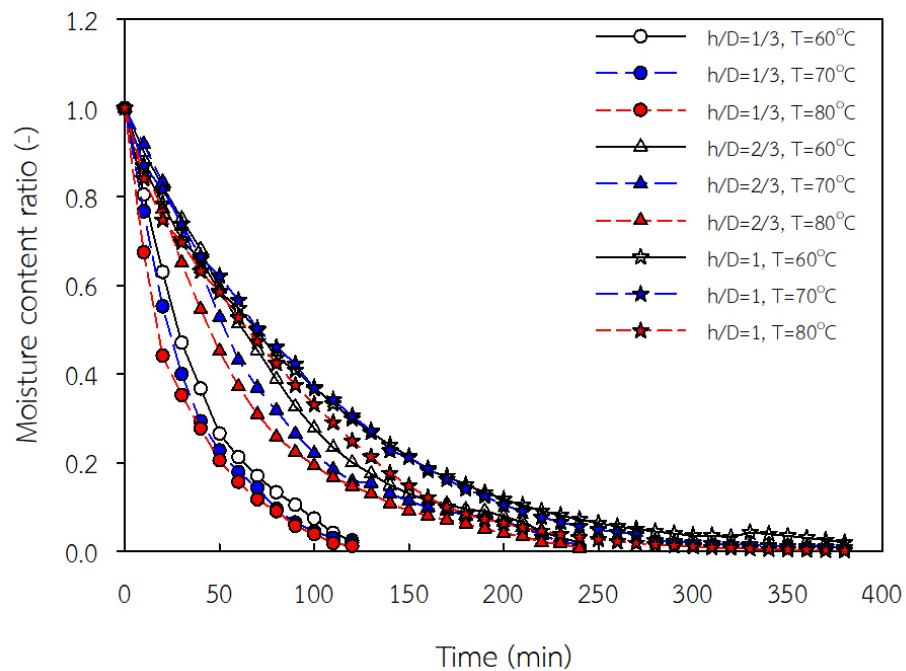
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด สำหรับ $(h/D)=1/3, 2/3$ และ 1 และอุณหภูมิอากาศร้อน $60^{\circ}\text{C}, 70^{\circ}\text{C}$ และ 80°C ตามลำดับ



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมวลกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด สำหรับ $(h/D)=1/3, 2/3$ และ 1 และอุณหภูมิอากาศร้อน $60^{\circ}\text{C}, 70^{\circ}\text{C}$ และ 80°C ตามลำดับ



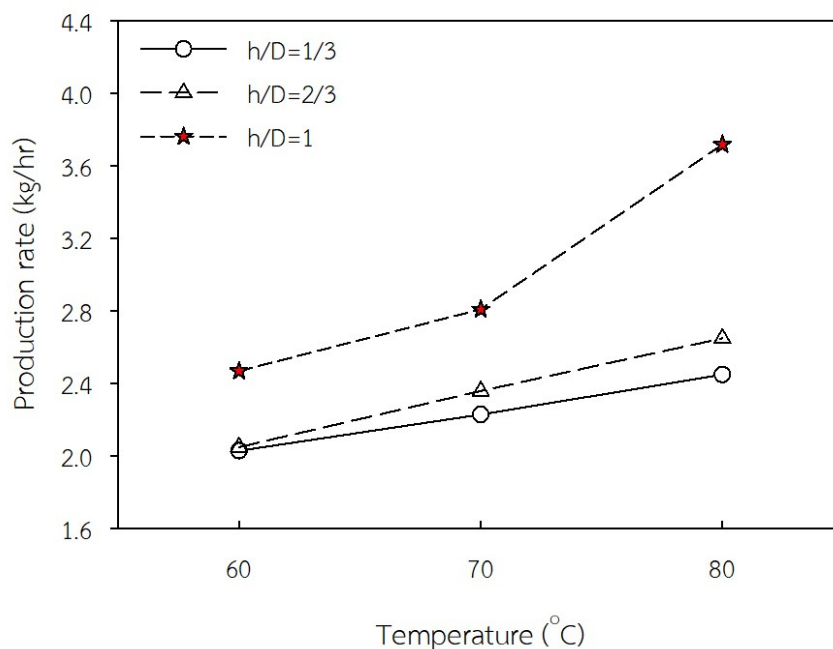
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบต สำหรับ $(h/D)=1/3, 2/3$ และ 1 และอุณหภูมิอากาศร้อน $60^{\circ}\text{C}, 70^{\circ}\text{C}$ และ 80°C ตามลำดับ



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบต สำหรับ $(h/D)=1/3, 2/3$ และ 1 และอุณหภูมิอากาศร้อน $60^{\circ}\text{C}, 70^{\circ}\text{C}$ และ 80°C ตามลำดับ

4.4 อิทธิพลของอากาศร้อนและความสูงเบตต่ออัตราการผลิตกุ้งแห้ง

เมื่อพิจารณาอัตราการผลิตกุ้งแห้งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.7012-2551) ด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบตโดยพิจารณาที่ความชื้นตามมาตรฐานการผลิตกุ้งแห้งเท่ากับ 30 %d.b. โดยได้เปรียบเทียบกับมวลกุ้งเริ่มต้นต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ค่าความชื้นตามกำหนดผลการทดลองพบว่าอัตราการผลิตกุ้งแห้งที่ความสูงเบต (h/D)=1/3 มีค่าเท่ากับ 2.03, 2.23 และ 2.45 kg/hr สำหรับอุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ ในส่วนของอัตราการผลิตกุ้งแห้งสำหรับความสูงเบต (h/D)=2/3 มีค่าเท่ากับ 2.05, 2.36 และ 2.65 kg/hr ที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ และกรณีอัตราการผลิตกุ้งแห้งสำหรับที่ความสูงเบต (h/D)=1 สำหรับการใช้อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C มีอัตราการผลิตเท่ากับ 2.47, 2.81 และ 3.72 kg/hr ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตกุ้งแห้งสำหรับที่ความสูงของกุ้งภายในเบต (h/D)=1 มีอัตราการผลิตกุ้งแห้งที่สูงกว่าอัตราการผลิตกุ้งแห้งสำหรับที่ความสูงของกุ้งภายในเบต (h/D)=1/3 และ 2/3 ภายใต้การทดสอบที่กำลังขับปั๊มคงตัว จากการวิเคราะห์การอบแห้งกุ้งสำหรับอัตราการผลิตกุ้งแห้งที่ความสูงของกุ้งภายในเบต (h/D)=1/3 และ 2/3 มีความหนาของชั้นกุ้งที่น้อย ส่งผลให้ระยะเวลาของอากาศร้อนที่ไหลผ่านชั้นกุ้งภายในเบตมีระยะเวลาที่สั้น ทำให้ระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนสู่ตัวกุ้งมีค่าที่ต่ำ ในขณะที่อัตราการผลิตกุ้งแห้งสำหรับที่ความสูงของกุ้งภายในเบต (h/D)=1 มีความหนาของชั้นกุ้งที่มาก ส่งผลให้ระยะเวลาของอากาศร้อนที่ไหลผ่านชั้นกุ้งภายในเบตมีระยะเวลานานกว่า จึงทำให้ระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนสู่ตัวกุ้งมีค่าที่สูง โดยอัตราการผลิตกุ้งแห้งเทียบจากมวลกุ้งเริ่มต้นสูงสุดถึง 3.72 kg/hr สำหรับอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 80°C ดังแสดงในภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 อัตราการผลิตกุ้งแห้งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.7012-2551) ประเภท กุ้งแห้ง ของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (กุ้งขนาดใหญ่)

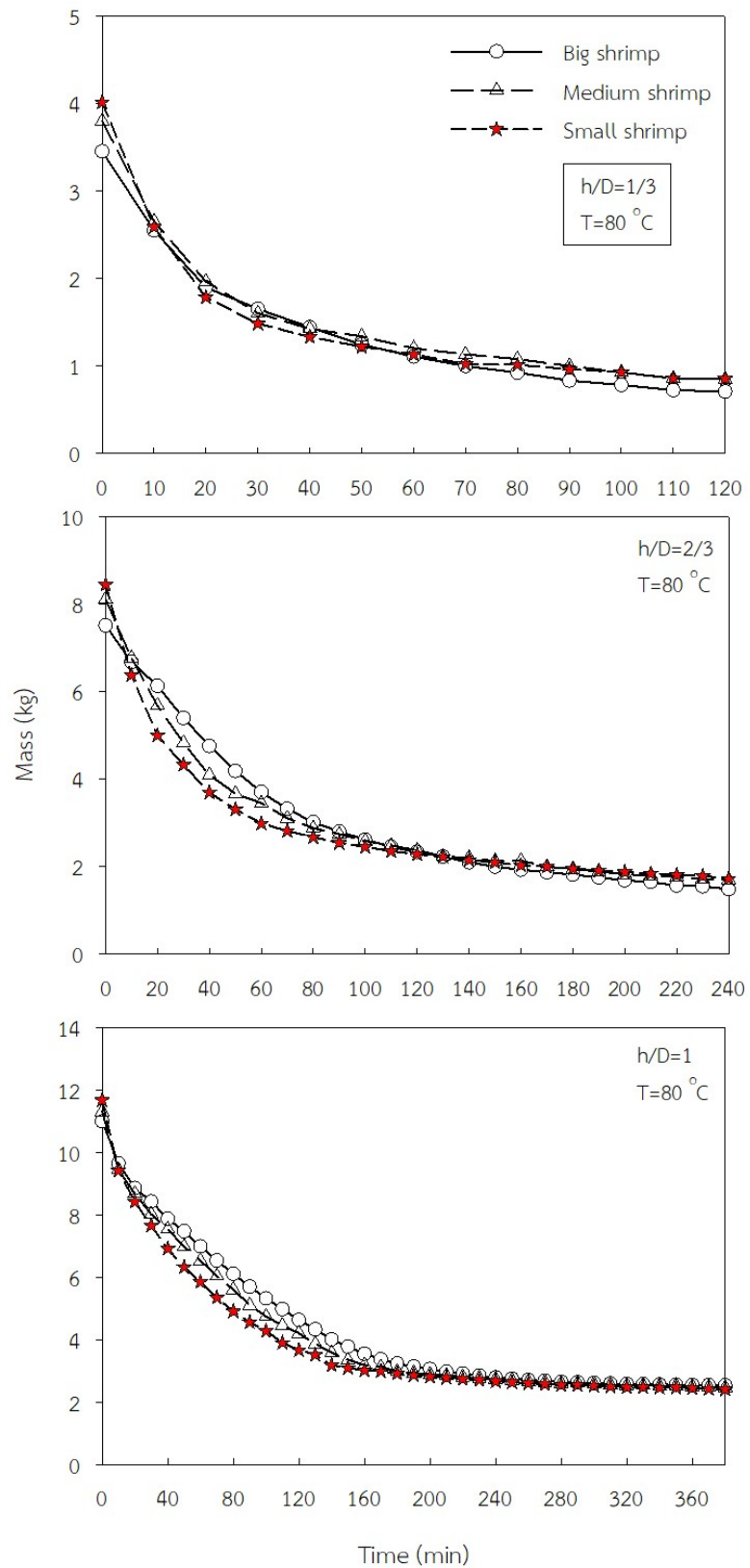
4.5 อิทธิพลของขนาดกึ่ง

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนออิทธิพลของขนาดกึ่งที่ส่งผลต่อการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด ซึ่งเป็นผลการทดลองต่อเนื่องจากหัวข้อก่อนหน้านี้ที่ได้ทำการหาเงื่อนไขการอบแห้งกึ่งขนาดใหญ่ที่เกิดสภาวะฟลูอิดซ์เซชันอย่างสมบูรณ์ ในการศึกษาอิทธิพลของขนาดกึ่งที่ใช้ในการอบแห้งได้ทำการทดลองผลของขนาดกึ่ง 3 ขนาด คือ กึ่งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ภายใต้ความสูงเบด 3 ค่า คือ $h/D=1/3$, $2/3$ และ 1 ตามลำดับ โดยได้กำหนดให้อุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งคงที่เท่ากับ 80°C ดังแสดงในภาพที่ 4.24 – 4.27 ที่จะนำเสนอต่อไปนี้

