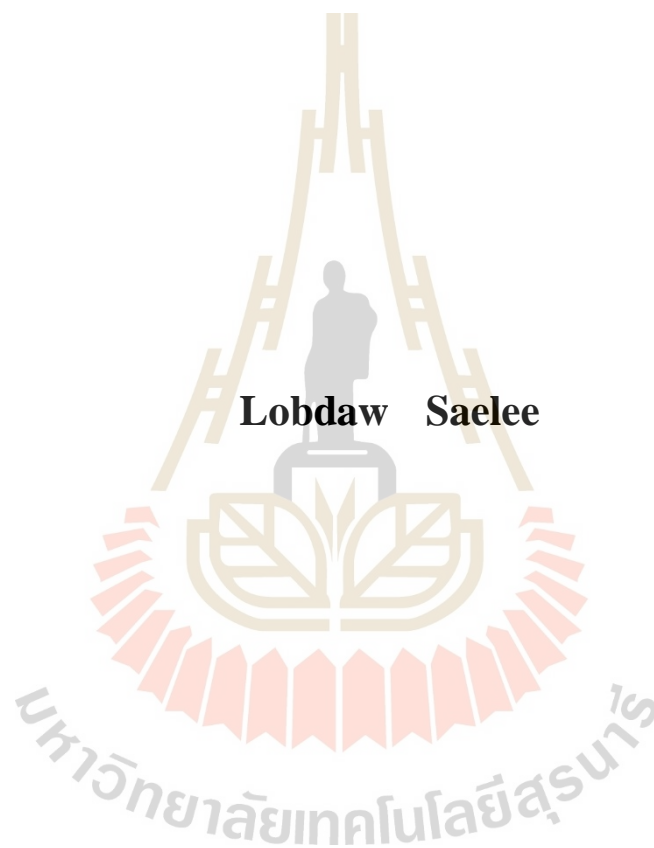


การทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยการระเหยภายใต้สุญญากาศร่วมกับการทำให้เป็น  
ละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2564

**CONCENTRATION OF PINEAPPLE JUICE BY VACUUM  
EVAPORATION COMBINED WITH ULTRASONIC  
ATOMIZATION AND INFRARED HEATING**

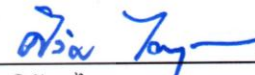


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree Master of Science in Food Technology  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2021**

การทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยการระเหยภายใต้สุญญากาศร่วมกับการทำให้เป็นละออง  
ด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพิจารณาเป็นส่วนตัวหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

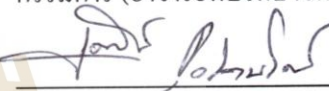
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
(ผศ. ดร.ศิววัฒน์ ไทยอุดม)

ประธานกรรมการ

  
(รศ. ดร.สุนันทา ทองทา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

  
(อ. ดร.ชนาวิทย์ กุลรัตนรักษ์)

กรรมการ


  
(ผศ. ดร.กระวี ศรีอำรรค)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

  
(รศ. ดร.นัตถรัชช โชติชูยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

  
(ศ. ดร.หนึ่ง เตียอำรุง)

คณบดีสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ลดความเข้มข้นน้ำสับประคด้วยการระเหยภายใต้สุญญากาศร่วมกับการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

(CONCENTRATION OF PINEAPPLE JUICE BY VACUUM EVAPORATION  
COMBINED WITH ULTRASONIC ATOMIZATION AND INFRARED HEATING)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันทา ทองทา, 73 หน้า.

สับประคเป็นผลไม้ยอดนิยมชนิดหนึ่งที่สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้หลากหลาย โดยประเทศไทยถือเป็นหนึ่งในสิบประเทศที่มีการส่งออกน้ำสับประคในปริมาณสูงของตลาดโลก น้ำสับประคที่ส่งออกส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบน้ำสับประคเข้มข้น เพื่อลดต้นทุนการส่งออก และยืดอายุการเก็บของน้ำสับประคในระหว่างการส่งออก การระเหยแบบสุญญากาศเป็นกระบวนการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีต้นทุนในการดำเนินงานต่ำ ให้ผลผลิตสูง และระดับความเข้มข้นที่สามารถทำได้อยู่ในช่วงกว้าง แต่อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่สูงและระยะเวลาในการระเหยที่นาน มีผลต่อการลดคุณภาพของน้ำผลไม้หลังการทำเข้มข้น ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้คือ (1) ศึกษาประสิทธิภาพการระเหยของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศรวมถึงค่าพีเอช และสีของน้ำสับประคหลังทำเข้มข้น (2) ศึกษาประสิทธิภาพการระเหยของการทำให้เป็นละออง ด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดในการระเหยภายใต้สุญญากาศ รวมถึงค่าพีเอช และสีของน้ำสับประคหลังทำเข้มข้น และ (3) วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดของการทำเข้มข้นน้ำสับประคในการทดลอง เพื่อทำนายระยะเวลาในการระเหย การทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรก น้ำสับประคจะถูกทำเข้มข้นให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 45 องศาบริกซ์ด้วยวิธีการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum evaporation, VE) การระเหยภายใต้สุญญากาศแบบหมุน (Rotary vacuum evaporation, VR) การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Ultrasonic atomization assisted vacuum evaporation, UAV) และการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศแบบหมุน (Ultrasonic atomization assisted rotary vacuum evaporation, UAVR) ภายใต้สภาวะความดัน 70 มิลลิบาร์และที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในระบบการระเหยแบบสุญญากาศ พบว่า การทำเข้มข้นน้ำสับประคด้วยวิธี UAVR ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีอัตราการระเหยสูงสุดที่ 6.32 กรัมของน้ำต่อนาทีและใช้ระยะเวลาในการระเหย 17 นาทีซึ่งน้อยกว่าวิธี VR, UAV และ VE ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าพลังงานการกระตุ้นในการระเหยของวิธี UAVR ยังมีค่าน้อยกว่าเทียบกับวิธีอื่น ๆ ประมาณ 1.1-1.3 เท่า อย่างไรก็ตาม การทำเข้มข้นด้วยการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการระเหยภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส ไม่มีผลในการช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลของน้ำ

สับประรดหลังทำเข้มข้นได้ โดยค่าความแตกต่างโดยรวมของสี (Total color different,  $\Delta E^*$ ) และดัชนีสีน้ำตาล (Browning index, BI) ของน้ำสับประรดเข้มข้นจากวิธี VE, VR, UAV และ UAVR มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) สำหรับการทดลองส่วนที่สอง น้ำสับประรดจะถูกทำเข้มข้นให้มีความเข้มข้นสุดท้ายที่ 60 องศาบริกซ์ด้วยวิธีการระเหยด้วยสูญญากาศแบบหมุน (Rotary vacuum evaporation, VR) การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการระเหยภายใต้สูญญากาศแบบหมุน (Ultrasonic atomization assisted rotary vacuum evaporation, UAVR) และการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดในการระเหยภายใต้สูญญากาศแบบหมุน (Ultrasonic atomization combined infrared heating assisted rotary vacuum evaporation, UAVRI) ภายใต้สภาวะความดัน 40 มิลลิบาร์ ที่อุณหภูมิ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดในการระเหยภายใต้สูญญากาศ โดยพบว่า การทำเข้มข้นน้ำสับประรดด้วยวิธี UAVRI ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส มีอัตราการระเหยอยู่ที่ 4.82 กรัมของน้ำต่อนาที ซึ่งมากกว่าวิธี UAVR และ VR ตามลำดับ ระยะเวลาในการระเหยและค่าพลังงานการกระตุ้นอยู่ที่ 26 นาทีและ 35.97 กิโลจูลต่อโมลซึ่งมีค่าน้อยกว่าการทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVR และ VR ตามลำดับ การเพิ่มการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดเข้าไปในระบบการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศในการทำเข้มข้นน้ำสับประรดที่อุณหภูมิ 35-40 องศาเซลเซียส มีผลในการช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลในน้ำสับประรดเข้มข้นได้ โดยค่า  $\Delta E^*$  และ BI ของน้ำสับประรดที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVRI มีค่าน้อยกว่าการทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVR และ VR ประมาณ 1.2-1.3 เท่า (ทั้งใน  $\Delta E^*$  และ BI) ตามลำดับ การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าสมการของ Midilli เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดในการนำทำนายระยะเวลาในการระเหยของการทดลองทั้ง 2 ส่วน

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_ *คณาว*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_ *กมล*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_ *กมล*

LOBDAW SAELEE : CONCENTRATION OF PINEAPPLE JUICE BY  
VACUUM EVAPORATION COMBINED WITH ULTRASONIC  
ATOMIZATION AND INFRARED HEATING. THESIS ADVISOR:  
ASSOC. PROF. SUNANTA THONGTA, Ph.D., 73 PP.

PINEAPPLE JUICE/VACUUM EVAPORATION/ULTRASONIC  
ATOMIZATION/INFRARED HEATING/MATHEMATIC MODEL

Pineapple is one of the most popular fruits which can be processed for various products. Thailand is a top ten exporter of pineapple juice in the world market. Vacuum evaporation is one of most suitable methods of fruit juice concentration in the industry. This process presents a low operating cost, high yield, and is achievable in a high range of juice concentration levels. However, the quality of concentrated juice is decreased due to high heat and long evaporation time. Therefore, the objectives of this work were (1) to study the efficiency of ultrasonic atomization assisted vacuum evaporation including pH and color of concentrated pineapple juice, (2) to study the efficiency of ultrasonic atomization and infrared heating assisted vacuum evaporation including pH and color of concentrated pineapple juice, and (3) to analyze the best mathematical model for predicting the evaporation time. The experiment was divided into two parts. The first part, the efficiency of ultrasonic atomization assisted vacuum evaporation was considered. Pineapple juice was concentrated by vacuum evaporation (VE), rotary vacuum evaporation (VR), ultrasonic atomization assisted vacuum evaporation (UAV) and ultrasonic atomization assisted rotary vacuum evaporation method (UAVR) methods at temperatures of 50,

55 and 60 °C under pressure 70 mbar. Pineapple juice concentration using UAVR at 60 °C had the highest evaporation rate of 6.32 g of water/min and the shortest evaporation time was 17 min. In addition, the activation energy of the UAVR method was lower than approximately 1.1–1.3 times of VR, UAV and VE methods. However, the total color difference ( $\Delta E^*$ ) and browning index (BI) of concentrated pineapple juice by VE, VR, UAV and UAVR at temperatures of 50-60 °C were not significantly different ( $p > 0.05$ ). For the second part, pineapple juice was concentrated by rotary vacuum evaporation (VR), ultrasonic atomization assisted rotary vacuum evaporation (UAVR) and ultrasonic atomization and infrared heating assisted rotary vacuum evaporation (UAVRI) methods at temperatures of 35, 40 and 45 °C under pressure 40 mbar. The UAVRI method showed the highest evaporation rate (4.82 g of water/min) and the shortest evaporation time (26 min) at 45 °C of evaporation temperature. The activation energy of the UAVRI method was 35.97 kJ/mol, which was lower than the UAVR and VR methods. The infrared heating combined with the ultrasonic atomization-assisted rotary vacuum evaporation method decreased the brown color in concentrated pineapple juice. Pineapple juice concentration by UAVRI presented lower  $\Delta E^*$  and BI than the UAVR and VR methods around 1.2-1.3 times. The Midilli model proved to be the best mathematical model for predicting the evaporation time of both parts.

School of Food Technology

Academic Year 2021

Student's Signature Lobdow.

Advisor's Signature [Signature]

Co-Advisor's Signature Thanawit Kulsathasak



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันทาทองทา และ อาจารย์ ดร.ธนาวิทย์ กุศลรัตนรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะ ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาวิจัยอย่างดียิ่งตลอดมา รวมถึงให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ ไตรภพ พาหอม ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่าง ๆ ระหว่างการเรียนและการเขียนรายงานต่าง ๆ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณกรรมการการสอบจบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิววัฒน์ ไทยอุดม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค ที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ 3 และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่เสียสละเวลา ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายกฤษณพงศ์ แก้วบังเกิด ที่ได้คอยความช่วยเหลือ, คำแนะนำ และให้กำลังใจตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษา ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในการศึกษา

ลบดาว แซ่ลิ้



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ

**บทที่**

## 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4

## 2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการทำเข้มข้น .....	5
2.1.1 การทำเข้มข้นที่ไม่ใช้ความร้อน.....	5
2.1.1.1 การทำเข้มข้นด้วยการแช่เยือกแข็ง .....	5
2.1.1.2 การทำเข้มข้นด้วยการใช้เยื่อเลือกผ่าน .....	5
2.1.2 การทำเข้มข้นที่ใช้ความร้อน.....	6
2.1.2.1 การทำเข้มข้นด้วยการระเหย.....	6
2.1.2.2 การทำเข้มข้นด้วยการระเหยในสถานะสุญญากาศ.....	6
2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการระเหยในสถานะสุญญากาศ.....	7
2.2.1 การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส.....	7
2.2.1.1 การระเหยแบบฟิล์มบาง .....	7
2.2.1.2 การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิค .....	8

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด.....	11
2.2.2.1 รังสีอินฟราเรด.....	11
2.2.2.2 ประเภทของรังสีอินฟราเรด.....	11
2.2.2.3 หลักการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด.....	12
2.2.2.4 การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรด.....	14
2.3 จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา.....	15
2.3.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์.....	15
2.3.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง.....	17
2.3.3 ปฏิกิริยาอันดับสอง.....	19
2.3.4 การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขึ้นกับอุณหภูมิ.....	20
2.3.5 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	20
<b>3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	22
3.1.1 น้ำสับปะรด.....	22
3.1.2 อุปกรณ์.....	22
3.2 การระเหย.....	22
3.2.1 การทดลองที่ 1 การประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตรา โซนิกในการระเหยภายใต้สุญญากาศ.....	23
3.2.2 อุปกรณ์.....	23
3.3 การวัดค่าปริมาณปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าพีเอส.....	26
3.4 การตรวจวัดคุณภาพทางสี.....	26
3.5 อัตราการระเหยและจลนศาสตร์.....	27
3.6 การคำนวณพลังงานการกระตุ้น.....	27
3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	28
3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	30
<b>4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย</b>	
4.1 การทำเข้มข้นด้วยการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการ ระเหยภายใต้สุญญากาศ.....	31

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.1	ค่าพีเอช (pH) และ สีของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิค .....	31
4.1.2	ระยะเวลาการระเหยและอัตราการระเหยของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิค .....	36
4.1.3	ปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์ของการทำเข้มข้นด้วยการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิค .....	38
4.1.4	พลังงานการกระตุ้นของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิค .....	39
4.1.5	การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิค .....	40
4.2	การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิคและการให้ความร้อนด้วยอินฟราเรดร่วมในการระเหยภายใต้สูญญากาศ .....	45
4.2.1	ค่าพีเอช (pH) และ สีของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด .....	45
4.2.2	ระยะเวลาการระเหยและอัตราการระเหยของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด .....	49
4.2.3	ปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์การทำให้เข้มข้นด้วยการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด .....	51
4.2.4	พลังงานการกระตุ้นของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด .....	51
4.2.5	การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด .....	52
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	57
	รายการอ้างอิง .....	59

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	73



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบภายในอาหารและพื้นระเคมีที่ดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ..... 13
3.1	วิธีและสภาวะการระเหยน้ำสับปรดที่ประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิคช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศ ..... 24
3.2	วิธีและสภาวะการระเหยน้ำสับปรดที่ประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศ ..... 25
3.3	สมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 แบบ ..... 28
4.1	ค่า pH ของน้ำสับปรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ..... 33
4.2	ค่าพารามิเตอร์ทางสีของน้ำสับปรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ..... 34
4.3	ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม ( $\Delta E^*$ ) ของน้ำสับปรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ..... 35
4.4	อัตราการระเหยน้ำสับปรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ..... 38
4.5	ค่าพารามิเตอร์ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์และอันดับหนึ่งของการทำเข้มข้นน้ำสับปรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ..... 39
4.6	ค่าพลังงานการกระตุ้นของวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ในการทำเข้มข้นน้ำสับปรด ..... 40
4.7	ค่าคงที่ของสมการ $R^2$ , $\chi^2$ และ RMSE ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 รูปแบบในการทำเข้มข้นน้ำสับปรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UVAR ที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ..... 41
4.8	ค่า pH ของน้ำสับปรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วย VR, UAVR และ UAVR ..... 46
4.9	ค่าพารามิเตอร์ทางสีของน้ำสับปรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ..... 47
4.10	ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม ( $\Delta E^*$ ) ของน้ำสับปรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ..... 48

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 อัตราการระเหย ค่าพารามิเตอร์ของการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง และค่าพลังงานกระตุ้นในการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI.....	52
4.12 ค่าคงที่ของสมการ $R^2$ , $\chi^2$ และ RMSE ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 รูปแบบที่ใช้ในการทำนายอัตราการระเหยด้วยสับปะรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UVARI ที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส .....	53



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ความถี่ของคลื่นเสียงชนิดต่าง ๆ.....8
2.2	กระบวนการสร้างละอองขนาดเล็กด้วยคลื่นอัลตราโซนิกตามสมมติฐานการเกิด โพรงอากาศ .....9
2.3	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ตามความยาวคลื่น ..... 11
2.4	กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรดไปยังอาหาร ..... 12
2.5	การส่งผ่านความร้อนและมวลในระบบการให้ความร้อนด้วยลมร้อน (a) และการให้ ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (b) ..... 14
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาในปฏิกิริยาอันดับศูนย์..... 17
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาในปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ..... 18
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาในปฏิกิริยาอันดับสอง ..... 19
3.1	แผนภาพระบบการระเหยด้วยวิธี UAVR ..... 23
3.2	แผนภาพระบบการระเหยด้วยวิธี UAVRI..... 25
4.1	ค่าดัชนีสีน้ำตาลของน้ำสับปะรดและน้ำสับปะรดที่ทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 °C..... 35
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสับปะรดที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลาการ ระเหยน้ำสับปะรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UVAR ที่ระดับอุณหภูมิการระเหยที่ 50 (A), 55 (B) และ 60 (C) องศาเซลเซียส ..... 37
4.3	กราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่าสัดส่วนความชื้น (MRt) จากการทดลองจริงและค่า สัดส่วนความชื้น (MR <sub>c</sub> ) ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Midilli ในการทำเข้มข้นน้ำ สับปะรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UVAR ที่ระดับอุณหภูมิการระเหยที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ..... 44
4.4	ค่าดัชนีสีน้ำตาลของน้ำสับปะรดที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ภายใต้ระดับอุณหภูมิการระเหยที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส ..... 48



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสับปะรดที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลาการ ระเหยของวิธี VR, UVAR และ UAVRI ที่ระดับอุณหภูมิการระเหยที่ 35 (A), 40 (B) และ 45 (C) องศาเซลเซียส..... 50
4.6	กราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่าสัดส่วนความชื้น (MR <sub>c</sub> ) จากการทดลองจริงและค่า สัดส่วนความชื้น (MR <sub>c</sub> ) ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Midilli ในการทำเข้มข้นน้ำ สับปะรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UVARI ที่ระดับอุณหภูมิการระเหยที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส ..... 56



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สับปะรด (*Ananas comosus*) เป็นผลไม้เศรษฐกิจในเขตร้อนที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทั่วโลกเนื่องจากเป็นผลไม้ที่มีกลิ่นหอมและรสชาติดี ในปัจจุบันประเทศที่เป็นผู้นำในการผลิตสับปะรด ได้แก่ ไทย คอสตาริกา บราซิล ฟิลิปปินส์ และอินโดนีเซีย ประเทศไทยเป็นหนึ่งในสามของประเทศที่มีการผลิตและส่งออกผลิตภัณฑ์แปรรูปจากสับปะรดสูงสุดของโลก โดยในปี 2560 ประเทศไทยมีการส่งออกผลิตภัณฑ์จากสับปะรดประมาณ 1.8-2 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 23,000-25,000 ล้านบาท หรือคิดเป็นร้อยละ 50 ของมูลค่าตลาดโลก (Casabar et al., 2020) ซึ่งผลิตภัณฑ์จากสับปะรดแปรรูปที่ส่งออกของประเทศไทย ได้แก่ สับปะรดกระป๋อง น้ำสับปะรด และสับปะรดอบแห้ง เป็นต้น น้ำสับปะรดเป็นผลิตภัณฑ์จากสับปะรดที่มียอดการส่งออกสูงรองจากสับปะรดกระป๋องโดยยอดการส่งออกน้ำสับปะรดในช่วงปี 2545 ถึง 2561 คิดเป็นร้อยละ 36.5 ของตลาดโลก (Wattanakul et al., 2021) โดยส่วนใหญ่แล้วการส่งออกน้ำสับปะรดในอุตสาหกรรมมักอยู่ในรูปแบบของน้ำสับปะรดเข้มข้น (Couto et al., 2011) เพื่ออำนวยความสะดวกในการขนส่งและจัดเก็บ เป็นต้น การทำเข้มข้นน้ำผลไม้ (Fruit concentration) เป็นวิธีการถนอมอาหารที่สำคัญวิธีหนึ่งในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ โดยน้ำผลไม้ที่ผ่านกระบวนการทำเข้มข้นจะมีปริมาตรลดลงทำให้สามารถลดต้นทุนในการขนส่ง บรรณจุภัณฑ์ และการจัดเก็บ (Sabanci and Icier, 2017) นอกจากนี้ กระบวนการทำเข้มข้นยังสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ทำให้สามารถเก็บไว้ได้นานกว่าน้ำผลไม้ที่ไม่ผ่านการทำเข้มข้นเนื่องจากค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity,  $A_w$ ) ของน้ำผลไม้อยู่ในระดับต่ำ (Cassano et al., 2003) กระบวนการทำเข้มข้นแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ การระเหย (Evaporation) การทำเข้มข้นแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze concentration) และ การทำเข้มข้นด้วยการใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane filtration) โดยทั่วไปแล้วน้ำผลไม้ที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธีการระเหยมักเกิดการสูญเสียกลิ่นรสและคุณภาพของน้ำผลไม้เนื่องจากความร้อนทำใช้ระหว่างการทำเข้มข้นด้วยวิธีการระเหย (Onsekizoglu et al., 2010; Gunko et al., 2006) เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียคุณภาพของน้ำผลไม้อันเกิดจากความร้อนการทำเข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งและการทำเข้มข้นด้วยการใช้เยื่อเลือกผ่าน ถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการรักษาคุณภาพของน้ำผลไม้

หลังการทำเข้มข้น เนื่องจากไม่มีกาให้ความร้อนในระหว่างการทำเข้มข้นทำให้สามารถคงคุณภาพของผลผลิตภัณฑ์ไว้ได้ (Jesus et al., 2007) อย่างไรก็ตาม การทำเข้มข้นน้ำผลไม้ด้วยวิธีทั้งสองยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของการลงทุนที่สูงและระดับความเข้มข้นที่สามารถทำได้ยังอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าการทำเข้มข้นด้วยวิธีการระเหย ซึ่งไม่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำผลไม้ (Jiao, 2003; Cassano et al., 2007) การทำเข้มข้นด้วยวิธีการระเหยด้วยสุญญากาศ (Vacuum evaporation) เป็นวิธีการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้เพื่อลดการเสื่อมเสียคุณภาพของน้ำผลไม้ลง ด้วยการใช้ความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศทำให้สามารถระเหยน้ำในอุณหภูมิที่ต่ำได้ (Assawarachan and Noomhorm, 2010) แม้ว่าการทำเข้มข้นด้วยวิธีการระเหยด้วยสุญญากาศนั้นจะถือเป็นวิธีที่เหมาะสมและได้รับความนิยมในการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ในระบบอุตสาหกรรมแต่ยังคงมีการศึกษาจากหลาย ๆ งานวิจัยพบว่าการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ด้วยวิธีนี้นั้นส่งผลต่อคุณภาพของน้ำผลไม้ เนื่องจากช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแต่น้ำผลไม้ค่อนข้างนาน และใช้พลังงานสูง (Petrotos and Lazarides, 2001) ปัญหาเหล่านี้ทำให้เกิดความท้าทายในกลุ่มของนักวิจัยในการพัฒนาระบบการระเหยแบบสุญญากาศให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับความร้อน เช่น การระเหยแบบฟิล์มบาง (Falling film evaporation) (Cyklis, 2017, Gourdon et al., 2015, Sudarminto et al., 2020) และการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic atomization) (Kirpalani and Toll, 2002; Spotar et al., 2015; Wang et al., 2018; Bando et al., 2004) รวมถึงการประยุกต์ใช้แหล่งความร้อนอื่น ๆ เช่น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave heating) (Quan et al., 2014) การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating) (Icier et al., 2017; Sabanci and Icier, 2017; Sabanci and Icier, 2019) และการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared heating) (Hebbar et al., 2004; Nimmol et al., 2007; Vishwanathan et al., 2013) ล้วนมีผลในการลดระยะเวลาในการให้ความร้อนภายในกระบวนการแปรรูปอาหารได้เช่นกัน

สำหรับการออกแบบเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในกระบวนการแปรรูปอาหารนั้น หลากหลายงานวิจัยศึกษาการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) เพื่อช่วยในการอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ในกระบวนการแปรรูปอาหารเพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการแปรรูปอาหารเหล่านั้น ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Bingol et al., 2008) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการทำแห้ง (Lee and Kim, 2009; Praveen et al., 2006; Kaleemullah and Kailappan, 2006) และกระบวนการทำเข้มข้นน้ำผลไม้หลากหลายชนิด เช่น น้ำสับปะรด (Assawarachan and Noomhorm, 2011) น้ำทับทิม (Goula et al., 2014) น้ำแอปเปิล (Bozkir and Baysal, 2017) น้ำองุ่นและน้ำแครอท (Dinçer et al., 2019) เพื่อทำนายอัตราการระเหยของน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic atomization, UA) ช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศ (Vacuum evaporation, VE) ต่อระยะเวลาการระเหย อัตราการระเหย ค่าพลังงานการกระตุ้น และการเปลี่ยนแปลงของสีน้ำสับปะรดหลังการทำเข้มข้น