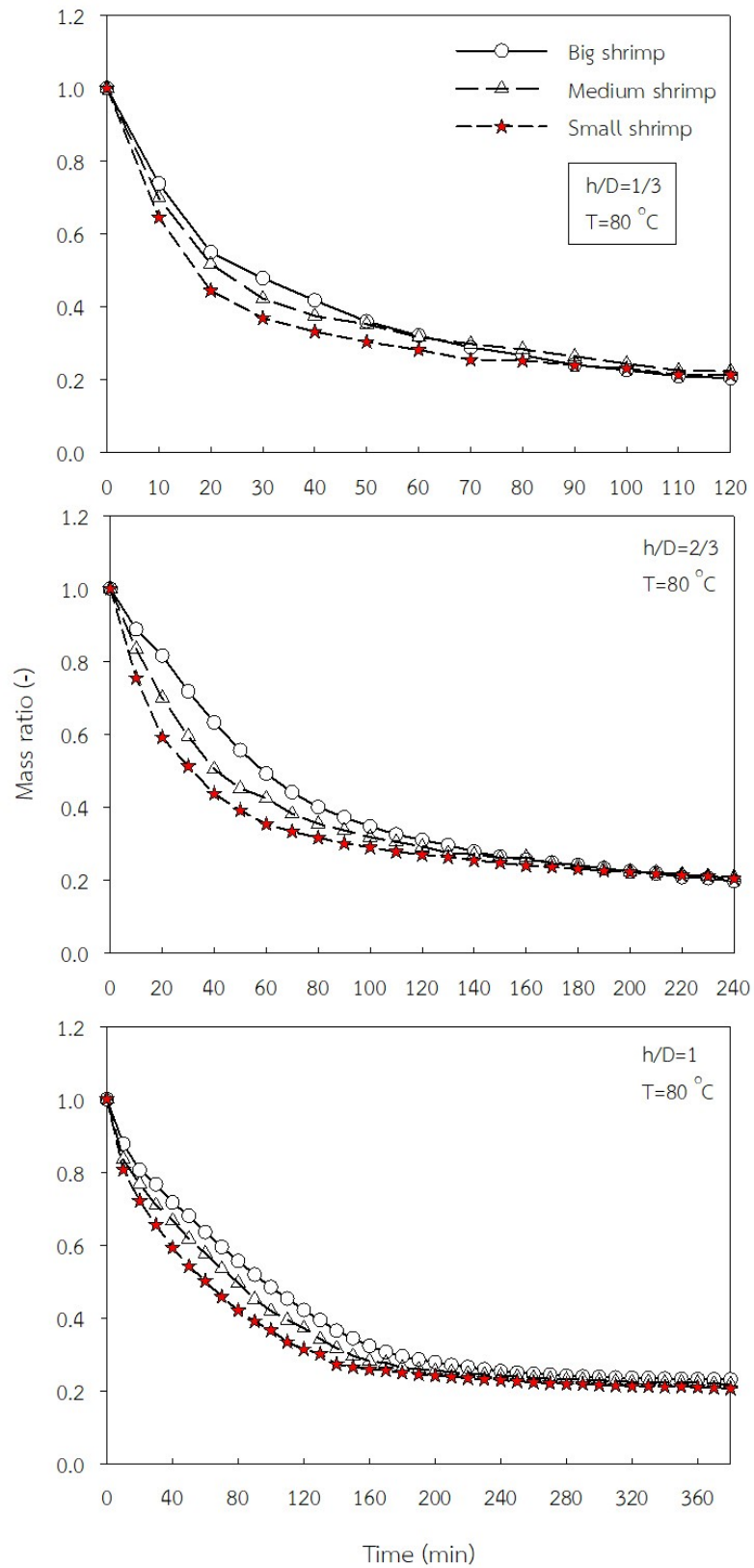
จากภาพที่ 4.24 แสดงผลการทดลองของมวลกึ่งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยกราฟด้านบน กลาง และ ด้านล่าง เป็นผลการทดลองที่ค่าความสูงเบด $h/D=1/3$, $2/3$ และ 1 ตามลำดับ ผลการทดลองเบื้องต้นพบว่ามวลของกึ่งจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งสอดคล้องกับผลก่อนหน้านี้ โดยผลของขนาดกึ่งที่ใช้ในการอบแห้งเผยให้เห็นว่า กึ่งขนาดเล็กจะมีแนวโน้มการลดลงของมวลที่สูงกว่ากึ่งขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ตามลำดับ ในส่วนของระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของค่าความสูงเบด ยังคงมีแนวโน้มเช่นเดิมคือเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความสูงเบด

เมื่อนำเสนอผลของอัตราส่วนมวลกึ่งต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.25 พบว่าอิทธิพลของขนาดกึ่งที่ส่งผลต่อการอบแห้งมีความเห็นชัดเจนขึ้น โดยขนาดของกึ่งที่ใช้ในการอบแห้งเล็กลง การลดลงอัตราส่วนมวลยิ่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นพบว่าการอบแห้งกึ่งขนาดเล็กภายใต้ค่าความสูงเบดเดียวกัน อากาศร้อนจะไหลผ่านตัวกึ่งขนาดเล็กแต่ละตัวได้อย่างทั่วถึง อีกทั้งตัวกึ่งแต่ละตัวจะมีมวลที่น้อย การเกิดฟลูอิดซ์เซชันจึงเป็นไปได้ดีกว่ากึ่งขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอัตราส่วนมวลในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง 60, 120 และ 200 min สำหรับที่ความสูงเบด $h/D=1/3$, $2/3$ และ 1 ตามลำดับ

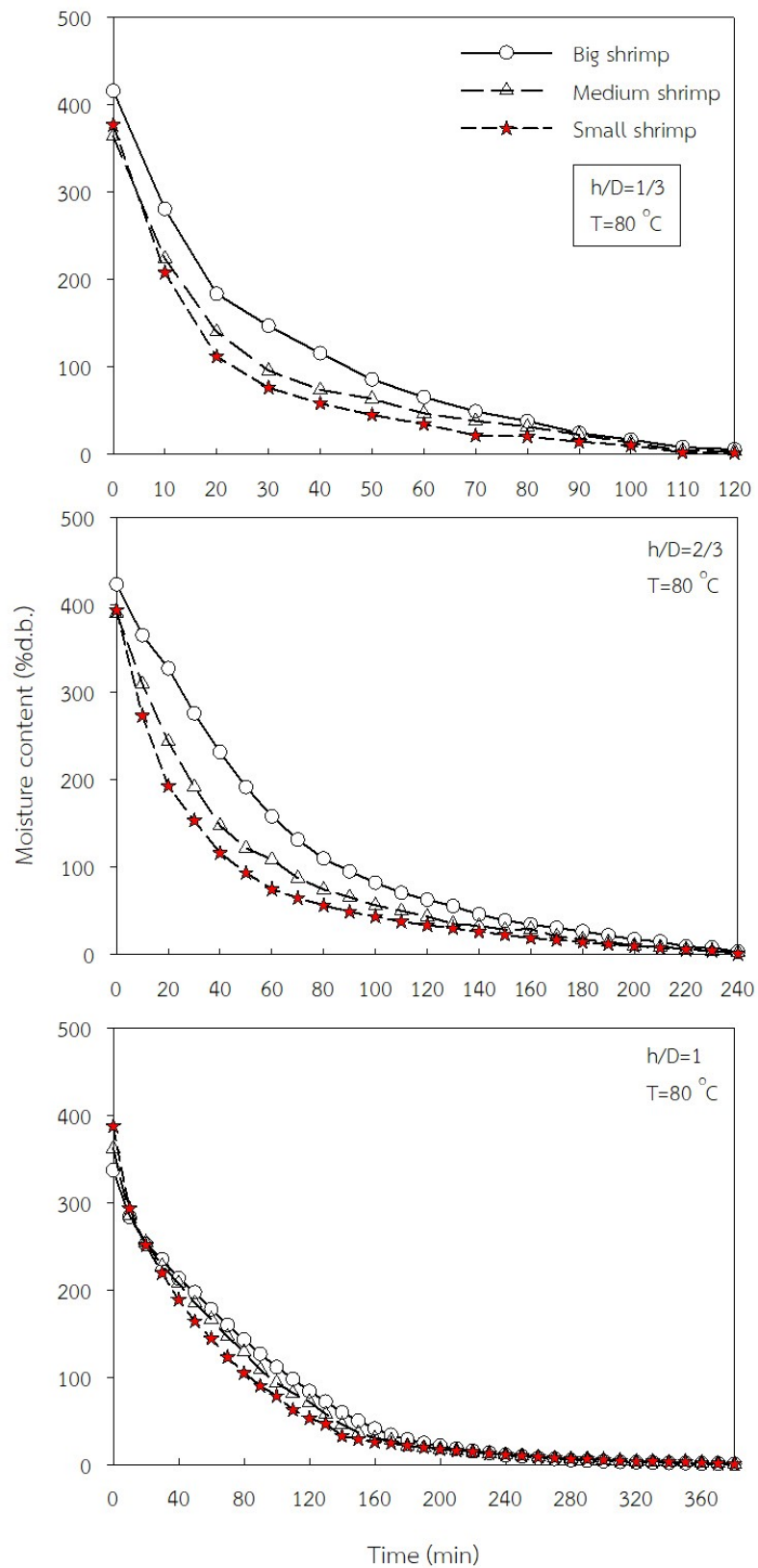
สำหรับภาพที่ 4.26 และ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกึ่งกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และอัตราส่วนความชื้นกึ่งกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสำหรับ $(h/D)=1/3$, $2/3$ และ 1 ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 80°C ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าค่าความชื้นเริ่มต้นของกึ่งแต่ละขนาดยังคงมีความแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากคุณลักษณะของกึ่งแต่ละตัวที่ไม่เหมือนกัน ในเบื้องต้นแนวโน้มของผลที่ได้จากการทดลองยังมีความสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้คือ ค่าความชื้นมีการลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นในแง่ของการศึกษาอิทธิพลของขนาดกึ่งที่ใช้ในการอบแห้งพบว่า กึ่งขนาดเล็กเมื่อผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบดจะมีการลดลงของค่าความชื้นที่สูงกว่ากึ่งขนาดกลางและขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นผลมาจากคุณลักษณะการไหลของอากาศร้อนที่ไหลผ่านกึ่งแต่ละตัวที่ ดีกว่า อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงกลไกการแพร่ที่เกิดขึ้นภายในตัวกึ่ง พบว่ามวลของน้ำที่อยู่ชั้นในของเนื้อกึ่งขนาดใหญ่จะต้องใช้ระยะทางและระยะเวลาในการแพร่ความชื้นสู่ชั้นผิวนอกของตัวกึ่งนานกว่ากึ่งขนาดเล็ก ส่งผลให้อัตราการลดลงของค่าความชื้นมีค่าไม่ดันทันเมื่อเทียบกับกึ่งขนาดเล็ก แต่จะให้ค่าความชื้นที่ใกล้เคียงกันเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลองของแต่ละกรณี เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งแต่ละขนาดที่ระดับความชื้นมาตรฐานแห้ง 30% d.b. ตามมาตรฐาน พบว่าการอบแห้งกึ่งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 80°C และ $h/D=1/3$ สำหรับกึ่งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ จะใช้เวลาประมาณ 68, 81 และ 85 min ตามลำดับ ในขณะที่ $h/D=2/3$ สำหรับกึ่งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ จะใช้เวลาประมาณ 130, 144 และ 170 min ตามลำดับ และ $h/D=1$ สำหรับกึ่งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ จะใช้เวลาประมาณ 145, 161 และ 177 min ตามลำดับ