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic atomization, UA) ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared heating) ช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศ (Vacuum evaporation, VE) ต่อระยะเวลาการระเหย อัตราการระเหย ค่าพลังงานการกระตุ้น และการเปลี่ยนแปลงของสีน้ำสับปะรดหลังการทำเข้มข้น

1.2.3 เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายระยะเวลาในการระเหยของระบบการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศแบบหมุน (UAVR) และระบบการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยการระเหยภายใต้สูญญากาศแบบหมุน (UAVRI) ในการทำเข้มข้นน้ำสับปะรด

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (UA) ช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศ (VE) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการระเหยและลดความเสียหายทางสีของน้ำสับปะรดหลังการทำเข้มข้นได้ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (UA) ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศ (VE) จะทำให้ประสิทธิภาพในการระเหยและคุณภาพของน้ำสับปะรดหลังทำเข้มข้นดียิ่งขึ้น

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (UA) และการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่ช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศ (VE) ในการทำเข้มข้นน้ำสับปะรด โดยพิจารณาจากระยะเวลาในการระเหย อัตราการระเหย ค่าพลังงานการกระตุ้น การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและสีของน้ำสับปะรดหลังการทำเข้มข้น การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศ ผ่านการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดให้มีความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 45 องศา บริกซ์ด้วยวิธีการทำระเหยทั้ง 4 วิธี ได้แก่ วิธีการระเหยภายใต้สูญญากาศ (VE) การระเหยภายใต้สูญญากาศแบบหมุน (VR) การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหย

ภายใต้สุญญากาศ (UAV) การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศแบบหมุน (UAVR) ที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส และใช้ความดันในการระเหยอยู่ที่ 70 มิลลิบาร์ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ร่วมกับการใช้รังสีอินฟราเรดช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศ ผ่านการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดให้มีความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 60 องศาบริกซ์ด้วยวิธีการทำระเหยทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การระเหยภายใต้สุญญากาศแบบหมุน (VR) การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศแบบหมุน (UAVR) และ การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ร่วมกับการใช้รังสีอินฟราเรดช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศแบบหมุน (UAVRI) ที่อุณหภูมิ 35 40 และ 45 องศาเซลเซียสและใช้ความดันในการระเหยที่ 40 มิลลิบาร์ การทดลองทั้งสองส่วนจะถูกทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการระเหยได้แก่ ระยะเวลาในการระเหย อัตราการระเหย ค่าพลังงานการกระตุ้น และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีกายภาพ (ค่าพีเอชและสี) ของน้ำสับปะรดหลังการทำเข้มข้นพร้อมทั้งวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ที่เหมาะสมในการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธีทั้งหมดในการทดลอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงประสิทธิภาพของการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ด้วยวิธีการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศในด้านของประสิทธิภาพการระเหย (ระยะเวลา อัตราการระเหย และค่าพลังงานการกระตุ้น) รวมทั้งคุณภาพของสีในน้ำผลไม้หลังการทำเข้มข้น

1.5.2 ทราบถึงประสิทธิภาพของการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ด้วยวิธีการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศในแง่ของประสิทธิภาพการระเหย (ระยะเวลา อัตราการระเหย และค่าพลังงานการกระตุ้น) รวมทั้งคุณภาพของสีในน้ำผลไม้หลังการทำเข้มข้น

1.5.3 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ด้วยวิธีการระเหยแบบสุญญากาศร่วมกับการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดเพื่อสามารถทำนายระยะเวลาการระเหย

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการทำเข้มข้น

กระบวนการทำเข้มข้น (Concentration) คือกระบวนการแปรรูปอาหารที่สำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอาหารที่เป็นของเหลวเช่น ชา กาแฟ และน้ำผลไม้ เป็นต้น โดยของเหลวที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบที่สูงเมื่อเข้าสู่กระบวนการทำเข้มข้นจะถูกดึงน้ำออกบางส่วนเพื่อให้มีปริมาณของแข็งมากขึ้น โดยการทำเข้มข้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กลุ่มที่ไม่มีการใช้ความร้อน และกลุ่มที่ใช้ความร้อน

##### 2.1.1 การทำเข้มข้นที่ไม่ใช้ความร้อน (Non-thermal concentration)

###### 2.1.1.1 การทำเข้มข้นด้วยการแช่เยือกแข็ง (Freeze concentration)

การทำเข้มข้นด้วยการแช่เยือกแข็ง (Freeze concentration) เป็นกระบวนการดึงน้ำออกจากสารละลายโดยการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารละลาย ทำให้น้ำบางส่วนเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งบริสุทธิ์ซึ่งจะถูกแยกออกเพื่อทำให้สารละลายที่เหลืออยู่เข้มข้นขึ้น (Dass and Grenco, 1991; Kobayashi and Shirai, 1996) การทำเข้มข้นน้ำผลไม้ด้วยวิธีนี้สามารถคงกลิ่นรสและคุณค่าทางโภชนาการของอาหารเอาไว้ได้ดี (Perzold et al., 2013) Qin et al. (2021) รายงานว่าการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งสามารถเก็บรักษาสารประกอบอะโรมาติกที่ระเหยง่าย (Volatile aromatic components) ในน้ำผลไม้ได้สูงถึงร้อยละ 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ด้วยวิธีการระเหยซึ่งสามารถเก็บรักษาสารประกอบอะโรมาติกที่ระเหยง่ายในน้ำผลไม้ได้เพียงร้อยละ 40 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น นอกจากนี้การทำเข้มข้นกาแฟด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นที่อยู่ในกาแฟหลังการทำเข้มข้น (Gunathilake et al., 2014) แม้ว่าการทำเข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งจะมีข้อดีในด้านการรักษาคุณภาพของอาหารหลังการทำเข้มข้น เนื่องจากไม่มีการใช้ความร้อนและประหยัดพลังงาน แต่อย่างไรก็ตาม การทำเข้มข้นด้วยวิธีนี้ยังข้อเสียเปรียบในเชิงอุตสาหกรรมอยู่หลายประการ เช่น การสูญเสียน้ำผลไม้บางส่วนในระหว่างการทำเข้มข้น มีค่าอุปกรณ์หรือการดำเนินงานที่สูง และระดับความเข้มข้นที่สามารถทำได้อยู่ในระดับต่ำ (Jiao, 2003; Sabanci and Icier, 2020; Qin et al., 2021)

###### 2.1.1.2 การทำเข้มข้นด้วยการใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane filtration)

การทำเข้มข้นด้วยการใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane filtration) เป็นการแยกน้ำออกจากของเหลวด้วยการใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane) บาง ๆ ของเหลวจะเคลื่อนผ่านเยื่อบาง ๆ ด้วย



ผลไม้ผ่านกระบวนการทำเข้มข้นด้วยการกรองผ่านเยื่อจะอยู่ที่ 25-30 องศาบริกซ์เท่านั้น ซึ่งแรงดันที่ป้อนเข้าไปภายในระบบ ของเหลวที่สามารถผ่านรูของเยื่อกรองได้จะถูกแยกออกมา การทำเข้มข้นด้วยวิธีนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทำเข้มข้นน้ำผลไม้สำหรับอุตสาหกรรม โดยวิธีนี้จะไม่มีการให้ความร้อนในระหว่างกระบวนการทำเข้มข้นทำให้สามารถใช้พลังงานค่อนข้างต่ำ และสามารถรักษากลิ่นรสและสารอาหารภายในอาหารเอาไว้ได้ (Echavarria et al., 2011) การทำเข้มข้นด้วยการกรองผ่านเยื่อถูกนำมาศึกษาประสิทธิภาพในการทำเข้มข้นน้ำผลไม้หลายชนิด เช่น น้ำทับทิม (Rehman et al., 2019) น้ำสับปะรด (Babu et al., 2006) น้ำอุนุ่น (Nayak et al., 2011) น้ำส้ม (Ongaratto et al., 2018; Quist-jensen et al., 2016) และน้ำแอปเปิล (Kujawa et al., 2015; Aguiar et al., 2012) เป็นต้น แม้ว่าการทำเข้มข้นด้วยการกรองผ่านเยื่อ (Membrane filtration) จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการรักษาคุณภาพของอาหารหลังการทำเข้มข้นเอาไว้ได้ดี แต่ยังคงมีรายงานว่า การทำเข้มข้นด้วยวิธีนี้ยังคงมีข้อด้อยหลายประการ เมื่อเทียบกับการทำเข้มข้นด้วยวิธีการระเหยที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรมอยู่หลายประการ เช่น ระดับความเข้มข้นสูงสุดของน้ำอยู่ในระดับต่ำกว่ามาตรฐานที่การทำเข้มข้นด้วยวิธีการระเหยสามารถทำได้ (45-65 องศาบริกซ์) (Jiao et al., 2004) นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและดำเนินงานค่อนข้างสูง (Alvarez et al., 2000)

## 2.1.2 การทำเข้มข้นที่ใช้ความร้อน (Thermal concentration)

### 2.1.2.1 การทำเข้มข้นด้วยการระเหย (Evaporation)

การระเหย (Evaporation) เป็นกระบวนการนำน้ำบางส่วนออกจากอาหารเหลวโดยอาศัยหลักการความแตกต่างระหว่างจุดเดือดของสารที่ผสมกันอยู่ ความร้อนจะทำให้สารที่มีจุดเดือดต่ำกว่ากลายเป็นไอน้ำระเหยออกมาทำให้ของเหลวที่เหลืออยู่มีความเข้มข้นขึ้น การระเหยแบบดั้งเดิมนั้นใช้พลังงานสูงเนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้เกิดการระเหย นอกจากนี้ยังใช้เวลานานทำให้อาหารที่ผ่านการระเหยเสื่อมเสียคุณภาพเนื่องจากสัมผัสกับความร้อนสูงเป็นเวลานาน (Fellow, 2007)

### 2.1.2.2 การทำเข้มข้นด้วยการระเหยในสภาวะสุญญากาศ (Vacuum evaporation)

การทำเข้มข้นด้วยการระเหยในสภาวะสุญญากาศ (Vacuum evaporation) เป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากกระบวนการระเหยแบบปกติด้วยการลดความดันในระบบลงทำให้สามารถทำเข้มข้นน้ำผลไม้ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าการระเหยปกติ ซึ่งเป็นการรักษาคุณภาพทางโภชนาการและสมบัติทางประสาทสัมผัสของอาหารที่ผ่านการทำเข้มข้นให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การทำเข้มข้นด้วยการระเหยในสภาวะสุญญากาศเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้ เนื่องจากมีต้นทุนในการติดตั้งเครื่องมือที่ต่ำและระดับความเข้มข้นที่สามารถทำได้อยู่ในระดับสูงกว่าวิธีการทำเข้มข้นด้วยวิธีอื่น ๆ (Ramteke et al., 1993; Cassano et al., 2007) แม้ว่าการทำเข้มข้นด้วยการระเหยในสภาวะสุญญากาศจะสามารถลดความสูญเสีย



คุณภาพทางโภชนาการและสมบัติทางประสาทสัมผัสของอาหารลงได้ แต่การทำเข้มข้นด้วยวิธีนี้ยังคงส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพของอาหารหลังการทำเข้มข้นอยู่ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสี และการสูญเสียสารอาหารที่ไวต่อความร้อน (Elik et al., 2016; Bozkir and Baysal, 2017) ดังนั้นเพื่อที่จะรักษาคุณภาพทางโภชนาการและคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของอาหารไว้ให้ได้มากที่สุด ระบบการทำเข้มข้นด้วยการระเหยในสถานะสูญญากาศถูกนำไปพัฒนาในหลาย ๆ แนวทางเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและคุณภาพสูงสุดของการระเหยน้ำผลไม้เข้มข้น เช่น การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเพื่อให้มีโอกาสได้รับความร้อนมากขึ้น และการใช้แหล่งความร้อนอื่น ๆ เพื่อให้เกิดการระเหยที่เร็วขึ้น

## 2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการระเหยในสถานะสูญญากาศ

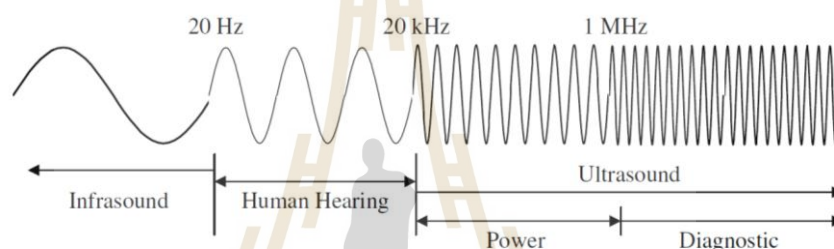
### 2.2.1 การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส

#### 2.2.1.1 การระเหยแบบฟิล์มบาง (Falling film evaporation) และการหมุน (Rotary vacuum evaporation)

การทำเข้มข้นโดยใช้เครื่องระเหยชั้นแบบฟิล์มบาง (Falling film evaporator) เป็นเทคโนโลยีการทำเข้มข้นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอาหารเหลวเช่น น้ำผลไม้เข้มข้น และนมข้น เป็นต้น การระเหยแบบฟิล์มบางมีข้อดีในด้านการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงที่อัตราการไหลต่ำ ใช้อุณหภูมิในการระเหยต่ำ และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ น้อย นอกจากนี้การทำเข้มข้นด้วยวิธีนี้ยังใช้ระยะเวลาในการระเหยสั้น และประหยัดพลังงาน (Pehlivan and Ozdemir, 2012) อาหารที่มีลักษณะเป็นของเหลวจะถูกปล่อยให้ไหลลงตามท่อและถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิการระเหยโดยอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ภายในท่อ จากนั้นโมเลกุลของน้ำภายในของเหลวจะระเหยกลายเป็นไอน้ำและเข้าสู่กระบวนการควบแน่นเพื่อควบคุมแรงดันไอน้ำให้สมดุลภายในระบบ (Yang and Shen, 2008) การทำเข้มข้นโดยใช้เครื่องระเหยชั้นแบบฟิล์มบาง ถูกนำไปใช้ในน้ำผลไม้ อาทิเช่น น้ำอ้อย (Khoodaruth, 2015) น้ำข้าวฟ่าง (Sudarminto et al., 2020; Ali et al., 2019) การระเหยด้วยสถานะสูญญากาศแบบหมุน (Rotary vacuum evaporation) เป็นอีกหนึ่งกระบวนการของการทำเข้มข้นที่ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงเนื่องจากการหมุน (Rotation) ทำให้เกิดฟิล์มบาง ๆ ทำให้น้ำสามารถระเหยออกมาได้อย่างรวดเร็ว การระเหยด้วยสถานะสูญญากาศแบบหมุนถูกนำไปใช้ศึกษาประสิทธิภาพในการทำเข้มข้นน้ำผลไม้หลายชนิด เช่น น้ำสับปะรด (Assawarachan and Noomhorm, 2010; Leong and Chua, 2020) น้ำทับทิม (Maskan, 2006) น้ำมะเขือเทศ (Ha and Thuy, 2020) น้ำบลูเบอร์รี่ (Elik et al., 2016) และน้ำลิ้นจี่ (Fang et al., 2021)

### 2.2.1.2 การทำให้เป็นล่องด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic atomization) คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic wave)

คลื่นอัลตราซาวนด์ เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินขีดจำกัดการได้ยินของมนุษย์ (>20 kHz) โดยคลื่นอัลตราซาวนด์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ พาวเวอร์อัลตราซาวนด์ (Power ultrasound) ซึ่งเป็นคลื่นที่มีความถี่ต่ำในช่วง 20 kHz ถึง 1 MHz โดยส่วนใหญ่นำไปใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร และ อัลตราซาวนด์สำหรับการวิเคราะห์ (Diagnostic ultrasound) ซึ่งมีความถี่สูงเกิน 1 MHz ใช้สำหรับการวิเคราะห์ทางการแพทย์และการอุตสาหกรรมภาพถ่าย (Mason, 1996) โดยคลื่นความถี่ของคลื่นต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความถี่ของคลื่นเสียงชนิดต่าง ๆ

ที่มา: Hao Feng and Gustavo (2011)

สำหรับการนำเอาเทคโนโลยีคลื่นอัลตราซาวนด์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร มีข้อได้เปรียบในด้านความปลอดภัยทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเนื่องจากกระบวนการใช้อัลตราซาวนด์ไม่ก่อให้เกิดสารพิษ (Hao Feng et al., 2011)

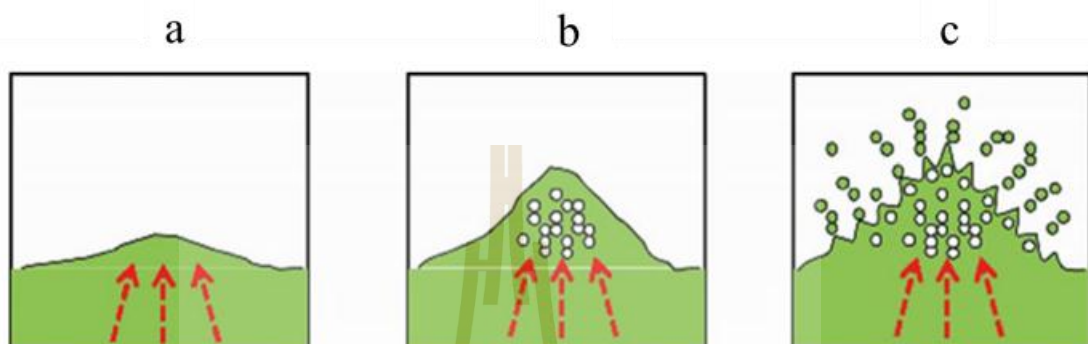
#### การทำให้เป็นล่องด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic atomization, UA)

การทำให้เป็นล่องด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ถูกอธิบายไว้ครั้งแรกในงานวิจัยของ Wood and Loomis (1927) โดยเป็นการสร้างล่องขนาดเล็กระดับไมครอนจากของเหลวด้วยคลื่นอัลตราโซนิกความถี่สูง กลไกการสร้างล่องด้วยอัลตราโซนิก (UA) ถูกอธิบายผ่าน 3 สมมติฐาน ได้แก่ (1) สมมติฐานการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation hypothesis) (2) สมมติฐานการเกิดคลื่นคาปิลลารี (Capillary wave hypothesis) และ (3) สมมติฐานร่วมระหว่างการเกิดโพรงอากาศกับการเกิดคลื่นคาปิลลารี (Conjunction hypothesis)

#### (1) สมมติฐานการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation hypothesis)

สมมติฐานการเกิดโพรงอากาศ มักใช้ในการอธิบายการสลายตัวของของเหลวที่ใช้อัลตราซาวนด์ความถี่สูง (>100 kHz) โดยเมื่อของเหลวถูกกระตุ้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (2.2a) โพรง

อากาศ (Cavities) หรือกลุ่มฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ (Microbubbles) จะถูกสร้างขึ้นด้วยการสั่นแบบไฮดรอลิก (Hydraulic vibration) โดยโพรงอากาศจะขยายและหดตัวอย่างต่อเนื่องด้วยพลังงานจากอัลตราโซนิก (2.2b) จากนั้นละอองขนาดเล็ก ๆ จะถูกขับออกมาจากผิวของเหลวด้วยคลื่นกระแทก (Shock wave) ซึ่งเกิดจากการหดตัวของโพรงอากาศ (2.2c) (Kudo et al., 2017) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการสร้างละอองขนาดเล็กด้วยคลื่นอัลตราโซนิกตามสมมติฐานการเกิดโพรงอากาศ

ที่มา: Simon et al (2015)

### (2) สมมติฐานการเกิดคลื่นคาปิลลารี (Capillary wave hypothesis)

สมมติฐานการเกิดคลื่นคาปิลลารี อธิบายถึงการสั่นบนผิวของเหลวที่เกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์ความถี่สูง ซึ่งทำให้เกิดคลื่นขนาดเล็กที่เรียกว่า คลื่นคาปิลลารี อยู่ที่บนพื้นผิวของเหลว และเมื่อแอมพลิจูดของคลื่นเพิ่มขึ้นในระหว่างการสั่นจะทำให้คลื่นขนาดเล็กเหล่านั้นเกิดความไม่เสถียรทำให้ละอองน้ำที่เกิดขึ้นภายในถูกขับออกมาที่บริเวณยอดคลื่นและเกิดเป็นละอองขนาดเล็ก (Simon et al., 2012)

### (3) สมมติฐานร่วมระหว่างการเกิดโพรงอากาศกับการเกิดคลื่นคาปิลลารี (Conjunction hypothesis)

สมมติฐานร่วมระหว่างการเกิดโพรงอากาศกับการเกิดคลื่นคาปิลลารีถูกนำเสนอไว้ในงานวิจัยของ Boguslavskii and Eknadiosyants. (1969) โดยสมมติฐานร่วมนี้ถูกนำไปอธิบายกลไกทางกายภาพของการทำให้เกิดละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ 2 MHz เริ่มแรกการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation) เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันฟองอากาศที่มีอนุภาคขนาดไมโครเมตร (Microbubbles) เนื่องจากความดันของน้ำมีค่าต่ำกว่าค่าความดันไอ จากนั้นเมื่อฟองอากาศมีความดันเพิ่มขึ้นจะเกิดการยุบตัว และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของคลื่นกระแทก หรือ

เรียกว่า Hydraulic shock wave เมื่อเกิดคลื่นกระแทกขึ้นเป็นระยะ ๆ จะทำให้พื้นผิวสัมผัสของของเหลวเกิดการสั่นอย่างรุนแรง โดยคลื่นนิ่งขนาดเล็ก (Standing capillary waves) ที่สะสมอยู่บริเวณผิวสัมผัสของของเหลวจะถูกกระตุ้นให้เกิดเป็นคลื่นน้ำขนาดใหญ่คล้ายน้ำพุ (Fountain jet) ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสของของเหลว จากนั้นฟองอากาศขนาดเล็ก จะเคลื่อนเข้าไปในส่วนที่เป็นยอดของคลื่นและยุบตัวที่บริเวณจุดสูงสุดของยอดคลื่นซึ่งเป็นบริเวณที่มีการสะสมของพลังงานจะคลื่นเสียง (Acoustic energy) ทำให้เกิดการปลดปล่อยละอองน้ำขนาดเล็กเป็นจำนวนมากคล้ายกับหมอก (Mist) (Kirpalani et al., 2002)

### การประยุกต์ใช้ทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในกระบวนการแปรรูปอาหาร

การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (UA) ถูกนำมาประยุกต์ในกระบวนการแปรรูปอาหารหลายประเภท โดยกลไกและการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกถูกศึกษาอย่างแพร่หลายในกระบวนการแยกสาร (Separation) เช่น การแยกแอลกอฮอล์ออกจากสารผสมด้วยการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Spotar et al., 2015; Kobara et al., 2009; Yasuda et al., 2020) Sato et al. (2001) พบว่าการแยกเอทานอลบริสุทธิ์ออกจากสารผสมด้วยการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส นอกจากนี้งานวิจัยของ Suzaki et al., (2006) พบว่าการแยกกรดอะมิโนเช่น ทริปโตเฟน (Tryptophan, Trp) และฟีนีลารามีน (Phenylamine, Phe) ออกจากสารละลายผสมสามารถทำได้ด้วยการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเช่นกัน Yuzada et al. (2005) รายงานเพิ่มเติมว่าการระบวนการแยกสารด้วยการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเมื่อละอองกระจายเข้าสู่ของสภาวะก๊าซ (Gas phase) ซึ่งถือเป็นข้อดีเมื่อเทียบกับวิธีการกลั่น (Distillation) ดังนั้น การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกลั่นเหล้าสาเกเพื่อทำให้ได้ปริมาณเอทานอลที่สูงขึ้น สำหรับกระบวนการแปรรูปอาหารประเภทอื่น ๆ Wangm et al. (2018) ได้ประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ร่วมกับการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) ในนมผงพร่องมันเนย (Skimmed milk powders) โดยพบว่า นมผงพร่องมันเนยที่ได้จากการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกมีคุณภาพดีและขนาดเล็กกว่านมที่ได้จากการทำแห้งด้วย High-speed rotating dish spray drying ประมาณ 5 เท่า นอกจากนี้ การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกยังถูกนำไปศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ในน้ำส้มและน้ำองุ่นร่วมกับการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อจะสั้นลงเนื่องจากละอองขนาดเล็กที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกมีพื้นที่สัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้มากขึ้น (Antonio-Gutiérrez et al., 2017)

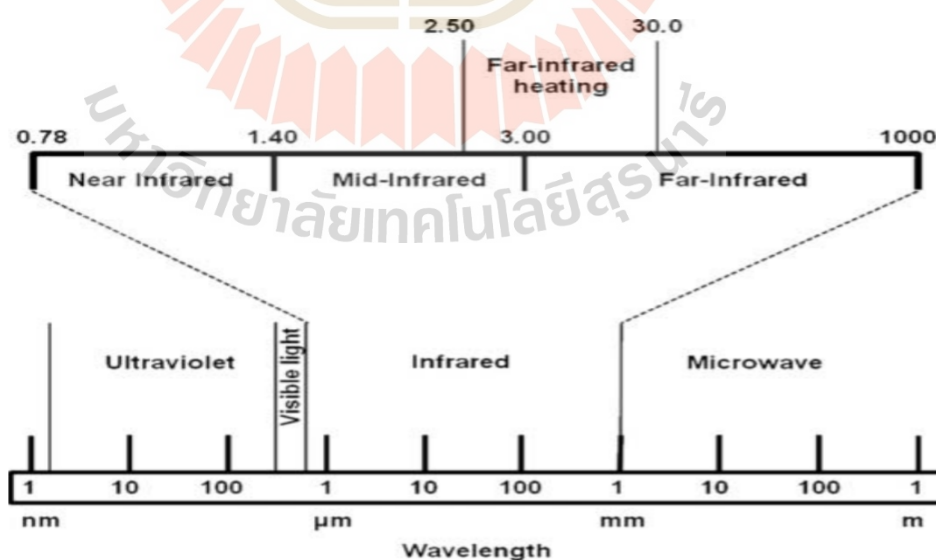
## 2.2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared heating)

### 2.2.2.1 รังสีอินฟราเรด (Infrared)

รังสีอินฟราเรด หรือรังสีความร้อน (Infrared radiation, IR) ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1800 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ วิลเลียม เฮอร์เชล (William Herschel) โดยรังสีอินฟราเรดคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.75-100 ไมโครเมตร หรือในช่วงความถี่ที่ 1,011-1,014 เฮิร์ตซ์ ซึ่งอยู่ระหว่างคลื่นไมโครเวฟและคลื่นแสงที่ตามองเห็น รังสีอินฟราเรดสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ตามความยาวคลื่นและความเหมาะสมตามรูปแบบของการใช้งานที่แตกต่างออกไปได้แก่ รังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared, NIR) รังสีอินฟราเรดย่านกลาง (Middle infrared, MIR) และรังสีอินฟราเรดย่านไกล (Far infrared, FIR) (Aboud et al., 2019) โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.3

### 2.2.2.2 ประเภทของรังสีอินฟราเรด

- 1) รังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared, NIR) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.78 ถึง 1.4 ไมโครเมตร ซึ่งสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส
- 2) รังสีอินฟราเรดย่านกลาง (Middle infrared, MIR) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 3 ไมโครเมตร โดยสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ 400-1000 องศาเซลเซียส
- 3) อินฟราเรดย่านไกล (Far infrared, FIR) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 3.0 ถึง 1000 ไมโครเมตร สามารถให้อุณหภูมิที่สูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.3 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ตามความยาวคลื่น

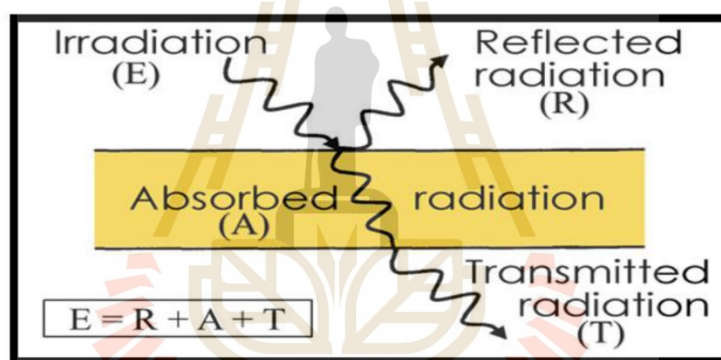
ที่มา: Rastogi (2012)



ในปัจจุบันแหล่งผลิตรังสีอินฟราเรดที่ใช้สำหรับให้ความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ได้แก่ การให้ความร้อนแบบระบบไฟฟ้า (Electric infrared heater) ซึ่งสามารถให้ความร้อนในช่วง 1100-2200 องศาเซลเซียสและการให้ความร้อนแบบเชื้อเพลิง (Gas-fired infrared heater) ที่ให้ความร้อนในช่วง 343-1100 องศาเซลเซียส (Fasina, 2003) โดยอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบระบบไฟฟ้ามักได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมมากกว่าเนื่องจากใช้งานง่ายและต้นทุนของอุปกรณ์ต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายจากการไหม้ อุณหภูมิของอินฟราเรดในการให้ความร้อนจึงถูกกำหนดให้อยู่ในช่วง 650-1200 องศาเซลเซียส (Aboud et al., 2019)

### 2.2.2.3 หลักการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

เมื่อรังสีอินฟราเรดตกกระทบบนผิวของวัสดุ การแผ่รังสีนี้จะแสดงคุณสมบัติพื้นฐานออกด้วยกันทั้ง 3 รูปแบบคือ การดูดซับ (Absorptivity, A) การสะท้อนกลับ (Reflectivity, R) และการส่งผ่านการแผ่รังสี (Emissivity transmissivity, T) ตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรดไปยังอาหาร

ที่มา: Yadav et al (2020)

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกดูดซับ และส่งผ่านเข้าไปในอาหารจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพของอะตอม และโมเลกุลภายในของวัสดุได้ 3 รูปแบบซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้ได้แก่ (1) การเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอน (Electron) ช่วงความยาวคลื่นอยู่ที่ 0.2-0.7 ไมโครเมตร (2) การเปลี่ยนแปลงทางการสั่น (Vibration) ช่วงความยาวคลื่นอยู่ที่ 2.5-100 ไมโครเมตร และ (3) การเปลี่ยนแปลงทางการหมุน (Rotation) ช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 100 ไมโครเมตร (Decareau, 1985) โดยทั่วไปแล้วการดูดซับรังสีอินฟราเรดของอาหารจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อผ่านกลไกการเปลี่ยนแปลงการสั่นของโมเลกุล โดยน้ำและสารประกอบอินทรีย์ภายในอาหารจะดูดซับพลังงานของรังสีอินฟราเรดได้ดีในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่า 2.5 ไมโครเมตร (Sakai and Hanzawa, 1994) ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1

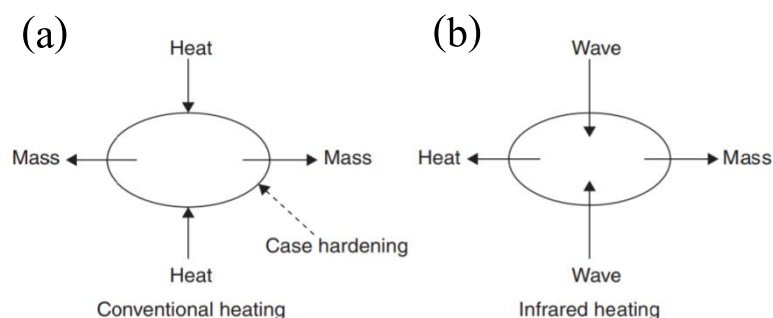
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบภายในอาหารและพันธะเคมีที่ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ

องค์ประกอบในสารอาหาร	ความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)	พันธะเคมี
น้ำ คาร์โบไฮเดรต	2.7-3.3	Hydroxyl group (O-H)
คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน	3.25-3.7	Aliphatic carbon-hydrogen
ไขมัน	5.71-5.76	Carbonyl group (C=O) (ester)
โปรตีน	5.92	Carbonyl group (C=O) (amyl)
โปรตีน	2.83-3.33	Nitrogen-hydrogen group (-NH-)
ไขมันไม่อิ่มตัว	4.44-4.76	Carbon-carbon double bond (C=C)

ที่มา: Aboud et al (2019)

รังสีอินฟราเรดที่ถูกดูดซับเข้ามาจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน และอุณหภูมิภายในอาหารจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในอาหารจะเปลี่ยนไปโดยเกิดได้ 2 รูปแบบคือ การสั่นตามแนวแกน (Stretching) ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนในรูปแบบของการลด-เพิ่มระยะห่างระหว่างอะตอมและการสั่นแบบเบี่ยงเบน (Bending) ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนในรูปแบบของการเคลื่อนที่ของอะตอม (Skjoldebrand, 2001) Habber and Rastogi. (2001) อธิบายเพิ่มเติมว่าการส่งผ่านมวลและความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดนั้นแตกต่างจากการให้ความร้อนด้วยวิธีทั่วไป เช่น การใช้ลมร้อน (Hot air heating) แสดงไว้ในรูปภาพที่ 2.5 โดยการให้ความร้อนแบบปกติ (2.5a) ความร้อนจะเข้าสู่ผิวสัมผัสของอาหารไปยังแกนกลางภายในด้วยการนำความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในทำให้เกิดปัญหาของการที่อาหารมีเปลือกนอกที่แข็งในระหว่างการทำแห้งและเป็นอุปสรรคในการระเหยของน้ำภายในที่ไม่สามารถระเหยออกมาได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (2.5b) เมื่ออาหารดูดซับรังสีอินฟราเรดเข้าไปภายในจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานการแผ่รังสีให้การเป็นพลังงานความร้อนที่มีความเข้มข้นสูงอยู่ภายในอาหารและส่งพลังงานความร้อนจากภายในออกมายังภายนอกและน้ำภายในอาหารสามารถระเหยออกมาได้อย่างรวดเร็ว (Rastogi, 2012)





**รูปที่ 2.5** การส่งผ่านความร้อนและมวลในระบบการให้ความร้อนด้วยลมร้อน (a) และการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (b)

ที่มา: Habber and Rastogi (2001)

#### 2.2.2.4 การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในกระบวนการแปรรูปอาหาร

การให้ความร้อนในการแปรรูปอาหารด้วยรังสีอินฟราเรดถือเป็นวิธีที่ถูกล้นพบบ่อยอย่างยาวนานในกระบวนการแปรรูปหลายประเภท โดยการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับวิธีการให้ความร้อนทั่วไป เช่น ใช้ระยะเวลาสั้น ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูง การกระจายความร้อนสม่ำเสมอ ความเที่ยงตรงสูง และสามารถลดการเสื่อมเสียคุณภาพอาหารหลังการแปรรูป (Mongpraneet et al., 2002) โดยการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงาน สารเคมี และ น้ำในปริมาณที่น้อยลงทำให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและไม่เกิดอันตรายจากการสัมผัส (Pan and Atungulu, 2011) นอกจากนี้การใช้อินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อนยังมีต้นทุนการดำเนินงานที่ต่ำกว่าการให้ความร้อนทั่วไปโดยพลังงานจะเกิดภายในอาหารทำให้ได้รับความร้อนโดยตรงและไม่ก่อให้เกิดสารประกอบที่ระเหยง่าย เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ หรือไนโตรเจนออกไซด์ จึงไม่จำเป็นต้องมีระบบหมุนเวียนความร้อนและระบบการแยกสารในระหว่างกระบวนการผลิต (Nindo and Tang, 2007) ปัจจุบันรังสีอินฟราเรดถูกนำไปศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารอย่างแพร่หลาย เช่น กระบวนการทำแห้ง (Drying) การลวก (Blanching) กระบวนการยับยั้งเอนไซม์ (Enzyme inactivation) กระบวนการพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) เป็นต้น Nokwak and Lewicki (2004) รายงานว่า การใช้รังสีอินฟราเรดในกระบวนการทำแห้งแอปเปิ้ลแผ่นสามารถลดระยะเวลาในการทำแห้งลงไปได้ถึงร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (Hot-air drying) เช่นเดียวกับการอบแห้งหอมหัวใหญ่ด้วยรังสีอินฟราเรดที่ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งน้อยกว่าวิธีการอบลมร้อนประมาณร้อยละ 30 (Kumar et al., 2005) นอกจากนี้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยแล้ว การใช้รังสีอินฟราเรดในการให้ความร้อนในกระบวนการแปรรูปอาหารประเภทอื่น ๆ ยังเป็นการเพิ่มคุณภาพ

ของผลิตภัณฑ์หลังการแปรรูปอีกด้วย Martinez et al. (1999) พบว่า การอบแป้งแผ่นบางด้วยรังสีอินฟราเรดทำให้เกิดคุณลักษณะที่ดีขึ้น เช่น การขึ้นรูปของแป้ง สี และเนื้อสัมผัส เมื่อเทียบกับการอบด้วยวิธีปกติ และในการทดลองอบขนมเค้กด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟพบว่า ขนมเค้กที่ได้มีสีและน้ำหนักที่ดีกว่าการอบด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว (Summu et al., 2005) นอกจากนี้ Kim et al. (2006) เสนอว่า การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีกับชาเขียวแทนการคั่วสามารถเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลในใบชาจาก 475.6 เป็น 811.1 มก./กรัมและปริมาณสารประกอบฟลาโวนอล จาก 175.7 เป็น 208.7 มก./กรัม นอกจากนี้ Park (2009) เสนอเพิ่มเติมว่า ความขมและความฝาดของชาลดลงเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

### 2.3 จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (Kinetics reaction)

ในการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยปกติแล้วต้องคำนึงถึงคุณภาพของอาหารหลังการแปรรูปเป็นหลัก ซึ่งคุณภาพของอาหารที่ได้ขึ้นขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของวัตถุดิบในการผลิตและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแปรรูปในรูปแบบของ (1) การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reactions) เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (2) การเกิดปฏิกิริยาทางจุลินทรีย์ (Microbial reactions) ซึ่งมีผลเชิงบวกในแง่ของการหมักและเชิงลบในแง่ของกระบวนการเน่าเสียและการเกิดโรคที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค (3) การเกิดปฏิกิริยาทางชีววิทยา (Biochemical reactions) ซึ่งมาจากเอนไซม์ภายในอาหารและ (4) การเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพ (Physical reactions) เช่น การจับตัวเป็นก้อนและการตกตะกอน เป็นต้น ซึ่งอาจนำไปสู่ความสูญเสียคุณภาพของอาหารทั้งในด้านของโภชนาการรวมถึงลักษณะทั่วไปของอาหารรสชาติ สี และเนื้อสัมผัสของอาหาร (Van Martinus, 2008)

แนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ภายในอาหารสามารถอธิบายได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ (Kinetics) โดยแบบจำลองทางจลนศาสตร์สามารถทำให้เข้าใจถึงการเกิดปฏิกิริยาภายในอาหารซึ่งนำไปสู่การทำนายพฤติกรรมและควบคุมการเกิดปฏิกิริยาเหล่านั้น ได้ (Haefner, 2005) โดยการสร้างแบบจำลองจลนศาสตร์เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิศาสตร์และจลนพลศาสตร์ทางเคมีซึ่งจะทำให้เข้าใจกลไกของปฏิกิริยาในระดับโมเลกุลและค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์พื้นฐานต่าง ๆ ได้ดีขึ้น

**2.3.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero-order reactions)** ถูกนำมาใช้อธิบายการเกิดปฏิกิริยาที่มีอัตราการเกิดไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยปฏิกิริยาอันดับศูนย์ที่พบบ่อยในอาหารได้แก่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Autooxidation) และกระบวนการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเสื่อมสลายของสี (Color degradation) และการก่อตัวของสารประกอบ

จำพวก Hydroxymethylfurfural (HMF) เช่น ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) (Heldman and Lund, 2007) การสลายตัวของวิตามินซีในน้ำผลไม้หลายชนิดถูกตรวจสอบได้ว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ โดยการศึกษาการเสื่อมสลายของวิตามินซีในน้ำแอปเปิ้ลที่ระดับความร้อนต่าง ๆ ถูกระบุว่า เป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Herbig and Renard, 2017) เช่นเดียวกันกับการศึกษาการสลายตัวของวิตามินซีในน้ำสตอเบอร์รี่ (Sapei and Hwa, 2014) และน้ำมะม่วง (Ogori et al., 2020) ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองของการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์เนื่องจากมีค่า สัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือ ค่า  $R^2$  สูงกว่าปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงและเสื่อมสภาพของสีผลไม้ที่ถูกแปรรูปโดยใช้ความร้อนและการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดมักถูกอธิบายด้วยปฏิกิริยาอันดับศูนย์เนื่องจากให้ค่า  $R^2$  สูง เช่น ในน้ำทับทิม (Maskan, 2006) น้ำส้ม (Tiwari and Muthukumarappan, 2008) เบอร์รี่สด (Suh and Noh, 2003; Boranbayeva et al., 2014) น้ำแอปเปิ้ล (Burdurlu and karadeniz, 2003) น้ำสับปะรด (Chutintrasri and Noomhorm, 2007; Rattanathanalerk et al., 2005) และ ผลไม้ในกลุ่มที่มีรสเปรี้ยว (Citrus) (Burdurlu et al., 2006; Koca et al., 2003) การหาปฏิกิริยาอันดับศูนย์สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1)

$$-\frac{dC}{dt} = k_0 \quad (1)$$

เมื่อทำการอินทิเกรต (integration) จะได้สมการใหม่

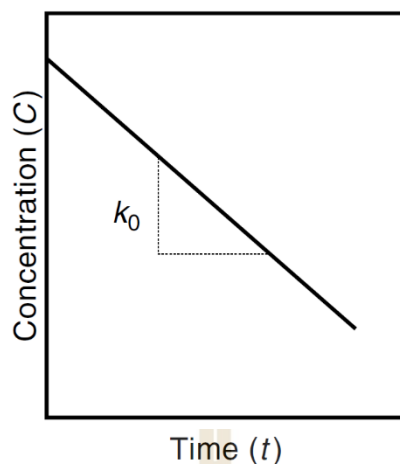
$$C = C_0 - k_0 t \quad (2)$$

โดยที่  $C_0$  และ  $C$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ

$t$  คือ เวลา

$k_0$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีลำดับศูนย์

คุณลักษณะที่โดดเด่นของปฏิกิริยาอันดับศูนย์คือความเข้มข้นที่ลดลงเชิงเส้นตามฟังก์ชันของเวลา ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาในปฏิกิริยาอันดับศูนย์  
ที่มา: Heldman and Lund (2007)

**2.3.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order reactions)** โดยปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในอาหารมักถูกจัดอยู่ในปฏิกิริยาประเภทนี้ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยปฏิกิริยาประเภทนี้จะถูกนำไปใช้ในการอธิบายแนวโน้มของกระบวนการเสื่อมสลายของคุณภาพอาหารได้หลายคุณสมบัติ เช่น สี เนื้อสัมผัส และสารประกอบที่ส่งผลต่อสุขภาพ (Ling et al., 2014) โดยจากการศึกษาพบว่า การลดลงของค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ในผลไม้ที่ถูกให้ความร้อนจะเป็นไปตามรูปแบบของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมากกว่าปฏิกิริยาอันดับอื่น ๆ เช่น การศึกษาการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ พบการลดลงค่า  $L^*$  ถูกอธิบายตามสมการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Chutintrasri and Noomhorm, 2007) เช่นเดียวกันงานวิจัยของ Lima et al. (2010) ที่สรุปว่าการลดลงของค่า  $L^*$  ในเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ความร้อนสูงสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของสีเขียวและการอ่อนตัวลงของหน่อไม้ฝรั่งเมื่อได้รับความร้อนยังระบุว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Lau et al., 2000) ยังมีอีกหลายงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอาหารที่เป็นไปตามรูปแบบของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เช่น การพัฒนาเนื้อสัมผัสของมันฝรั่งหั่นชนิด (Nisha et al., 2006) ความแน่นของเนื้อลิ้นจี่ที่ลดลงเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น (Yu et al., 2011) ความอ่อนตัวของกะหล่ำปลีหลังลวก (Jaiswal et al., 2012) นอกจากนี้การเสื่อมสภาพของสารประกอบต่าง ๆ ในผลไม้บางชนิดยังถูกอธิบายด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เช่น การสลายตัวของวิตามินซีในน้ำส้ม (Vikram et al., 2005; Dhuique-Mayer et al., 2007) การเสื่อมสลายของสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ในผลไม้ตระกูลเบอร์รี่ (Harbourne et al., 2008; Verbeyst et al., 2011; Harbourne et al., 2008) การหาปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3)

$$-\frac{dC}{dt} = k_1 C \quad (3)$$

เมื่อ integration จะได้สมการใหม่

$$C = C_0 \exp(-k_1 t) \quad (4)$$

และเมื่อนำฟังก์ชันลอการิทึม (logarithmic) แทนสมการเลขชี้กำลัง (exponential)

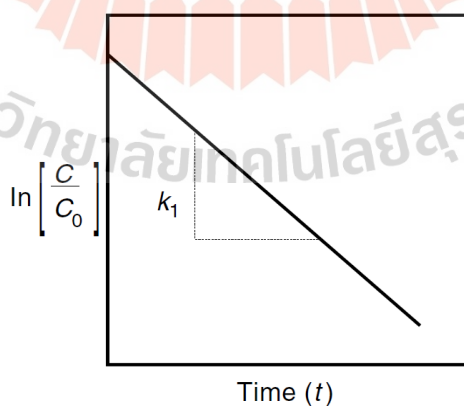
$$\ln C = \ln C_0 - k_1 t \quad (5)$$

โดยที่  $C_0$  และ  $C$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ

$t$  คือ เวลา

$k_1$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีลำดับหนึ่ง

โดย ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln C$  กับเวลาเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นตรงที่ความชันมีค่าเท่ากับ  $-k_1$  ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาในปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง  
ที่มา: Heldman and Lund (2007)

**2.3.3 ปฏิกริยาอันดับสอง (Second-Order Reactions)** เป็นปฏิกริยาที่มีอัตราการเกิดปฏิกริยาที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยมีอันดับรวมของปฏิกริยาเท่ากับสอง โดยทั่วไปแล้วปฏิกริยาอันดับสองมักเกิดขึ้นน้อยมากในการเปลี่ยนแปลงของอาหาร เช่น การเสื่อมสลายของแซนโทฟิลล์ (Xanthophyll) ในน้ำส้มที่ผ่านการให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ถูกระบุว่าปฏิกิริยาอันดับสอง (Hadjal et al., 2013) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

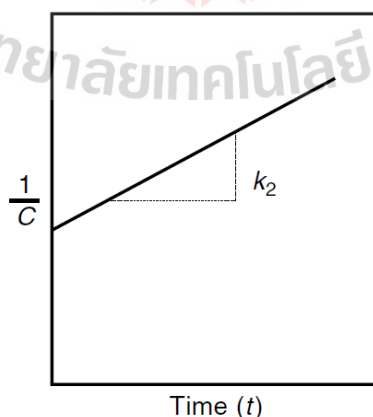
$$-\frac{dC}{dt} = k_2 C^2 \quad (6)$$

เมื่อ integration จะได้สมการใหม่

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + k_2 t \quad (7)$$

โดย  $C_0$  และ  $C$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ  
 $t$  คือ เวลา  
 $k_2$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกริยาลำดับที่สอง

โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นตรงที่ความชันถูกแสดงในรูปที่ 2.8



**รูปที่ 2.8** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาในปฏิกริยาอันดับสอง  
 ที่มา: Heldman and Lund (2007)



### 2.3.4 การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

การเกิดปฏิกิริยาในอาหารนั้นส่วนได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทั้งภายนอกภายในของอาหาร โดยอุณหภูมิถือเป็นปัจจัยภายนอกที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยแนวคิดหลักของการศึกษาจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอาหารที่มีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิคือการประเมินคุณสมบัติเชิงคุณภาพ (Quality attribute) ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในการให้ความร้อน ณ อุณหภูมิหนึ่ง โดยใช้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) ที่ได้จากการสมการการเกิดปฏิกิริยาในลำดับต่าง ๆ ที่ตัดสินใจเลือก (Ling et al., 2015) โดยการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเคมีที่ขึ้นกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทั่วไปภายในอาหารมักถูกอธิบายโดยอาศัยแบบจำลองตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ในสมการที่ (8) (Van Boekel, 2005)

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

โดย  $k$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate constant)

$k_0$  คือ อัตราคงที่ (Rate constant) หรือ ปัจจัยความถี่ (Frequency factor)

$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลล์/โมลล์·เคลวิน)

$T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

$E_a$  คือ พลังงานการกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งเป็นพลังงานขั้นต่ำที่จำเป็นต้องใช้ในการเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาเคมีในอาหาร โดยมีหน่วยเป็นกิโลจูลล์ต่อโมลล์ การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เมื่อ โมเลกุลที่เกิดปฏิกิริยา (Activated molecular) มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานการกระตุ้น ( $E_a$ ) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้พลังงานที่มีในระบบมีมากกว่าพลังงานการกระตุ้นส่งผลให้อัตราการระเหยมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นพลังงานการกระตุ้นจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ระบุได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นเร็วเพียงใด (Ling et al., 2015)

### 2.3.5 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematic modeling)

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematic modeling) ถูกประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอย่างแพร่หลายเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาและสามารถควบคุมพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องภายในกระบวนการแปรรูปอาหาร (Perez and Schmalcko, 2009) สำหรับในกระบวนการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ การทราบคุณลักษณะน้ำผลไม้หลังการทำเข้มข้นเป็นสิ่งสำคัญของการออกแบบอุปกรณ์ การออกแบบกระบวนการให้เหมาะสม และการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้น การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงจำเป็นสำหรับการควบคุมและการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำเข้มข้น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้ในการ