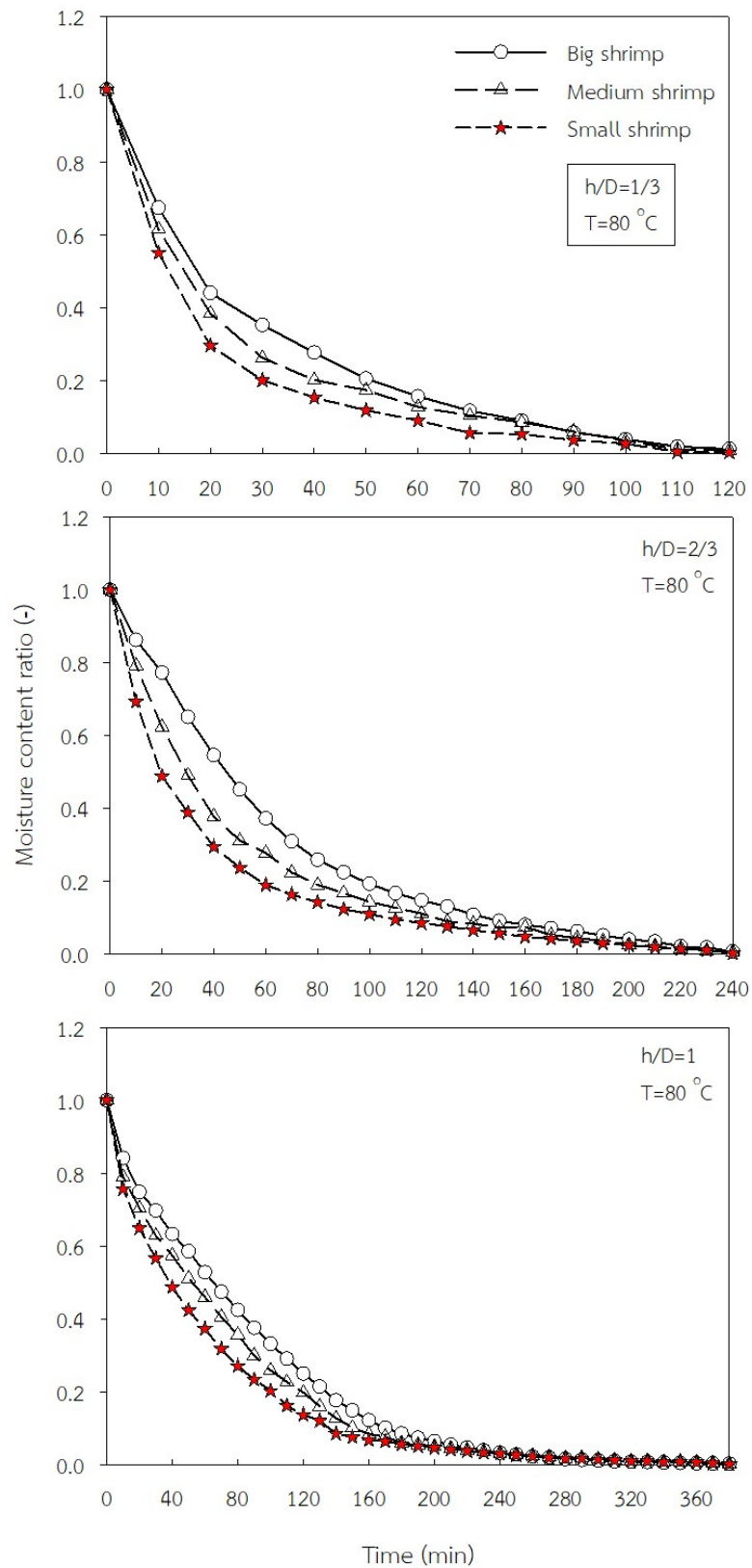
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกุ้งต้มสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด สำหรับ $(h/D)=1/3, 2/3$ และ 1 ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 80°C



ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมวลกุ้งต้มสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบด สำหรับ $(h/D) = 1/3, 2/3$ และ 1 ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 80°C



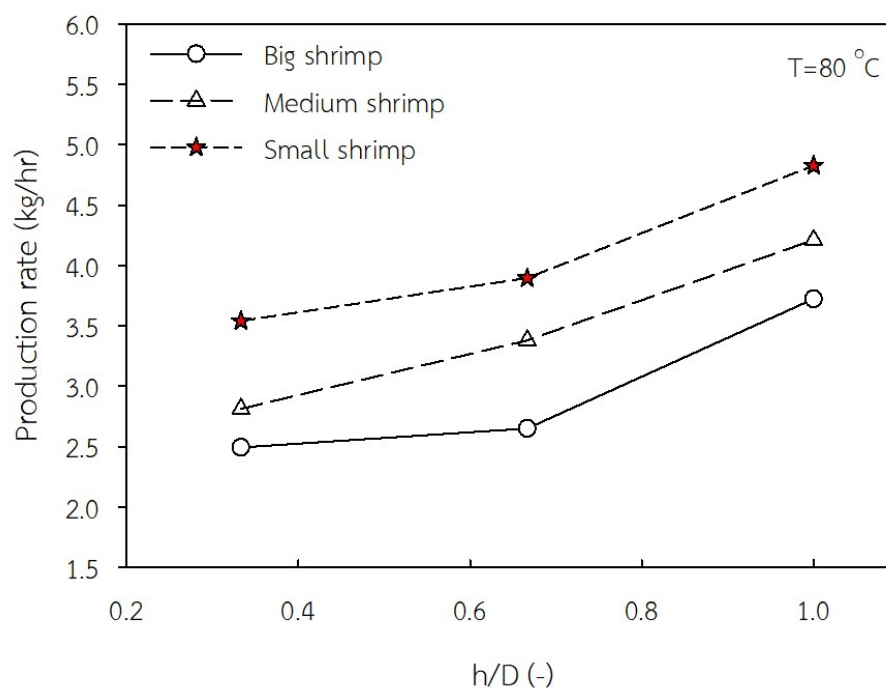
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกึ่งตมสุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด สำหรับ $(h/D)=1/3, 2/3$ และ 1 ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 80°C



ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกึ่งตม้สุกกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์-เบด สำหรับ $(h/D) = 1/3, 2/3$ และ 1 ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 80°C

4.6 อิทธิพลของขนาดกุ้งต่ออัตราการผลิตกุ้งแห้ง

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของขนาดกุ้งต่ออัตราการผลิตกุ้งแห้งโดยอ้างอิงตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.7012-2551) ด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดโดยพิจารณาที่ความชื้นเท่ากับ 30 %d.b. ดังแสดงในภาพที่ 4.28 ผลการพิจารณาพบว่าอัตราการผลิตกุ้งแห้งที่ความสูงเบด (h/D)=1/3 มีค่าเท่ากับ 3.54, 2.81 และ 2.45 kg/hr สำหรับ กุ้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และ ขนาดใหญ่ ตามลำดับ ในส่วนของอัตราการผลิตกุ้งแห้งสำหรับความสูงเบด (h/D)=2/3 มีค่าเท่ากับ 3.9, 3.38 และ 2.65 kg/hr สำหรับ กุ้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และ ขนาดใหญ่ ตามลำดับ และกรณีอัตราการผลิตกุ้งแห้งสำหรับที่ความสูงเบด (h/D)=1 สำหรับ กุ้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และ ขนาดใหญ่ มีอัตราการผลิตเท่ากับ 4.83, 4.21 และ 3.72 kg/hr ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตกุ้งแห้งจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความสูงเบดและเพิ่มขึ้นตามการลดลงของขนาดกุ้ง ซึ่งผลของความสูงเบดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งได้ถูกนำเสนอไปก่อนหน้านี้ ในกรณีที่อิทธิพลของขนาดกุ้งที่ส่งผลต่ออัตราการผลิต จากการวิเคราะห์ค่าที่ได้จากการอบแห้งกุ้งในแง่ของการเปลี่ยนแปลงมวลและความชื้นพบว่า กลไกการแพร่ ความชื้น/มวลของน้ำในเนื้อกุ้งขนาดใหญ่ที่เกิดหลังจากความชื้นที่ผิวกุ้งมีความชื้นต่ำจะมีอัตราการแพร่ที่ต่ำเนื่องจากระยะทางในการแพร่มวล/ความชื้นจากชั้นในของเนื้อกุ้งสู่ผิวนอกสุดมีค่ามากนั่นเอง อีกทั้งการเกิดฟลูอิดซ์เซชันของกุ้งขนาดเล็กเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้อัตราการผลิตกุ้งแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบดที่ค่า $h/D=1$ และอุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 80°C สำหรับกุ้งขนาดเล็กมีค่าสูงสุดถึง 4.83 kg/hr



ภาพที่ 4.28 อัตราการผลิตกุ้งแห้งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.7012-2551) ประเภท กุ้งแห้ง ของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การอบแห้งกุ้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหากระบวนการผลิตกุ้งแบบดั้งเดิม(ตากแดด) ที่มีข้อเสียหลายประการ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการทดลองทั้งกระบวนการอบแห้งกุ้งด้วยวิธีตากแดดเพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบกระบวนการผลิตกุ้งแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบดซึ่งได้นำเสนออิทธิพลของขนาดกุ้ง(ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่) ความสูงของเบด($h/D=1/3, 2/3$ และ 1) และอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้สำหรับอบแห้ง(60°C , 70°C และ 80°C) ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในการอบแห้งกุ้งด้วยวิธีดั้งเดิม งานวิจัยนี้ได้ทดลองตากแดดกุ้งทั้ง 3 ขนาด เพื่อลดความชื้นกุ้งตั้งแต่วันที่ 8.00 – 17.00 น. ของวันที่ 13 และ 14 เมษายน 2560 ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า เมื่อได้ทำการตากแห้งกุ้งต้มสุกทั้ง 3 ขนาดเป็นระยะเวลา 2 วัน (18 hr) ค่าความชื้นสุดท้ายของกุ้งแห้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18, 23 และ 28 %d.b. สำหรับกุ้งขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อเสียในเรื่องของระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่นานถึงแม้จะตากแห้งในช่วงที่บรรยากาศมีค่าความร้อนสูงสุดของปีก็ตาม

2. สำหรับการผลิตกุ้งแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด ซึ่งได้ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศร้อนสำหรับการอบแห้งกุ้งที่อุณหภูมิ 60°C , 70°C และ 80°C พบว่า อัตราการอบแห้งกุ้งต้มสุกจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิอากาศร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนก่อให้เกิดความแตกต่างของระดับอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนกับตัวกุ้ง ค่าการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนสู่น้ำที่อยู่ในตัวกุ้งจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในตัวกุ้งสู่อากาศร้อนเพิ่มสูงขึ้น

3. การศึกษาผลของความสูงเบด($h/D=1/3, 2/3$ และ 1) ที่มีผลต่อการอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งของกุ้งต้มสุกจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความสูงของเบด นอกจากนั้นยังส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเกิดจากปริมาณของมวลน้ำที่อยู่ภายในตัวกุ้งมีค่ามาก อีกทั้งในช่วงต้นของกระบวนการลดความชื้นกุ้งต้มสุกภายในกรณีเบด($h/D=1$) จะเกิดค่าความดันตกคร่อมของอากาศร้อนภายในเบดที่สูง ส่งผลให้อากาศร้อนที่ไหลผ่านชั้นตัวกุ้งมีความเร็วต่ำส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนสู่ตัวกุ้งมีค่าไม่สูง เมื่อเทียบกับกรณีความสูงเบด $h/D=1/3$ และ $2/3$

4. กรณีผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดตัวกุ้งต่ออัตราการอบแห้งพบว่า อัตราการอบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการลดลงของขนาดตัวกุ้ง เนื่องจากการอบแห้งกุ้งขนาดเล็กภายใต้ค่าความสูงเบดและอุณหภูมิเดียวกัน อากาศร้อนจะไหลผ่านตัวกุ้งขนาดเล็กแต่ละตัวได้อย่างทั่วถึง อีกทั้งตัวกุ้งแต่ละตัวมีมวลที่น้อย การเกิดฟลูอิดซ์เซชันจึงเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์กว่ากุ้งขนาดกลาง และขนาดใหญ่ นอกจากนั้นผลของการแพร่ที่เกิดขึ้นภายในตัวกุ้ง พบว่ามวลของน้ำที่อยู่ชั้นในของเนื้อกุ้งขนาดใหญ่จะต้องใช้ระยะทางและระยะเวลาในการแพร่ความชื้นสู่ชั้นผิวนอกของตัวกุ้งนานกว่ากุ้งขนาดเล็ก

5. อัตราการผลิตกุ้งแห้งโดยอ้างอิงตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.7012-2551) ด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดโดยพิจารณาที่ความชื้นเท่ากับ 30 %d.b. พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง เพิ่มขึ้นตามความสูงของเบด และเพิ่มขึ้นตามการลดลงของขนาดกุ้ง อัตราการผลิตกุ้งแห้งภายใต้ความสูงเบด ($h/D=1$) และอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 80°C มีอัตราการผลิตกุ้งแห้งสูงสุดถึง 4.83, 4.21 และ 3.72 kg/hr สำหรับกุ้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

เบื้องต้นของผลที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่าชุดทดลองยังคงต้องมีการพัฒนาในเรื่องของระบบการผลิตที่เป็นแบบต่อเนื่องโดยนำเงื่อนไขการทดลองที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้เช่น อุณหภูมิอากาศร้อน อัตราการไหล ความสูงเบด และขนาดตัวกึ่ง ออกแบบระบบผลิตแบบอัตโนมัติ อีกทั้งในระหว่างการอบแห้งในระยะเวลาหนึ่ง เนื้อกึ่งเริ่มหดตัวลงส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างเปลือกกับเนื้อกึ่ง ซึ่งเป็นอุปสรรคของกลไกการแพร่ความชื้นของมวลน้ำในตัวกึ่งสู่อากาศร้อน อัตราการอบแห้งจึงยังไม่ใช่ว่าดีที่สุดที่สุด ดังนั้นควรมีอุปกรณ์ช่วยกะเทาะเปลือกกึ่งในระบบเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้งให้สูงขึ้น