อธิบายคุณลักษณะการทำเข้มข้นในน้ำผลไม้ เช่น Lewis, Henderson and Pabis, Page, Midilli, Logarithmic, Wang and Sing และ linear เป็นต้น โดยในปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหล่านี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการทำเข้มข้นน้ำผลไม้หลายชนิด เช่น การทำเข้มข้นน้ำสับปะรด ด้วยวิธีการระเหยแบบสุญญากาศร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของ Page ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ (แสดงค่า  $R^2$  สูงที่สุด  $\chi^2$  และ RMSE ต่ำที่สุด) (Assawarachan and Noomhorm, 2010) ในขณะที่การทำเข้มข้นน้ำผลไม้ประเภทอื่น ๆ ให้ผลที่แตกต่างกันออกไป โดยงานวิจัยของ Dinçer et al., (2019) พบว่าแบบจำลองของ Midilli สามารถอธิบายลักษณะการทำเข้มข้นน้ำองุ่น น้ำแครอท และน้ำเบอร์รี่ได้ดีกว่าแบบจำลองอื่น ๆ โดยพิจารณาจากค่า  $R^2$  สูงที่สุด ในขณะที่  $\chi^2$  และ RMSE มีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้งานวิจัยของ Goula et al., (2014) รายงานว่าแบบจำลอง logarithmic ถูกใช้ในการอธิบายการทำเข้มข้นน้ำทับทิม ด้วยวิธีการระเหยด้วยสุญญากาศได้ดีที่สุด เนื่องจากแสดงค่า  $R^2$  และ Adjusted  $R^2$  สูงที่สุด ในขณะที่ผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (Sum of squared errors, SSE) มีค่าต่ำที่สุด



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

##### 3.1.1 น้ำสับประรด

น้ำสับประรดที่ใช้ในตัวอย่างการทดลองโดยใช้เป็นน้ำสับประคยูเอสทีของมาลี (MaLee) โดยก่อนการทำการทดลองน้ำสับประคจะถูกนำไปตรวจวัดคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ความเข้มข้น ค่าพีเอช (pH) และค่าพารามิเตอร์ทางสี (Color parameters)

##### 3.1.2 อุปกรณ์

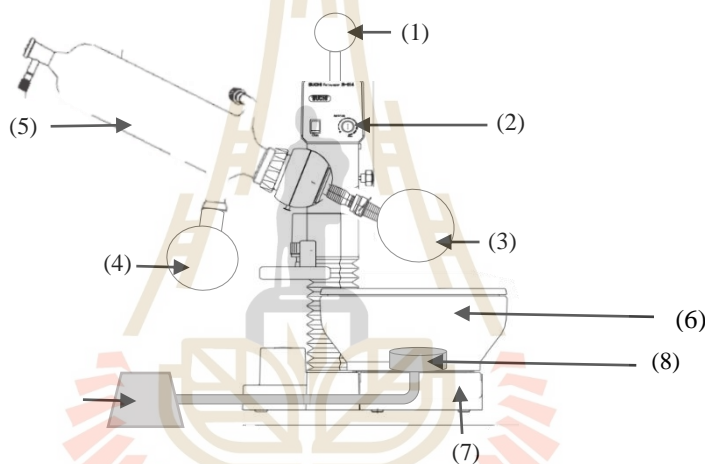
- (1) เครื่องทำระเหยแบบสุญญากาศ (BUCHI Rotavator R-124, Germany) ถูกใช้เป็นอุปกรณ์หลักในวิธีการระเหยทั้งหมดในการทำเข้มข้นน้ำสับประค
- (2) เครื่องสร้างละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก หรือ เครื่องสร้างหมอกด้วยคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ 1.7 MHz (แสดงในภาคผนวกรูปที่ 1) โดยเครื่องสร้างหมอกจะถูกติดตั้งในวิธีการระเหยแบบ UAV, UAVR และ UAVRI
- (3) เตาเซรามิกที่ภายในประกอบด้วยขดลวดอินฟราเรดซึ่งทำหน้าที่ในการให้ความร้อน (กำลังไฟ 800 วัตต์) ที่แสดงในภาคผนวกรูปที่ 2 โดยเตาเซรามิกจะถูกติดตั้งในวิธีการระเหย UAVRI
- (4) เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียน (PAT cooling, BUCHI, Thailand) ที่ต่อเข้ากับสายยางเพื่อหมุนเวียนน้ำในอ่างทำความร้อนให้อุณหภูมิคงที่
- (5) เครื่องวัดอุณหภูมิประกอบด้วย เทอร์โมคัปเปิล ชนิด เค (Thermocouple type K) และ เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Digital Temperature Controller) เพื่อวัดและแสดงค่าอุณหภูมิของน้ำให้อ่างควบคุมอุณหภูมิ (แสดงในภาคผนวกรูปที่ 3)

#### 3.2 การระเหย

การทดลองจะถูกแบ่งออก 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในการระเหยภายใต้สุญญากาศ เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของกระบวนการ ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเข้ามาช่วย ในระบบการระเหยแบบสุญญากาศ และส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศ

### 3.2.1 การทดลองที่ 1

น้ำสับปะรดปริมาณ 150 มิลลิลิตร จะถูกทำเข้มข้นให้มีความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 45 องศาบริกซ์ (°Brix) ด้วยวิธีการระเหย 4 วิธี ได้แก่ V, VR, UAV และ UAVR ซึ่งแผนภาพระบบการระเหยของวิธี UAVR ถูกแสดงในรูปที่ 2.1 และวิธีการระเหยทั้งหมดถูกแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1 การระเหยทั้ง 4 วิธีถูกดำเนินการภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดัน 70 มิลลิบาร์ โดยใช้อุณหภูมิการระเหยที่ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ระหว่างการทำเข้มข้น น้ำสับปะรดจะถูกนำมาออกตรวจวัดความเข้มข้นทุก ๆ 5 นาที จนกระทั่งได้ความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 45 องศาบริกซ์ (°Brix) จากนั้นนำน้ำที่ได้จากการระเหยไปชั่งน้ำหนักและน้ำสับปะรดเข้มข้นที่ได้ไปตรวจวัดสมบัติทางเคมีกายภาพ



**รูปที่ 3.1** แผนภาพระบบการระเหยด้วยวิธี UAVR โดย (1) มาตรวัดความดัน (2) ตัวควบคุมการหมุน (3) ขวดสำหรับระเหย (4) ขวดบรรจุสารหลังควบแน่น (5) เครื่องควบแน่น (6) อ่างทำความร้อน (7) ตัวควบคุมอุณหภูมิ (8) เครื่องสร้างละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (9) แหล่งจ่ายไฟ

### 3.2.2 การทดลองที่ 2

หลังจากการพิจารณาผลในการทดลองส่วนที่ 1 พบว่าวิธีการระเหยด้วยวิธี VR และ UAVR มีแนวโน้มที่ดีในด้านของการเพิ่มประสิทธิภาพในการระเหย แต่อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการระเหยภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิสูง (50-60 องศาเซลเซียส) ยังคงไม่มีผลในการรักษาคุณภาพสีของน้ำสับปะรดหลังทำเข้มข้นได้ ดังนั้นในการทดลองที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพของการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศจะถูกนำมา

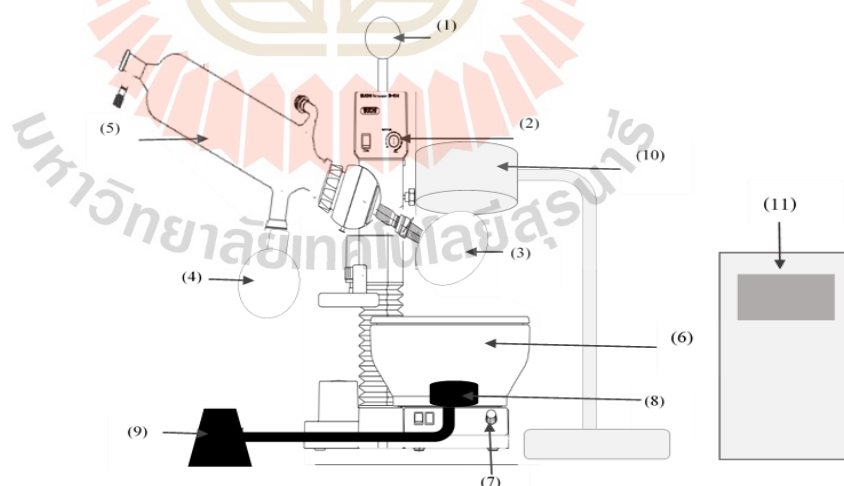
เปรียบเทียบกับ การทำเข้มข้นด้วยวิธีการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศ น้ำสับประรดปริมาณ 200 มิลลิลิตรจะถูกทำเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ที่แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.2 โดยการทำให้เข้มข้นด้วยวิธีทั้ง 3 วิธีจะถูกดำเนินการในสถานะที่แตกต่างไปจากการทดลองส่วนที่ 1 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้เข้มข้นจะถูกลดลงให้อยู่ในช่วง 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส รวมถึงความดันที่ใช้จะถูกลดลงอยู่ที่ 40 มิลลิบาร์ เพื่อให้สัมพันธ์กับอุณหภูมิการระเหยที่ลดลง น้ำสับประรดจะถูกระเหยจนมีความเข้มข้นเท่ากับ 60 องศาบริกซ์ (Brix) โดยในระหว่างการระเหยน้ำสับประรดจะถูกนำออกมาตรวจความเข้มข้นทุก ๆ 10 นาที จากนั้นนำน้ำที่ได้จากการระเหยไปชั่งน้ำหนักและน้ำสับประรดเข้มข้นที่ได้ไปตรวจวัดค่าพีเอชและค่าพารามิเตอร์ทางสี

**ตารางที่ 3.1** วิธีและสถานะการระเหยน้ำสับประรดที่ประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศ

วิธีการระเหย	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (มิลลิบาร์)	ความเร็วการหมุน (รอบ/ นาที)
การระเหยแบบสุญญากาศ (Vacuum evaporation, VE)	50	70	-
	55		
	60		
การระเหยภายใต้สุญญากาศร่วมกับการหมุน (Rotary vacuum evaporation, VR)	50	70	80
	55		
	60		
การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Ultrasonic atomization assisted vacuum evaporation, UAV)	50	70	-
	55		
	60		
การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยแบบสุญญากาศร่วมกับการหมุน (Ultrasonic atomization assisted rotary vacuum evaporation, UAVR)	50	70	80
	55		
	60		

**ตารางที่ 3.2** วิธีและสภาวะการระเหยน้ำสับปะรดที่ประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยในการระเหยภายใต้สุญญากาศ

วิธีการระเหย	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (มิลลิบาร์)	ความเร็วรอบการหมุน (รอบ/ นาที)
การระเหยแบบสุญญากาศร่วมกับการหมุน (Rotary vacuum evaporation, VR)	35		
	40	40	80
	45		
การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการระเหยแบบสุญญากาศร่วมกับการหมุน (Ultrasonic atomization assisted rotary vacuum evaporation, UAVR)	35		
	40	40	80
	45		
การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยในการระเหยแบบสุญญากาศที่มีการหมุน (Ultrasonic atomization and infrared assisted rotary vacuum evaporation, UAVR)	35		
	40	40	80
	45		



**รูปที่ 3.2** แผนภาพระบบการระเหยด้วยวิธี UAVRI โดย (1) มาตรวัดความดัน (2) ตัวควบคุมการหมุน (3) ขวดสำหรับระเหย (4) ขวดควบแน่น (5) เครื่องควบแน่น (6) อ่างทำความร้อน (7) ตัวควบคุมอุณหภูมิ (8) เครื่องสร้างละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (9) แหล่งจ่ายไฟ (10) เตาให้ความร้อนด้วยอินฟราเรด (11) เครื่องทำความเย็น

### 3.3 การตรวจวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าพีเอช

ความเข้มข้นของน้ำสับประดุกวัดเป็นปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid, TSS) ในหน่วยของซาบริกซ์ ( Brix ) ด้วยมาตรดัชนีหักเห (Refractometer, ATAGO, Tokyo, Japan) ในขณะที่ค่า pH ของน้ำสับประดู่ที่ตรวจวัดก่อนและหลังการทำเข้มข้นจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องวัดพีเอช (pH meter)

### 3.4 การตรวจวัดคุณภาพทางสี

การวัดค่าสีของน้ำสับประดุกวัดด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter, Hunter Lab, CQX32, USA) โดยใช้ระบบการวัดแบบ CIELAB ซึ่งจะแสดงค่าพารามิเตอร์ของสีออกมา 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่า  $L^*$  แทนค่าความสว่าง (Lightness) ค่า  $a^*$  แทนค่าความเป็นสีแดง (Redness) และค่า  $b^*$  แทนค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) เพื่อนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสีหลังการทำเข้มข้น การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของน้ำสับประดู่ในการทดลองครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 วิธี โดยวิธีแรกเป็นการวิเคราะห์หาความแตกต่างของสีทั้งหมด (Total color difference,  $\Delta E^*$ ) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) และค่าดัชนีสีน้ำตาล (Browning index, BI) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_i^* - L_c^*)^2 + (a_i^* - a_c^*)^2 + (b_i^* - b_c^*)^2} \quad (1)$$

โดย  $\Delta E^*$  คือ ค่าความแตกต่างของสี

$L_i^*$ ,  $a_i^*$  และ  $b_i^*$  แสดงค่าพารามิเตอร์ของสีเริ่มต้นของน้ำสับประดู่

$L_c^*$ ,  $a_c^*$  และ  $b_c^*$  แสดงค่าพารามิเตอร์ของสีของน้ำสับประดู่เข้มข้นสุดท้าย

$$BI = \left| \frac{100(x-0.31)}{0.17} \right| \quad (2)$$

โดย BI คือ ค่าดัชนีสีน้ำตาล

X คือ ค่าพิคตของสีโดยคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$X = \frac{(a^* + 1.75L^*)}{(5.645L^* + a^* - 3.012b^*)} \quad (3)$$



โดย  $L^*$  คือ ค่าความสว่าง  
 $a^*$  คือ ค่าความเป็นสีแดง  
 $b^*$  คือ ค่าความเป็นสีเหลือง

### 3.5 อัตราการระเหยและจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำ สับปะรด

อัตราการระเหยของน้ำสับปะรดถูกคำนวณตามสมการที่ (4) โดยคำนวณจากสัดส่วนระหว่างปริมาณน้ำที่ได้จากการระเหยกับระยะเวลาในการระเหย

$$\text{Evaporation rate} = \frac{\text{condensed water (g)}}{\text{evaporation time (minute)}} \quad (4)$$

จลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำสับปะรดถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีอันดับศูนย์ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีอันดับที่ 1 ที่คำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$C = C_0 - k_0 t \quad (5)$$

$$C = C_0 \exp(-k_1 t) \quad (6)$$

โดย  $C_0$  คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำสับปะรด  
 $C_t$  คือ ค่าความเข้มข้นของน้ำสับปะรดที่เวลาใด ๆ  
 $k_0$  และ  $k_1$  คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์และอันดับที่หนึ่งตามลำดับ  
 $t$  คือ ระยะเวลาการระเหยที่เพิ่มขึ้น (นาท)

### 3.6 การคำนวณพลังงานการกระตุ้น (Activation energy)

พลังงานการกระตุ้น (Activation energy,  $E_a$ ) คือพลังงานแรกเริ่มที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งในกรณีนี้ หมายถึงค่าพลังงานอย่างน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะกลายเป็นไอในระหว่างการทำเข้มข้นด้วยวิธีการระเหยที่แตกต่างกัน ซึ่งการมีค่าพลังงานการกระตุ้นน้อยจะทำให้การระเหยเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยค่าพลังงานการกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

โดย  $k$  คือ อัตราการระเหย

$k_0$  คือ ค่าคงที่สมการ

$E_a$  คือ พลังงานการกระตุ้น (กิโลจูลล์/โมลล์)

$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลล์/โมลล์·เคลวิน)

$T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

### 3.7 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 แบบ ได้แก่ Lewis, Henderson and Pabis, Page, Midilli, Logarithmic, Wang and Sing และ linear (สมการที่ (8)-(14)) ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมจากผลการทดลอง โดยคำนวณผ่านเวลา ( $t$ ) และ สัดส่วนความชื้น ณ เวลานั้น ๆ ( $MR_t$ ) ในการทำนายอัตราการระเหยของการทำเข้มข้นน้ำสับประรด ด้วยวิธีการระเหยทั้งหมดจากค่าอัตราความชื้น (Moisture ratio, MR) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (14) โดยการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในสมการถูกดำเนินการผ่าน โปรแกรมทางสถิติ (IBM SPSS Statistics version 24.0, IBM Corp. 2016) โดยใช้วิธีการคำนวณแบบการวิเคราะห์การถดถอยระหว่างตัวแปรที่ไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear regression technique)

ตารางที่ 3.3 สมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 แบบ

แบบจำลอง	สมการ	อ้างอิง	สมการที่
Lewis	$MR_t = \exp(-kt)$	Lewis (1921)	(8)
Henderson & Pabis	$MR_t = a \cdot \exp(-kt)$	Henderson and Pabis (1961)	(9)
Page	$MR_t = a \cdot \exp(-kt^n)$	Page (1949)	(10)
Midilli	$MR_t = a \cdot \exp(-kt^n) + b$	Midilli <i>et al</i> (2002)	(11)
Logarithmic	$MR_t = \exp(-kt) + b$	Sharma <i>et al</i> (2005)	(12)
Wang and Sing	$MR_t = at^2 + bt + 1$	Sharma <i>et al</i> (2005)	(13)
Linear model	$MR_t = kt + b$	Sabancı and Icier (2017)	(14)

หมายเหตุ:  $t$  คือ เวลาในการระเหย (นาที) และ  $k$ ,  $a$ ,  $n$  และ  $b$  คือ ค่าคงที่ของสมการ

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} \quad (15)$$

โดย MR คือ สัดส่วนความชื้น

$m_t$  คือ ความชื้นของน้ำสับปะรดที่เวลาใด ๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16)

$m_e$  คือ ความชื้นของน้ำสับปะรดที่ความเข้มข้นสุดท้าย

$m_0$  คือ ความชื้นของน้ำสับปะรดก่อนการทำเข้มข้น

$$m_t = \frac{(1 - (TSS_t / 100)) \times M_{a,t}}{(TSS_{ini} / 100) \times M_{a,ini}} \quad (16)$$

โดย  $TSS_{ini}$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำสับปะรด (%)

$TSS_t$  คือ ความเข้มข้นเริ่มของน้ำสับปะรดที่เวลาใด ๆ (%)

$M_{a,ini}$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของน้ำสับปะรด (กรัม)

$M_{a,t}$  คือ น้ำหนักของน้ำสับปะรดที่เวลาใด ๆ (กรัม)

ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของทั้ง 7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำมาวิเคราะห์ 3 สมการ ดังแสดงในสมการที่ (17) (18) และ (19) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ซึ่งบ่งบอกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราเลือกใช้มีความสมรูปกับข้อมูลมากเพียงใด ส่วนค่า Reduced Chi square ( $\chi^2$ ) และ รากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) จะแสดงค่าความผิดพลาด (Error) ของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น ๆ กับข้อมูลจริง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดจะถูกคัดเลือกจากการมีค่า  $R^2$  ที่สูงที่สุด ในขณะที่ค่า  $\chi^2$  และ RMSE ควรมีค่าที่ต่ำที่สุด โดยค่า RMSE จะถูกใช้เพื่อยืนยันความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่สามารถตัดสินใจได้เนื่องจากมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงค่า  $R^2$  สูงที่สุด และ  $\chi^2$  ต่ำที่สุดมากกว่า 1 แบบจำลอง

$$R^2 = \frac{1 - (\text{Residual MR})}{(\text{Corrected total MR})} \quad (17)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\text{MR}_{\text{exp}} - \text{MR}_{\text{pre}})^2}{N - n_p} \quad (18)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{exp}} - \text{MR}_{\text{pre}})^2}{N}} \quad (19)$$

โดย  $\text{MR}_{\text{exp}}$  คือ สัดส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง  
 $\text{MR}_{\text{pre}}$  คือ สัดส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์  
 $N$  คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ  
 $n$  คือ จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวางแผนการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้ใช้รูปแบบแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) ในแต่ละวิธีการระเหยที่อุณหภูมิต่าง ๆ และ การตรวจวัดคุณภาพต่าง ๆ จะถูกทดลองซ้ำ 3 ครั้ง การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติทั้งหมดถูกนำไปวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมทางสถิติ (IBM SPSS Statistics version 24.0, IBM Corp. 2016) และการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดลองด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

#### 4.1 ผลของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการระเหยภายใต้สูญญากาศ

4.1.1 ค่าพีเอช (pH) และ สีของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกลักษณะทางเคมีกายภาพของน้ำสับปะรด ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ค่าพารามิเตอร์ทางสี ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) และค่าความแตกต่างโดยรวมของสี (Total color different,  $\Delta E^*$ ) ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.1-4.3 ตามลำดับ โดยค่าพีเอชของน้ำสับปะรดหลังการทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ในตารางที่ 4.1 มีค่าแตกต่างจากน้ำสับปะรดที่ยังไม่ผ่านการทำเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ส่วนการใช้วิธีการทำเข้มข้นที่แตกต่างกันทั้ง 4 วิธี แสดงค่าพีเอชของน้ำสับปะรดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยอยู่ในช่วง  $3.63 \pm 0.12$  ถึง  $3.84 \pm 0.04$  นอกจากนี้การทำระเหยในอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียสส่งผลให้ค่า pH ของน้ำสับปะรดหลังทำเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าการระเหยในอุณหภูมิที่ 50 และ 55 องศาเซลเซียสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

การเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่าง (Lightness,  $L^*$ ) ของน้ำสับปะรดหลังทำเข้มข้น ในตารางที่ 4.2 พบว่าการทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ทำให้ค่า  $L^*$  มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำสับปะรดที่ไม่ผ่านกระบวนการทำเข้มข้น แต่อย่างไรก็ตาม ค่า  $L^*$  ของน้ำสับปะรดเข้มข้นที่ได้จากวิธี VE, VR, UAV และ UAVR มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ค่าความเป็นสีแดง (Redness,  $a^*$ ) และ ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness,  $b^*$ ) ของน้ำสับปะรดหลังทำเข้มข้น (ตารางที่ 4.2) มีค่าแตกต่างกันกับน้ำสับปะรดที่ยังไม่ผ่านการทำเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) น้ำสับปะรดที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธี VR จะมีค่า  $a^*$  มากกว่าการทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, UAV และ UAVR สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่า  $b^*$  ในน้ำสับปะรด พบว่า การทำเข้มข้นทำให้ ค่า  $b^*$  ของน้ำสับปะรดเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำสับปะรดที่ยังไม่ผ่านการทำเข้มข้น โดยค่า  $b^*$  ที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำเข้มข้นด้วยวิธี ทั้ง 4 วิธีมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ จากที่ได้กล่าวมานั้น การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์สีในน้ำสับปะรดถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างโดยรวมของสี (Total different color,  $\Delta E^*$ ) เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดค่าสีในน้ำผลไม้ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านกระบวนการแปรูปต่าง ๆ จากตารางที่ 4.3 ค่า  $\Delta E^*$  ของน้ำสับปะรดที่ผ่าน

การทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR มีค่าอยู่ในช่วง 51.93-53.38 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ ) เช่นเดียวกับค่าดัชนีสีน้ำตาล (Browning index, BI) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดการเกิดสีน้ำตาลขึ้นในน้ำผลไม้ผ่านกระบวนการทำเข้มข้น โดยค่า BI ของน้ำสับประรดก่อนการทำเข้มข้นและหลังทำเข้มข้นถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 การทำเข้มข้นน้ำสับประรดส่งผลทำให้ค่า BI แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p<0.05$ ) เมื่อเทียบกับน้ำสับประรดที่ยังไม่ได้ผ่านการทำเข้มข้น อย่างไรก็ตาม ค่า BI ของน้ำสับประรดที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยอยู่ในช่วง 112.44-114.23 สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่า  $\Delta E^*$  และ BI ในน้ำสับประรดหลังผ่านกระบวนการทำเข้มข้นเป็นผลมาจากการที่น้ำสับประรดมีสีน้ำตาลเกิดขึ้นทำให้สังเกตเห็นได้ว่าน้ำสับประรดหลังการทำเข้มข้นมีสีเข้มขึ้นจากเดิม โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในน้ำผลไม้สามารถเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณีคือ ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Enzymatic browning reaction) และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non-Enzymatic browning reaction) เนื่องจากเอนไซม์ที่มีผลทำให้เกิดสีน้ำตาลในน้ำผลไม้จะสลายตัวเมื่ออยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ดังนั้นสำหรับการเพิ่มขึ้นของค่า  $\Delta E^*$  และ BI ในน้ำสับประรดที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส จึงเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Rattanathanalerk et al., 2005) ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ ที่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลในน้ำสับประรดหลังการทำเข้มข้น (Hikal et al., 2017) โดยปฏิกิริยาเมลลาร์ดเกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) เช่น น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรักโทส กับกรดอะมิโน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde หรือ HMF และเมื่อเกิดการก่อตัวของสารประกอบ HMF ในปริมาณมากจะเกิดเป็นสารสีน้ำตาลเรียกว่า เมลานอยดิน (melanoidins) Garza et al, (1999) อธิบายว่า น้ำสับประรด ประกอบด้วย น้ำตาลซูโคส น้ำตาลกลูโคส และ น้ำตาลฟรักโทส อยู่เป็นจำนวนมากซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด ยิ่งไปกว่านั้น การเพิ่มอุณหภูมิในการระเหยจะมีผลทำให้ซูโครสภายในน้ำสับประรดจะถูกย่อยออกมาเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรักโทสได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเมลลาร์ด ทำให้เกิดสารสีน้ำตาลในปริมาณที่มากขึ้น



ตารางที่ 4.1 ค่า pH ของน้ำสับปรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR

วิธีการ	อุณหภูมิ (°C)	ค่าพีเอช (pH)		
		50	55	60
น้ำสับปรด**			3.84±0.04 <sup>C</sup>	
VE		3.70±0.04 <sup>Ab</sup>	3.74±0.02 <sup>Ab</sup>	3.63±0.12 <sup>Aa</sup>
VR		3.75±0.01 <sup>Bb</sup>	3.77±0.01 <sup>Bb</sup>	3.70±0.02 <sup>Ba</sup>
UAV		3.75±0.01 <sup>ABb</sup>	3.72±0.02 <sup>ABb</sup>	3.67±0.05 <sup>ABa</sup>
UAVR		3.74±0.02 <sup>Bb</sup>	3.75±0.01 <sup>Bb</sup>	3.72±0.03 <sup>Ba</sup>

หมายเหตุ: \*\*น้ำสับปรด หมายถึง น้ำสับปรดก่อนเข้ากระบวนการทำเข้มข้น

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ <sup>A-B</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของวิธีการทำเข้มข้น

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ <sup>a-d</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการระเหย

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ทางสีของน้ำสับปรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR

วิธีการ	อุณหภูมิ (°C)			ค่าพารามิเตอร์สี					
	L*			a*			b*		
	50	55	60	50	55	60	50	55	60
น้ำสับปรด**	90.17±0.16 <sup>B</sup>			-0.88±0.11 <sup>A</sup>			20.16±0.05 <sup>A</sup>		
VE	38.58±0.16 <sup>Aab</sup>	38.45±0.67 <sup>Ab</sup>	38.33±0.08 <sup>Aa</sup>	10.36±0.11 <sup>Bb</sup>	10.26±0.30 <sup>Bab</sup>	10.27±0.09 <sup>Aa</sup>	24.24±0.07 <sup>Bab</sup>	23.88±0.17 <sup>Bb</sup>	24.17±0.16 <sup>Ba</sup>
VR	38.87±0.09 <sup>Aab</sup>	38.44±0.23 <sup>Ab</sup>	38.32±0.04 <sup>Aa</sup>	11.02±0.21 <sup>Cb</sup>	11.15±0.32 <sup>Cab</sup>	10.31±0.03 <sup>Ca</sup>	24.28±0.07 <sup>Bab</sup>	24.39±0.09 <sup>Bb</sup>	24.08±0.17 <sup>Ba</sup>
UAV	38.60±0.13 <sup>Aab</sup>	39.30±0.87 <sup>Ab</sup>	38.15±0.08 <sup>Aa</sup>	10.44±0.12 <sup>Bb</sup>	10.00±0.58 <sup>Aab</sup>	10.40±0.08 <sup>Aa</sup>	23.98±0.13 <sup>Bab</sup>	25.64±1.50 <sup>Bb</sup>	23.99±0.18 <sup>Ba</sup>
UAVR	38.60±0.08 <sup>Aab</sup>	39.59±1.38 <sup>Ab</sup>	38.41±0.06 <sup>Aa</sup>	10.45±0.10 <sup>Bb</sup>	9.96±0.30 <sup>Aab</sup>	10.14±0.07 <sup>Aa</sup>	24.24±0.13 <sup>Bab</sup>	24.72±0.62 <sup>Bb</sup>	24.27±0.07 <sup>Ba</sup>

หมายเหตุ : \*\*น้ำสับปรด หมายถึง น้ำสับปรดก่อนเข้ากระบวนการทำเข้มข้น (วัดที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส))

ด้วยภาษาอังกฤษ<sup>A-B</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของวิธีการทำเข้มข้น

ด้วยภาษาอังกฤษ<sup>a-d</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการระเหย



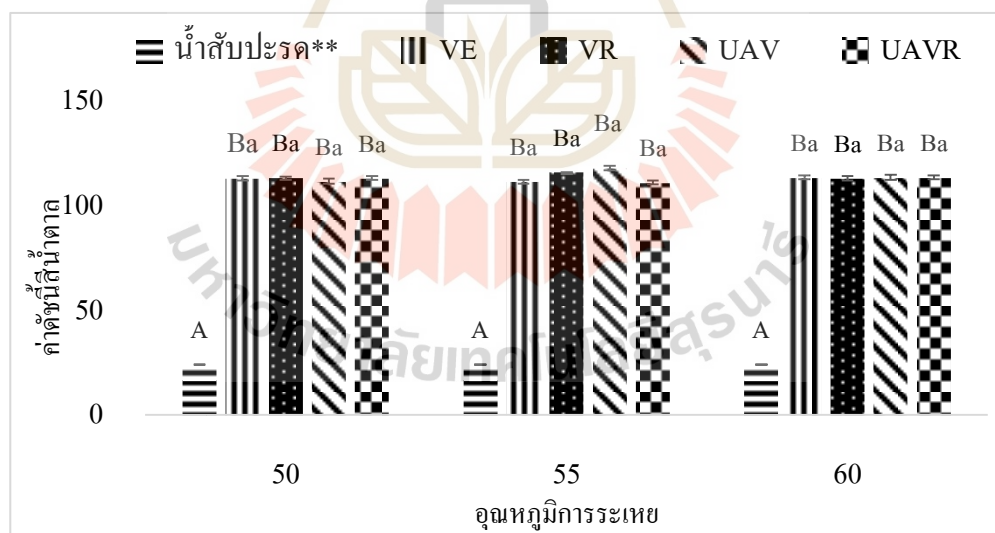
ตารางที่ 4.3 ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม ( $\Delta E^*$ ) ของน้ำสับปรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR

วิธีการ	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม ( $\Delta E^*$ )		
		50	55	60
VE		52.96 $\pm$ 0.16 <sup>Aab</sup>	53.04 $\pm$ 0.72 <sup>Aa</sup>	53.17 $\pm$ 0.08 <sup>Ab</sup>
VR		52.82 $\pm$ 0.05 <sup>Aab</sup>	53.28 $\pm$ 0.15 <sup>Aa</sup>	53.19 $\pm$ 0.05 <sup>Ab</sup>
UAV		52.94 $\pm$ 0.16 <sup>Aab</sup>	52.32 $\pm$ 1.11 <sup>Aa</sup>	53.38 $\pm$ 0.07 <sup>Ab</sup>
UAVR		52.96 $\pm$ 0.70 <sup>Aab</sup>	51.93 $\pm$ 1.35 <sup>Aa</sup>	53.14 $\pm$ 0.06 <sup>Ab</sup>

หมายเหตุ : \*\*น้ำสับปรด หมายถึงน้ำสับปรดก่อนเข้ากระบวนการทำเข้มข้น

ด้วยภาษาอังกฤษ<sup>A-B</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของวิธีการทำเข้มข้น

ด้วยภาษาอังกฤษ<sup>a-d</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการระเหย

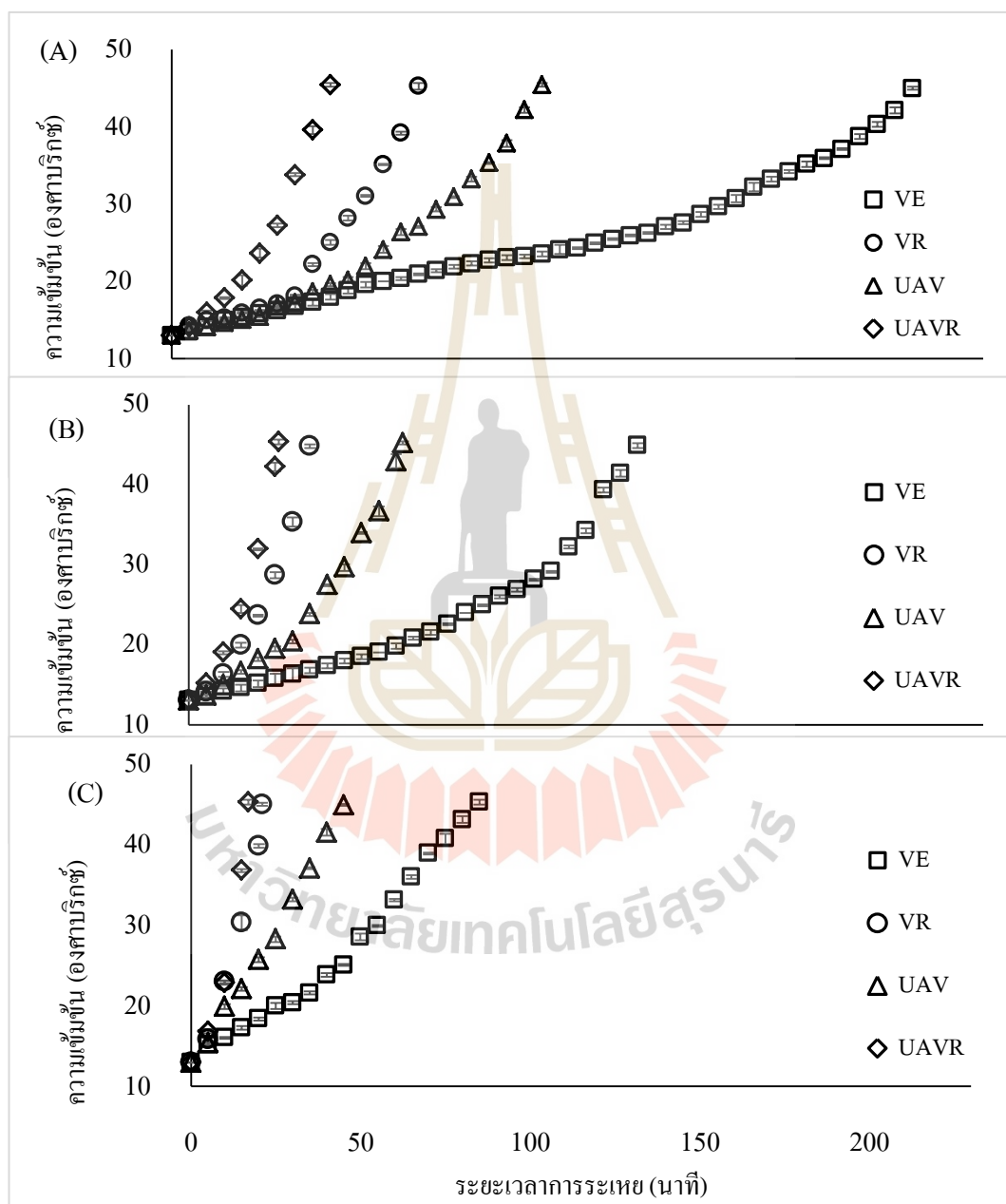


รูปที่ 4.1 ค่าดัชนีสีน้ำตาลของน้ำสับปรดและน้ำสับปรดที่ทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60  $^{\circ}\text{C}$

#### 4.1.2 ระยะเวลาการระเหยและอัตราการระเหยของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสับปะรดที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลาในการระเหยน้ำสับปะรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ภายใต้อุณหภูมิการระเหยที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ถูกแสดงไว้ในรูปภาพที่ 4.2 โดยช่วงระยะเวลาในการระเหยน้ำสับปะรดทั้งหมดอยู่ในช่วง 17-210 นาที การทำเข้มข้นน้ำสับปะรดจากความเข้มข้นเริ่มต้นให้มีความเข้มข้นสุดท้ายที่ 45° Brix ด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการทำระเหยอยู่ที่ 200, 70, 105 และ 45 นาที ตามลำดับ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำระเหยเป็น 55 และ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้ในการทำระเหยของทั้ง 4 วิธีอยู่ที่ 130, 35, 62 และ 26 นาที และ 85, 21, 45 และ 17 นาที ตามลำดับ การทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี UAVR สามารถลดระยะเวลาการระเหยลงได้เป็น 1.3, 2.4 และ 4.9 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการทำเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAV และ VE ตามลำดับ โดยสอดคล้องกับอัตราการระเหยน้ำสับปะรดที่แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งอัตราการระเหยที่ได้จากการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี ทั้ง 4 วิธีมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยอัตราการระเหยน้ำสับปะรดด้วยวิธี UAVR มีค่ามากกว่าวิธี VR, UAV และ VE ประมาณ 1.44, 2.96 และ 5.04 ตามลำดับ การประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการระเหยภายใต้สูญญากาศในวิธี UAV สามารถลดระยะเวลาในการระเหยลงเมื่อเทียบกับการระเหยน้ำสับปะรดด้วยวิธีการระเหยด้วยสูญญากาศแบบปกติ (Vacuum evaporation, VE) ซึ่งเป็นวิธีการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ทั่วไปในอุตสาหกรรม โดยน้ำภายในน้ำสับปะรดสามารถระเหยได้อย่างรวดเร็วในรูปแบบของละอองน้ำขนาดเล็ก (Fine-droplets) โดยละอองน้ำขนาดเล็กที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า 100 นาโนเมตร (Kudo et al., 2017) ซึ่งมีขนาดเล็กมากกว่าละอองน้ำที่เกิดจากการสเปรย์ถึง 5 เท่า ทำให้น้ำสามารถระเหยได้เร็วขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสความร้อนมากขึ้นและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในการระเหย ดังนั้นระยะเวลาในการระเหยจึงสั้นลง (Wang et al., 2018; Crafton and Black, 2013) ในขณะเดียวกันการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยการหมุน (Rotation) ร่วมกับการระเหยแบบสูญญากาศ (VR) เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถลดระยะเวลาในการระเหยทำให้อัตราการระเหยเพิ่มสูงขึ้นกว่าการใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการระเหยภายใต้สูญญากาศ (UAV) โดยการหมุนทำให้เกิดฟิล์มบาง ๆ รอบขวดระเหยที่สัมผัสกับความร้อนโดยตรงระหว่างการระเหยมีผลทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงการระเหยของน้ำจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Leonard and Ramey, 1964) การเพิ่มอุณหภูมิการระเหยเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้อัตราการระเหยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เนื่องจากระยะเวลาในการระเหยสั้นลง การทำเข้มข้นด้วยอุณหภูมิการระเหยที่สูงขึ้นทำให้พลังงานความร้อนภายในน้ำสับปะรดมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นโมเลกุลของน้ำภายในจึงสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นและ

ระเหยออกมามากกว่าได้อย่างรวดเร็ว (Goula et al., 2014) ดังนั้นการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี UAVR ที่ 60 องศาเซลเซียส จึงใช้ระยะเวลาในการระเหยสั้นที่สุดและมีค่าอัตราการระเหยสูงที่สุด เนื่องจากผลของการเพิ่มพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฟิล์มบางจากการหมุนและการเพิ่มพื้นที่ผิวของการเปลี่ยนสถานะของละอองขนาดเล็กที่สร้างจากคลื่นอัลตราโซนิค (Fazaeli et al., 2011)



**รูปภาพที่ 4.2** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสับปะรดที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลาการระเหยน้ำสับปะรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UVAR ที่ระดับอุณหภูมิการระเหยที่ (A) 50, (B) 55 และ (C) 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.4 อัตราการระเหยน้ำสับปะรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR

วิธีการ	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการระเหย (กรัมของน้ำ/นาที่)		
		50	55	60
VE		0.51±0.01 <sup>Aa</sup>	0.83±0.01 <sup>Ab</sup>	1.27±0.01 <sup>Ac</sup>
VR		1.44±0.02 <sup>Ca</sup>	3.03±0.02 <sup>Cb</sup>	5.19±0.10 <sup>Cc</sup>
UAV		1.01±0.01 <sup>Ba</sup>	1.73±0.01 <sup>Bb</sup>	2.39±0.03 <sup>Bc</sup>
UAVR		2.39±0.03 <sup>Da</sup>	4.29±0.04 <sup>Db</sup>	6.32±0.07 <sup>Dc</sup>

หมายเหตุ : ด้วยภาษาอังกฤษ<sup>A-B</sup> หมายถึง ความแตกต่างทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของวิธีการทำเข้มข้น  
 ด้วยภาษาอังกฤษ<sup>a-d</sup> หมายถึง ความแตกต่างทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการระเหย

#### 4.1.3 ปฏิริยาจลนพลศาสตร์ของการทำเข้มข้นด้วยการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำสับปะรดในระหว่างการระเหยถูกนำมาวิเคราะห์ผ่านปฏิริยาจลนพลศาสตร์ (Kinetic reaction) อันดับศูนย์และอันดับหนึ่ง โดยการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของน้ำสับปะรดที่ทำเข้มข้นด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR แสดงพฤติกรรมไปตามรูปแบบของปฏิริยาจลนพลศาสตร์อันดับที่หนึ่ง (First order kinetics reaction) โดยค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.964-0.994 ซึ่งมากกว่าค่า  $R^2$  ที่วิเคราะห์ได้จากปฏิริยาอันดับศูนย์ (ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.891-0.961 ดังที่แสดงในตารางที่ 4.5 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นในน้ำผลไม้แบบปฏิริยาจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งยังถูกนำไปอธิบายพฤติกรรมการระเหยในน้ำผลไม้ชนิดอื่น ๆ เช่น บลูเบอร์รี่ (Elik et al., 2016) มัลเบอร์รี่ และ บาร์เบอร์รี่ (Alizadeh et al., 2020) การประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก และการเพิ่มอุณหภูมิในการระเหยมีผลต่อค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิริยา ( $k_1$ ) ซึ่งการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศทำให้ค่า  $k_1$  มีค่าสูงขึ้น โดยวิธี UAV ค่า  $k_1$  สูงกว่าวิธี VE (ในกรณีที่ไม่มีการหมุน) และค่า  $k_1$  จากวิธี UAVR จะมีค่าสูงกว่าค่า  $k_1$  จากวิธี VR (ในกรณีที่มีการหมุน) นอกจากนี้ค่า  $k_1$  จะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการระเหยสูงขึ้น ดังนั้นการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี UAVR ภายใต้อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส จะแสดงค่า  $k_1$  สูงที่สุด และ ทำให้ความเข้มข้นของน้ำสับปะรดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบวิธีการและอุณหภูมิการระเหยอื่น ๆ การเพิ่มขึ้นของค่า  $k_1$  สัมพันธ์กับค่าอัตราการระเหย



และระยะเวลาในการระเหย โดยเมื่อค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูง ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เร็วทำให้อัตราการระเหยมีค่าสูงขึ้นและใช้ระยะเวลาในการระเหยสั้นลง

**ตารางที่ 4.5** ค่าพารามิเตอร์ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์และอันดับหนึ่งของการทำเข้มข้นน้ำสับประรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR

วิธีการ	อุณหภูมิ (°C)	$k_1$ (นาที <sup>-1</sup> )		$C_0$		$R^2$	
		ศูนย์	หนึ่ง	ศูนย์	หนึ่ง	ศูนย์	หนึ่ง
VE	50	0.13±0.01	0.005±0.00	11.681±0.56	13.664±0.14	0.950	0.989
	55	0.21±0.02	0.010±0.00	9.573±1.11	11.358±0.25	0.891	0.964
	60	0.38±0.02	0.018±0.00	10.834±0.83	13.653±0.15	0.970	0.994
VR	50	0.43±0.04	0.020±0.00	8.451±1.79	10.454±0.33	0.882	0.971
	55	0.88±0.10	0.039±0.01	9.057±2.09	11.252±0.25	0.928	0.993
	60	1.51±0.15	0.060±0.03	9.981±2.14	12.327±0.32	0.961	0.994
UAV	50	0.29±0.02	0.012±0.00	8.913±1.09	11.342±0.16	0.931	0.990
	55	0.51±0.04	0.022±0.00	8.997±1.42	11.586±0.20	0.939	0.992
	60	0.67±0.06	0.038±0.00	14.341±1.59	14.930±0.30	0.939	0.987
UAVR	50	0.72±0.07	0.031±0.00	8.951±1.80	11.470±0.22	0.934	0.993
	55	1.26±0.14	0.058±0.01	9.112±2.34	11.569±0.24	0.945	0.996
	60	1.86±0.32	0.083±0.01	9.448±3.63	11.062±0.53	0.918	0.986

#### 4.1.4 พลังงานการกระตุ้นของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ค่าพลังงานการกระตุ้น (Activation energy,  $E_a$ ) ที่ใช้ในการทำเข้มข้นน้ำสับประรดของแต่ละวิธีถูกรายงานไว้ในตารางที่ 4.6 โดยอยู่ในช่วง 88.188-114.584 kJ/mol·K สำหรับทุก ๆ การเกิดปฏิกิริยาใด ๆ ส่วนจำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งที่กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเริ่มแรกขึ้น พลังงานเหล่านั้นเรียกว่า ค่าพลังงานการกระตุ้น หรือ ค่า  $E_a$  ซึ่งในงานวิจัยนี้จะหมายถึง พลังงานเริ่มต้นที่ใช้ในการทำให้น้ำเกิดการระเหยในระหว่างการทำเข้มข้นน้ำสับประรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ตารางที่ 4.6 พบว่าการทำเข้มข้นน้ำสับประรดด้วยวิธี UAVR ใช้พลังงานในการกระตุ้นต่ำที่สุด โดยใช้พลังงานต่ำกว่าวิธี VE, UAV และ VR ประมาณ 1.30, 1.17 และ 1.16 เท่า ดังนั้นการระเหยของน้ำจะเกิดขึ้นเร็วขึ้นเมื่อทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVR เนื่องจากใช้ค่า  $E_a$  ต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ สำหรับการมีค่าพลังงานการกระตุ้นที่ต่ำของวิธี UAVR นั้นเป็นผลมาจากการเพิ่มพื้นที่สัมผัสในการแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปแบบแผ่นฟิล์มบาง ๆ จากการหมุนร่วมกับละอองขนาดเล็กจากกระบวนการทำให้เกิดละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ตารางที่ 4.6 ค่าพลังงานการกระตุ้นของวิธี VE, VR, UAV และ UAVR ในการทำเข้มข้นน้ำสับปะรด

วิธีการ	$k_0$	$E_a$ (kJ/mol)
VE	$2 \times 10^{16}$	114.584
VR	$2 \times 10^{14}$	98.346
UAV	$6 \times 10^{14}$	103.094
UAVR	$6 \times 10^{12}$	88.188

#### 4.1.5 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

สมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 สมการ ได้แก่ Lewis, Henderson and Pabis, Page, Midilli, Logarithmic, Wang and Sing, และ linear ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายระยะเวลาการระเหยน้ำสับปะรดในการทดลองโดยพิจารณาจากค่า  $R^2$  (มีค่าสูงสุด),  $\chi^2$  และ RMSE (มีค่าต่ำสุด) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.7 จากตารางผลข้อมูลสามารถพิจารณาได้ว่าสมการทางคณิตศาสตร์ของ Midilli เป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายระยะเวลาการระเหยของน้ำสับปะรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UAVR โดยแสดงค่า  $R^2$  ที่สูงที่สุด (0.982 ถึง 1.000) ในขณะที่ ค่า  $\chi^2$  (0.000 ถึง 0.002) และ RMSE (0.000 ถึง 0.042) มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสมการทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ กราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่าสัดส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองของ Midilli ( $MR_{pre}$ ) และค่าสัดส่วนความชื้น ที่ได้จากการทดลองจริง ( $MR_{exp}$ ) แสดงอยู่ในรูปที่ 4.3 นอกจากนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli ยังถูกนำไปใช้ในการทำนายอัตราการระเหยในน้ำผลไม้ชนิดอื่น ๆ เช่น น้ำเชอร์รี่ (Sabanci and Icier, 2017) น้ำองุ่น และน้ำทับทิม (Dinçer et al., 2019)

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ของสมการ  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 รูปแบบในการทำเข้มข้นน้ำสับปรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UVAR ที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส

แบบจำลอง	วิธีการ	อุณหภูมิ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์ทางสถิติ				$R^2$	$\chi^2$	RMSE
			k	n	a	b			
Lewis	VE	50	0.011	-	-	-	0.979	0.001	0.038
		55	0.013	-	-	-	0.941	0.005	0.069
		60	0.029	-	-	-	0.968	0.003	0.052
	VR	50	0.023	-	-	-	0.873	0.014	0.113
		55	0.053	-	-	-	0.925	0.010	0.095
		60	0.102	-	-	-	0.946	0.009	0.086
	UAV	50	0.017	-	-	-	0.927	0.007	0.085
		55	0.031	-	-	-	0.936	0.007	0.026
		60	0.063	-	-	-	0.988	0.001	0.034
	UAVR	50	0.043	-	-	-	0.934	0.008	0.086
		55	0.078	-	-	-	0.936	0.009	0.089
		60	0.115	-	-	-	0.930	0.012	0.098
Henderson and Pabis	VE	50	0.010	-	0.989	-	0.979	0.002	0.038
		55	0.014	-	1.067	-	0.949	0.004	0.064
		60	0.029	-	0.998	-	0.968	0.003	0.051
	VR	50	0.026	-	1.090	-	0.886	0.013	0.107
		55	0.056	-	1.096	-	0.939	0.010	0.085
		60	0.107	-	1.061	-	0.951	0.010	0.080
	UAV	50	0.019	-	1.106	-	0.943	0.006	0.074
		55	0.035	-	1.103	-	0.951	0.006	0.072
		60	0.064	-	1.024	-	0.989	0.001	0.034
	UAVR	50	0.047	-	1.089	-	0.946	0.002	0.077
		55	0.083	-	1.075	-	0.944	0.009	0.082
		60	0.119	-	1.048	-	0.993	0.016	0.097

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ของสมการ  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 รูปแบบในการทำ  
เข้มข้นน้ำสับปรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UVAR ที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

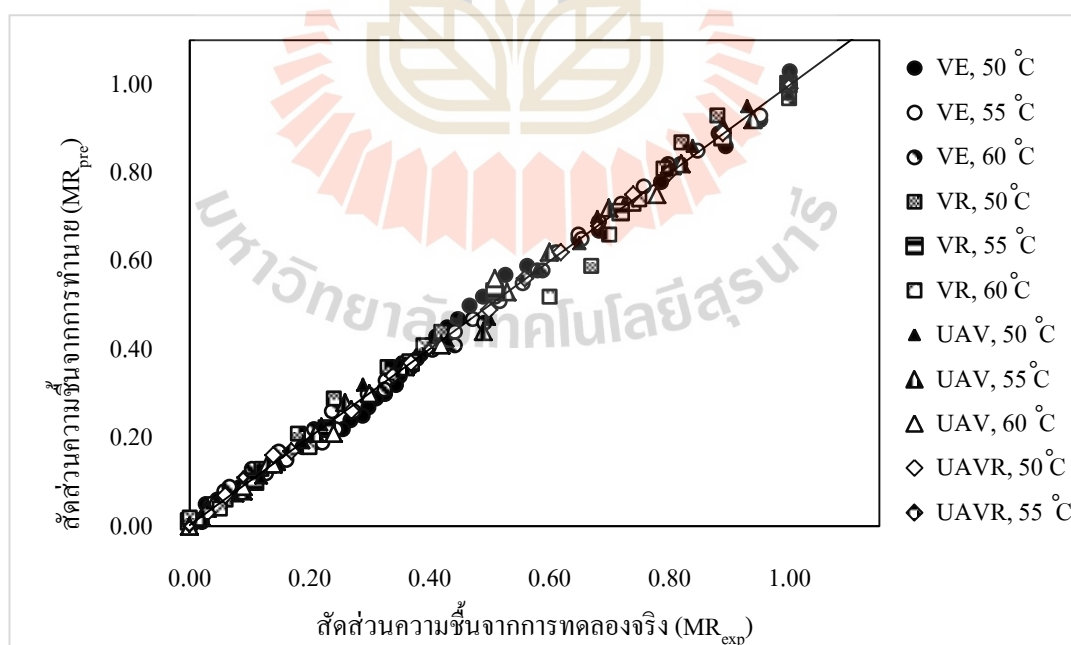
แบบจำลอง	วิธีการ	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่าสัมประสิทธิ์ทางสถิติ				$R^2$	$\chi^2$	RMSE
			k	n	a	b			
Page	VE	50	0.010	1.007	-	-	0.979	0.002	0.038
		55	0.002	1.398	-	-	0.975	0.002	0.045
		60	0.018	1.123	-	-	0.972	0.003	0.048
	VR	50	0.001	1.913	-	-	0.962	0.004	0.061
		55	0.006	1.737	-	-	0.994	0.001	0.026
		60	0.019	1.679	-	-	0.996	0.001	0.023
	UAV	50	0.001	1.628	-	-	0.989	0.001	0.032
		55	0.004	1.562	-	-	0.988	0.002	0.036
		60	0.043	1.125	-	-	0.992	0.001	0.027
	UAVR	50	0.006	1.618	-	-	0.990	0.001	0.033
		55	0.012	1.701	-	-	0.993	0.001	0.029
		60	0.019	1.762	-	-	0.985	0.004	0.026
Midilli	VE	50	0.036	0.632	1.026	0.002	0.993	0.001	0.022
		55	0.022	0.357	1.002	0.007	0.998	0.000	0.012
		60	0.062	0.594	0.995	0.005	0.996	0.000	0.018
	VR	50	0.024	0.634	0.967	0.020	0.982	0.002	0.042
		55	0.010	1.470	1.004	0.005	0.999	0.000	0.011
		60	0.026	1.491	1.003	0.003	0.998	0.001	0.015
	UAV	50	0.002	1.437	0.975	0.002	0.998	0.000	0.016
		55	0.010	1.175	1.008	0.004	0.997	0.000	0.018
		60	0.061	0.952	1.006	0.002	0.996	0.001	0.021
	UAVR	50	0.011	1.269	0.999	0.006	0.999	0.000	0.009
		55	0.021	1.359	1.000	0.007	1.000	0.000	0.000
		60	0.035	1.572	1.060	0.009	0.999	0.001	0.001

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ของสมการ  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 รูปแบบในการทำ  
เข้มข้นน้ำสับปรดด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UVAR ที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

แบบจำลอง	วิธีการ	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่าสัมประสิทธิ์ทางสถิติ				$R^2$	$\chi^2$	RMSE
			k	n	a	b			
Log	VE	50	0.007	-	1.154	-0.209	0.987	0.001	0.030
		55	$9.5 \times 10^{-5}$	-	76.33	77.289	0.997	0.000	0.016
		60	1.331	-	0.015	-0.394	0.992	0.001	0.025
	VR	50	$7.6 \times 10^{-5}$	-	190.67	189.65	0.979	0.003	0.046
		55	0.011	-	3.201	-2.171	0.996	0.001	0.023
		60	0.040	-	1.800	-0.781	0.993	0.002	0.029
	UAV	50	$6.0 \times 10^{-5}$	-	160.17	161.15	0.993	0.001	0.026
		55	0.010	-	2.224	-1.202	0.997	0.001	0.021
		60	0.050	-	1.107	-0.108	0.995	0.001	0.022
	UAVR	50	0.011	-	2.661	-1.664	0.998	0.000	0.016
		55	0.021	-	2.408	-1.393	0.998	0.001	0.017
		60	0.009	-	7.123	-6.125	0.999	0.000	0.009
Wang and Sing	VE	50	-	-	-0.008	$1.5 \times 10^{-5}$	0.969	0.020	0.046
		55	-	-	-0.096	$1.0 \times 10^{-5}$	0.996	0.002	0.019
		60	-	-	-0.021	$10.9 \times 10^{-5}$	0.982	0.003	0.040
	VR	50	-	-	-0.012	$3.3 \times 10^{-5}$	0.982	0.002	0.042
		55	-	-	-0.033	$10.5 \times 10^{-5}$	0.994	0.001	0.027
		60	-	-	-0.066	$89.0 \times 10^{-5}$	0.996	0.001	0.031
	UAV	50	-	-	-0.011	$1.3 \times 10^{-5}$	0.996	0.000	0.020
		55	-	-	-0.020	$6.8 \times 10^{-5}$	0.996	0.000	0.020
		60	-	-	-0.045	$53.2 \times 10^{-5}$	0.987	0.000	0.035
	UAVR	50	-	-	-0.028	$10.8 \times 10^{-5}$	0.998	0.000	0.016
		55	-	-	-0.048	$31.2 \times 10^{-5}$	0.998	0.000	0.016
		60	-	-	-0.044	$27.9 \times 10^{-5}$	0.999	0.000	0.009

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ของสมการ  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 รูปแบบในการทำ  
 เข้มข้นน้ำสับประคด้วยวิธี VE, VR, UAV และ UVAR ที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

แบบจำลอง	วิธีการ	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่าสัมประสิทธิ์ทางสถิติ				$R^2$	$\chi^2$	RMSE
			k	n	a	b			
Linear	VE	50	0.004	-	-	0.830	0.957	0.003	0.054
		55	0.007	-	-	0.957	0.997	0.000	0.016
		60	0.011	-	-	0.838	0.966	0.003	0.053
	VR	50	0.015	-	-	1.012	0.975	0.002	0.046
		55	0.030	-	-	0.837	0.992	0.001	0.030
		60	0.047	-	-	0.959	0.979	0.005	0.055
	UAV	50	0.010	-	-	0.983	0.993	0.001	0.026
		55	0.016	-	-	0.968	0.989	0.001	0.033
		60	0.021	-	-	0.821	0.912	0.011	0.093
	UAVR	50	0.023	-	-	0.977	0.993	0.001	0.028
		55	0.039	-	-	0.973	0.992	0.001	0.033
		60	0.059	-	-	0.989	0.999	0.000	0.009



รูปที่ 4.3 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่าสัดส่วนความเข้มข้น จากการทดลองจริง ( $MR_{exp}$ ) และค่าสัดส่วน  
 ความเข้มข้น ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Midilli ( $MR_{pre}$ ) ในการทำเข้มข้นน้ำสับประคด้วยวิธี  
 VE, VR, UAV และ UVAR ที่ระดับอุณหภูมิการระเหยที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส



## 4.2 ผลของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิคและการให้ความร้อนด้วยอินฟราเรดร่วมในการระเหยภายใต้สูญญากาศ

### 4.2.1 ค่าพีเอช (pH) และสีของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

การเปลี่ยนแปลงค่า pH และพารามิเตอร์ทางสีของน้ำสับประรดหลังการทำเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ภายใต้ความดัน 40 มิลลิบาร์และอุณหภูมิการระเหยที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส ถูกตรวจวัดและแสดงในตารางที่ 4.8 โดยค่า pH ของน้ำสับประรดหลังทำเข้มข้นมีค่าแตกต่างจากน้ำสับประรดก่อนการทำเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แต่เมื่อพิจารณาระหว่างค่า pH ของน้ำสับประรดที่ผ่านการเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ นอกจากนี้ การทำเข้มข้นน้ำสับประรดที่ 45 องศาเซลเซียสส่งผลให้ค่า pH ของน้ำสับประรดที่ค่าสูงกว่าการทำเข้มข้นที่ 35 และ 40 องศาเซลเซียส

ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ทางสี และ ค่าความแตกต่างโดยรวมของสี (Total color different,  $\Delta E^*$ ) ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และ 4.10 โดยค่าพารามิเตอร์ทางสี และ  $\Delta E^*$  ของน้ำสับประรดเข้มข้นมีค่าแตกต่างจากน้ำสับประรดที่ไม่ผ่านการทำเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยเป็นผลมาจากการใช้ความร้อนในการทำเข้มข้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 35-45 องศาเซลเซียสในวิธีการระเหยทั้ง 3 วิธี ไม่ได้มีผลแตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) จากตารางที่ 4.9 พบว่าความสว่าง (Lightness,  $L^*$ ) ของน้ำสับประรดเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยการทำเข้มข้นวิธี UAVRI ทำให้น้ำสับประรดเข้มข้นมีค่า  $L^*$  ของน้ำสูงกว่าการใช้วิธี UAVR และ VR ตามลำดับ สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีแดง (Redness,  $a^*$ ) ของน้ำสับประรดเข้มข้นพบว่า ค่า  $a^*$  น้ำสับประรดที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธีทั้ง 3 วิธีมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness,  $b^*$ ) ของน้ำสับประรดที่เพิ่มขึ้นหลังทำเข้มข้นด้วยวิธีทั้ง 3 วิธี พบว่า การทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVRI ทำให้น้ำ  $b^*$  แตกต่างจากวิธี UAVR และ VR อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยค่า  $b^*$  ของวิธี UAVRI ที่ได้มีค่าน้อยกว่าในวิธี UAVR และ VR การพิจารณาค่าความแตกต่างโดยรวมของสี ( $\Delta E^*$ ) ในน้ำสับประรดเข้มข้นถูกคำนวณค่าจากการเปลี่ยนแปลงของ  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ดังแสดงในตารางที่ 4.10 โดยค่า  $\Delta E^*$  ของน้ำสับประรดที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) การทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVRI แสดงค่า  $\Delta E^*$  น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธี UAVR และ VR ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีสีน้ำตาล (Browning index, BI) ที่แสดงในรูปที่ 4.4 ค่า BI ของน้ำสับประรดที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธีทั้ง 3 มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยค่า BI ของน้ำสับประรดที่ผ่าน

การทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVRI มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVR และ VR ตามลำดับ ดังนั้น จึงสามารถกล่าวได้ว่า การทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี UAVRI สามารถลดการเปลี่ยนแปลงทางสีและการเกิดสีน้ำตาลในน้ำสับปะรดเข้มข้นได้ดีกว่าวิธี UAVR และ VR ซึ่งเป็นผลมาจากการระเหยในลักษณะของละอองขนาดเล็กร่วมกับการให้ความร้อนในอุณหภูมิสูงของอินฟราเรดทำให้น้ำภายในละอองระเหยออกมาได้ดีกว่าการให้ความร้อนจากการระเหยแบบสูญญากาศปกติที่ความร้อนจะสัมผัสกับน้ำผลไม้เป็นเวลานานกว่า นอกจากนี้การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถลดการเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำผลไม้หลังให้ความร้อนได้ดีกว่าระบบการให้ความร้อนแบบทั่วไป เช่น ในน้ำมะนาว (Aghajanzadeh et al., 2016)

ตารางที่ 4.8 ค่า pH ของน้ำสับปะรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วย VR, UAVR และ UAVRI

วิธีการ	อุณหภูมิ (°C)	ค่าพีเอช (pH)		
		35	40	45
น้ำสับปะรด**			3.84±0.50 <sup>B</sup>	
VR		3.60±0.50 <sup>Ab</sup>	3.68±0.01 <sup>Ab</sup>	3.57±0.03 <sup>Aa</sup>
UAVR		3.61±0.05 <sup>Ab</sup>	3.68±0.06 <sup>Ab</sup>	3.60±0.03 <sup>Aa</sup>
UAVRI		3.61±0.06 <sup>Ab</sup>	3.61±0.29 <sup>Ab</sup>	3.61±0.04 <sup>Aa</sup>

หมายเหตุ : \*\*น้ำสับปะรด หมายถึง น้ำสับปะรดก่อนเข้ากระบวนการทำเข้มข้น

ด้วยภาษาอังกฤษ <sup>A-B</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของวิธีการทำเข้มข้น

ด้วยภาษาอังกฤษ <sup>a-d</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการระเหย

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ทางสีของน้ำสับปรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI

วิธีกร	อุณหภูมิ (C)			ค่าพารามิเตอร์สี					
	L*			a*			b*		
	35	40	45	35	40	45	35	40	45
น้ำสับปรด**		34.98±0.180 <sup>C</sup>			-3.57±0.030 <sup>A</sup>			11.69±0.065 <sup>A</sup>	
VR	30.23±0.89 <sup>Aa</sup>	29.75±0.17 <sup>Aa</sup>	29.85±0.47 <sup>Aa</sup>	3.67±0.31 <sup>Ba</sup>	3.36±0.06 <sup>Ba</sup>	3.17±0.13 <sup>Ca</sup>	27.78±0.11 <sup>Ca</sup>	27.48±0.41 <sup>Ca</sup>	27.60±0.30 <sup>Ca</sup>
UAVR	31.10±1.56 <sup>Ba</sup>	30.11±0.79 <sup>Ba</sup>	31.53±0.69 <sup>Ba</sup>	3.12±0.39 <sup>Ba</sup>	3.02±0.00 <sup>Ba</sup>	3.35±0.11 <sup>Ca</sup>	26.90±0.86 <sup>Ca</sup>	26.59±0.76 <sup>Ca</sup>	26.76±0.29 <sup>Ca</sup>
UAVRI	30.52±0.72 <sup>Ba</sup>	31.75±0.20 <sup>Ba</sup>	32.83±0.43 <sup>Ba</sup>	3.49±0.34 <sup>Ba</sup>	3.15±0.20 <sup>Ba</sup>	3.31±0.28 <sup>Ba</sup>	23.40±0.98 <sup>Ba</sup>	23.73±0.05 <sup>Ba</sup>	25.42±0.03 <sup>Ba</sup>

หมายเหตุ : \*\*น้ำสับปรด หมายถึง น้ำสับปรดก่อนเข้ากระบวนการทำเข้มข้น

ด้วยภาษาอังกฤษ<sup>A-B</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของวิธีการทำเข้มข้น

ด้วยภาษาอังกฤษ<sup>a-d</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการระเหย

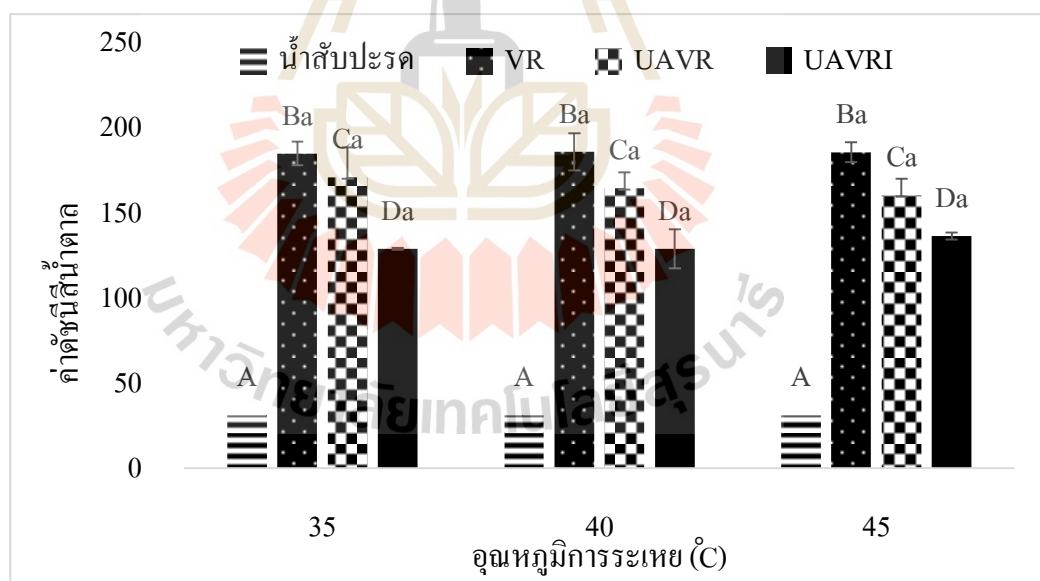
ตารางที่ 4.10 ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม ( $\Delta E^*$ ) ของน้ำสับปรดก่อนและหลังทำเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI

วิธีการ	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม ( $\Delta E^*$ )		
		35	40	45
VR		18.29 $\pm$ 0.30 <sup>Ca</sup>	18.02 $\pm$ 0.40 <sup>Ca</sup>	18.03 $\pm$ 0.26 <sup>Ca</sup>
UAVR		17.13 $\pm$ 0.35 <sup>Ba</sup>	17.01 $\pm$ 0.90 <sup>Ba</sup>	17.03 $\pm$ 0.42 <sup>Ba</sup>
UAVRI		14.13 $\pm$ 0.78 <sup>Aa</sup>	14.16 $\pm$ 0.10 <sup>Aa</sup>	15.51 $\pm$ 0.09 <sup>Aa</sup>

หมายเหตุ : \*\*น้ำสับปรด หมายถึง น้ำสับปรดก่อนเข้ากระบวนการทำเข้มข้น

ด้วยภาษาอังกฤษ <sup>A-B</sup> หมายถึง ความแตกต่างทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของวิธีการทำเข้มข้น

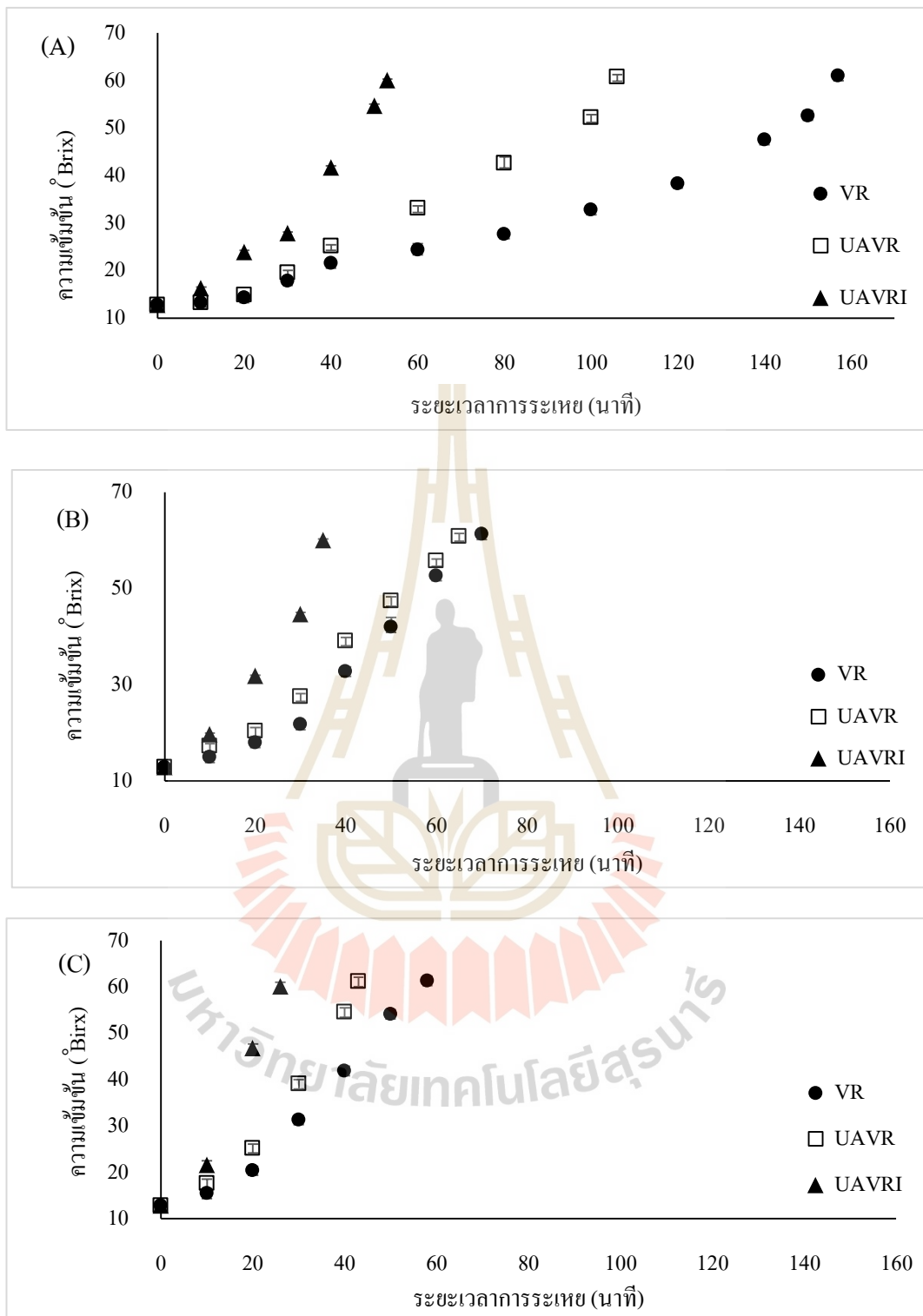
ด้วยภาษาอังกฤษ <sup>a-d</sup> หมายถึง ความแตกต่างทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการระเหย



รูปภาพที่ 4.4 ค่าดัชนีสีน้ำตาลของน้ำสับปรดที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ภายใต้ระดับอุณหภูมิการระเหยที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2 ระยะเวลาการระเหยและอัตราการระเหยของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำระเหยน้ำสับปะรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ภายใต้อุณหภูมิการระเหยที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส ถูกแสดงในรูปที่ 4.5 โดยระยะเวลาที่ใช้ในการระเหยน้ำสับปะรดจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 12.8 องศาบริกซ์ ไปจนถึงความเข้มข้นสุดท้าย 60 องศาบริกซ์ ด้วยวิธี UAVRI, UAVR และ VR ที่ 35 องศาเซลเซียส อยู่ที่ 53, 106 และ 157 นาที ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการระเหยระยะเวลาที่ใช้ในการระเหยของทั้ง 3 วิธีอยู่ที่ 35, 65 และ 70 นาทีที่อุณหภูมิการระเหยเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส และมีระยะเวลาที่สั้นลงอยู่ที่ 26, 57 และ 58 นาทีที่อุณหภูมิการระเหยเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส การใช้วิธี UAVRI ในการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดสามารถระยะเวลาในกระบวนการระเหยลงได้ประมาณ 2-3 เท่าของการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี UAVR และ VR ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการทำระเหยด้วยวิธี UAVRI จะสั้นที่สุดเมื่ออุณหภูมิกะเหยภายใต้อุณหภูมิการระเหยที่ 45 องศาเซลเซียส โดยเป็นผลมาจาก 2 สาเหตุหลักโดยประการแรกคือ การเพิ่มประสิทธิภาพการระเหยด้วยการทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดแทนการใช้ความร้อนจากอ่างทำความร้อน และประการที่สองคือการเพิ่มอุณหภูมิในการระเหยโดยการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี UAVRI ที่ 45 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการระเหยสั้นกว่าที่ 40 และ 35 องศาเซลเซียส ประมาณ 1-2 เท่า ตามลำดับ โดยมีผลในทิศทางเดียวกันเมื่อทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี UAVR และ VR ตามลำดับ อัตราการระเหยในการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.11 ผลของอัตราการระเหยที่สูงขึ้นสอดคล้องกับระยะเวลาการระเหยที่สั้นลงโดยอัตราการระเหยของการทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVRI ที่ 45 องศาเซลเซียส มีอัตราการระเหยสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกสภาวะการระเหย การใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการระเหยแบบหมุนภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Rotary vacuum evaporator) มีผลทำให้อัตราการระเหยน้ำสับปะรดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยคลื่นอัลตราโซนิคที่มีความถี่สูงที่ส่งผ่านไปยังน้ำสับปะรดจะกระตุ้นให้เกิดละอองขนาดเล็กเหนือพื้นผิวสัมผัสของน้ำสับปะรดในระหว่างกระบวนการระเหย ซึ่งละอองน้ำที่เกิดขึ้นมีพื้นที่ในการเปลี่ยนสถานะสูงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น น้ำภายในละอองจึงระเหยออกมาได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การให้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดที่อยู่ในอุณหภูมิสูงจะทำให้น้ำภายในละอองระเหยออกมาได้อย่างรวดเร็วยิ่งทำให้มีอัตราการระเหยสูงกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการระเหยแบบสุญญากาศทั่วไป Aboud et al. (2019) รายงานว่าการให้รังสีอินฟราเรดสามารถทำอุณหภูมิให้สูงได้ไวกว่าเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบธรรมดา



รูปภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสับปะรดที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลาการระเหยของวิธี VR, UVAR และ UAVRI ที่ระดับอุณหภูมิการระเหยที่ (A) 35, (B) 40 และ (C) 45 องศาเซลเซียส