5.3 ความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์

เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดเปรียบเทียบกับวิธีการตากแห้งแบบดั้งเดิม พบว่าต้นทุนของเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดมีค่าประมาณ 60,000 บาท ในการทำแห้งกึ่งขนาดเล็กวันละ 8 hr ต้นทุนของกึ่งสดราคา kg ละ 100 บาท $\times$ 8 hr $\times$ 15 kg/hr เป็นเงิน 12,000 บาท ต้นทุนค่า LPG วันละ 175 บาท รวมเป็นเงิน 12,175 บาท/วัน ซึ่งจะได้กึ่งแห้งจำนวน $4.83 \text{ kg/hr} \times 8 \text{ hr} = 38.64 \text{ kg}$ โดยขายได้ในราคา kg ละ 500 บาท เป็นเงินได้เท่ากับ 19,320 บาท/วัน ดังนั้นรายได้ต่อวันเท่ากับ $19,320 - 12,175 = 7,145$ บาท/วัน ดังนั้นจุดคุ้มทุนของการอบแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดนี้มีค่าเท่ากับ $60,000 / 7,145 = 8.4$ วัน หรือต้องขายกึ่งแห้งได้เท่ากับ 325 kg

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, “การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540
- [2] M. Abid, R. Gibert, C. Laguerie, An experimental and theoretical analysis of the mechanisms of heat and mass transfer during the drying of corn grains in a fluidized bed, *International Chemical Engineering*, 30 (4) (1990), pp. 632-642.
- [3] W. Kaensup, S. Wongwises, S. Chutima, Drying of pepper seeds using a combined microwave/fluidized bed dryer, *Drying Technology*, 16 (1998), pp. 853-862.
- [4] A. Reyes, P.I. Alvarez, F.H. Marquardt, Drying of carrots in a fluidized bed. Effect of drying conditions and modeling, *Drying Technology*, 20 (2002), pp. 1463-1483.
- [5] S. Soponronnarit, A. Pongtornkulpanich, S. Prachayawarakorn, Drying characteristics of corn in fluidized bed dryer, *Drying Technology*, 15 (1997), pp. 1603-1615.
- [6] Woramate Tudtong, Smith Eiamsa-ard, PurinAkkarakultron and PongjetPromvonge, Modeling of coffee bean drying in a fluidized-bed, *The Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2004)*, Paper number HS-211, 1-3 December 2004, Thailand.
- [7] P. Promvonge, A. Boonloi, M. Pimsarn, C. Thianpong, Drying characteristics of peppercorns in a rectangular fluidized-bed with triangular wavy walls, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38 (2011), pp. 1239-1246.
- [8] T. Madhiyanon, A. Phila and S. Soponronnarit, Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut, *Applied thermal engineering*, 29 (2009), pp. 2849-2854.
- [9] K. Daizo and L. Octave, *Fluidization Engineering 2nd*, Elsevier's Science and Technology Right Department in Oxford, UK
- [10] ปัญญา ตีระกิจวัฒนา, “การให้ความร้อนกับถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศร้อนร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อน”, *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 2549
- [11] คณินนิตย์ จัปใจเหมาะ, “การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เซชันที่เบดสูง”, *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องจักรกลเกษตร, มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 2548
- [12] มานิต สุจ้านงค์, วชรินทร์ ดงบัง และ กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย, “การอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ กข. 10 ด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบด, *วิศวกรรมสาร มข*, ปีที่ 32 ฉบับที่ 2, 2548
- [13] สมบัติ ก้ามมอญ, สมเกียรติ ปรัญญาวารการ, ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์, พชร ตั้งตระกูล และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, “เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวหอมมะลิด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เซชัน”, *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4*, 2551
- [14] อนันต์ พงศ์ธรรณพานิช, “การศึกษาการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไคซ์เซชัน”, *วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 2539
- [15] มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช. 7012-2551) ประเภท กุ้งแห้ง ของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ภาคผนวก
บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

อิทธิพลของช่องเจ็ทพุ่งชนที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนในเครื่องสร้างอากาศร้อน

INFLUENCE OF IMPINGING SLOT JETS ON THERMAL PERFORMANCE IN AN AIR HEATER

ขวัญชัย หนาแน่น

ปวิณ สุขบรรเทิง

ยุทธนา พลอยฉาย

อุทัย ผ่องศรี

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์เทคโนโลยี

อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000

โทร 032-493-300

E-mail: ae_bew@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลของช่องเจ็ทพุ่งชนที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนในช่องการไหลที่มีความกว้าง (W) ความสูง (H) และยาว (L) เท่ากับ 100, 10 และ 270 มิลลิเมตร ตามลำดับ ขณะที่ช่องเจ็ทพุ่งชนมีอัตราส่วนความกว้างช่องเจ็ทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ (B/D_h) เท่ากับ 0.2 ระยะห่างระหว่างช่องเจ็ทพุ่งชนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ (S/D_h) เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 โดยของไหลที่ใช้ในการทดสอบคืออากาศ สำหรับเลขเรย์โนลด์ส (Re) พิจารณาที่เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ที่มีค่าระหว่าง 4000 ถึง 20,000 ผลที่ได้จากการทดสอบเผยให้เห็นผลของช่องเจ็ทพุ่งชนสามารถช่วยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีแบบดั้งเดิมถึง 2.18 เท่า โดยค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ได้มีค่าสูงสุดถึง 1.81 สำหรับระยะ S/D_h เท่ากับ 2 และเลขเรย์โนลด์สเท่ากับ 4000

คำสำคัญ: การถ่ายเทความร้อน, สมรรถนะทางความร้อน, เครื่องสร้างอากาศร้อน

พิทักษ์ พร้อมไรสง

สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก

กรุงเทพมหานคร 10530

Abstract

This research was presented the influence of impinging slot jets on thermal performance in a channel having width (W), height (H) and length (L) of 100, 10 and 270 mm respectively. While, the ratio of impinging slot jet width and hydraulic diameter (B/D_h) was 0.2 and spacing ratios between slot jet spacing and hydraulic diameter (S/D_h) were 2, 3, 4 and 5 respectively. The working fluid was air and Reynolds numbers based on the hydraulic diameter at the range of 4000 to 20,000. The results obtained the experiment showed that the heat transfer from using the impinging slot jet higher than the conventional around 2.18 times and the maximum of thermal performance up to 1.81 for S/D_h of 2 and Reynolds number of 4000.

Keywords: heat transfer, thermal performance, air heater

1. บทนำ

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีถนอมอาหารวิธีหนึ่งที่ได้รับการยอมรับนิยมเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นการอบแห้งเมล็ดพืชผลทางการเกษตรต่างๆ หรือแม้แต่การอบแห้งอาหารทะเลเช่น กุ้งแห้ง ปลาแห้ง หอยแห้ง ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มระยะเวลาในการเก็บรักษาให้นานยิ่งขึ้น โดยกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนจำเป็นต้องอาศัยเครื่องสร้างอากาศร้อน ไม่ว่าจะเป็นเครื่องสร้างอากาศร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องสร้างอากาศร้อนพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล หรือแม้แต่เครื่องสร้างอากาศร้อนพลังงานไฟฟ้าล้วนแล้วแต่อาศัยกลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างแหล่งพลังงานความร้อนสู่อากาศ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการวิจัยเพื่อพัฒนาการถ่ายเทความร้อนของเครื่องสร้างอากาศร้อนอย่างต่อเนื่อง ทั้งการปรับปรุงสภาพพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน การสอดใส่ชิ้นงานในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อสร้างการไหลหมุนวนปั่นป่วน หรืออาศัยเทคนิคการไหลพุ่งชนด้วยลำเจ็ท ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้นได้

ดังเช่นตัวอย่างงานวิจัยของ Wen และ Jang [1] ได้ทำการทดสอบผลการถ่ายเทความร้อนของผิวทดสอบกรณีที่มีการให้พลั๊กความร้อนแบบคงตัวเพื่อศึกษาผลการไหลพุ่งชนของลำเจ็ทที่มีการการติดตั้ง

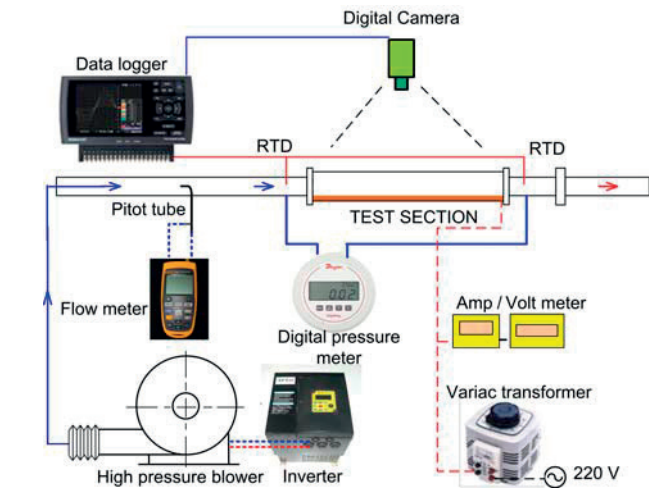
อุปกรณ์สร้างการหมุนและไม่มีการหมุน ภายใต้เลขเรย์โนลด์ส 500 ถึง 27,000 ที่มีระยะห่างระหว่างเจ็ทกับผิวทดสอบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเจ็ทอยู่ในช่วง 3 ถึง 16 ซึ่งได้ทำการศึกษาดังกล่าวถึงการไหลปั่นป่วนและปรากฏการณ์การไหลภายใต้การไหลหมุนของเจ็ทบนพื้นผิวเรียบด้วยวิธีเชิงทฤษฎี ต่อมา Koseoglu และ Baskay [2] ได้ศึกษาอิทธิพลของการไหลปะทะของเจ็ทรูปทรงของหัวฉีด โดยได้ศึกษารูปทรงของหน้าตัดหัวฉีดที่แตกต่างกันซึ่งมีทั้งหน้าตัดแบบวงกลม วงรี และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งพบว่าหัวฉีดที่มีหน้าตัดแบบเป็นช่องยาว สร้างการถ่ายเทความร้อนแบบสม่ำเสมอได้มากกว่าเมื่อเทียบกับหัวฉีดที่มีหน้าตัดวงกลม และการกระจายการถ่ายเทความร้อนนอกจากจะได้รับอิทธิพลจากรูปร่างของหัวฉีดแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาด จำนวน และลักษณะการจัดวางของหัวฉีดอีกด้วย จากนั้น Dae Hee Lee และคณะ [3] ได้ศึกษาผลการไหลพุ่งชนของเจ็ทช่องทางเดียวที่มีการไหลแบบราบเรียบในช่วงเลขเรย์โนลด์ส 120 ถึง 200 และทดสอบผลของอัตราส่วนความกว้างของช่องทางไหล (H/B) ระหว่าง 2 ถึง 10 พบว่าที่ค่า $H/B=2$ มีการกระจายเลขนัสเซลที่สูงที่สุดที่บริเวณจุดหยุดนิ่ง ต่อมา ช่างเจริญ และพรหมวงศ์ [4] ได้ทำการศึกษาคัดตั้งแผ่นกัน

บนพื้นผิวเพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนโดยได้ศึกษาถึงอิทธิพลของระยะของแผ่นกั้นกับศูนย์กลางของช่องเจ็ทพุงชนที่ s/B เท่ากับ 4 – 10 ที่การไหลแบบราบเรียบด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ผลจากการศึกษาพบว่า ค่าเลขนัสเซลล์ที่เฉลี่ยสูงสุดจะเกิดขึ้นในช่วง $7 < s/B < 10$ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 15.4% ถึง 22.7% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งแผ่นกั้น ในปีถัดมา ช้างเจริญ และเพ็ชรกุล [5] ได้ศึกษาต่อเนื่องจาก [4] โดยได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบราบเรียบจากช่องเดี่ยวปะทะบนพื้นผิวแบบจำกัดที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นไว้ ในช่วงเลขเรโนลด์ส (Re) ระหว่าง 120 ถึง 200 ที่ความกว้างของช่องทางไหลต่อความกว้างของหัวฉีด, $H/B=2$ อัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นไว้, $h/B=1.5$ ซึ่งได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนตำแหน่งของแผ่นกั้นไว้ (s/B) และเลขเรย์โนลด์ส ที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยและค่าการกระจายเลขนัสเซลล์และเส้นชั้นของการไหล ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าสูงสุดของเลขนัสเซลล์เฉลี่ยสัมพันธ์กับตำแหน่งของแผ่นกั้นไว้ นอกจากนี้เมื่อตำแหน่งของแผ่นกั้นไว้เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความดันจะเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของเกรเดียนต์ความเร็วรอบๆ แผ่นกั้น โดยค่าสูงสุดของเลขนัสเซลล์ที่เฉลี่ยเกิดขึ้นที่ $s/B=10$ และ $Re=200$ ซึ่งมีค่าสูงกว่ากรณีไม่ติดตั้งแผ่นกั้นไว้ประมาณ 23.36% ล่าสุด สุขบรรเทิง และคณะ [6] ได้ใช้เทคนิคการไหลพุงชนของเจ็ทอากาศในเครื่องสร้างอากาศร้อน โดยได้ศึกษาอิทธิพลของกลุ่มท่อเจ็ทที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในเครื่องทำอากาศร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองพบว่าการไหลพุงชนของกลุ่มเจ็ทอากาศให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น

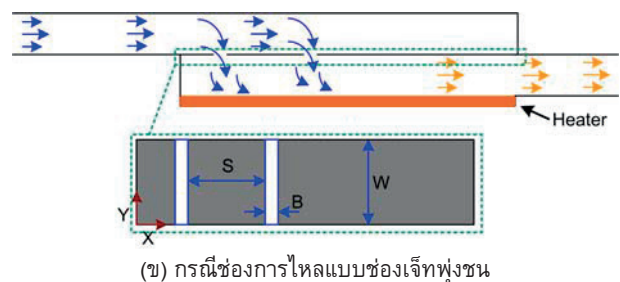
จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2] แสดงให้เห็นถึงหน้าตัดของเจ็ทพุงชนแบบยาวๆ จะให้ค่าการกระจายตัวของการถ่ายเทความร้อนสม่ำเสมอมากกว่ากรณีเจ็ทแบบอื่นๆ จึงเป็นที่มาของการวิจัยนี้ที่ได้ทำการศึกษการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีการให้ความร้อนด้านเดียว โดยช่องเจ็ทไหลพุงชนจะประกอบด้วย 2 ช่องลำการไหลซึ่งได้ศึกษาถึงระยะห่างระหว่างช่องเจ็ทที่ระยะ (S/D_h) เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 ที่ส่งผลต่อค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพื่อใช้

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จากรูปที่ 1 แสดงแผนภาพการทดลองการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลพุงชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ในการทดลองเริ่มจากอากาศที่ถูกขับโดยพัดลมแรงดันสูงขนาด 3 แรงม้าที่มีอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยมีชุดวัดอัตราการไหลแบบ Pitot tube จากนั้นอากาศจะไหลเข้าไปยังช่องการไหลเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับพื้นผิวที่ใช้แผ่นฮีตเตอร์แบบบางโดยมีหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบฟลักซ์ความร้อนคงตัว ซึ่งอีกด้านของแผ่นฮีตเตอร์ได้มีแผ่นเทอร์โมคิวิตคลิสต์ลเพื่อถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลและนำไปวิเคราะห์ผลต่อไปโดยอาศัยหลักการของการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมคิวิตคลิสต์ล ซึ่งสามารถนำค่าอุณหภูมิที่ได้แต่ละจุดภาพไปคำนวณหาการกระจายตัวของค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ ซึ่งที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกช่วงท่อทดสอบได้ติดตั้งทั้งเซ็นเซอร์ RTD และจุดวัดความดันเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 1 แผนภาพชุดทดลองการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลพุงชนผิวแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 2 ช่องเจ็ทพุงชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับรูปที่ 2 (ก) แสดงรูปแบบของช่องการไหลทดสอบแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง (W) ความสูง (H) และยาว (L) เท่ากับ 100, 10 และ 270 มิลลิเมตร ตามลำดับ ขณะที่รูปที่ 2 (ข) แสดงช่องเจ็ทพุงชนมีอัตราส่วนความกว้างช่องเจ็ทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (B/D_h) เท่ากับ 0.2 โดยทดสอบที่ระยะห่างระหว่างช่องเจ็ทพุงชนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (S/D_h) เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งอากาศทดสอบมีเลขเรย์โนลด์ส (Re) ที่พิจารณาบนพื้นฐานเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกที่มีค่าระหว่าง 4000 ถึง 20,000 เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรณีแบบดั้งเดิม

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อน เลขนัสเซลล์เฉลี่ย สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$Q_{air} = Q_{conv} \quad (1)$$

$$Q_{air} = \dot{m} C_p (T_o - T_i) = VI \quad (2)$$

โดยการพาความร้อนที่ผิวสามารถหาได้ดังนี้

$$Q_{conv} = hA(\bar{T}_w - T_b) \quad (3)$$

เมื่อ

$$T_b = (T_o + T_i) / 2 \quad (4)$$

เมื่อ T_w เป็นค่าอุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยอาศัยการกระจายตัวของแผ่นเทอร์โมโครมิกสลิคควิดคลิสต์ล และค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ย สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$Nu = hD / k \quad (5)$$

ค่าตัวประกอบความเสียดทานหาได้จาก

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D}\right)\left(\rho \frac{U^2}{2}\right)} \quad (6)$$

สำหรับค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแลกเปลี่ยนความร้อนที่พิจารณาภายใต้กำลังขับปั๊มเดียวกัน สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{(Nu / Nu_p)^{1/3}}{(f / f_p)^{1/3}} \quad (7)$$

สำหรับการไหลของไหลในช่องทดลอง เลขเรย์โนลด์ส์หาได้จาก

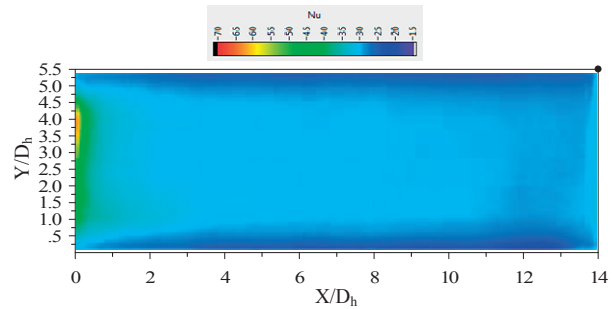
$$Re = \rho UD / \mu = UD / \nu \quad (8)$$

4. ผลการทดลอง

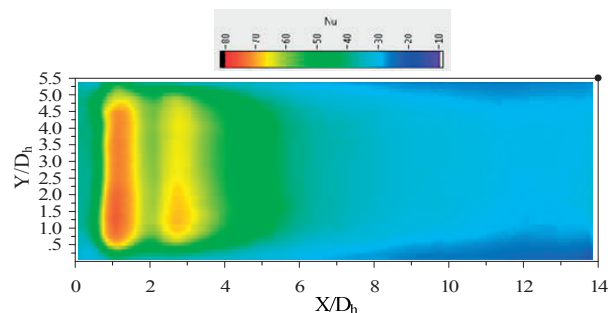
4.1 การถ่ายเทความร้อน (Nu)

จากรูปที่ 3 (ก) แสดงผลกระจายตัวของค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับกรณีท่อเปล่า เบื้องต้นได้ถูกนำไปสอบเทียบความน่าเชื่อถือกับค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์ของ Dittus and Boelter พบว่ามีความคลาดเคลื่อนกันประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) ในขณะที่รูปที่ 3 (ข – จ) แสดงการกระจายตัวของค่าการถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีช่องเจ็ทพุงชนที่ $S/D_h = 2 - 5$ ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดลองเผยให้เห็นถึงอิทธิพลของช่องเจ็ทพุงชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งกรณี $S/D_h = 2 - 5$ ที่มีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่บริเวณเจ็ทพุงชนของไหลพุงชนซึ่งมีจำนวน 2 จุด โดยเปรียบเทียบกับกรณีแบบดั้งเดิมที่จะมีความสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อนำผลของค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้แสดงในรูปแบบการกระจายตัวตามแนวแกนนอน (X) ที่ตำแหน่ง (Y/D_h) ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า ที่ช่วงการไหลของเลขเรย์โนลด์ส์ต่ำๆ การกระจายตัวของค่าการถ่ายเทความร้อนตามแนวแกนนอนของกรณีช่องเจ็ทพุงชนจะมีค่าสูงกว่ากรณีแบบดั้งเดิม โดยมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่บริเวณ $X/D_h = 1$ ซึ่งเป็นตำแหน่งแรกของช่องเจ็ทพุงชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยค่าการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลงตามแนวแกนนอน และจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงอีกจากอิทธิพลของเจ็ทพุงชนในช่องที่สองตามแต่ละกรณีของระยะ S/D_h ซึ่งค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดนี้จะมีค่าต่ำกว่าผลของช่องเจ็ทพุงชน

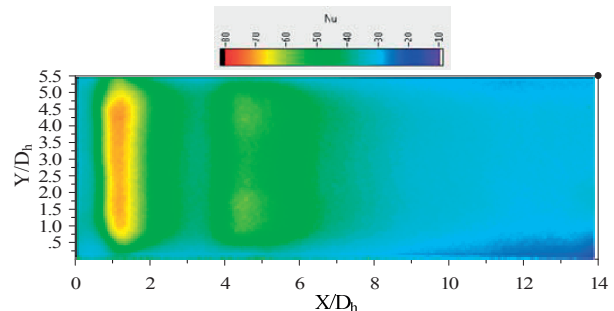
อันเนื่องจากอิทธิพลของเจ็ทพุงชนช่องที่สองนี้จะมีผลของการไหลขวางของอากาศจากช่องเจ็ทพุงชน แต่เมื่อพิจารณาผลของช่องเจ็ทพุงชนที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์สูงๆ (20,000) ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะมีค่าต่ำกว่ากรณีแบบดั้งเดิมที่บริเวณหลังจุดพุงชน ซึ่งเกิดจากการไหลแยกตัวของของไหลที่รุนแรง ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค)



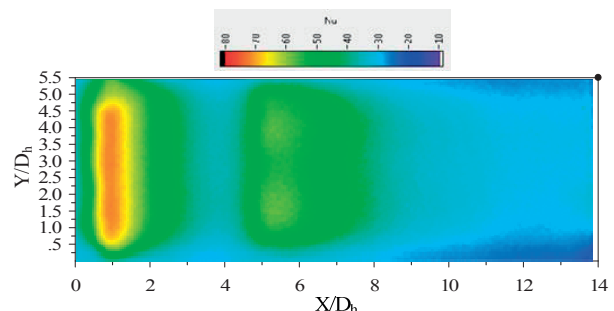
(ก) กรณีช่องการไหลแบบดั้งเดิม



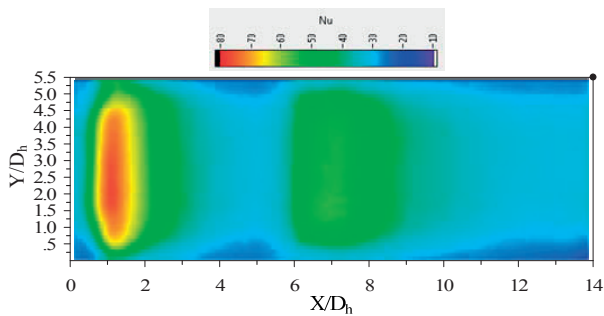
(ข) กรณีช่องการไหล $S/D_h = 2$



(ค) กรณีช่องการไหล $S/D_h = 3$



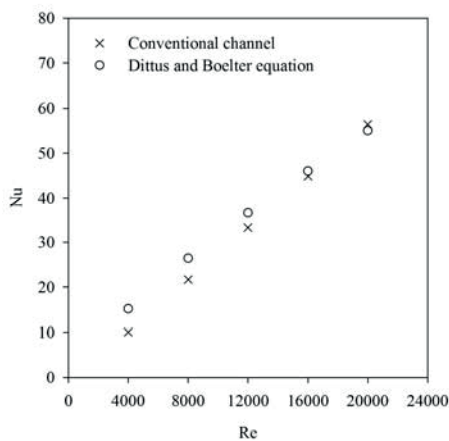
(ง) กรณีช่องการไหล $S/D_h = 4$



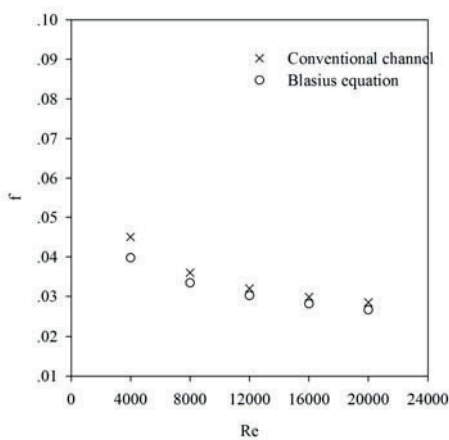
(จ) กรณีช่องการไหล $S/D_h=5$

รูปที่ 3 การกระจายตัวของค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่เลขเรย์โนลด์ส์ 12,000

เมื่อพิจารณาถึงค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) พบว่า กรณีช่องเจ็ทไหลพุ่งชนจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีแบบดั้งเดิมประมาณ 115 เปอร์เซ็นต์ สำหรับที่ช่วงการไหลต่ำๆ ($Re=4000$) แต่เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 16,000 เป็นต้นไป ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลขวางและการไหลแยกตัวของเจ็ทพุ่งชนที่รุนแรง



(ก) การถ่ายเทความร้อน



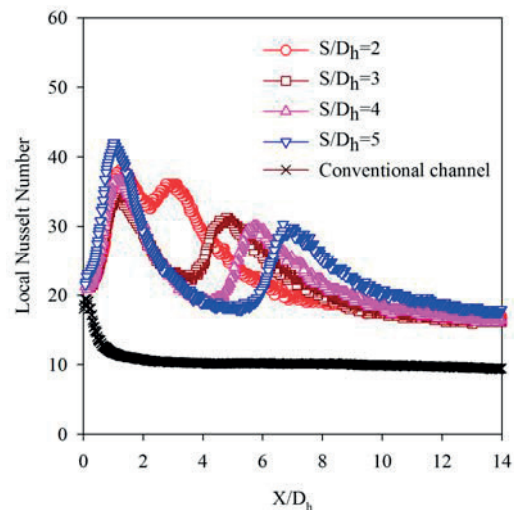
(ข) ตัวประกอบความเสียดทาน

รูปที่ 4 การสอบเทียบผลการทดลองกับสหสัมพันธ์ในอดีต

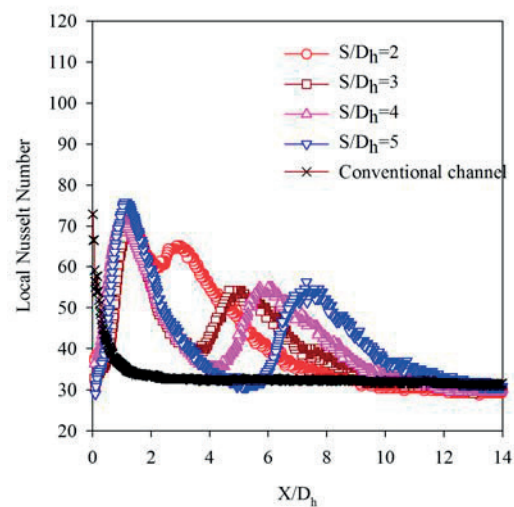
4.2 ความเสียดทาน (f)

ขณะที่ตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการทดลองสำหรับกรณีการไหลแบบดั้งเดิมได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius เพื่อใช้สอบเทียบความถูกต้องดังแสดงในรูป 4 (ข) พบว่าค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์ของ Blasius ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์

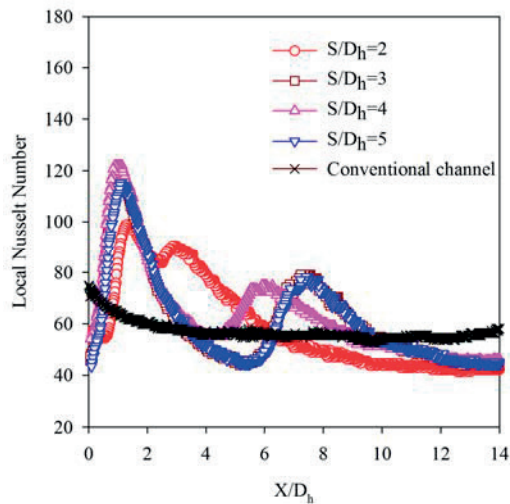
สำหรับผลของตัวประกอบความเสียดทานกรณีช่องการไหลพุ่งชนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีแบบดั้งเดิมดังรูปที่ 6 (ข) ผลของการไหลพุ่งชนแบบช่องการไหลทั้งกรณี S/D_h เท่ากับ 2 – 5 จะมีค่าสูงกว่ากรณีแบบดั้งเดิมตลอดช่วงการไหลซึ่งเกิดจากทั้งการไหลพุ่งชนและการไหลหมุนวนจากผลของการไหลแบบแยกตัว ล้วนแล้วแต่ก่อให้เกิดค่าความดันสูญเสียแทบทั้งสิ้น โดยค่าตัวประกอบความเสียดทานกรณี S/D_h เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 จะมีค่าสูงกว่ากรณีแบบดั้งเดิมประมาณ 118, 238, 271 และ 301 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งผลของระยะห่างระหว่างช่องเจ็ทไหลพุ่งชนที่มีค่าสูงๆ จะส่งผลให้ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตาม อันเนื่องจากระยะทางของการไหลก่อนการพุ่งชนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง



(ก) กรณีเลขเรย์โนลด์ส์ 4000

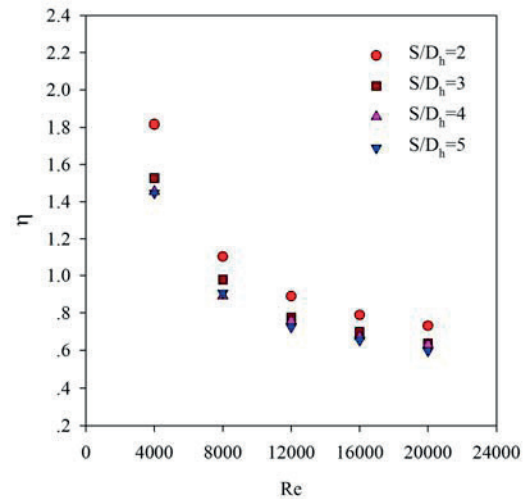


(ข) กรณีเลขเรย์โนลด์ส์ 12,000



(ค) กรณีเลขเรย์โนลด์ส์ 20,000

รูปที่ 5 การกระจายตัวของค่าการถ่ายเทความร้อนตามแนวแกน
($Y/D_h=2.75$)

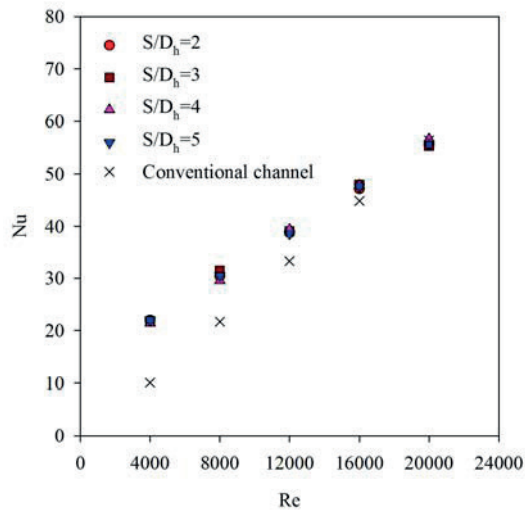


(ค) สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

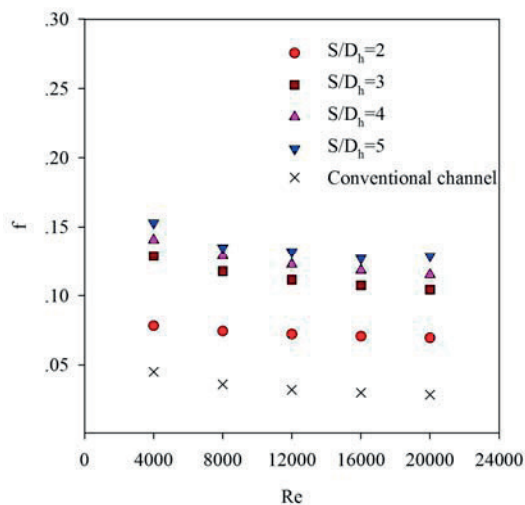
รูปที่ 6 อิทธิพลของช่องเจ็ทไหลพุ่งชน

4.3 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (η)

ในการประเมินผลความเหมาะสมของการนำช่องการไหลแต่ละแบบไปใช้งานนั้นต้องทำการพิจารณาถึงค่าสมรรถนะของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจาก “สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนเทียบกับสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าความเสียดทาน” ภายใต้กำลังขับของไหลเดียวกัน ดังสมการที่ 7 นั้นผลจากการวิเคราะห์สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีช่องเจ็ทไหลพุ่งชนได้แสดงดังรูปที่ 6 (ค) พบว่า สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเครื่องสร้างอากาศร้อนที่ใช้ช่องเจ็ทไหลพุ่งชนจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์ส์ ซึ่งมีความเหมาะสมที่นำไปใช้งานได้ในช่วงการไหลที่เลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 4000 โดยให้ค่าสูงสุดถึง 1.81, 1.52, 1.45 และ 1.44 สำหรับที่ระยะ S/D_h เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณี S/D_h เท่ากับ 2 มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณี $S/D_h = 3, 4$ และ 5 ประมาณ 19, 24 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ค่าความเสียดทานน้อยที่สุด)



(ก) ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย



(ข) ตัวประกอบความเสียด

5. สรุปผลการทดลอง

1. สำหรับอิทธิพลของช่องเจ็ทไหลพุ่งชนที่มีผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนนั้น จากการทดลองพบว่าทั้งกรณี $S/D_h = 2, 3, 4$ และ 5 จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีแบบดั้งเดิมประมาณ 115 เปอร์เซ็นต์ สำหรับที่ช่วงการไหลต่ำๆ ($Re=4000$) ในขณะที่เพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์ ผลของช่องการไหลพุ่งชนจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนไม่ต่างกันเมื่อเทียบกับกรณีแบบดั้งเดิม

2. ในแง่ของค่าตัวประกอบความเสียดทานกรณี S/D_h เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 จะมีค่าสูงกว่ากรณีแบบดั้งเดิมประมาณ 118, 238, 271 และ 301 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3. โดยค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของช่องเจ็ทไหลพุ่งชนในเครื่องสร้างอากาศร้อนนั้น จากผลการทดลองพบว่าผลของช่องเจ็ทพุ่งชนที่ $S/D_h=2$ จะให้ค่าสูงสุดถึง 1.81 สำหรับที่เลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 4000

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560 และมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีสำหรับทุนสนับสนุนการเผยแพร่ผลงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wen, and Jang, An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips, International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 4657-4667.
- [2] M.F. Koseoglu, S. Baskaya, The role of jet inlet geometry in impinging jet heat transfer, modeling and experiments, Int. J. Therm. Sci. 49 (2010) 1417–1426
- [3] Dae Hee Lee , Hyun Jin Park and Phil Ligrani, Milliscale confined impinging slot jets: Laminar heat transfer characteristics for an isothermal flat plate, International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 2249–2260.
- [4] วาโย ช้างเจริญ และพงษ์เจต พรหมวงศ์, การศึกษาเชิงตัวเลขของอิทธิพลของแผ่นกั้นต่อการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลแบบราบเรียบในช่องลำการไหลปะทะแบบจำกัด, งานประชุมวิชาการการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 13, 13-14 มีนาคม 2557 ณ เจ้าหลวงคานานารีรีสอร์ท อำเภอ ท่าใหม่ จังหวัด จันทบุรี
- [5] วาโย ช้างเจริญ และสมศักดิ์ เพ็ชรกุล, ผลกระทบของแผ่นกั้นเว้าต่อการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลแบบราบเรียบจากช่องเดี่ยวปะทะพื้นผิวแบบจำกัด, งานประชุมวิชาการการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 14, 19-20 มีนาคม 2558 ณ ฮอไรซันวิลเลจแอนดรีรีสอร์ท และสวนพฤกษศาสตร์ทวีชล อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่
- [6] ปวีณ สุขบรรเทิง, ขวัญชัย หนาแน่น, อุทัย ผ่องรัศมี และสมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด, การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในเครื่องทำอากาศร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยลำเจ็ทพุ่งชน, งานประชุมวิชาการการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 15, 30-31 มีนาคม 2559 ณ โรงแรม แอล รี รีสอร์ท สมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี

อิทธิพลของความสูงเบตต่ออัตราการอบแห้งกุ้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบต

EFFECT OF BED HEIGHT ON SHRIMP DRYING RATE WITH FLUIDIZED BED DRIER

ขวัญชัย หานาแน่น

ปวีณ สุขบรรเทิง

อุทัย ผ่องศรี

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยี

อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000

E-mail: kwanchai.nan@mail.pbru.ac.th

สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก

กรุงเทพมหานคร 10530

วริสา ชูวัฒนกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง

เขตลาดกระบัง กทม. 10520

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งกุ้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบตเพื่อปรับปรุงการผลิตกุ้งแห้งแบบดั้งเดิม(ตากแดด) การทดลองนี้ได้นำเสนออิทธิพลของความสูงของเบต ($h/D=0.3, 0.6$ และ 1.0) โดยใช้อุณหภูมิอากาศร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG ที่ 70°C ภายใต้กำลังขับปั๊มคงตัว โดยได้เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งกุ้งด้วยวิธีการตากแดดเป็นระยะเวลา 2 วัน (วันละ 9 ชั่วโมง) ค่าความชื้นสุดท้ายของกุ้งแห้งมีค่าเท่ากับ 23 %d.b. กรณีการอบแห้งกุ้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบต พบว่าอัตราการอบแห้งของกุ้งต้มสุกจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความสูงของเบต นอกจากนั้นยังส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับอัตราการผลิตกุ้งแห้งโดยอ้างอิงตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.7012-2551) ด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบตโดยพิจารณาที่ความชื้นเท่ากับ 30 %d.b. มีอัตราการผลิตกุ้งแห้งสูงสุดถึง 2.23, 2.36 และ 2.81 kg/hr สำหรับ $h/D=0.3, 0.6$ และ 1.0 ตามลำดับ

คำสำคัญ: การอบแห้ง, กุ้ง, กุ้งแห้ง, ฟลูอิดไรซ์เซชัน, ฟลูอิดไรซ์เบต, การถ่ายเทความร้อน

Abstract This research was aimed to study of shrimp drying with fluidized bed drier for improvement of the conventional dried shrimp production (sun drying). In the experiment, influence of bed height ($h/D = 0.3, 0.6$ and 1) on drying rate under constant pumping power and hot air temperature (70°C) are also described. The conventional dried shrimp production for 2 days (9 hour/day), the final moisture content of dried shrimps is 23 %d.b. For the result of shrimp drying with fluidized bed drier, the effect of bed height reveals that the drying rate decreases with increasing bed height. In addition, the drying time was increased. The production rate by Thai agricultural commodity and food standard (TACFS 7012-2008) at moisture content of 30 %d.b., the maximum production rate for $h/D=0.3, 0.6$ and 1.0 are 2.23, 2.36 and 2.81 kg/hr, respectively.

Keywords: Drying, Shrimp, Dried shrimp, Fluidization, Fluidized bed, Heat transfer

1. บทนำ

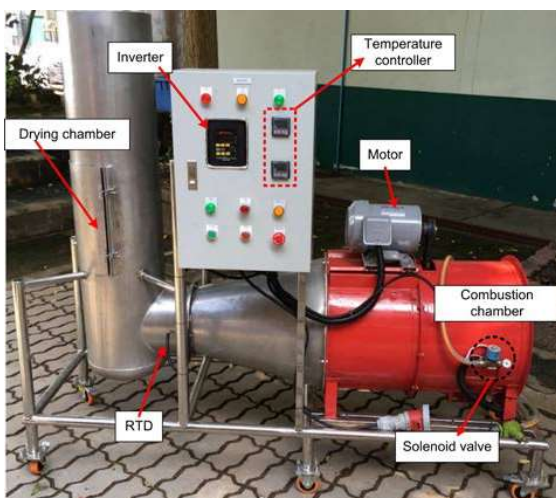
จังหวัดเพชรบุรีเป็นจังหวัดที่มีพื้นที่ติดกับชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกที่ติดกับอ่าวไทยซึ่งครอบคลุมเนื้อที่ตั้งแต่ตำบลบ้านลาดไปจนถึงอำเภอชะอำ รวมระยะทางประมาณ 82 กิโลเมตร จึงทำให้จังหวัดเพชรบุรีมีการทำประมงเป็นอาชีพหลักๆ ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากที่สามารถช่วยสร้างรายได้ให้กับจังหวัดและยังเป็นแหล่งส่งออกอาหารทะเลที่สำคัญของประเทศอีกด้วย ไม่ว่าจะเป็นการส่งออกอาหารทะเลสด แช่แข็ง และอาหารทะเลแปรรูปที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ในการรักษาคุณภาพ หนึ่งในวิธีการของกระบวนการถนอมอาหารที่นิยมคือ การทำแห้ง (การลดความชื้น) เช่น ปลาแห้ง ปลาหมึกแห้ง หอยตากแห้ง และกุ้งแห้ง ซึ่งนิยมทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดเพราะกระบวนการไม่ซับซ้อน จากวิธีการทำแห้งด้วยการตากแดดโดยตรงมีข้อเสียหลายประการที่ก่อให้เกิดปัญหาในด้านการส่งออกคือเรื่องของคุณภาพที่ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการการตากแดดที่ส่งผลให้มีสิ่งเจือปนบนผลิตภัณฑ์สูง อีกทั้งจากกระบวนการดังกล่าวยังต้องการพื้นที่ในการตากแห้ง และยังใช้เวลาในการลดความชื้นนาน ซึ่งส่งผลให้กำลังการผลิตของแห้งมีค่าต่ำ ด้วยเหตุดังกล่าวจึงได้เสนองานวิจัยโดย

ใช้เทคนิคฟลูอิดไรซ์เซชันในการอบแห้งกุ้ง เพื่อช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีการตากแดด เพราะเป็นกระบวนการที่มีความสามารถในการไล่ความชื้นสูงและถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย ที่ผ่านมานักวิจัยได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องจากการใช้แบบทดสอบมาตรฐาน Abid et al. [2], Kaensup et al. [3], Reyes et al. [4] and Soponronnarit et al. [5] นอกจากนั้น Tudtong et al. [6] ได้ทำการศึกษาการอบแห้งเม็ดกาแฟโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไรซ์เบต โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิการอบแห้งและความเร็วของอากาศภายในห้องทดลองที่ต่างๆ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับนักวิจัยท่านต่างๆ ที่ศึกษามาในอดีต นอกจากนั้น Madhiyanon et al. [8] ได้นำเสนอโมเดลการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของอัตราการอบแห้งของมะพร้าวเกล็ดแบบบาง ซึ่งได้ทำการทดลองการอบแห้งจากเครื่องฟลูอิดไรซ์เบต โดยได้ศึกษาถึงผลของความชื้นอากาศและอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งระหว่าง $70-120^{\circ}\text{C}$ และ $0-40\% \text{RH}$ ตามลำดับ โดยผลเบื้องต้นมีแนวโน้มเดียวกันกับงานวิจัยที่

ผ่านมาก็คือ ค่าความชื้นสมมูลจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความชื้นสัมพัทธ์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อหารูปแบบที่สามารถทำนายความชื้นสมมูลได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการอบแห้งของมะพร้าวเกล็ดยังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดของชุดอบแห้งกึ่งแบบฟลูอิดไรเซชันที่ประกอบไปด้วย ห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) สำหรับสร้างอากาศร้อนจากการเผาไหม้แก๊ส LPG ที่ถูกควบคุมด้วยวาล์วโซลินอยด์ร่วมกับชุดควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนเพื่อให้ได้อากาศร้อนคงที่เท่ากับ 70 °C โดยมีพัดลมที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ที่มีอินเวอร์เตอร์การควบคุมภายใต้กำลังขับเคลื่อนตัว อากาศร้อนจะไหลผ่านเข้าด้านล่างของห้องอบแห้ง (Drying chamber) ซึ่งมีกึ่งต้มสุกบรรจุที่ค่าความสูงเบดต่างๆ และจะเกิดกระบวนการอบแห้งทันที โดยเริ่มจากการต้มกึ่งเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำกึ่งใส่ในห้องอบแห้งที่ค่าความสูงเบด $h/D = 0.3$ และชั่งมวลกึ่งเริ่มต้นพร้อมบันทึกภาพกึ่ง จากนั้นป้อนอากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งภายใต้อุณหภูมิการทดลอง ในระหว่างการอบแห้งจะทำการชั่งมวลกึ่งที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 10 นาที โดยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลที่มีค่าความละเอียด 0.001 กรัม จนอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลกึ่งมีค่าน้อยมาก และทำการทดลองภายใต้เงื่อนไข $h/D = 0.6$ และ 1.0



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งกึ่งแบบฟลูอิดไรเซชัน



รูปที่ 2 เครื่องวิเคราะห์ความชื้นรุ่น Kett FD-660

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการอบแห้งวัสดุหรือผลผลิตต่างๆ ปริมาณที่สำคัญที่สุดที่จะต้องคำนึงถึงคือความชื้นของวัสดุหลังผ่านการอบแห้งแล้วความชื้นของวัสดุอบแห้งเป็นตัวบอกถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือวัสดุแห้ง การบอกค่าความชื้นโดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบคือ

เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก

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

เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง

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

เมื่อ

M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, %w.b.

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, %d.b.

w คือ มวลของกึ่ง, kg

d คือ มวลของกึ่งแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

อัตราการอบแห้ง

เป็นตัวแปรที่บอกถึงความเร็วของการลดค่าความชื้นของตัวกึ่ง

$$\text{Drying rate} = \frac{dX}{dt} = \frac{x_0 - x}{t - t_0} \quad (3)$$

เมื่อ

$x_0 - x$ คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้น

$t - t_0$ คือ การเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลา

อัตราการผลิตกึ่งแห้ง

การอัตราการผลิตกึ่งอบแห้งในการทดลองได้อ้างอิง การผลิตกึ่งแห้งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช. 7012-2551) ประเภท กึ่งแห้ง ของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนมวลกึ่งเริ่มต้นต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ระดับค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง 30%d.b. ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$PR = \frac{w}{t_p} \quad (4)$$

เมื่อ

PR คือ อัตราการผลิตกึ่งแห้ง (kg/hr)

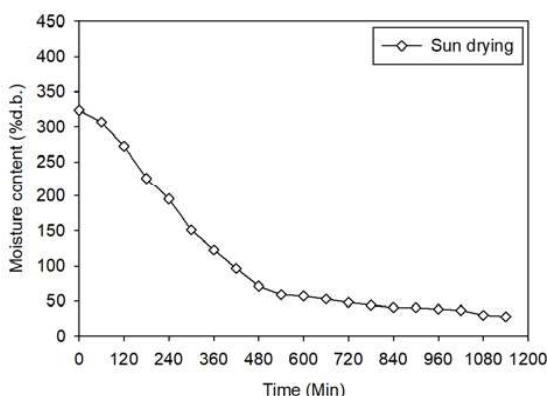
t_p คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งที่ค่าความชื้น 30%d.b. (hr)

4. ผลการทดลอง

4.1 การทำแห้งกึ่งด้วยวิธีแบบดั้งเดิม (ตากแดด)

การตากแห้งกึ่งด้วยวิธีธรรมชาติ(ตากแดด) นั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสียซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยที่ได้ปรับปรุงกระบวนการอบแห้งกึ่งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไรเซชัน เบื้องต้นได้ดำเนินการทดลองการตากแห้งกึ่งต้มสุกเป็นระยะเวลา 2 วัน คือ วันที่ 13 เมษายน 2560 และ 14 เมษายน 2560 ซึ่งเป็นช่วงที่อากาศร้อนจัดของประเทศไทย

โดยผลของค่าความชื้นกึ่งตัมสุกตากแดด(แกนตั้ง) และระยะเวลาการตากแดด(แกนนอน) ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าค่าความชื้นในตัวอย่างตัมสุกจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการตากแดดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความชื้นเริ่มต้น(0 ชั่วโมง) ประมาณ 324 %d.b. การลดลงของความชื้นในตัวอย่างจะมีค่าสูงมากในช่วงแรกของการตากแดด (0-6 ชั่วโมง) จนได้ค่าความชื้นที่ใกล้เคียงกันประมาณ 80 %d.b. เมื่อเวลาผ่านไปหลังจาก 6 ชั่วโมงแรกของการตากแดดพบว่าค่าความชื้นของตัวอย่างมีอัตราการลดลงต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เนื้อกึ่งเกิดการหดตัวและทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อกึ่งกับเปลือกกึ่ง ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของรังสีดวงอาทิตย์สู่เนื้อกึ่งเป็นไปได้ยากขึ้น โดยค่าความชื้นสุดท้ายของกึ่งแห้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28 %d.b. ด้วยวิธีการทำแห้งตามธรรมชาตินี้แสดงให้เห็นถึงข้อเสียในเรื่องของระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่นานถึงแม้จะตากแห้งในช่วงที่บรรยากาศมีค่าความร้อนสูงสุดของปีก็ตาม

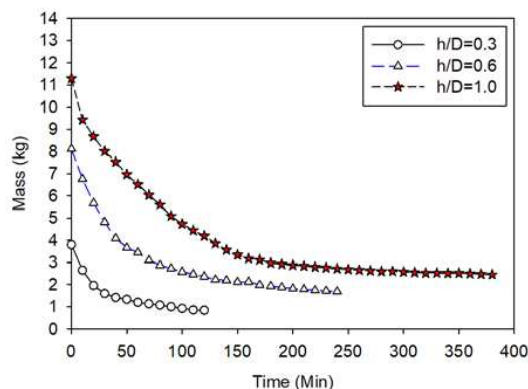


รูปที่ 3 การลดลงของความชื้นกึ่งด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม
(วันที่ 13-14 เมษายน พ.ศ. 2560)

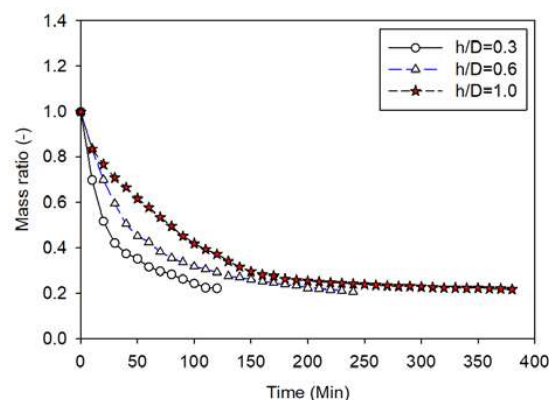
4.2 การทำแห้งกึ่งด้วยเครื่องฟลูอิดไรเซเบต

จากรูปที่ 4 และ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมวลกึ่งตัมและอัตราส่วนมวลกึ่งตัมสุกต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกึ่ง ที่ได้อบแห้งกึ่งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไรเซเบตภายใต้เงื่อนไขความสูงกึ่งในเบต (h/D)=0.3, 0.6 และ 1.0 ที่อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 70°C เบื้องต้นพบว่า การเพิ่มความสูงเบตยิ่งมากระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งยิ่งมากตามไปด้วย โดยผลความสูงเบต (h/D)= 0.3, 0.6 และ 1.0 มีมวลกึ่งเริ่มต้นเท่ากับ 4, 8 และ 11 kg ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละค่าความสูงเบต มวลกึ่งจะมีการลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ทำให้มวลของกึ่งไม่เปลี่ยนแปลงประมาณสำหรับความสูงเบต (h/D)= 0.3, 0.6 และ 1.0 มีค่าเท่ากับ 120, 240 และ 360 นาที ตามลำดับ เมื่อได้นำเสนอมวลด้วยเทอมของอัตราส่วนมวลดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าอัตราส่วนการลดลงของมวลกึ่งที่ค่าความสูงเบต h/D =0.3 จะมีการลดลงที่สูงกว่า h/D =0.6 และ 1.0 ซึ่งเป็นผลมาจากมวลรวมของกึ่งในเบตที่น้อยกว่าส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ต้องทำการระเหยมีค่าน้อยตามไปด้วย การลดลงของมวลในเบตที่ค่าความสูง h/D =0.3 จึงลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นความหนาแน่นของตัว

กึ่งเมื่อเทียบกับปริมาตรเบตอบแห้งมีค่าไม่สูง การเกิดฟลูอิดไรเซชันของตัวอย่างภายในเบตจึงเกิดอย่างสมบูรณ์

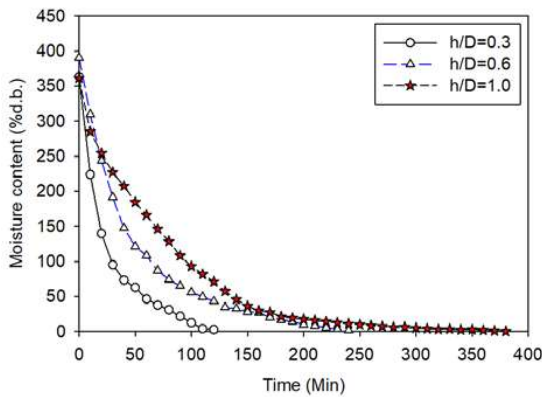


รูปที่ 4 การลดลงของมวลกึ่งตัมสุกด้วยเครื่องฟลูอิดไรเซเบต

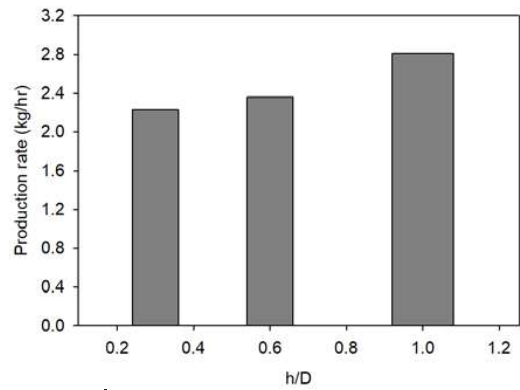


รูปที่ 5 การลดลงของอัตราส่วนมวลกึ่งตัมสุกด้วยเครื่องฟลูอิดไรเซเบต

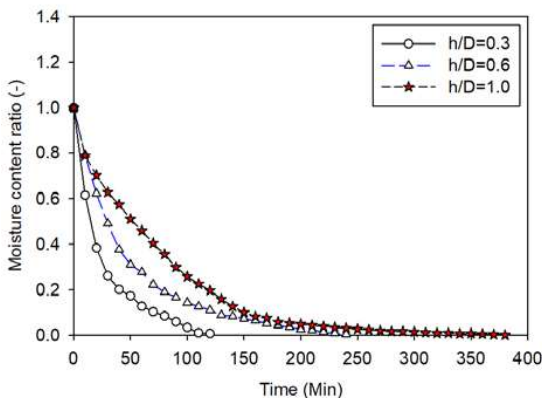
จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกึ่งตัมสุกและอัตราส่วนความชื้นกึ่งตัมภายในเบต (h/D)=0.3, 0.6 และ 1.0 ที่ได้วิเคราะห์บนพื้นฐานความชื้นมาตรฐานแห้ง ผลจากการวิเคราะห์ความชื้นกึ่งเริ่มต้นพบว่า ความชื้นเฉลี่ยของกึ่งที่ใช้ในการทดลองมีค่าประมาณ 380 %d.b. และมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อพิจารณาผลของความสูงของกึ่งตัมสุกภายในเบตพบว่าที่ความสูงเบต h/D =0.3 มีการเปลี่ยนแปลง/อัตราการลดลงของค่าความชื้นที่สูงกว่ากรณี h/D =0.6 และ 1.0 เป็นเพราะปริมาณของน้ำที่ต้องทำการระเหยออกจากตัวกึ่งมีค่าน้อยกว่า นอกจากนั้นความหนาแน่นของตัวกึ่งต่ำเมื่อเทียบกับปริมาตรห้องอบแห้งมีค่าไม่สูง การเกิดฟลูอิดไรเซชันของตัวกึ่งภายในเบตจึงเกิดอย่างสมบูรณ์ สำหรับการอบแห้งกึ่งด้วยเครื่องฟลูอิดไรเซเบตที่ความสูงของกึ่งตัมภายในเบต (h/D)=0.3, 0.6 และ 1.0 เพื่อให้ได้ค่าความชื้นตามมาตรฐานการผลิตกึ่งแห้ง 30 %d.b. ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งมีค่าประมาณ 87, 193 และ 207 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 6 การลดลงของความชื้นกึ่งตมสุกด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบด



รูปที่ 8 อัตราการผลิตกึ่งตมสุกด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบด



รูปที่ 7 การลดลงของอัตราส่วนความชื้นกึ่งตมสุกด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบด



รูปที่ 9 กุ้งแห้งที่ผลิตด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบด

4.3 อัตราการผลิตกุ้งแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบด

เมื่อพิจารณาอัตราการผลิตกุ้งแห้งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.7012-2551) ด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่ความชื้นตามมาตรฐานการผลิตกุ้งแห้งเท่ากับ 30% d.b. ที่เปรียบเทียบระหว่างมวลกุ้งเริ่มต้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าอัตราการผลิตกุ้งแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความสูงเบด ซึ่งที่ความสูงเบด $h/D = 0.3, 0.6$ และ 1.0 ให้อัตราการผลิตกุ้งแห้งเท่ากับ 2.23, 2.36 และ 2.81 kg/hr ตามลำดับ จากการวิเคราะห์การอบแห้งกุ้งสำหรับอัตราการผลิตกุ้งแห้งที่ความสูงของกุ้งภายในเบด (h/D)=0.3 และ 0.6 มีความหนาของชั้นกุ้งที่น้อยส่งผลให้ระยะเวลาของอากาศร้อนที่ไหลผ่านชั้นกุ้งภายในเบดมีระยะเวลาที่สั้น ทำให้ระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนสู่ตัวกุ้งมีค่าที่ต่ำ ในขณะที่อัตราการผลิตกุ้งแห้งสำหรับที่ความสูงของกุ้งภายในเบด (h/D)=1.0 ความหนาของชั้นกุ้งที่มาก ส่งผลให้ระยะเวลาของอากาศร้อนที่ไหลผ่านชั้นกุ้งภายในเบดมีระยะเวลานานกว่า จึงทำให้ระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนสู่ตัวกุ้งมีค่าที่สูงกว่ากรณี $h/D=0.3$ และ 0.6 ตามลำดับ

5. สรุปผลการทดลอง

1. ผลที่ได้จากการอบแห้งกุ้งด้วยวิธีดั้งเดิมในวันที่ 13 และ 14 เมษายน 2560 เป็นระยะเวลา 2 วัน (18 ชั่วโมง) พบว่าค่าความชื้นสุดท้ายของกุ้งแห้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28 % d.b. ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อเสียในเรื่องของระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่นานถึงแม้จะตากแห้งในช่วงที่บรรยากาศมีค่าความชื้นสูงสุดของปีก็ตาม

2. ผลการศึกษาดัชนีผลผลิตความสูงเบด ($h/D=0.3, 0.6$ และ 1.0) ที่มีผลต่อการอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งของกุ้งตมสุกจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความสูงของเบด นอกจากนั้นยังส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากปริมาณของมวลน้ำที่อยู่ภายในตัวกุ้งมีค่ามาก อีกทั้งในช่วงต้นของกระบวนการลดความชื้นกึ่งตมสุกภายในกรณีเบด ($h/D = 1.0$) จะเกิดค่าความดันตกคร่อมของอากาศร้อนภายในเบดที่สูง ส่งผลให้อากาศร้อนที่ไหลผ่านชั้นตัวกุ้งมีความเร็วต่ำ ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนสู่ตัวกุ้งมีค่าไม่สูง เมื่อเทียบกับกรณีความสูงเบด $h/D=0.3$ และ 0.6

3. อัตราการผลิตกุ้งแห้งโดยอ้างอิงตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.7012-2551) ด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยพิจารณาที่ความชื้นเท่ากับ 30 % d.b. พบว่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของเบด อัตราการผลิตกุ้งแห้งภายใต้ความสูงเบด (h/D)=1.0 โดยใช้อุณหภูมิอากาศร้อนอบแห้งเท่ากับ 70°C มีอัตราการผลิตกุ้งแห้งสูงสุดถึง 2.81 kg/hr

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560 และมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีสำหรับทุนสนับสนุนการเผยแพร่ผลงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, "การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540
- [2] M. Abid, R. Gibert, C. Laguerie, An experimental and theoretical analysis of the mechanisms of heat and mass transfer during the drying of corn grains in a fluidized bed, *International Chemical Engineering*, 30 (4) (1990), pp. 632-642.
- [3] W. Kaensup, S. Wongwises, S. Chutima, Drying of pepper seeds using a combined microwave/fluidized bed dryer, *Drying Technology*, 16 (1998), pp. 853-862.
- [4] A. Reyes, P.I. Alvarez, F.H. Marquardt, Drying of carrots in a fluidized bed, Effect of drying conditions and modeling, *Drying Technology*, 20 (2002), pp. 1463-1483.
- [5] S. Soponronnarit, A. Pongtornkulpanich, S. Prachayawarakorn, Drying characteristics of corn in fluidized bed dryer, *Drying Technology*, 15 (1997), pp. 1603-1615.
- [6] Woramate Tudtong, Smith Eiamsa-ard, PurinAkkarakultron and PongjetPromvonge, Modeling of coffee bean drying in a fluidized-bed, *The Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2004)*, Paper number HS-211, 1-3 December 2004, Thailand.
- [7] P. Promvonge, A. Boonloi, M. Pimsarn, C. Thianpong, Drying characteristics of peppercorns in a rectangular fluidized-bed with triangular wavy walls, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38 (2011), pp. 1239-1246.
- [8] T. Madhiyanon, A. Phila and S. Soponronnarit, Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut, *Applied thermal engineering*, 29 (2009), pp. 2849-2854.