#### 4.2.3 ปฏิริยาจลนพลศาสตร์การทำเข้มข้นด้วยการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำสับประรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ถูกรายงานออกมาในรูปแบบของการเกิดปฏิริยาอันดับที่หนึ่งดังตารางที่ 4.11 โดยค่า  $R^2$  มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง (0.979-0.997) ค่า  $k_1$  ที่ได้มีความสอดคล้องกับอัตราการระเหยน้ำสับประรดโดยค่า  $k_1$  จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการระเหยสูงขึ้น นอกจากนี้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดยังมีผลในการทำให้ค่า  $k_1$  มีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน การทำเข้มข้นน้ำสับประรดด้วยวิธี UAVRI ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แสดงค่า  $k_1$  สูงที่สุด โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มของของความเข้มข้นในน้ำผลไม้ในระหว่างการทำเข้มข้นมักเป็นไปตามการเกิดปฏิริยาจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง เช่น บลูเบอร์รี่ (Elik et al., 2016)

#### 4.2.4 พลังงานการกระตุ้นของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

ค่าพลังงานการกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยน้ำสับประรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.11 โดยค่าพลังงานการกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยที่อุณหภูมิ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วง 35.97-55.50 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งค่าพลังงานการกระตุ้นของวิธี UAVRI ในการระเหยมีค่าน้อยกว่าของวิธี UAVR และ VR การทำให้เป็นละอองด้วยอัลตราโซนิกในวิธี UAVR มีผลในการลดค่าพลังงานการกระตุ้นเมื่อเทียบกับการระเหยด้วยสุญญากาศแบบหมุน (VR) โดยเป็นผลมาจากการระเหยในรูปแบบละอองขนาดเล็ก ที่สร้างจากคลื่นอัลตราโซนิกซึ่งมีจะพื้นที่สัมผัสกับความร้อน และพื้นที่ในการเปลี่ยนสถานะมากขึ้น ทำให้พลังงานการกระตุ้นที่ต้องใช้ในการระเหยมีค่าน้อยลง ค่าพลังงานการกระตุ้นจะลดลงมากขึ้น เมื่อประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดในการระเหยภายใต้สุญญากาศแบบหมุน (UAVRI) ในการทำเข้มข้นน้ำสับประรด โดยค่าพลังงานการกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยที่ใช้วิธี UAVRI มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับวิธี UAVR และ VR ถึง 1.39 และ 1.54 เท่าตามลำดับ เช่นเดียวกับการประยุกต์ใช้การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด ในกระบวนการทำแห้งผลทับทิมซึ่งสามารถลดค่าพลังงานการกระตุ้นในการทำแห้งลงได้ถึง 1.37 เท่าเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบลมร้อนปกติ (Minaei et al., 2011)



ตารางที่ 4.11 อัตราการระเหย ค่าพารามิเตอร์ของการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง และค่าพลังงานกระตุ้นในการทำเข้มข้นน้ำสับประรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI

วิธีการ	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการระเหย (g/min)	$k_1$ (min <sup>-1</sup> )	$C_0$	$R^2$	$k_0$	$E_a$ (kJ/mol)
VR	35	0.81±0.01 <sup>Cc</sup>	0.01±0.00	12.86±0.00	0.988		
	40	1.81±0.03 <sup>Cb</sup>	0.02±0.00	12.14±0.00	0.985	4×10 <sup>7</sup>	55.50
	45	2.21±0.03 <sup>Ca</sup>	0.03±0.00	13.21±0.00	0.979		
UAVR	35	1.20±0.01 <sup>Bc</sup>	0.01±0.00	13.00±0.00	0.988		
	40	1.95±0.03 <sup>Bb</sup>	0.02±0.00	14.24±0.00	9.985	6×10 <sup>6</sup>	49.94
	45	2.90±0.05 <sup>Ba</sup>	0.04±0.00	12.39±0.00	0.997		
UAVRI	35	2.36±0.04 <sup>Ac</sup>	0.03±0.00	12.37±0.00	0.995		
	40	3.50±0.01 <sup>Ab</sup>	0.04±0.00	12.76±0.00	0.993	5×10 <sup>4</sup>	35.97
	45	4.82±0.02 <sup>Aa</sup>	0.06±0.00	13.09±0.00	0.985		

หมายเหตุ : ด้วยภาษาอังกฤษ <sup>A-B</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของวิธีการทำเข้มข้น  
 ด้วยภาษาอังกฤษ <sup>a-d</sup> หมายถึง ความแตกต่างกันทางสถิติที่มาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการระเหย

#### 4.2.5 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

การวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ของการทำเข้มข้นน้ำสับประรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ที่อุณหภูมิ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.12 โดยค่าสัมประสิทธิ์ทางสถิติในสมการ  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE ถูกวิเคราะห์ผ่านสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 สมการ ได้แก่ Lewis, Henderson and Pabis, Page, Midilli, Logarithmic, Wang and Sing, และ linear เพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการเป็นแบบจำลองการระเหยน้ำสับประรดด้วยวิธีทั้งหมดในการทดลองส่วนนี้โดยพิจารณาจากค่า  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE พบว่า Midilli เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาอธิบายอัตราการระเหยน้ำสับประรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UAVRI ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการทดลองในส่วนที่ 1 โดยแสดงค่า  $R^2$  ที่สูงที่สุด (0.982 ถึง 1.000) และ ค่า  $\chi^2$  (0.000 ถึง 0.003) กับ RMSE (0.000 ถึง 0.013) ที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสมการทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ กราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่าสัดส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนาย

ด้วยแบบจำลองของ Midilli ( $MR_{per}$ ) และ ค่าสัดส่วนความชื้น ที่ได้จากการทดลองจริง ( $MR_{exp}$ ) ถูกแสดงในรูปแบบที่ 4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli ยังถูกระบุให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดในการกระบวนการให้ความร้อนในผักและน้ำผลไม้ประเภทอื่น ๆ เนื่องจากมีค่า  $R^2$  สูงที่สุด  $\chi^2$  และ RMSE ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสมการอื่น ๆ เช่น การทำเข้มข้นในน้ำแอปเปิลและเชอร์รี่ (Dince, 2021) และ การทำแห้งในน้ำมะเขือเทศ (Sadin et al., 2014) แครอท (Togrul, 20006; Bengang et al., 2014) กีวี (Doymaz, 2018)

**ตารางที่ 4.12** ค่าคงที่ของสมการ  $R^2$   $\chi^2$  และ RMSE ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 รูปแบบในการทำเข้มข้นน้ำสับประรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UVARI ที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส

แบบจำลอง	วิธีการ	อุณหภูมิ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์ทางสถิติ				$R^2$	$\chi^2$	RMSE	
			k	n	a	b				
Lewis	VR	35	0.015	-	-	-	0.963	0.005	0.020	
		40	0.032	-	-	-	0.932	0.010	0.033	
		45	0.041	-	-	-	0.947	0.009	0.032	
	UAVR	35	0.021	-	-	-	0.930	0.011	0.010	
		40	0.041	-	-	-	0.973	0.003	0.020	
		45	0.055	-	-	-	0.965	0.006	0.029	
	Henderson and Pabis	UAVRI	35	0.045	-	-	-	0.965	0.005	0.025
			40	0.070	-	-	-	0.980	0.004	0.024
			45	0.095	-	-	-	0.963	0.009	0.040
VR		35	0.017	-	1.099	-	0.976	0.003	0.016	
		40	0.034	-	1.101	-	0.946	0.010	0.030	
		45	0.044	-	1.090	-	0.958	0.009	0.028	
UAVR	35	0.025	-	1.142	-	0.956	0.008	0.006		
	40	0.042	-	1.051	-	0.976	0.004	0.020		
	45	0.058	-	1.060	-	0.970	0.006	0.026		
UAVRI	35	0.047	-	1.064	-	0.971	0.005	0.023		
	40	0.073	-	1.041	-	0.983	0.004	0.021		
	45	0.097	-	1.041	-	0.966	0.010	0.037		

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่ของสมการ  $R^2$   $\chi^2$  และ RMSE ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 รูปแบบในการทำเข้มข้นน้ำสับปรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UVARI ที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส (ต่อ)

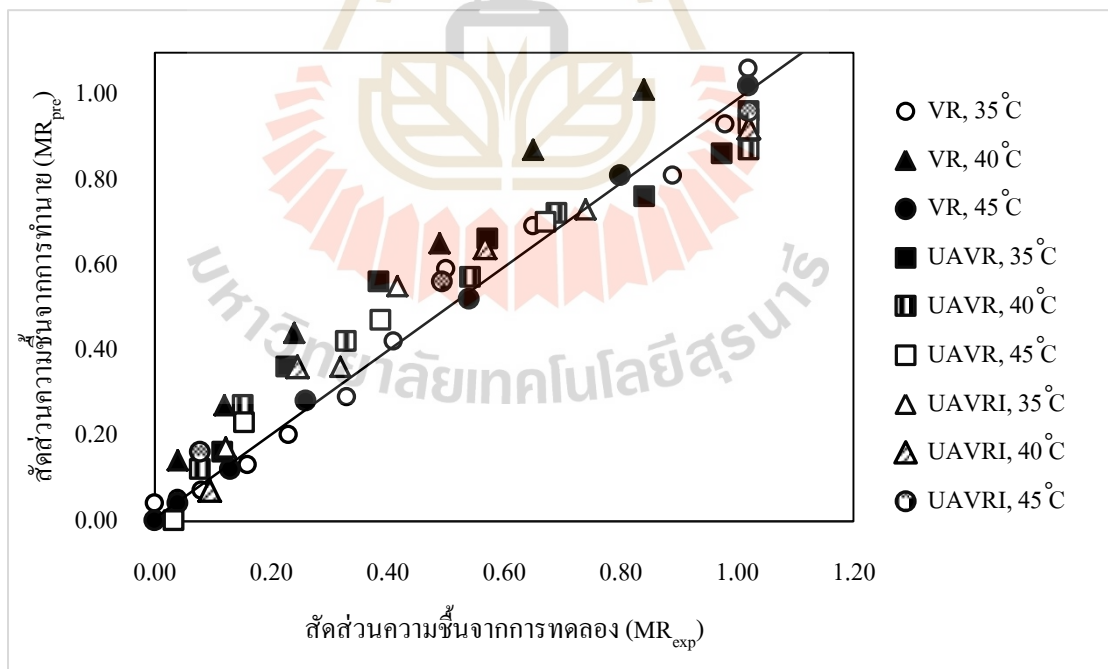
แบบจำลอง	วิธีการ	อุณหภูมิ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์ทางสถิติ				$R^2$	$\chi^2$	RMSE	
			k	n	a	b				
Page	VR	35	0.005	1.266	-	-	0.979	0.003	0.015	
		40	0.002	1.749	-	-	0.993	0.001	0.011	
		45	0.004	1.700	-	-	0.998	0.000	0.006	
	UAVR	35	0.002	1.695	-	-	0.988	0.002	0.002	
		40	0.013	1.332	-	-	0.989	0.002	0.012	
		45	0.011	1.523	-	-	0.995	0.001	0.011	
	UAVRI	35	0.012	1.408	-	-	0.989	0.002	0.013	
		40	0.022	1.395	-	-	0.996	0.001	0.010	
		45	0.009	1.902	-	-	0.999	0.000	0.006	
	Midilli	VR	35	0.010	1.088	1.124	-0.066	0.982	0.003	0.013
			40	0.004	1.524	1.101	-0.094	0.996	0.001	0.009
			45	0.006	1.563	1.051	-0.034	0.999	0.000	0.005
UAVR		35	0.002	1.693	1.013	0.031	0.992	0.002	0.001	
		40	0.025	1.046	1.193	-1.179	0.994	0.001	0.010	
		45	0.022	1.197	1.191	-1.171	1.000	0.000	0.002	
UAVRI		35	0.023	1.077	1.256	-0.023	0.994	0.002	0.010	
		40	0.040	1.084	1.186	-0.166	0.999	0.001	0.005	
		45	0.015	1.705	1.053	-0.033	1.000	0.000	0.000	

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่ของสมการ  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 รูปแบบในการทำเข้มข้นน้ำสับปรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UVARI ที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส (ต่อ)

แบบจำลอง	วิธีการ	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่าสัมประสิทธิ์ทางสถิติ				$R^2$	$\chi^2$	RMSE
			k	n	a	b			
Log	VR	35	0.016	-	-	0.030	0.956	0.005	0.019
		40	0.031	-	-	-0.001	0.932	0.012	0.033
		45	0.040	-	-	-0.007	0.947	0.010	0.032
	UAVR	35	0.023	-	-	0.033	0.932	0.012	0.010
		40	0.038	-	-	-0.026	0.974	0.004	0.020
		45	0.052	-	-	-0.020	0.965	0.004	0.029
	UAVRI	35	0.043	-	-	-0.015	0.965	0.006	0.025
		40	0.067	-	-	-0.014	0.981	0.004	0.022
		45	0.089	-	-	-0.022	0.964	0.013	0.039
Wand and Sing	VR	35	0.010	-	3.184	0.011	0.976	0.004	0.016
		40	0.010	-	9.223	-0.021	0.988	0.002	0.015
		45	0.010	-	0.000	-0.029	0.989	0.002	0.015
	UAVR	35	-	-	5.939	-0.016	0.967	0.012	0.005
		40	-	-	0.000	-0.029	0.995	0.004	0.010
		45	-	-	0.000	-0.037	0.999	0.043	0.006
	UAVRI	35	-	-	0.000	-0.031	0.993	0.001	0.012
		40	-	-	0.001	-0.049	0.998	0.001	0.008
		45	-	-	0.001	-0.062	0.996	0.001	0.013

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่ของสมการ  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 รูปแบบในการทำเข้มข้นน้ำสับประรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UVARI ที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส (ต่อ)

แบบจำลอง	วิธีการ	อุณหภูมิ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์การวิเคราะห์ทางสถิติ				$R^2$	$\chi^2$	RMSE
			k	n	a	b			
Linear	VR	35	-0.006	-	-	0.913	0.928	0.011	0.027
		40	-0.015	-	-	0.966	0.967	0.006	0.023
		45	-0.018	-	-	0.942	0.950	0.009	0.031
	UAVR	35	-0.010	-	-	0.957	0.924	0.012	0.011
		40	-0.015	-	-	0.873	0.934	0.009	0.032
		45	-0.023	-	-	0.934	0.967	0.006	0.028
	UAVRI	35	-0.019	-	-	0.019	0.957	0.006	0.028
		40	-0.028	-	-	0.923	0.953	0.008	0.036
		45	-0.040	-	-	0.962	0.968	0.007	0.035



รูปที่ 4.6 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่าสัดส่วนความชื้นจากการทดลองจริง ( $MR_{exp}$ ) และ ค่าสัดส่วนความชื้น ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Midilli ( $MR_{pre}$ ) ในการทำเข้มข้นน้ำสับประรดด้วยวิธี VR, UAVR และ UVARI ที่ระดับอุณหภูมิการระเหยที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส

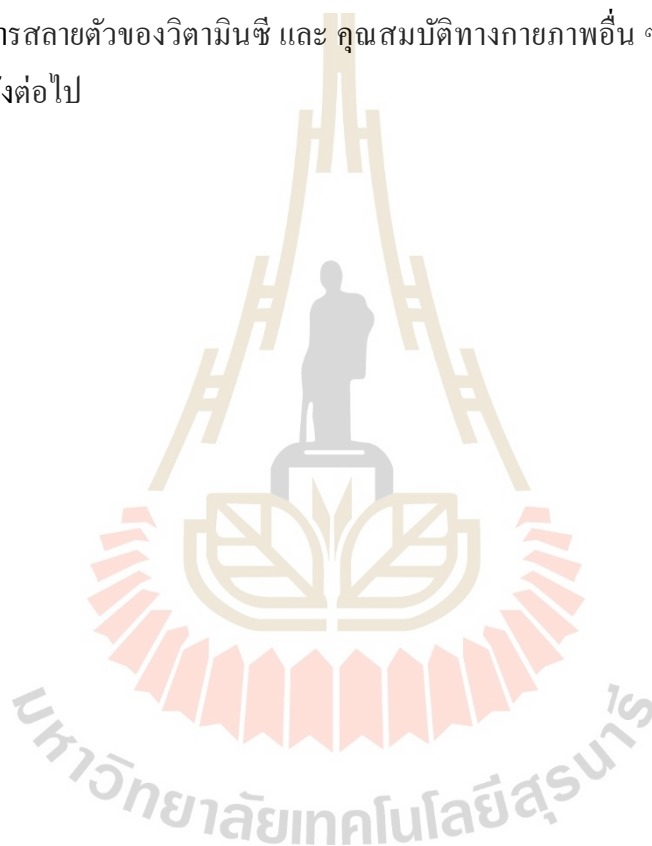
## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศในการทำเข้มข้นน้ำ สับปะรดที่สภาวะความดัน 70 มิลลิบาร์ (ในการทดลองส่วนแรก) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ ค่าพีเอช (pH) ลดลงหลังการทำเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงค่าดี ( $\Delta E^*$  และ BI) ของน้ำสับปะรด เมื่อเทียบกับการระเหยภายใต้สูญญากาศทั้งในสภาวะที่มีการหมุนและปราศจากการหมุน โดยค่าพีเอช ค่า  $\Delta E^*$  และ BI ของน้ำสับปะรดที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVR มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเทียบกับวิธี VR, UAV และ VE อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิในการระเหยมีผลทำให้ค่าพีเอช และ ค่า  $\Delta E^*$  เปลี่ยนแปลงไป โดยการทำเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสทำให้น้ำสับปะรดมีค่าพีเอชต่ำกว่า และค่า  $\Delta E^*$  มีค่าสูงกว่า เมื่อเทียบกับการทำเข้มข้นที่อุณหภูมิ 50-55 องศาเซลเซียส การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศที่มีการหมุน หรือวิธี UAVR มีประสิทธิภาพในการระเหยสูง โดยแสดงค่าระยะเวลาที่สั้นในการระเหย อัตราการระเหยสูง และใช้ค่าพลังงานการกระตุ้นน้อยกว่าวิธี VR, UAV และ VE ตามลำดับ สำหรับการทดลองส่วนที่สอง การประยุกต์ใช้การทำเป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศในการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดที่สภาวะความดัน 40 มิลลิบาร์ และ อุณหภูมิที่ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทั้งในการรักษาคุณภาพสีของน้ำสับปะรดหลังทำเข้มข้นและประสิทธิภาพในการระเหยได้ การทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี UAVRI สามารถลดการเกิดสีน้ำตาลในน้ำสับปะรดเข้มข้นลงได้ โดยค่า  $\Delta E^*$  และ BI ของน้ำสับปะรดที่ผ่านการทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVRI มีค่าน้อยกว่าวิธี UAVR และ VR ประมาณ 2 เท่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากการใช้ระยะเวลาการระเหยที่รวดเร็ว ซึ่งจากการทดลองพบว่า การทำเข้มข้นด้วยวิธี UAVRI ใช้ระยะเวลาการระเหยที่สั้น อัตราการระเหยสูง และใช้ค่าพลังงานการกระตุ้นต่ำกว่าวิธี UAVR และ VR ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดด้วยวิธี UAVR (ส่วนที่ 1) และ วิธี UAVRI (ส่วนที่ 2) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli มีความเหมาะสมที่สุดในการทดลองทั้งสองส่วน เพื่อนำไปทำนายระยะเวลาในการระเหยน้ำสับปะรดที่ระดับความเข้มข้นใด ๆ

## ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้เป็นเพียงการศึกษาประสิทธิภาพเบื้องต้นของการประยุกต์ใช้การทำให้เป็นละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด เข้ามาช่วยในการระเหยภายใต้สูญญากาศ (UAVRI) ในการทำเข้มข้นน้ำสับปะรด ซึ่งผลในแง่ของการรักษาคุณภาพของน้ำสับปะรดนั้นจะบ่งบอกถึงการลดปริมาณสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นในการทำเข้มข้นเท่านั้น ดังนั้นการศึกษาผลของระบบ UAVR ในการทำเข้มข้นน้ำสับปะรดที่มีต่อคุณภาพในด้านอื่น ๆ เช่น ผลกระทบในการสลายตัวของวิตามินซี และ คุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษาในครั้งต่อไป





## รายการอ้างอิง

- About, S. A., Altemimi, A. B., R. S. Al-Hilphy, A., Yi-Chen, L., and Cacciola, F. (2019). A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing. **Molecules**. 24(22): 1-20.
- Aghajanzadeh, S., Kashaninejad, M., and Ziaifar, A. M. (2016). Effect of infrared heating on degradation kinetics of key lime juice physicochemical properties. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. 38: 139-148.
- Aguiar, I. B., Miranda, N. G. M., Gomes, F. S., Santos, M. C. S., Freitas, D. de G. C., Tonon, R. V., and Cabral, L. M. C. (2012). Physicochemical and sensory properties of apple juice concentrated by reverse osmosis and osmotic evaporation. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. 16: 137-142.
- Ali, D. Y., Yuwono, S. S., Istianah, N., and Putri, M. W. (2019). Optimization of sodium metabisulphite addition and vacuum evaporation temperature on production of sweet sorghum juice (*Sorghum bicolor* L. Moench) concentrate using response surface methodology. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**. 230.
- Alizadeh, H.-R., Mortezaipoor, H., Akhavan, H.-R., and Balvardi, M. (2020). Physicochemical changes of barberry juice concentrated by liquid desiccant-assisted solar system and conventional methods during the evaporation process. **Journal of Food Science and Technology**.
- Álvarez, S., Riera, F., Álvarez, R., Coca, J., Cuperus, F., Th Bouwer, S., and Panyor, L. (2000). A new integrated membrane process for producing clarified apple juice and apple juice aroma concentrate. **Journal of Food Engineering**. 46(2): 109-125.
- Antonio-Gutiérrez, O., López-Malo, A., Ramírez-Corona, N., and Palou, E. (2017). Enhancement of UVC-light treatment of tangerine and grapefruit juices through ultrasonic atomization. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. 39: 7-12.
- Assawarachan, R., and Noomhorm, A. (2009). Mathematical models for vacuum-microwave concentration behavior of pineapple juice. **Journal of Food Process Engineering**. 34(5): 1485-1505.

- Assawarachan, R., and Noomhorm, A. (2011). Influence of temperature and TSS on performance of evaporation and rheological properties of pineapple concentration by microwave vacuum. **Journal of Food Process Engineering**. 35(3): 455-470.
- Assawarachan, R., and Noomhorm, A. (2010). Changes in color and rheological behavior of pineapple concentrate through various evaporation methods. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**. 3(1): 74-84.
- Babu, B. R., Rastogi, N. K., and Raghavarao, K. S. M. S. (2006). Effect of process parameters on transmembrane flux during direct osmosis. **Journal of Membrane Science**. 280(1-2): 185-194.
- Bando, Y., Yamaguchi, S., Doi, K., Nakamura, M., Yasuda, K., Oda, A., and Kawase, Y. (2004). The effect of operational condition on the contribution of evaporation in ultrasonic atomization. **Journal of Chemical Engineering**. 37(10): 1286-1289.
- Bingol, G., Pan, Z., Roberts, J.S., Devres, Y.O., and Balaban, M.O. (2008). Mathematical modeling of microwave-assisted convective heating and drying of grapes. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**. 1(2): 46-54
- Boguslavskii, Y.Y. and Eknadiosyants, O. K. (1969). Physical mechanism of the acoustic atomization of a liquid. **Soviet Physics Acoustics**. 15: 14-21.
- Boranbayeva, T., Karadeniz, F., and Yilmaz, E. (2014). Effect of Storage on Anthocyanin Degradation in Black Mulberry Juice and Concentrates. **Food and Bioprocess Technology**. 7(7): 1894-1902.
- Bozkir, H., and Baysal, T. (2017). Concentration of apple juice using a vacuum microwave evaporator as a novel technique: Determination of quality characteristics. **Journal of Food Process Engineering**. 40(5): 12535.
- Burdurlu, H. S., Koca, N., and Karadeniz, F. (2006). Degradation of vitamin C in citrus juice concentrates during storage. **Journal of Food Engineering**. 74(2). 211-216.
- Casabar, J. T., Ramaraj, R., Tipnee, S., and Unpaprom, Y. (2020). Enhancement of hydrolysis with *Trichoderma harzianum* for bioethanol production of sonicated pineapple fruit peel. **Fuel**. 279: 118437.
- Cassano, A., Conidi, C., Timpone, R., D'Avella, M., and Drioli, E. (2007). A membrane-based process for the clarification and the concentration of the cactus pear juice. **Journal of Food Engineering**. 80(3): 914-921.

- Cassano, A., Drioli, E., Galaverna, G., Marchelli, R., Di Silvestro, G., and Cagnasso, P. (2003). Clarification and concentration of citrus and carrot juices by integrated membrane processes. **Journal of Food Engineering**. 57(2): 153-163.
- Chutintrasri, B., and Noomhorm, A. (2007). Color degradation kinetics of pineapple puree during thermal processing. **LWT - Food Science and Technology**. 40(2): 300-306.
- Couto, D. S., Cabral, L. M. C., Matta, V. M. da, Deliza, R., and Freitas, D. de G. C. (2011). Concentration of pineapple juice by reverse osmosis: physicochemical characteristics and consumer acceptance. **Food Science and Technology (Campinas)**. 31(4): 905-910.
- Crafton E. and Black W. (2004). Heat transfer and evaporation rates of small liquid droplets on heated horizontal surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 47(6-7): 1187-1200.
- Cyklis, P. (2017). Industrial scale engineering estimation of the heat transfer in falling film juice evaporators. **Applied Thermal Engineering**. 123: 1365-1373.
- Dass, J.D., and Grenco. (1991, Spring). Current large-scale commercial application of freeze concentration in the food industry. **European Food and Drink Review**. 19-24.
- Decareau, R.V. (2020). Cooking using infrared and microwave radiation. In **Catering Technology and System Design III- international Conference**. Harrogate 10-13 Sept. 1984.
- Dhuique-Mayer, C., Tbatou, M., Carail, M., Caris-Veyrat, C., Dornier, M., and Amiot, M. J. (2007). Thermal Degradation of Antioxidant Micronutrients in Citrus Juice: Kinetics and Newly Formed Compounds. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 55(10): 4209-4216.
- Dinçer, C. (2021). Effect of intermittent microwave vacuum concentration on quality parameters of apple juice and sour cherry nectar and mathematical modeling of concentration. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**. 55(3): 175-196.
- Dinçer, C., Çam, I.B., Torun, M., Gulmez, H.B., and Topuz, A. (2019). Mathematical modeling of concentrations of grape, pomegranate and black carrot juices by various methods. **GIDA/ The Journal of Food**. 44(6): 1092-1105.
- Doymaz, I (2018). Infrared drying of kiwifruit slices. **International Journal of Green Energy**. 1-7.

- Echavarría, A. P., Torras, C., Pagán, J., and Ibarz, A. (2011). Fruit Juice Processing and Membrane Technology Application. **Food Engineering Reviews**. 3(3-4): 136-158.
- Elik, A., Yanik, D. K., Maskan, M., and Gogus, F. (2016). Influence of three different concentration techniques on evaporation rate, color and phenolics content of blueberry juice. **Journal of Food Science and Technology**. 53(5): 2389-2395.
- Fasina, O. (2003). Infrared heating of food and agricultural materials. In **ASAE Annual International Meeting**. Las Vegas, Nevada, USA.
- Fazaeli, M., Hojjatpanah, G. and Emam-Djomeh, Z. (2011). Effects of heating method and conditions on the evaporation rate and quality attributes of black mulberry (*Morus nigra*) juice concentrate. **Journal of Food Science and Technology**. 50(1): 35-43.
- Fellows, P. (2000, July). Food Processing Technology: Principles and Practice, 2nd ed, New York. **Technology and Engineering**.
- Feng, H., Barbosa-Cánovas, G.V., and Weiss, J. (2011). Ultrasound technologies for food and bioprocessing. **Food Engineering Series book**. 1-12.
- Garza, S., Ibarz, A., Pagán, J., and Giner, J. (1999). Non-enzymatic browning in peach puree during heating. **Food Research International**. 32(5): 335343.
- Goula, A. M., Tzika, A. and Adamopoulos, K. G. (2014). Kinetic Models of Evaporation and Total Phenolics Degradation during Pomegranate Juice Concentration. **International Journal of Food Engineering**. 10(3): 383-392.
- Gourdon, M., Innings, F., Jongasma, A., and Vamling, L. (2015). Qualitative investigation of the flow behavior during falling film evaporation of a dairy product. **Experimental Thermal and Fluid Science**. 60: 9-19.
- Gunathilake, M., Shimmura, K., Dozen, M., and Miyawaki, O. (2014). Flavor Retention in Progressive Freeze-Concentration of Coffee Extract and Pear (La France) Juice Flavor Condensate. **Food Science and Technology Research**. 20(3): 547-554.
- Gunko, S., Verbych, S., Bryk, M., and Hilal, N. (2006). Concentration of apple juice using direct contact membrane distillation. **Desalination**. 190(1-3): 117-124.
- Ha, H.T.N., and Thuy. N.M. (2020). Kinetic study of water and total soluble solid changes of black cherry tomato (*Solanum Lycopersicum* Cv. OG) sauce using rotary vacuum evaporation. **Current Research in Nutrition and Food Science**. 8(3): 1037-1045.

- Hadjal, T., Dhuique-Mayer, C., Madani, K., Dornier, M., and Achir, N. (2013). Thermal degradation kinetics of xanthophylls from blood orange in model and real food systems. **Food Chemistry**. 138(4): 2442-2450.
- Haefner, J.W. (2005). Modeling biological systems: principles and applications. **Springer Science & Business Media**. Boca Raton. London. New York.
- Harbourne, N., Jacquier, J. C., Morgan, D. J., and Lyng, J. G. (2008). Determination of the degradation kinetics of anthocyanins in a model juice system using isothermal and non-isothermal methods. **Food Chemistry**. 111(1): 204-208.
- Hebbar, H. U., Vishwanathan, K., and Ramesh, M. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. **Journal of Food Engineering**. 65(4): 557-563.
- Hebbar, H.U., and Rastogi, N.K. (2001). Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. **Journal of Food Engineering**. 47(1): 1-5.
- Heldman, D.R., and Lund, D. (2007). Handbook of food engineering. **Chemical Rubber Company**. Boca Raton. London. New York.
- Henderson, S. M., and Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Research Engineering**. 7: 85-89.
- Herbig, A.L., and Renard, C.M.G.C. (2017). Factors that impact the stability of vitamin C at intermediate temperatures in a food matrix. **Food Chemistry**. 220: 444-451.
- Hikal, W.M., Mahmoud, A.A., Said-Al Ahl, H.A.H., Bratovic, A., Tkachenko, K.G., Kacaniova, M. and Rodriguez, R.M. (2021). Pineapple (*Ananas comosus L. Merr.*), Waste Streams, Characterisation and Valorisation: An Overview. **Open Journal of Ecology**. 11: 610-634.
- Icier, F., Yildiz, H., Sabanci, S., Cevik, M., and Cokgezme, O. F. (2017). Ohmic heating assisted vacuum evaporation of pomegranate juice: Electrical conductivity changes. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 39: 241-246.
- Jaiswal, A. K., Gupta, S., and Abu-Ghannam, N. (2012). Kinetic evaluation of colour, texture, polyphenols and antioxidant capacity of Irish York cabbage after blanching treatment. **Food Chemistry**. 131(1): 63-72.
- Jesus, D. F., Leite, M. F., Silva, L. F. M., Modesta, R. D., Matta, V. M., and Cabral, L. M. C. (2007). Orange (*Citrus sinensis*) juice concentration by reverse osmosis. **Journal of Food Engineering**. 81(2): 287-291.

- Jiao, B. (2003). Recent advances on membrane process for the concentration. **Journal of Food Engineering**, 63: 303-324.
- Kaleemullah, S., and Kailappan, R. (2006). Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies. **Journal of Food Engineering**, 76(4): 531-537.
- Khoodaruth, A. (2015). Use of Falling Thin Film Evaporator for Increasing Cogenerated Electricity in Cane Flexi-factory in Mauritius. **Energy Procedia**, 75: 1021-1026.
- Kim, S.Y., Jeong, S.M., Jo S.C., Lee, S.C. (2006). Application of far-infrared irradiation in the manufacturing process of green tea. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 54: 9943-9947.
- Kirpalani, D. M., and Toll, F. (2002). Revealing the physicochemical mechanism for ultrasonic separation of alcohol–water mixtures. **Journal of Chemical Physics**, 117(8): 3874-3877.
- Kobara, H., Tamiya, M., Wakisaka, A., Fukazu, T., and Matsuura, K. (2009). Relationship between the size of mist droplets and ethanol condensation efficiency at ultrasonic atomization on ethanol-water mixtures. **American Institute of Chemical Engineers Journal**, 56(3): 810-814.
- Kobayashi, A., Shirai, Y., Nakanishi, K., and Matsuno, R. (1996). A method for making large agglomerated ice crystals for freeze concentration. **Journal of Food Engineering**, 27(1): 1-15.
- Koca, N., Burdurlu, H.S., and Karadeniz, F. (2003). Kinetics of Nonenzymatic Browning Reaction in Citrus Juice Concentrates during Storage. **Turkish Journal of Agriculture**, 27: 353-360.
- Kudo, T., Sekiguchi, K., Sankoda, K., Namiki, N., and Nii, S. (2017). Effect of ultrasonic frequency on size distributions of nanosized mist generated by ultrasonic atomization. **Ultrasonics Sonochemistry**, 37: 16-22.
- Kujawa, J., Guillen-Burrieza, E., Arafat, H. A., Kurzawa, M., Wolan, A., and Kujawski, W. (2015). Raw Juice Concentration by Osmotic Membrane Distillation Process with Hydrophobic Polymeric Membranes. **Food and Bioprocess Technology**, 8(10): 2146-2158.
- Kumar, P.D.G., Umesh H.H., Sukuumar, D., and Ramesh, M.N. (2005). Infrared and hot -air drying of onions. **Journal of Food Processing and Preservation**, 29(2): 132-150.



- Lau, M., Tang, J., and Swanson, B. (2000). Kinetics of textural and color changes in green asparagus during thermal treatments. **Journal of Food Engineering**. 45(4): 231-236.
- Lee, J. H., and Kim, H. J. (2009). Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus* L.) slices. **LWT - Food Science and Technology**. 42(1): 180-186.
- Leonard, W. F., and Ramey, R. L. (1964). Thin-Film Thickness from Theoretical Expressions for Conductivity and Isothermal Hall Effect. **Journal of Applied Physics**. 35(10): 2963-2965.
- Leong, C.Y., and Chua, L.S. (2020). Optimization of concentrating process using rotary vacuum evaporation for pineapple juice. **Chemical Engineering Transactions**. 78: 7-12.
- Lewis, W. K. (1921). The Rate of Drying of Solid Materials. **Journal of Industrial & Engineering Chemistry**. 13(5): 427-432.
- Lima, J. R., Elizondo, N. J., and Bohuon, P. (2010). Kinetics of ascorbic acid degradation and colour change in ground cashew apples treated at high temperatures (100-180°C). **International Journal of Food Science & Technology**. 45(8): 1724-1731.
- Ling, B., Tang, J., Kong, F., Mitcham, E. J., and Wang, S. (2014). Kinetics of Food Quality Changes During Thermal Processing: A Review. **Food and Bioprocess Technology**. 8(2), 343-358.
- Ling, B., Tang, J., Kong, F., Mitcham, E. J., and Wang, S. (2014). Kinetics of Food Quality Changes During Thermal Processing: a Review. **Food and Bioprocess Technology**. 8(2): 343-358.
- Liu, B., Xue, W., Guo, Z., Liu, S., Zhu, Q., Pang, X., Zhang Z., and Fang, F. (2021). Water loss and pericarp browning of litchi (*Litchi chinensis*) and longan (*Dimocarpus longan*) fruit maintain seed vigor. **Scientia Horticulturae**. 290.
- Martínez, B.F., Morales, S. E., Chang, Y. K., Herrera, G.A., Martínez, M. J. L., Baños, L., and Flores, M.H.E. (1999). Effect of infrared baking on wheat flour tortilla characteristics. **Cereal Chemistry Journal**. 76(4): 491-495.
- Maskan, M. (2006). Production of pomegranate (*Punica granatum* L.) juice concentrate by various heating methods: colour degradation and kinetics. **Journal of Food Engineering**. 72(3): 218-224.
- Mason, T. (1996). The uses of ultrasound in food technology. **Ultrasonics Sonochemistry**. 3(3): 253-260.



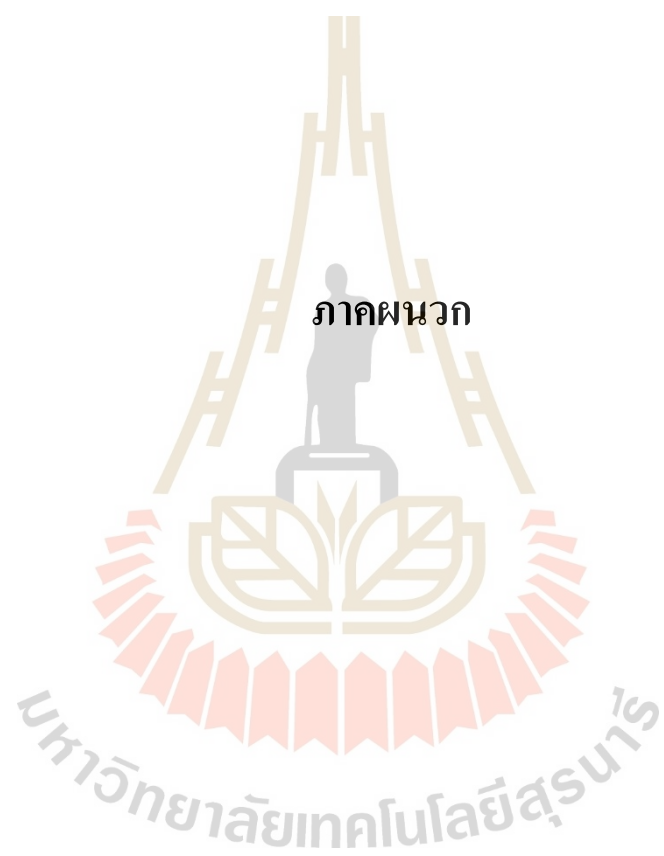
- Midilli, A., Kucuk, H., and Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. **Drying technology**. 20(7): 1503-1513.
- Minaei, S., Motevali, A., Najafi, G., and Sayedi, S. R. M. (2011). Influence of drying methods on activation energy, effective moisture diffusion and drying rate of pomegranate arils (*Punica Granatum*). **Australian Journal of Crop Science**. 6: 584-591.
- Mongpraneet, S., Abe, T., and Tsurusaki, T. (2002). Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. **Journal of Food Engineering**. 55(2): 147-156.
- Nayak, C. A., Valluri, S. S., and Rastogi, N. K. (2011). Effect of high or low molecular weight of components of feed on transmembrane flux during forward osmosis. **Journal of Food Engineering**. 106(1): 48-52.
- Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T., and Soponronnarit, S. (2007). Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation. **Journal of Food Engineering**. 81(3): 624-633.
- Nindo, C. I. and Tang, J. (2007). Refractance Window Dehydration Technology: A Novel Contact Drying Method. **Drying Technology**. 25(1): 37-48.
- Nisha, P., Singhal, R. S., and Pandit, A. B. (2006). Kinetic modelling of texture development in potato cubes (*Solanum tuberosum L.*), green gram whole (*Vigna radiate L.*) and red gram splits (*Cajanus cajan L.*). **Journal of Food Engineering**. 76(4): 524-530.
- Nowak, D., and Lewicki, P. P. (2004). Infrared drying of apple slices. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. 5(3): 353-360.
- Ogori, A.F. (2020). Source, Extraction and Constituents of Fats and Oils. **Journal of Food Science and Nutrition**. 6: 1-8.
- Ongaratto, R. S., Menezes, L., Borges, C. P., and Laranjeira da Cunha Lage, P. (2018). Osmotic distillation applying potassium pyrophosphate as brine. **Journal of Food Engineering**. 228: 69-78.
- Onsekizoglu, P., Bahceci, K. S., and Acar, M. J. (2010). Clarification and the concentration of apple juice using membrane processes: A comparative quality assessment. **Journal of Membrane Science**. 352(1-2): 160-165.
- Page, G. E. (1949). Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer. Unpublished Master's Thesis, Purdue University, Lafayette, IN.

- Pan, Z., and Atungulu, G.G. (2011). *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*. **Chemical Rubber Company**. Boca Raton. London. New York.
- Park, J.H., Lee, J.M., Cho, Y.J., Kim, C.T., Kim, C.J., Nam, K.C., and Lee, S.C. (2009). Effect of far-infrared heater on the physicochemical characteristics of green tea during processing. **Journal of Food Biochemistry**. 33(2): 149-162.
- Pehlivan, H., and Özdemir, M. (2012). Experimental and theoretical investigations of falling film evaporation. **Heat and Mass Transfer**. 48(6): 1071-1079.
- Perez, N.E., and Schmalko, M.E. (2009). Convective drying of pumpkin: influence of pretreatment and drying temperature. **Journal of food process engineering**. 32(1): 88-103.
- Petrotos, K. B., and Lazarides, H. N. (2001). Osmotic concentration of liquid foods. **Journal of Food Engineering**. 49(2-3): 201-206.
- Petzold, G., Niranjana, K., and Aguilera, J. M. (2013). Vacuum-assisted freeze concentration of sucrose solutions. **Journal of Food Engineering**. 115(3): 357-361.
- Praveen Kumar, D. G., Hebbar, H. U., and Ramesh, M. N. (2006). Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices. **LWT-Food Science and Technology**. 39(6): 700-705.
- Qin, F. G. F., Ding, Z., Peng, K., Yuan, J., Huang, S., Jiang, R., and Shao, Y. (2020). Freeze concentration of apple juice followed by centrifugation of ice packed bed. **Journal of Food Engineering**. 291: 1-9.
- Quan, X., Zhang, M., Zhang, W., and Adhikari, B. (2014). Effect of microwave-assisted vacuum frying on the quality of potato chips. **Drying Technology**. 32(15): 1812-1819.
- Quist-Jensen, C. A., Macedonio, F., Conidi, C., Cassano, A., Aljlil, S., Alharbi, O. A., and Drioli, E. (2016). Direct contact membrane distillation for the concentration of clarified orange juice. **Journal of Food Engineering**. 187: 37-43.
- Ramaswamy, H. S., and Marcotte, M. (2006). *Food processing: Principles and applications*. **Chemical Rubber Company Press**.
- Ramteke, R. S. and Singh, N. I. and Rekha, M. N. and Eipeson, W. E. (1993) Methods for Concentration of Fruit Juices: A Critical Evaluation. **Journal of Food Science and Technology (India)**. 30 (6):391-402.

- Rastogi, N. K. (2012). Recent trends and developments in infrared heating in food processing. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 52(9): 737-760.
- Rattanathanalerk, M., Chiewchan, N., and Srichumpoung, W. (2005). Effect of thermal processing on the quality loss of pineapple juice. **Journal of Food Engineering**. 66(2): 259-265.
- Sabanci, S., and Icier, F. (2017). Applicability of ohmic heating assisted vacuum evaporation for concentration of sour cherry juice. **Journal of Food Engineering**. 212: 262-270.
- Sabanci, S., and Icier, F. (2019). Effects of vacuum ohmic evaporation on some quality properties of sour cherry juice concentrates. **International Journal of Food Engineering**.
- Sabanci, S., and Icier, F. (2020). Enhancement of the performance of sour cherry juice concentration process in vacuum evaporator by assisting ohmic heating source. **Food and Bioproducts Processing**. 122: 26-279.
- Sadin, R., Chegini, G.R., and Sadin, H. (2014). The effect of temperature and slice thickness on drying kinetics tomato in the infrared dryer. **Heat and Mass Transfer**. 50(4): 501-507.
- Sakai, N., and Hanzawa, T. (1994). Applications and advances in far-infrared heating in Japan. **Trends in Food Science & Technology**. 5(11): 357-362.
- Sapei, L., and Hwa, L. (2014). Study on the Kinetics of Vitamin C Degradation in Fresh Strawberry Juices. **Procedia Chemistry**. 9: 62-68.
- Sato, M., Matsuura, K., and Fujii, T. (2001). Ethanol separation from ethanol-water solution by ultrasonic atomization and its proposed mechanism based on parametric decay instability of capillary wave. **The Journal of Chemical Physics**. 114(5): 2382-2386.
- Selen Burdurlu, H., and Karadeniz, F. (2003). Effect of storage on nonenzymatic browning of apple juice concentrates. **Food Chemistry**. 80(1): 91-97.
- Sharma, G. P., Verma, R. C., and Pathare, P. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. **Journal of Food Engineering**. 71(3): 282-286.
- Simon, J. C., Sapozhnikov, O. A., Khokhlova, V. A., Crum, L. A., and Bailey, M. R. (2015). Ultrasonic atomization of liquids in drop-chain acoustic fountains. **Journal of Fluid Mechanics**. 766: 129-146.
- Simon, J.C., Sapozhnikov, O.A., Khokhlova, V.A., Wang, Y.N., Crum, L.A., and Bailey, M.R. (2012). Ultrasonic atomization of tissue and its role in tissue fractionation by high intensity focused ultrasound. *Physics in Medicine and Biology*, 57(23): 8061–8078.

- Skjoldebrand, C. (2001). Infrared heating. In: Richardson P, editor. Thermal technologies in food processing. **Chemical Rubber Company**. New York.
- Spotar, S., Rahman, A., Gee, O. C., Jun, K. K., and Manickam, S. (2015). A revisit to the separation of a binary mixture of ethanol–water using ultrasonic distillation as a separation process. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, 87: 45-50.
- Sudarminto S.Y., Istianah, N., Dego Y. A., and Rizkhia J.A.A. (2020). The properties of sweet sorghum syrup produced by combined vacuum falling film and rotary evaporation. **International Journal of Advance Tropical Food**. 2(1): 1-7.
- Suh, H. J., Noh, D. O., Kang, C. S., Kim, J. M., and Lee, S. W. (2003). Thermal kinetics of color degradation of mulberry fruit extract. **Nahrung/Food**. 47(2): 132-135.
- Summu, G., Sahin, S., and Sevimli, M. (2005). Microwave, infrared and infrared-microwave combination baking of cakes. **Journal of Food Engineering**. 71(2): 150-155.
- Suzuki, A., Maruyama, H., Seki, H., Matsukawa, Y., and Inoue, N. (2006). Enrichment of Amino Acids by Ultrasonic Atomization. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 45(2): 830-833.
- Tiwari, B. K., Muthukumarappan, K., O'Donnell, C. P., and Cullen, P. J. (2008). Effects of Sonication on the Kinetics of Orange Juice Quality Parameters. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 56(7): 2423-2428.
- Togrul H. (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot. **Journal of food engineering**. 77(3): 610-619.
- Ur Rehman, W., Muhammad, A., Ali Khan, Q., Younas, M., and Rezakazemi, M. (2019). Pomegranate Juice Concentration Using Osmotic Distillation with Membrane Contactor. **Separation and Purification Technology**. 481-489
- Van Boekel, M. A. J. S. (2008). Kinetic Modeling of Food Quality: A Critical Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. 7(1): 144-158.
- Van Boekel, M.A.J.S. (2009). Kinetic modeling of reactions in foods. **Chemical Rubber Company**. Boca Raton. London. New York.
- Verbeyst, L., Crombruggen, K. V., Van der Plancken, I., Hendrickx, M., and Van Loey, A. (2011). Anthocyanin degradation kinetics during thermal and high-pressure treatments of raspberries. **Journal of Food Engineering**. 105(3): 513-521.

- Vikram, V. B., Ramesh, M. N., and Prapulla, S. G. (2005). Thermal degradation kinetics of nutrients in orange juice heated by electromagnetic and conventional methods. **Journal of Food Engineering**. 69(1): 31-40.
- Vishwanathan, K. H., Giwari, G. K., and Hebbar, H. U. (2013). Infrared assisted dry-blanching and hybrid drying of carrot. **Food and Bioproducts Processing**: 91(2): 89-94.
- Wang, Y., Cui, Y., Wang, B., and Zhang, M. (2018). Ultrasonic atomizing-assisted spray drying: Effect on the quality of skimmed milk powders. In **21st International Drying Symposium Proceedings**. Editorial Universitat Politècnica de València. Spain. 1309-1316)
- Wattanakul, T., Nonthapot, S., and Watchalaanun, T. (2020). Factors determine Thailand's processed pineapple export competitiveness. **International Journal of Managerial Studies and Research**. 8(1): 36-41.
- Wood, R. W., and Loomis, A. L. (1927). The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**. 4(22): 417-436.
- Wu, B., Ma, H., Qu, W., Wang, B., and Zhang, X. (2014). Catalytic infrared and hot air dehydration of carrot slices. **Journal of Food Process Engineering**. 37(2): 111-121.
- Yadav, G., Gupta, N., Sood, M., Anjum, N., and Chib, A. (2020). Infrared heating and its application in food processing. **The Pharma Innovation Journal**. 9(2): 142-151.
- Yang, L., and Shen, S. (2008). Experimental study of falling film evaporation heat transfer outside horizontal tubes. **Desalination**. 220(1-3): 654-660.
- Yasuda, K., Bando, Y., Yamaguchi, S., Nakamura, M., Oda, A., and Kawase, Y. (2005). Analysis of concentration characteristics in ultrasonic atomization by droplet diameter distribution. **Ultrasonics Sonochemistry**. 12(1-2): 37-41.
- Yasuda, K., Nohara, Y., and Asakura, Y. (2020). Effect of ultrafine bubbles on ethanol enrichment using ultrasonic atomization. **Japanese Journal of Applied Physics**. 59.
- Yu, K., Wu, Y., Hu, Z., Cui, S., and Yu, X. (2011). Modeling thermal degradation of litchi texture: Comparison of WeLL model and conventional methods. **Food Research International**. 44(7): 1970-1976.







รูปที่ 1 เครื่องสร้างระลอกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก หรือ เครื่องสร้างหมอกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ความถี่ 1.7 MHz



รูปที่ 2 เตาเซรามิกให้ความร้อน (กำลังไฟ 800 วัตต์)



รูปที่ 3 เครื่องวัดอุณหภูมิประกอบด้วย เทอร์โมคัปเปิล ชนิด เค (Thermocouple type K) และ เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Digital Temperature Controller)



## ประวัติผู้เขียน

นางสาวลพดาว แซ่ลี เกิดเมื่อวันที่ 3 เมษายน พ.ศ. 2537 เริ่มศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนบ้านเมืองปักสามัคคี ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนปักธงชัยประชานิรมิต และโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้านครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2559 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปี พ.ศ. 2559

### ผลงาน

(1) ผลงานการตีพิมพ์ในวารสาร Food and Applied Bioscience ในชื่อเรื่อง “Evaluation of mathematical modelings of pineapple juice concentration using different combination techniques” ในปี 2021

(2) ผลงานวิจัย (Full proceeding) ในงานการประชุมวิศวกรรมนานาชาติ KKU (The 7th KKU International Engineering Conference 2021) จัดโดย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในชื่อเรื่อง “The effect of ultrasonic atomization and infrared heating assisted vacuum evaporation on evaporation rate, the color of pineapple juice.”

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี