



การพัฒนากระบวนการผลิตสับประรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะ
สุญญากาศ



ปรีชา ชิวสันติกานต์

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพลังงานทดแทน
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การพัฒนากระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควมแน่นภายใต้สภาวะ
สุญญากาศ



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพลังงานทดแทน
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การพัฒนากระบวนการผลิตสับปรดกวนด้วยเทคนิคการควบคุมภายใต้สภาวะ
สุญญากาศ"

ของ ปรีชา ชิวสันติกานต์

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานทดแทน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ศรีประภาคาร)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช สุริวงษ์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ แซ่มสะอาด)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การพัฒนากระบวนการผลิตสับประรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ
ผู้วิจัย	ปรีชา ชิวสันติกานต์
ประธานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ
กรรมการที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช สุริวงษ์
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. พลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2566
คำสำคัญ	การกวนสับประรด, เทคนิคแบบสุญญากาศ, การควบแน่น, การแปรรูปอาหาร, การลดความชื้น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยเครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ กำหนดปริมาณสับประรดที่จะทำการทดลอง อยู่ที่ 10 kg และต้องการดึงน้ำออกจากสับประรด 5 kg ในระยะเวลาประมาณ 60 นาที โดยสับประรดต้องมีอุณหภูมิในการกวนไม่เกิน 100 °C จุดเดือดของน้ำในสับประรดไม่เกิน 80 °C จากการศึกษาพบว่าสับประรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่ 100 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดคือ 1.08 kWh/kg โดยการกวนสับประรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่ 100 °C ใช้ระยะเวลาในการกวน 50 นาที พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 5.4 kWh มีความชื้นเริ่มต้น 483.77 %db มีความชื้นสุดท้าย 191.89 %db และมีค่าอัตราการอบแห้ง ณ เวลาสุดท้าย 291.89 kg/hr ในขณะที่การกวนสับประรดภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 1.98 kWh/kg ระยะเวลาในการกวน 320 นาที พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 9.9 kWh มีความชื้นเริ่มต้น 483.77 %db มีความชื้นสุดท้าย 186.05 %db และมีค่าอัตราการลดความชื้น ณ เวลาสุดท้าย 297.72 kg/hr ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายของสับประรดด้วยโปรแกรมทางสถิติสับประรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 100 °C มีค่าเฉลี่ยของการแสดงผลความสว่างและการแสดงผล $\Delta E = 4.958$ อยู่ระหว่าง $3.5 < \Delta E < 5.0$ ซึ่งค่าเฉลี่ยของการแสดงผลความสว่างและการแสดงผลใกล้เคียงกับสับประรดสด การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ระยะเวลาการใช้งานเครื่อง 10 ปี ค่าบำรุงรักษาปีแรก 50,000 บาท ต้นทุนของวัตถุดิบ 465,360 บาท/ปี ต้นทุนของแรงงาน 217,800 บาท/ปี ต้นทุนของพลังงาน 249,480 บาท/ปี มีรายได้ 3,822,000 บาท/ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 308.64 % ค่ามูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์สุทธิ (NPV) เท่ากับ 24,325,652 บาท ดังนั้นเครื่องผลิตสับประรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศมีจุดคุ้มทุน 1 ปี จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสามารถพัฒนาเครื่องให้มีขนาดใหญ่เพื่อสามารถนำไปใช้ใน

อุตสาหกรรมได้ เนื่องจากสามารถช่วยลดระยะเวลาในการทำงานและเพิ่มประสิทธิภาพอีกด้วย



Title	DEVELOPMENT OF PINEAPPLE JAM PRODUCTION PROCESS USING VACUUM CONDENSATION TECHNIQUE
Author	Preecha Chewasantikan
Advisor	Associate Professor Ph.D Pisit Maneechot
Co-Advisor	Associate Professor Dr. Tawat Suriwong
Academic Paper	M.S. Thesis in Renewable Energy, Naresuan University, 2023
Keywords	Pineapple Stirring, Vacuum Technique, Condensation, Food Processing, Dehumidification

ABSTRACT

This research is the development of a pineapple stirrer using the condensation technique under vacuum conditions. By a pineapple stirrer using a condensation technique under vacuum conditions. The quantity of pineapple to be experimented is set at 10 kg and the water needs to be extracted from 5 kg of pineapple in approximately 60 minutes. The pineapple must have a stirring temperature not exceeding 100 °C. The boiling point of the water in the pineapple must not exceed 80 °C from the study. It was found that stirring pineapple under vacuum at 100 °C had the lowest specific energy consumption, which was 1.08 kWh/kg. Stirring pineapple under vacuum at 100 °C took 50 minutes to stir, total energy used was 5.4 kWh. It had an initial humidity of 483.77 %db, a final humidity of 191.89 %db and a drying rate at the final time of 291.89 kg/hr, while stirring pineapple under atmospheric pressure of 100 °C had a specific energy consumption of 1.98 kWh/kg, stirring time 320 minutes, total energy used 9.9 kWh, initial humidity 483.77 %db, final humidity 186.05 %db, and final humidity reduction rate 297.72 kg/hr. Results of photo analysis of pineapple. With the statistical program, pineapple stirred under vacuum conditions at 100 °C has an average of the brightness and display $\Delta E=4.958$ between $3.5 < \Delta E < 5.0$, which the average of the brightness and display. The fruit is similar to fresh pineapple. Economic analysis of the machine's use period of 10 years, maintenance cost for the first year 50,000 baht, cost of raw materials 465,360 baht/year, labor costs 217,800 baht/year, energy costs 249,480

baht/year, income 3,822,000 baht/year, and rate of return. Within (IRR) 308.64 %, the net present value (NPV) value is equal to 24,325,652 baht. Therefore, the pineapple stir-fry production machine using the condensation technique under vacuum conditions has a break-even point of 1 year. The results of the said experiment show that it can be developed. The machine is large enough to be able to be used in industry. Because it can help reduce work time and increase efficiency as well.



ประกาศคุณูปการ

การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของผู้รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่ามาเป็นที่ปรึกษา พร้อมทั้งยังได้ให้ทั้งความรู้ แนวคิด และคำแนะนำต่างๆ ที่ดีตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านอันประกอบไปด้วยที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนการแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร ทุกท่านที่ได้สอนวิชาความรู้ทั้งด้านวิชาการและประสบการณ์ต่างๆ

ปรีชา ชิวสันติกานต์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุณูปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บริบทของการบริโภคพลังงานกับอุตสาหกรรมอาหารแปรรูปของไทย.....	6
2.2 ความสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี.....	7
2.3 สัมประรด.....	8
2.4 การลดความชื้นในผลิตภัณฑ์.....	13
2.5 การเกิดออกซิเดชันของวิตามินซี ทำให้สูญเสียคุณสมบัติและคุณค่าทางโภชนาการ.....	14
2.6 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน (Oxidation of Fats).....	14
2.7 จลนศาสตร์การลดความชื้น.....	15
2.8 การลดความชื้นโดยการใช้อากาศหรือลมร้อน.....	17

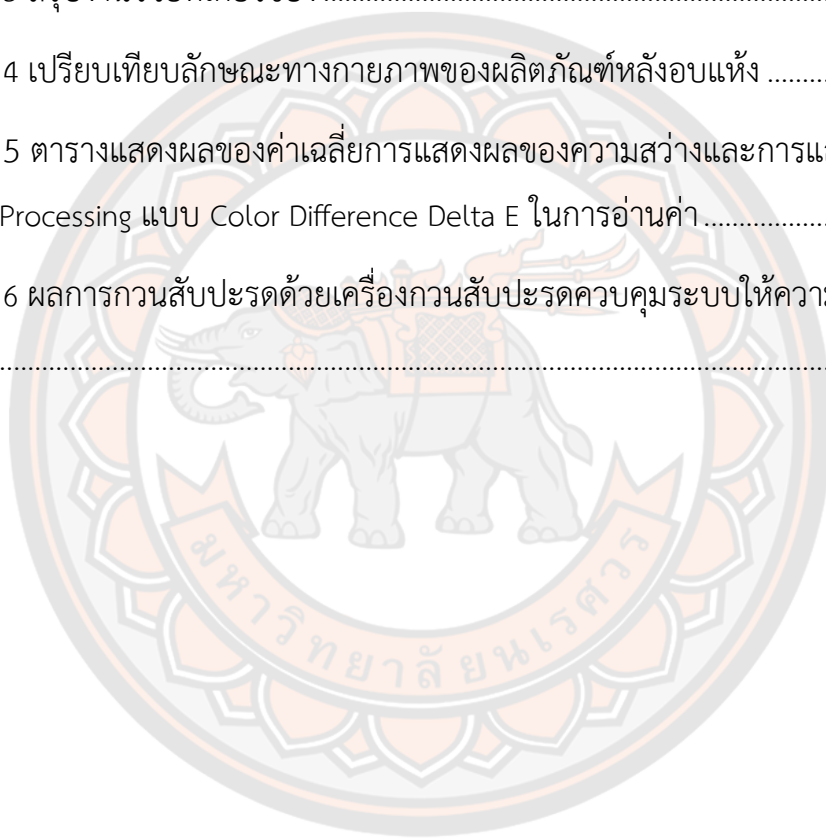
2.9 อัตราความชื้น [54].....	20
2.10 กลไกการระเหยน้ำออก.....	20
2.11 แร้งยืดติระหว่างโมเลกุลของน้ำกับกลูโคส.....	21
2.12 การเปลี่ยนสถานะของของเหลว.....	22
2.13 การระเหย.....	23
2.14 การถ่ายเทความร้อนในการระเหย	24
2.15 การเดือด	24
2.16 ปัจจัยที่มีผลต่อจุดเดือด-จุดหลอมของของเหลว	26
2.17 แผนภาพวัฏภาค	28
2.18 เทอร์โมไดนามิกส์ของการลดความชื้น (Thermodynamics of Drying)	30
2.19 ความร้อนของการเปลี่ยนสถานะของน้ำเป็นไอน้ำ	32
2.20 ระบบควบแน่นไอน้ำ	33
2.21 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดความชื้นด้วยเทคนิคสุญญากาศ.....	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	43
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	43
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	44
3.3 สถานที่ดำเนินการวิจัย	62
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	63
4.1 จลนพลศาสตร์การลดความชื้น.....	63
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์.....	73
4.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	76
4.4 ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการ ควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ.....	77
บทที่ 5 บทสรุป	80

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม.....	82
ภาคผนวก ตารางผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	90
ประวัติผู้วิจัย.....	97



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 องค์ประกอบของเนื้อผลสับปะรด	9
ตาราง 2 คุณสมบัติของความดันของน้ำที่เปลี่ยนแปลง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป.....	31
ตาราง 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
ตาราง 4 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง	74
ตาราง 5 ตารางแสดงผลของค่าเฉลี่ยการแสดงผลของความสว่างและการแสดงผล โดยใช้ Image Processing แบบ Color Difference Delta E ในการอ่านค่า	75
ตาราง 6 ผลการกวนสับปะรดด้วยเครื่องกวนสับปะรดควบคุมระบบให้ความร้อนด้วย PLC	76



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก	11
ภาพ 2 โครงสร้างของเบต้าแคโรทีน	11
ภาพ 3 (ก) สับประรดพันธุ์ MD2 และ (ข) สับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย	12
ภาพ 4 แผนภาพปรากฏการณ์ลดความชื้นในผลิตภัณฑ์อาหาร	14
ภาพ 5 การลดลงของความชื้นวัสดุ	15
ภาพ 6 การถ่ายโอนมวลสารและพลังงานระหว่างการลดความชื้น	21
ภาพ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา...21	
ภาพ 8 ผลของแรงเชื่อมแน่นและแรงยึดติดต่อการเกิดแรงคาปิลลารีในของเหลว	22
ภาพ 9 การเปลี่ยนสถานะบริเวณผิวหน้าของเหลวด้วยการระเหย	23
ภาพ 10 การเดือดของของเหลว เมื่อได้รับความร้อนจนความดันไอของสารเท่ากับความดันบรรยากาศ	25
ภาพ 11 เส้นกราฟการเดือด (เส้นทึบ : เส้นแรงกระแสน้ำร้อน q เส้นประ : สัมประสิทธิ์การนำความร้อน h)	25
ภาพ 12 กราฟความร้อนแฝงที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ (ก : สถานะของแข็ง ข : หลอมละลาย ค : สถานะของเหลว ง : การระเหย)	27
ภาพ 13 ภูมิภาคของสารทั้งสามสถานะที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงสถานะไปมาระหว่างกันด้วยอุณหภูมิและความดัน	29
ภาพ 14 ขั้นตอนการทดสอบภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C	45
ภาพ 15 ขั้นตอนการทดสอบภายใต้สุญญากาศ 100 °C	46
ภาพ 16 ขั้นตอนการทดสอบภายใต้สุญญากาศ 80 °C	47

ภาพ 17 ฮีตเตอร์ต้มน้ำ 6000 W.....	49
ภาพ 18 ข้อมูลพื้นฐานของคูลิ่งทาวเวอร์ (Cooling Tower).....	50
ภาพ 19 คุณสมบัติปั๊มสุญญากาศ 2BV.....	52
ภาพ 20 เครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ.....	52
ภาพ 21 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องกวนสับประรด.....	53
ภาพ 22 สับประรดสุกพันธุ์ภูเก็ต.....	56
ภาพ 23 หม้อกวนสับประรด.....	57
ภาพ 24 ทดสอบภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C.....	64
ภาพ 25 ทดสอบภายใต้สุญญากาศ 100 °C.....	65
ภาพ 26 ทดสอบภายใต้สุญญากาศ 80 °C.....	66
ภาพ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดความชื้นกับความชื้นในการกวนสับประรด ภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C.....	67
ภาพ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดความชื้นกับความชื้นในการลดความชื้น สับประรดภายใต้สุญญากาศ 100 °C.....	68
ภาพ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดความชื้นกับความชื้นในการลดความชื้น สับประรดภายใต้สุญญากาศ 80 °C.....	69
ภาพ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา (a) ภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100°C (b) ภายใต้สุญญากาศ 100°C และ (c) ภายใต้สุญญากาศ 80°C.....	70
ภาพ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดความชื้นกับเวลา (a) ภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C (b) ภายใต้สุญญากาศ 100 °C และ (c) ภายใต้สุญญากาศ 80 °C.....	71
ภาพ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดความชื้นกับอัตราส่วนความชื้น (a) ภายใต้ แรงดันบรรยากาศ 100 °C (b) ภายใต้สุญญากาศ 100 °C และ (c) ภายใต้สุญญากาศ 80 °C	72

ภาพ 33 ค่าที่อ่านได้จากตัวอย่างสีบปรดสดและสีบปรดกวนในการทดลอง โดยใช้
Image Processing แบบ Color Difference Delta E.....73



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รายงาน International Energy Outlook 2017 จัดทำโดย สำนักบริหารสารสนเทศพลังงานของสหรัฐอเมริกา (US Energy Information Administration: EIA) คาดการณ์ว่าโลก และประเทศไทยจะใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ร้อยละ 28 ระหว่างปี 2558-2583 [1] ทำให้ทุกภาคส่วนต้องเร่งหามาตรการที่มีประสิทธิภาพ เพื่อจัดการความต้องการการใช้พลังงานให้เกิดดุลยภาพและเกิดความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ ซึ่งนอกจากการหาแหล่งพลังงานที่เหมาะสมและเพียงพอกับความต้องการแล้วสิ่งสำคัญที่ต้องดำเนินการควบคู่กันไป คือการดำเนินการอนุรักษ์พลังงานมาใช้ ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับประเทศไทย เพื่อให้การใช้พลังงานในทุกภาคส่วนใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูง ควบคู่ไปกับการสร้างจิตสำนึกในการอนุรักษ์พลังงานในองค์กร สอดคล้องตามยุทธศาสตร์กระทรวงพลังงาน (พ.ศ. 2555-2559) การอนุรักษ์พลังงานและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ กลยุทธ์ส่งเสริมและสนับสนุน การวิจัยพัฒนาและสาธิตเทคโนโลยีอนุรักษ์พลังงานเพื่อการนำไปใช้จริงในวงกว้าง

รายงานดังกล่าว World Bank ได้เน้นประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มผลิตภาพสู่ความรุ่งเรืองภายใต้บริบทเศรษฐกิจไทยในช่วงเปลี่ยนผ่านสู่การเป็นประเทศที่มีรายได้สูง ซึ่งหากประเทศไทยต้องการบรรลุเป้าหมายที่จะเปลี่ยนผ่านไปสู่ประเทศที่มีรายได้สูงภายในปี 2580 ภายใต้แผนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ประเทศไทยจะต้องมีอัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจ สูงกว่าร้อยละ 5 อย่างต่อเนื่องจนถึงปี 2568 โดยจะต้องมีการปฏิรูปโครงสร้างทางเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคการเกษตร ซึ่งมีการจ้างแรงงานในสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 30 ของกำลังแรงงานทั้งหมดในประเทศไทย และนับว่ามีสัดส่วนสูงมากเมื่อเทียบกับประเทศอื่นที่มีโครงสร้างเศรษฐกิจและระดับรายได้ต่อหัวแบบเดียวกัน อาทิ มาเลเซีย ซึ่งมีสัดส่วนแรงงานในภาคเกษตรเพียง ร้อยละ 11 [2]

ระบบการบริหารจัดการผลผลิตทางการเกษตรยังไม่มีประสิทธิภาพสูงเพียงพอ การไม่จำกัดผลผลิต ทำให้เกิดผลผลิตทางการเกษตรล้นตลาดในช่วงฤดูการเก็บเกี่ยว สับปะรดเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจและสินค้าส่งออกสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ข้อมูลของสมาคมผู้ผลิตอาหารแปรรูปปี 2560 ประเทศไทยมีผลผลิตสับปะรดในประเทศ ปริมาณ 2.136 ล้านตัน ใช้บริโภคภายในประเทศประมาณ 3 แสนตัน/ปี ขณะที่การส่งออก ในปี 2560 ประมาณ 5.9 แสนตัน มูลค่าการส่งออกประมาณ 24,000 ล้านบาท [3] มีตลาดหลัก คือ สหรัฐอเมริกา เยอรมนี สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ เนเธอร์แลนด์ และออสเตรเลีย ขณะที่คู่แข่งที่สำคัญในกลุ่มสับปะรดแปรรูป คือ ฟิลิปปินส์และ

อินโดนีเซีย ปัจจุบันไทยเป็นประเทศที่ผลิตสับปะรดมากเป็นอันดับ 4 ของโลก (2.136 ล้านตัน/ปี) รองจาก ฟิลิปปินส์ คอสตาริกา และบราซิล [4] อย่างไรก็ตาม ผลผลิตสับปะรดในประเทศเกินความต้องการของตลาดอยู่ถึง 1.1 ล้านตัน สับปะรดโรงงานกิโลกรัมละ 3.43 บาท เพิ่มขึ้นจากกิโลกรัมละ 3.15 บาท ของสับปะรดที่ผ่านมาร้อยละ 8.89 และลดลงจากกิโลกรัมละ 7.25 บาท ในช่วงเดียวกันของปีที่ผ่านมาร้อยละ 52.68 [5] ด้วยเหตุที่ราคาสับปะรดประสบกับปัญหาด้านราคาที่ตกต่ำนี้ (จากข้อมูลราคา ช่วงที่ต่ำสุดในปีที่แล้ว) จึงมีความจำเป็นต้องเร่งดำเนินการส่งเสริมและสนับสนุนให้ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมการแปรรูปสับปะรด เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้า ผลิตภัณฑ์สับปะรดของประเทศไทยที่มีการส่งออกมีอยู่หลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นสับปะรดสด สับปะรดแช่เย็น สับปะรดแช่แข็ง สับปะรดแห้ง สับปะรดกวน สับปะรดกระป๋องและน้ำสับปะรดเข้มข้น สถานการณ์และการส่งออก ปี 2560 ตลาดส่งออกสับปะรดแปรรูปที่สำคัญ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา (54.79%) เนเธอร์แลนด์ (15.99%) เยอรมนี (12.24%) รัสเซีย (8.67%) และ สเปน (8.30%) [4] อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมการแปรรูปสับปะรดยังมีผลิตภัณฑ์ไม่หลากหลายมากนัก การพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปผลิตภัณฑ์สับปะรดกวนจึงเป็นแนวทางเพิ่มผลิตภัณฑ์แปรรูปสับปะรดทางเลือกที่น่าจับตามอง ที่จะผลักดันให้มีบทบาทมากขึ้นในตลาด เพื่อลดปัญหาผลผลิตส่วนเกิน และเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร และยกระดับชีวิตความเป็นอยู่ให้ดีขึ้นโดยการเลือกใช้เทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม ประสิทธิภาพสูง ใช้พลังงานต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในด้านการพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์/ผลิตผลให้มีมูลค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายเร่งด่วนของรัฐบาลในการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน และการยกระดับราคาสินค้าเกษตรการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการแปรรูปสับปะรดจะต้องพิจารณาประสิทธิภาพในการลดความชื้นและการปั่นเหวี่ยงเป็นสำคัญ [6]

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตทั้งในเชิงคุณภาพของผลผลิตหรือในเชิงการใช้พลังงานให้คุ้มค่า [7] Artnaseaw ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องสุญญากาศต้นแบบขึ้น โดยการใช้เครื่องสุญญากาศเป็นอุปกรณ์ในการให้ความร้อน ซึ่งเครื่องดังกล่าวอาศัยการปรับอุณหภูมิร่วมกับความดัน เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยน้ำออกจากผลผลิตภายใต้สภาวะความดันต่ำกว่าความดันปกติ ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C สามารถช่วยรักษาคุณค่าทางอาหารและรูปร่างของผลผลิตได้ สำหรับการลดความชื้นผลผลิตด้วยเครื่องกวนสับปะรดระบบสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสุญญากาศนั้น อย่างไรก็ตามการออกแบบระบบสุญญากาศมีข้อจำกัดจากการขยายตัวอย่างมหาศาลของไอน้ำ ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงมากในการดึงไอน้ำออกจากระบบ งานวิจัยนี้ได้นำเอาระบบควบแน่นไอน้ำเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ โดยการดึงเอาไอน้ำที่เกิดขึ้นจากกระบวนการให้เคลื่อนที่ออกมาและเพิ่มระบบควบแน่นคอนเดนเสท (Condensate) เพื่อให้เกิดการควบแน่นของน้ำ เป็นการลดมวลรวมของระบบ ซึ่งจะทำได้ทำให้สามารถถ่ายเทมวลของความชื้นออกจากระบบได้ดี เพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องในระบบสุญญากาศ โดย

ตลอดขบวนการทั้งหมดเป็นระบบปิด (Closed Systems) ทำให้การสูญเสียพลังงานไปสู่บรรยากาศภายนอกต่ำมาก ลดอัตราการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้อย่างมหาศาล อีกทั้งประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักร เนื่องจากเป็นระบบปิดและอุปกรณ์ขับเคลื่อนใช้พลังงานต่ำ กลไกหลักของการระเหยโดยทั่วไปนั้น ปริมาณสุทธิของการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของน้ำขึ้นไปในอากาศนั้นจะเกิดขึ้นได้ถ้ามีความชันของความดันไอน้ำ (Vapor pressure gradient) หรือปริมาณความดันไอน้ำที่ไหลผ่านอากาศ (P) ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างระหว่างความชันของผิวหน้าของเหลวที่ได้รับความร้อน กับความชันของผิวหน้าที่ตรงกันข้ามของของเหลวนั้น ต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง ในบางกรณีการระเหยในบรรยากาศทั่วไป ณ จุดหนึ่งอาจเกิดการระเหยจะเป็นศูนย์ได้ ถ้าอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ 100% โดยเฉพาะการระเหยจากผิวหน้าของวัสดุที่มีความชื้นในประเทศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศสูง จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอเป็นอย่างมาก เนื่องจากว่าการระเหยในระบบเปิดยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ทำให้ส่งผลต่ออัตราการระเหยอีกด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มความร้อนแฝง (Latent heat) ปริมาณ 540 แคลอรี เพื่อทำให้น้ำระเหยไป 1 กรัม ที่อุณหภูมิ 100 °C และหากต้องการระเหยน้ำในภูมิภาคประเทศที่หนาวเย็นถึง 0 °C ต้องใช้ความร้อนถึง 600 แคลอรี ด้วยเหตุนี้จะต้องมีแหล่งความร้อนจากภายนอกด้วย อัน ได้แก่ รังสีดวงอาทิตย์ เตาอบอุณหภูมิสูง เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงเลือกพิจารณาจากการเพิ่มพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ของการสั่นโมเลกุลของน้ำ โดยการระเหยในสภาวะสูญญากาศ ที่เพิ่มความดันไอน้ำ ส่งผลให้จุดเดือดลดลง และพลังงานที่ใช้ในการระเหยจะลดลงตามไปด้วยอย่างมีนัยสำคัญ [8]

ดังนั้น เครื่องกวนระบบปิดภายใต้สภาวะสูญญากาศ โดยมีการใช้พลังงานจากก๊าซ LPG เพื่อผลิตความร้อนในฮีตเตอร์ความร้อนเพื่อการลดความชื้น จึงมีความสำคัญและสามารถใช้แปรรูปผลิตผลทางการเกษตรในพื้นที่ห่างไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยยกระดับการแปรรูปผลผลิตจากการเกษตรกรรมของชุมชน โดยการเลือกใช้เทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม มีประสิทธิภาพสูง ใช้พลังงานต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สอดคล้องตามยุทธศาสตร์กระทรวงพลังงานทางด้านการอนุรักษ์พลังงานและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสอดคล้องตามยุทธศาสตร์กระทรวงพลังงานทางด้านการอนุรักษ์พลังงานและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ กลยุทธ์ส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยพัฒนาและสาธิตเทคโนโลยีอนุรักษ์พลังงานเพื่อการนำไปใช้จริงในวงกว้าง และสอดคล้องตามแผนอนุรักษ์พลังงาน (พ.ศ. 2558 – 2579) กลยุทธ์ด้านการส่งเสริม และสนับสนุนการอนุรักษ์พลังงานโดยอยู่ในกลุ่มมาตรการการสนับสนุนทางการเงิน (EE5) และมาตรการการส่งเสริมการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยี และนวัตกรรมอนุรักษ์พลังงาน (EE8) ด้วยการกระตุ้นให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดปัญหาสภาวะโลกร้อน และการประหยัดการใช้พลังงานของประเทศ

นับว่าก่อให้เกิดประโยชน์แก่ประเทศไทยได้อย่างกว้างขวางและยั่งยืนทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ
- 2) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบทางกายภาพของสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ
- 3) ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

การกวนสับปะรดกวนในระบบสุญญากาศ ช่วยลดพลังงานที่ใช้สำหรับการระเหยน้ำ และช่วยลดพลังงานรวมของทั้งระบบ การทำลายแรงพันธะไฮโดรเจนระหว่าง น้ำ-น้ำ และน้ำ-น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80 °C และปริมาณน้ำสามารถทำให้ควบแน่นได้ทันทีด้วยระบบควบแน่นที่ออกแบบสามารถถ่ายเทมวลของความร้อนออกจากระบบได้ 1,416 L/min ในปริมาณที่จำกัดได้เช่นกัน

1.4 ขอบเขตการดำเนินการวิจัย

- 1) เครื่องกวนสับปะรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศได้รับการออกแบบและสร้างจากผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความรู้และประสบการณ์
- 2) ถังกวนสับปะรดมีความจุขนาด 50 ลิตรตั้งอยู่บนเครื่องชั่งน้ำหนักภายในมีใบกวนพร้อมมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า ติดตั้งอยู่ในถังกวน ที่สภาวะอุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C ที่ควบคุมอุณหภูมิในการกวนไม่เกิน 100 °C จุดเดือดของน้ำในสับปะรดไม่เกิน 80 °C
- 3) ปริมาณสับปะรดที่จะทำการทดลอง อยู่ที่ 10 กิโลกรัม และต้องการตั้งน้ำออกจากสับปะรด 5 กิโลกรัม ในระยะเวลาประมาณ 60 นาที โดยสับปะรดต้องมีอุณหภูมิในการกวนไม่เกิน 100 °C จุดเดือดของน้ำในสับปะรดไม่เกิน 80 °C

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินโครงการฯ คือเพื่อให้เกิดต้นแบบระบบควบแน่นไอน้ำเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดความชื้นจากเครื่องกวนระบบสุญญากาศ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความชื้นได้สูงขึ้น ลดระยะเวลาในการกวนให้สั้นลง ซึ่งการลดระยะเวลาการกวน จะส่งผลให้มีการใช้พลังงานลดลง รักษาคุณภาพของสีสับปะรดให้คงสภาพจากสับปะรดสด ผู้ใช้สามารถลดต้นทุนในการผลิตซึ่งเกิดจากค่าจ่ายในการดำเนินงาน (Operating cost) ได้อย่างมากมาย



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บริบทของการบริโภคพลังงานกับอุตสาหกรรมอาหารแปรรูปของไทย

ประเทศไทยมีปริมาณความต้องการการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ทุกภาคส่วนต้องเร่งหามาตรการที่มีประสิทธิภาพ เพื่อจัดการความต้องการการใช้พลังงานให้เกิดคุณภาพและเกิดความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ ซึ่งนอกจากการหาแหล่งพลังงานที่เหมาะสมและเพียงพอกับความต้องการแล้ว สิ่งสำคัญที่ต้องดำเนินการควบคู่กันไป คือการดำเนินการอนุรักษ์พลังงานมาใช้ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับประเทศไทย เพื่อให้การใช้พลังงานในทุกภาคส่วนใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูง ควบคู่ไปกับการสร้างจิตสำนึกในการอนุรักษ์พลังงานในองค์กร สอดคล้องตามยุทธศาสตร์กระทรวงพลังงาน (พ.ศ. 2555-2559) [9] การอนุรักษ์พลังงานและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ กลยุทธ์ส่งเสริมและสนับสนุน การวิจัยพัฒนาและสาธิตเทคโนโลยีอนุรักษ์พลังงานเพื่อการนำไปใช้จริงในวงกว้าง ปัจจุบันมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสูงส่งส่งผลต่อการใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ เพื่อรองรับการพัฒนาที่เกิดขึ้น โดยพบว่าแนวโน้มการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั่วโลกในปี พ.ศ. 2557 มีสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลสูงถึงร้อยละ 86 จากสัดส่วนการใช้พลังงานทั้งหมด ซึ่งร้อยละ 32 จะถูกใช้ในรูปเชื้อเพลิงน้ำมัน [1, 10, 11] รองลงมาเป็นถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ เมื่อพิจารณาการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) พบว่ามีสัดส่วนการใช้เพียง 1% จากสัดส่วนการใช้พลังงานทั้งหมด ซึ่งประเทศไทยมีแนวโน้มความต้องการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายคล้ายคลึงกับของโลก ปัจจุบันหลายประเทศได้มีการสนับสนุนในการเลือกใช้พลังงานสะอาดที่ลดการก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและบรรยากาศ [12]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก ซึ่งมีการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว การไม่จำกัดผลผลิต ทำให้เกิดผลผลิตส่วนเกิน ผลผลิตล้นตลาดสับปะรดเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจ และสินค้าส่งออกสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ข้อมูลของสมาคมผู้ผลิตอาหารแปรรูป ปี 2560 ประเทศไทยไทยมีผลผลิตสับปะรดในประเทศ ประมาณ 2 ล้านตัน ใช้บริโภคภายในประเทศราว 3 แสนตัน/ปี ขณะที่การส่งออก ในปี 2560 ประมาณ 5.9 แสนตัน มูลค่าการส่งออกประมาณ 24,000 ล้านบาท [13] มีตลาดหลัก คือ สหรัฐอเมริกา เยอรมนี สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ เนเธอร์แลนด์ และ ออสเตรเลีย ขณะที่คู่แข่งที่สำคัญในกลุ่มสับปะรดแปรรูป คือ ฟิลิปปินส์ และอินโดนีเซีย [4] ปัจจุบันไทยเป็นประเทศที่ผลิตสับปะรดมากเป็นอันดับ 4 ของโลก (2 ล้านตัน/ปี) รองจาก ฟิลิปปินส์ คอสตาริกา และบราซิล อย่างไรก็ตาม ผลผลิตสับปะรดในประเทศยังมีส่วนที่เกินความต้องการของตลาดอยู่ถึง 1.1 ล้านตัน ประสบกับปัญหาด้านราคาที่ตกต่ำ จึงมี

ความจำเป็นต้องเร่งดำเนินการส่งเสริม และสนับสนุนให้ผลักดันอุตสาหกรรมการแปรรูปสับปะรด เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้า [3]

ผลิตภัณฑ์สับปะรดของประเทศไทยที่มีการส่งออกมีอยู่หลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นสับปะรดสด สับปะรดแช่เย็น สับปะรดแช่แข็ง สับปะรดแห้ง สับปะรดกวน สับปะรดกระป๋องและน้ำสับปะรดเข้มข้น สถานการณ์และการส่งออก ปี 2560 ตลาดส่งออกสับปะรดแปรรูปที่สำคัญ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา (54.79%) เนเธอร์แลนด์ (15.99%) เยอรมนี (12.24%) รัสเซีย (8.67%) และ สเปน (8.30%) [4, 5] อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมการแปรรูปสับปะรดยังมีผลิตภัณฑ์ไม่หลากหลายมากนัก การพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปผลิตภัณฑ์สับปะรดกวน จึงเป็นแนวทางเพิ่มผลิตภัณฑ์แปรรูปสับปะรดทางเลือกที่น่าจับตามอง ที่จะผลักดันให้มีบทบาทมากขึ้นในตลาด เพื่อลดปัญหาผลผลิตเกินความต้องการของตลาด และเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรและยกระดับชีวิตความเป็นอยู่ให้ดีขึ้น โดยการเลือกใช้เทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม มีประสิทธิภาพสูง และการใช้พลังงานต่ำ และใช้พลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในด้านการพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์/ผลิตผลให้มีมูลค่าสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับนโยบายเร่งด่วนของรัฐบาลในการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน และการยกระดับราคาสินค้าเกษตร

2.2 ความสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี

การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการแปรรูปสับปะรดจะต้องพิจารณาประสิทธิภาพในการลดความชื้นและการปนเปื้อนเป็นสิ่งสำคัญ ปัจจุบันเครื่องกวนได้มีการพัฒนาประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตทั้งในเชิงคุณภาพของผลผลิตหรือในเชิงการใช้พลังงานให้คุ้มค่า Artnaseaw ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องลดความชื้นระบบสุญญากาศต้นแบบขึ้น โดยการใช้เครื่องสูบลมความร้อนเป็นอุปกรณ์ในการให้ความร้อน ซึ่งเครื่องสุญญากาศอาศัยการปรับอุณหภูมิร่วมกับความดัน เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยน้ำออกจากผลผลิตภายใต้สภาวะความดันต่ำกว่าความดันปกติ ใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำกว่า 100 °C มีอัตราการลดความชื้นสูง สามารถช่วยรักษาคุณค่าทางอาหารและรูปร่างของผลผลิตได้ สำหรับการลดความชื้นผลผลิตด้วยเครื่องลดความชื้นระบบสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมร้อนนั้น ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญของการลดความชื้นคือ ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content หรือ EMC) ของผลผลิตซึ่งความชื้นสมดุล คือความชื้นของผลผลิตที่อยู่ในภาวะสมดุลกับอากาศที่แวดล้อมขณะนั้น โดยความชื้นสมดุลที่สภาวะบรรยากาศ จะขึ้นกับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และชนิดของผลผลิต และมีอิทธิพลต่ออัตราการแห้ง (Drying rate) ของผลผลิต

นอกจากนี้ พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำในการลดความชื้นระบบสุญญากาศนี้ยังต่ำกว่าการอบแบบดั้งเดิม (Conventional Dryer) และตลอดกระบวนการทั้งหมดเป็นระบบปิด (Closed

Systems) ทำให้การสูญเสียพลังงานไปสู่บรรยากาศภายนอกต่ำมาก ลดอัตราการใช้พลังงานลดลง กระบวนการผลิตได้อย่างมหาศาล อีกทั้งประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักร เนื่องจากเป็นระบบปิดและอุปกรณ์ขับเคลื่อนใช้พลังงานต่ำ [14]

ดังนั้น เครื่องลดความชื้นระบบสูญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบน้ำร้อน โดยมีการใช้พลังงานจากก๊าซ LPG และพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลิตไฟฟ้าเพื่อผลิตความร้อนในฮีตเตอร์ ความร้อนเพื่อการลดความชื้น จึงมีความสำคัญและสามารถใช้แปรรูปผลิตผลทางการเกษตรในพื้นที่ห่างไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยยกระดับการแปรรูปผลิตผลจากการเกษตรกรรมของชุมชน โดยการเลือกใช้เทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม มีประสิทธิภาพสูง และการใช้พลังงานต่ำ และใช้พลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [15] สอดคล้องตามยุทธศาสตร์กระทรวงพลังงานทางด้านการอนุรักษ์พลังงานและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสอดคล้องตามยุทธศาสตร์กระทรวงพลังงาน ทางด้านการอนุรักษ์พลังงานและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ กลยุทธ์ส่งเสริมและสนับสนุน การวิจัยพัฒนาและสาธิตเทคโนโลยีอนุรักษ์พลังงานเพื่อนำไปใช้จริงในวงกว้าง และสอดคล้องตามแผนอนุรักษ์พลังงาน (พ.ศ. 2558 – 2579) กลยุทธ์ด้านการส่งเสริม และสนับสนุนการอนุรักษ์พลังงานโดยอยู่ในกลุ่มมาตรการการสนับสนุนทางการเงิน (EE5) และมาตรการการส่งเสริมการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยี และนวัตกรรมอนุรักษ์พลังงาน (EE8) ด้วยการกระตุ้นให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงในระบบการลดความชื้น เพื่อลดปัญหาสภาวะโลกร้อน และการประหยัดการใช้พลังงานของประเทศ นับว่าก่อให้เกิดประโยชน์แก่ประเทศชาติได้อย่างกว้างขวางและยั่งยืนทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

2.3 สับปะรด

สับปะรด มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Ananas comosus* (L.) Merr. อยู่ในวงศ์ Bromeliaceae เป็นพืชไร่ที่มีพันธุ์ปลูกหลากหลาย แต่ละพันธุ์มีอัตลักษณ์ด้านกลิ่นรสที่โดดเด่นแตกต่างกันออกไป สับปะรดจัดว่าเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลซึ่งเป็นแหล่งของพลังงาน วิตามิน และแร่ธาตุหลายชนิด นอกจากนี้ยังมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ อาทิ สารประกอบ ฟีนอลิกและเบต้าแคโรทีน [16-23] ซึ่งจัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในร่างกายได้ โดยเฉพาะสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเป็นกลุ่มสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำคัญที่มักพบในผักและผลไม้ทั่วไป นอกจากนี้ สับปะรดยังเป็นแหล่งของเอนไซม์โบรมีเลน ซึ่งเป็นเอนไซม์ในกลุ่มโปรติเอสที่สามารถย่อยโปรตีนให้เปลี่ยนเป็นเปปไทด์สายสั้นและกรดอะมิโน จึงสามารถช่วยให้ร่างกายย่อยอาหารได้ดีขึ้น อีกทั้งยังมีผลช่วยลดความเสี่ยงต่อโรคหัวใจและหลอดเลือด ควบคุมการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็ง [24-30] มีฤทธิ์ด้านการอักเสบในผู้ป่วยโรครูมาตอยด์ ช่วยขับปัสสาวะด้านการอักเสบที่บริเวณลำไส้ และลดอาการปวดและโรคหอบหืดเรื้อรังได้ [28, 31-33]

ตาราง 1 องค์ประกอบของเนื้อผลสับปะรด [34]

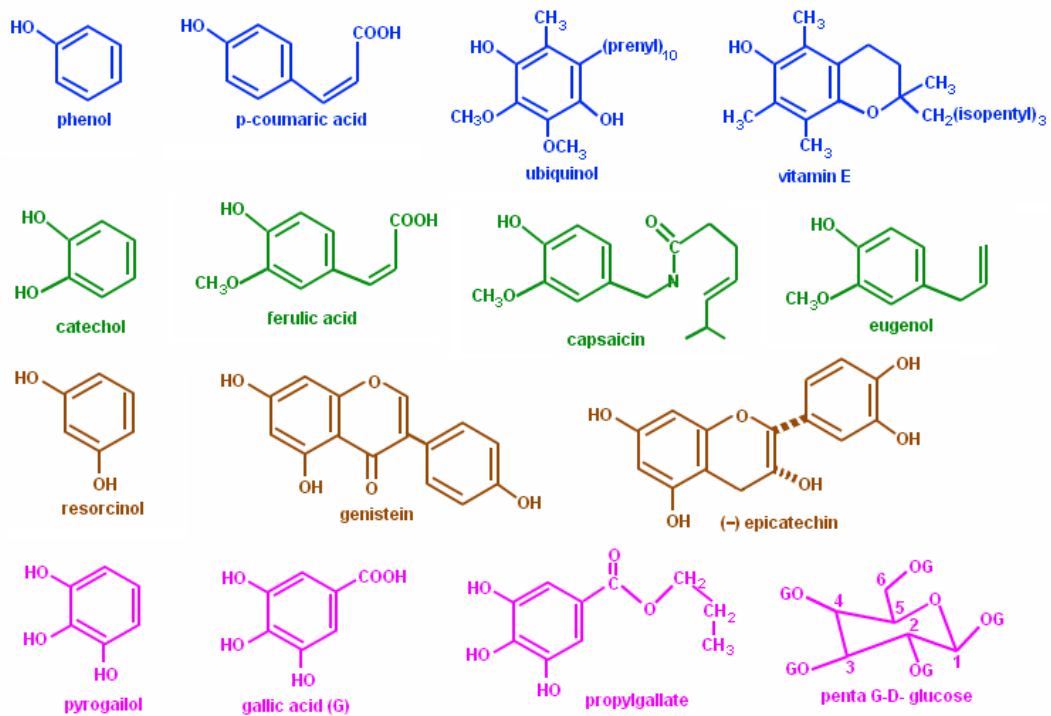
องค์ประกอบ	ปริมาณ	หน่วย (ต่อ 100 กรัมของเนื้อสับปะรด)
ความชื้น	84.90	กรัม
พลังงาน	54.0	แคลอรี
ไขมัน	0.30	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	14.0	กรัม
เยื่อใย	0.50	กรัม
โปรตีน	0.40	กรัม
ฟอสฟอรัส	8.0	มิลลิกรัม
เหล็ก	0.40	มิลลิกรัม
แคลเซียม	22.0	มิลลิกรัม
วิตามินเอ	15.0	หน่วยสากล
วิตามินบี-หนึ่ง	0.09	มิลลิกรัม
วิตามินบี-สอง	0.04	มิลลิกรัม
วิตามินซี	17.0	มิลลิกรัม
ไนอะซิน	0.20	มิลลิกรัม

ที่มา: กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข

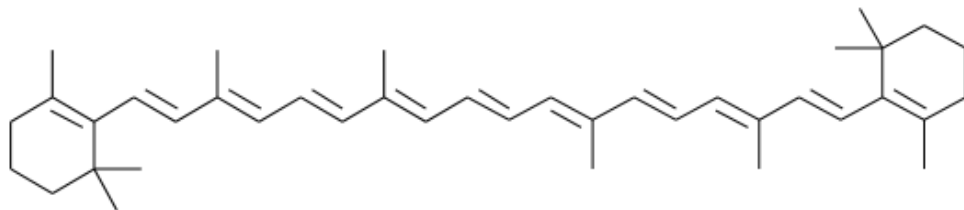
ลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของเนื้อผลสับปะรดที่สามารถตรวจสอบได้ง่ายที่สุดคือสี เนื้อผลสับปะรดทุกสายพันธุ์จะมีสีเหลืองแต่ความเข้มของสีนั้นขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสับปะรด พื้นที่และสภาพภูมิอากาศของแหล่งเพาะปลูกด้วย เนื้อผลสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียจะมีสีเหลือง เนื้อมีลักษณะสัมผัสอ่อน นุ่ม และชุ่มน้ำกว่าสับปะรดพันธุ์ควีนที่มีเนื้อผลสีเหลืองทองและมีเนื้อสัมผัสกรอบ [35] และเมื่อผลสุกสับปะรดทั้งสองสายพันธุ์นี้จะส่งกลิ่นหอมที่แตกต่างกัน สำหรับสมบัติทางเคมีของเนื้อผลที่สามารถนำมาใช้บอกระดับความสุกของผลสับปะรดได้นั้นคือ ค่า pH ปริมาณกรด และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดที่เรียกกันทั่วไปว่า ความหวาน จากการศึกษาเปรียบเทียบพันธุ์สับปะรดที่เพาะปลูกในประเทศไทย สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดที่นิยมเรียกกันว่า ค่าความหวานนั้น พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ทั้งหมดของสับปะรดพันธุ์ภูเก็ต มีค่าสูงกว่าสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 16.09°Brix และ 13.04°Brix ตามลำดับ สับปะรดพันธุ์ภูเก็ตนั้นมีรสชาติหวานกว่าสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในสับปะรดพันธุ์ Smooth Cayenne (8.16%fw) นั้นมีค่าสูงกว่า Red Spanish

(6.45%fw) [33, 36-42] และสับปะรดพันธุ์ภูแลและนางแลมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยมีค่าเท่ากับ 14.45°Brix และ 13.10°Brix ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยที่วิเคราะห์สมบัติทางเคมีเชิงลึกถึงระดับชนิดและปริมาณของกรดอินทรีย์หลักในน้ำสับปะรด มีการนำน้ำสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย (*Ananas comosus* cv. Smooth Cayenne) ที่ปลูกต่างพื้นที่ในจังหวัดลำปาง เก็บเกี่ยวช่วง 160 วันหลังดอกบาน มาวิเคราะห์ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์และน้ำตาลโดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) พบว่าน้ำสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียมีปริมาณกรดอินทรีย์หลักคือ กรดซิตริก อะซิติก และมาลิก โดยพบในช่วงร้อยละ 0.58-0.78, 0.09-0.32 และ 0.12 - 0.24 % (w/v) ตามลำดับ โดยกรดอะซิติกและมาลิกมีแนวโน้มลดลงเมื่อเก็บสับปะรดให้สุกทั้งผล และปริมาณน้ำตาลหลักที่พบคือน้ำตาลซูโครส (7.55 - 8.72%) ฟรุคโตส (1.90-3.81%) และ กลูโคส (2.30-3.00%) โดยพบว่าน้ำตาลฟรุคโตสและกลูโคสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่น้ำตาลซูโครสลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างการบ่มให้สุก จากการวิเคราะห์ชนิดของสารอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ของสับปะรดด้วยวิธี HP-SPME ร่วมกับ GC-MS พบว่าสารระเหยที่สำคัญในเนื้อผลสับปะรดได้แก่สารประกอบจำพวกเอสเทอร์ เทอปีน คีโตนและแอลดีไฮด์ ซึ่งจะพบสารเหล่านี้ได้ในส่วนเนื้อมากกว่าส่วนอื่นๆ สารระเหยสำคัญที่ให้กลิ่นหอมของส่วนเนื้อสับปะรดได้แก่ ethyl 2-methylbutanoate, ethyl hexanoate, 2,5-dimethyl-4-hydroxy-3(2H)-furanone (DMHF), decanal, ethyl 3-(methylthio) propionate, ethyl butanoate, และ ethyl (E)-3-hexenoate และส่วนแกนมีสารระเหยสำคัญ ได้แก่ ethyl 2-methylbutanoate, ethyl hexanoate และ DMHF [43] นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่าสารระเหยที่สำคัญที่พบในเนื้อผลสับปะรดสด ได้แก่ methyl hexanoate, ethyl hexanoate, ethyl 3-methylthiopropionate and 1-(E,Z)-3,5-undecatriene [44, 45]



ภาพ 1 โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก



ภาพ 2 โครงสร้างของเบต้าแคโรทีน

สับปะรด นับว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย มีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 600,000 ไร่ และมีผลผลิตโดยรวมประมาณ 2.0 – 2.2 ล้านตันต่อปี ไทยเป็นผู้ส่งออกสับปะรดและผลิตภัณฑ์ในลำดับต้นๆ ของโลก มูลค่าการส่งออกสูงถึง 25,000 ล้านบาท ผลิตภัณฑ์ที่ส่งออกมากคือสับปะรดกระป๋อง ร้อยละ 80 สับปะรดสด ร้อยละ 10 สับปะรดอบแห้ง ร้อยละ 5 และสับปะรดกวน ร้อยละ 5 [47, 48] โดยมีทั้งการส่งออกในตราสินค้าของตนเองและการรับจ้างผลิต โดยคู่แข่งสำคัญของไทยในอุตสาหกรรมสับปะรด คือ ฟิลิปปินส์ และอินโดนีเซีย

แหล่งเพาะปลูกสับปะรดที่สำคัญ ได้แก่ ประจวบคีรีขันธ์ ระยอง ชลบุรี เพชรบุรี พิษณุโลก พันธุ์ที่นิยมปลูก คือ พันธุ์ปัตตาเวีย เนื่องจากมีเนื้อแน่น รสหวานปานกลางหรือหวานจัด สามารถปลูกได้ทั่วไป สำหรับพันธุ์รับประทานสด ประมาณร้อยละ 10 มีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพื้นที่ปลูก

กล่าวคือ พันธุ์ตราดสีทอง พันธุ์ทองระยอง พันธุ์ภูเก็ท พันธุ์ภูแล พันธุ์สวี พันธุ์นางแล ผลผลิต สับปะรดภายในประเทศ ร้อยละ 70 – 80 ส่งเข้าโรงงานแปรรูป ที่เหลือใช้บริโภคภายในประเทศ ร้อย ละ 20 – 30 ปัจจุบันมีสับปะรดพันธุ์ใหม่ที่กำลังเป็นที่นิยม คือ สับปะรดพันธุ์ MD2 เป็นพันธุ์ที่ พัฒนาขึ้นที่ฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา มีคุณสมบัติโดดเด่นทั้งภายในและภายนอก รสชาติหวาน มี กลิ่นหอมเฉพาะตัว เนื้อมีสีเหลืองเข้ม เนื้อต้น แน่น ไม่เป็นโพรง น้ำหนักผลเฉลี่ย 1.7 – 1.8 กิโลกรัม จากข้อมูลพบว่า มีวิตามินซีสูงถึง 4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับสับปะรดพันธุ์อื่นๆ รับประทานแล้วไม่กัด ลิ้น ภายนอกเมื่อผลแก่จะเปลี่ยนจากผิวสีเขียวเป็นสีเหลืองทองทั้งผล ทำให้เป็นที่ดึงดูด สามารถ บังคับให้ต้นสับปะรดออกดอกได้ง่าย และมีอายุการเก็บเกี่ยวที่เร็วกว่าพันธุ์ปัตตาเวีย ลักษณะของใบ พันธุ์ MD2 มีสีเขียวตลอดทั้งใบ



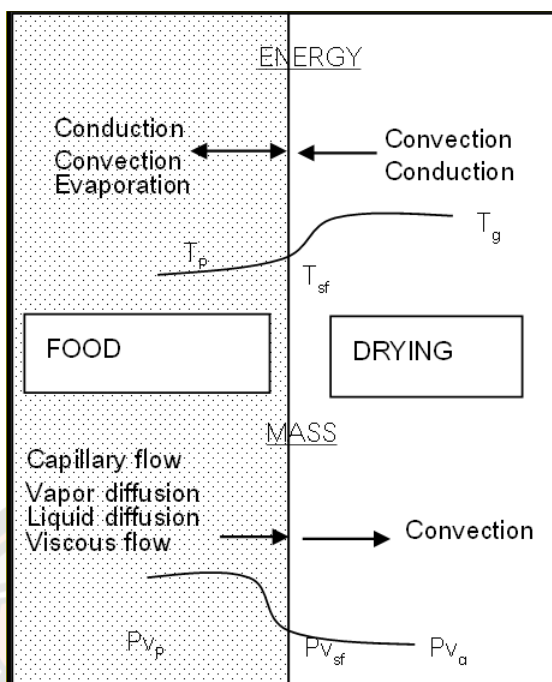
ภาพ 3 (ก) สับปะรดพันธุ์ MD2 และ (ข) สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย

สับปะรดต้องการอากาศค่อนข้างร้อน อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 24 – 30 °C ปริมาณ น้ำฝนที่ต้องการอยู่ในช่วง 1,000 – 1,500 มิลลิเมตรต่อปี แต่ต้องตกกระจายสม่ำเสมอตลอดทั้งปีและ มีความชื้นในอากาศสูง สับปะรดชอบดินร่วน ดินร่วนปนทราย ดินปนลูกรัง ดินทรายชายทะเล และ ชอบที่ลาดเท อาทิ ที่ลาดเชิงเขา สภาพดินมีความเป็นกรดเล็กน้อยคือประมาณ 4.5 – 5.5 แต่ไม่เกิน 6.0 [49]

2.4 การลดความชื้นในผลิตภัณฑ์

การลดความชื้นเป็นวิธีการแปรรูปอาหารที่เก่าแก่และมีความหลากหลายมาก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ยืดอายุการจัดเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ [50] มีผลยับยั้งจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสียให้ชะลอการเจริญ รวมทั้งลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ กระบวนการให้ความร้อน อาทิ การเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงสี การสลายตัวของสารออกฤทธิ์ที่มีประโยชน์ ไม่ว่าจะเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในรูปแบบต่างๆ และสารหอมระเหย ที่เกิดจากการทำงานของเอนไซม์และความร้อน รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในลักษณะต่างๆ และเพื่อเพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ผลไม้และผักแห้ง [51, 52]

โดยมากแล้วเกิดจากการลดความชื้นจากการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ ผ่านกระบวนการให้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน [53] การวิจัยและพัฒนาเพื่อช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการให้ความร้อนเป็นกุญแจสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแห้งแบบต่างๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปที่สามารถรักษากลิ่นรสและคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้ใกล้เคียงกับผลผลิตสด โดยการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับเวลา ทั้งยังได้รับผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง อาทิ อุณหภูมิและความเร็ว หรือพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตเอง ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนมีการถ่ายเทเกิดขึ้นคือ การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกไปยังผิวหน้าของวัสดุอาหาร และการถ่ายเทมวลจากข้างในไปยังผิวของวัสดุอาหาร เนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภาพที่ 4 พลังงานถ่ายเทสู่วัสดุโดยการพาความร้อนเกิดขึ้นเมื่อพลังงานสำหรับการระเหยน้ำได้รับจากกระแสอากาศร้อนที่ไหลผ่านวัสดุ ดังเช่น การลดความชื้นแบบถาด, belt-conveyor, flash, fluid-bed และ spray drying การนำความร้อนเกิดขึ้นเมื่อวัสดุสัมผัสกับผิวร้อนตั้งในกรณีของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหรือ rotary dryer



ภาพ 4 แผนภาพปรากฏการณ์ลดความชื้นในผลิตภัณฑ์อาหาร

2.5 การเกิดออกซิเดชันของวิตามินซี ทำให้สูญเสียคุณสมบัติและคุณค่าทางโภชนาการ

การออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน ทำให้เกิดกลิ่นหืนจากปฏิกิริยา โดยมีลักษณะแตกต่างกัน ดังนี้

1. ปฏิกิริยาอโตออกซิเดชัน (Auto-oxidation) เกิดจากออกซิเจนที่มีอยู่ในอาหารทำปฏิกิริยากับน้ำมันหรือไขมัน โดยมีแสง อุณหภูมิ และโลหะหนัก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์ของไขมัน (Hydrolysis of Fat) อาหารที่มีทั้งไขมันและน้ำเป็นส่วนประกอบ จะเกิดการไฮโดรไลซ์ของไขมัน โดยทำให้ไตรกลีเซอไรด์แตกตัวเป็นกลีเซอรอล และกรดไขมันอิสระ กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นบางตัวจะมีกลิ่นรสที่ไม่พึงปรารถนา

2.6 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน (Oxidation of Fats)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน (Oxidation of Fats) เกิดได้ 2 ลักษณะ คือ

1. Ketone rancidity ไขมันจะถูกไฮโดรไลซ์บางส่วน ได้กรดไขมันอิสระ กรดไขมันอิสระที่อิมัลชันจะถูกออกซิไดซ์ให้สารประกอบที่มีกลิ่นหอม โดยมีแบคทีเรียหรือเชื้อราที่ผลิตเอนไซม์ช่วยเร่งปฏิกิริยา
2. Aldehyde rancidity กรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันถูกออกซิไดซ์โดยไม่เกิดการไฮโดรไลซ์ ในสภาวะที่มีแสง ความร้อน และโลหะหนักเป็นตัวเร่ง

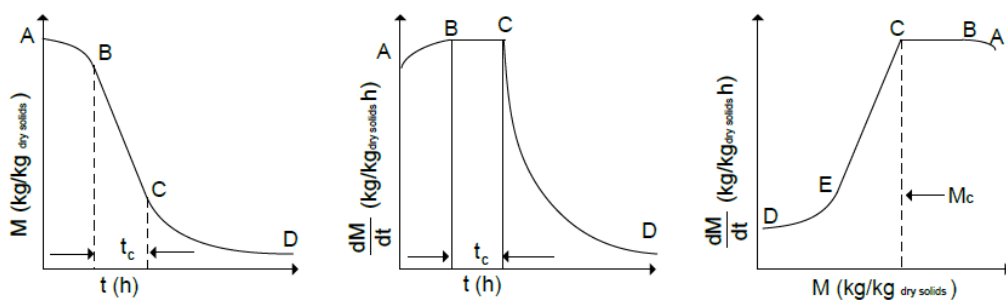
การเกิดสารประกอบอะโครเลอิน (Acrolein) เกิดจากไขมันได้รับความร้อนเป็นเวลานานในสภาวะที่มีน้ำ เกิดการไฮโดรไลซิสได้กลีเซอรอล โดยกลีเซอรอลนั้นเกิดการสูญเสียที่อุณหภูมิสูง เกิดเป็นสารอะโครเลอิน ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ อะโครเลอินสามารถเกิดขึ้นได้ในการทอดอาหาร

การพอลิเมอไรส์ของไขมัน เกิดจากการที่ไขมันได้รับความร้อนเป็นเวลานาน ในสภาวะที่มีออกซิเจน ไขมันที่ไม่อิ่มตัวเกิดการพอลิเมอไรส์ ได้ไขมันที่มีโมเลกุลที่เป็นสายยาว เมื่อทิ้งตัวให้เย็นลงจะมีลักษณะข้นเหนียวและเหน็ด ไม่กลับคืนสภาพ

การทำปฏิกิริยากับตีบุกและเหล็ก อาหารที่มีโปรตีนสูง เมื่อนำไปบรรจุกระป๋อง โปรตีนจะทำปฏิกิริยากับตีบุกจำนวนเล็กน้อยที่ละลายอยู่ ให้กลิ่นรสของอาหารเปลี่ยนแปลงไป บางครั้งอาหารเกิดเป็นตะกอนสีขาว การป้องกันทำได้โดยการเคลือบกระป๋องด้วยแล็กเกอร์

2.7 จลนศาสตร์การลดความชื้น

การลดความชื้นส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการลดความชื้น ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพของการลดความชื้นโดยพฤติกรรม การลดความชื้นโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุ เมื่อสมมติให้อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศเหนือผิวของวัสดุอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการและมีการถ่ายเทความร้อน สู่วัสดุโดยการพาความร้อน การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตลอดกระบวนการลดความชื้นแสดงในภาพที่ 5 โดยแบ่งการลดความชื้นออกเป็น 3 ช่วงคือ



ภาพ 5 การลดลงของความชื้นวัสดุ

ช่วง A-B ช่วงนี้เป็นช่วงสภาวะที่ผิวของวัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการลดความชื้น ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทสู่ผิววัสดุจนถึงค่าๆ หนึ่งซึ่งมีความสมดุลระหว่างผิววัสดุกับอากาศ

ช่วง B-C ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการลดความชื้นคงที่ (Constant rate period of drying) ช่วงนี้ผิววัสดุยังคงชุ่มไปด้วยน้ำซึ่งจะถูกนำออกจากผิววัสดุด้วยการระเหย ซึ่งอัตราการลดความชื้นในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของการลดความชื้น อัตราการถ่ายเทมวลมีความสมดุลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้งคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอบแห้ง

ช่วง C-D ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการลดความชื้นลดลง (Falling rate period) เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลง ณ จุด C ใน ภาพที่ 5 อัตราการลดความชื้นเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) เมื่อกระบวนการลดความชื้นดำเนินต่อไปอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยปกติช่วงอัตราการลดความชื้นลดลงประกอบไปด้วยสองช่วงคือ ช่วงของการลดความชื้นลดลงส่วนที่ 1 (C-E) ช่วงนี้ผิวของวัสดุจะแห้งและอัตราการลดความชื้นลดลง ช่วงของการลดความชื้นลดลงส่วนที่ 2 (E-D) ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุและผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น อัตราการไหลของอากาศ มีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาตลอดกระบวนการลดความชื้นจะพบว่าช่วงของการลดความชื้นลดลงเป็นช่วงหลักที่เกิดขึ้น

อัตราการลดความชื้นวัสดุโดยทั่วไปที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วนั้นมีปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่ออัตราการลดความชื้นคือ

1) ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการลดความชื้น ถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อวัสดุและเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนโมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการลดความชื้นเร็วขึ้น

2) ขนาดและรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมาก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วขึ้นวัสดุทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุดีขึ้น อัตราการลดความชื้นจึงเร็วขึ้น

3) ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ วัสดุที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลายๆ ชั้นในถาด ทำให้ปริมาณของวัสดุต่อถาดมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้บริเวณนั้นมีอัตราการลดความชื้นที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงเป็นแบบชั้นบางเพื่อให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4) อุณหภูมิของอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการลดความชื้นจะเร็วขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในเนื้อวัสดุได้ดีจึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการลดความชื้นเร็วขึ้นแต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการลดความชื้นด้วย

5) ความชื้นของอากาศร้อน หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุได้ยาก

6) ความดันของบรรยากาศ การลดความชื้นโดยทั่วไปมักทำที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ ถ้าหากมีการลดความดันของบรรยากาศในขณะที่การลดความชื้นจะทำให้อัตราการลดความชื้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากจะทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง ซึ่งการลดความชื้นประเภทนี้เหมาะกับการลดความชื้นวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องจากความร้อน เครื่องอบแห้งมีการลดความดันในสภาวะการลดความชื้น เช่น เครื่องลดความชื้นระบบปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศแบบลูกกลิ้ง เป็นต้น

7) ความเร็วลมร้อน ถ้าความเร็วของลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุได้ดีขึ้นทำให้อัตราการลดความชื้นเร็วขึ้น

8) คุณสมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการลดความชื้นคือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองวัสดุ

2.8 การลดความชื้นโดยการใช้อากาศหรือลมร้อน

ความสามารถของอากาศที่จะกำจัดความชื้นออกจากอาหารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ ปริมาณของไอน้ำที่อยู่ในอากาศแสดงได้ด้วยค่าความชื้นสัมบูรณ์ ซึ่งเป็นมวลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง (kg/kg) หรือที่เรียกว่า ปริมาณ ความชื้น หรือแสดงในรูปความชื้นสัมพัทธ์ (RH) มีค่าเป็น % ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความดันย่อย ของไอน้ำในอากาศต่อความดันของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกันและคูณด้วย 100 ไชโครเมตริกส์เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ

เรียกอุณหภูมิของอากาศที่วัดโดยกระเปาะเทอร์โมมิเตอร์ว่า อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และถ้าเอาผ้าเปียกหุ้มกระเปาะเอาไว้ ความร้อนจะถูกกำจัดออกจากผ้าโดยการ ระเหยของน้ำและอุณหภูมิจะลดต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง เรียกอุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้ว่า อุณหภูมิกระเปาะเปียก เราสามารถใช้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้งสองนี้ในการหาค่าความชื้นสัมพัทธ์บนกราฟไชโครเมตริกส์ได้ การเพิ่มอุณหภูมิหรือลด RH ทำให้น้ำระเหยจากผิวที่เปียกเร็วขึ้นและทำให้อุณหภูมิลดลงมาก อุณหภูมิจุดน้ำค้างเป็นอุณหภูมิที่อากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำ (100 %RH) และทำให้อากาศเย็นลงกว่าจุดน้ำค้างจะทำให้เกิดการควบแน่นในอากาศ ส่วนเส้นกราฟทำให้เย็นแบบอะเดียบาติก เป็นเส้นกราฟที่เอียงขนานกันและตัดกับกราฟและแสดงให้เห็นว่าความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศลดลงในขณะที่อุณหภูมิของอากาศนั้นสูงขึ้น

คำจำกัดความของศัพท์ไชโครเมตริกส์ ศัพท์ไชโครเมตริกส์ (Psychrometric Terms) หมายถึง คำศัพท์ที่แสดงคุณสมบัติอากาศชื้น เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น

ความดันไอ คือส่วนของความดันย่อยที่กระทำโดยโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชั้น ถ้าอากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำ เรียกความดันไอนี้ว่า ความดันไออิ่มตัว ค่าความดันไออิ่มตัวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิความชื้น สัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ คืออัตราส่วนของเศษส่วนเชิงโมลหรือความดันไอของไอน้ำในอากาศต่อเศษส่วนโมลหรือความดันไอของไอน้ำในอากาศที่อิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 0-1

อัตราส่วนความชื้น คือมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ แห่งหนึ่งหน่วยมวล

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง คืออุณหภูมิของ อากาศชั้นที่ชี้บอกโดยเทอร์โมมิเตอร์ทั่วๆ ไป อุณหภูมิกระเปาะเปียก คืออุณหภูมิของอากาศชั้นที่บอกโดยเทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะถูกหุ้มด้วยผ้ากอสเปียก และมีลมเป่าผ่านกระเปาะด้วยความเร็วอย่างน้อย 4.6 m/s นี้เรียกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงไซโครเมตริก

เอนทัลปี (Enthalpy) เอนทัลปีของอากาศชั้น คือ ค่าปริมาณความร้อนของอากาศชั้นต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง ที่สูงกว่าค่าที่อุณหภูมิอ้างอิงที่กำหนดขึ้น ในการคำนวณโดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับ ความแตกต่างของเอนทัลปี ดังนั้นอุณหภูมิอ้างอิงจะเป็นอุณหภูมิใดก็ได้ โดยทางปฏิบัติ เรา มักจะให้อุณหภูมิอ้างอิงของน้ำ = 32 °F และของอากาศแห้ง = 0 °F ในระบบอังกฤษ และอุณหภูมิ อ้างอิงของทั้งน้ำและอากาศ = 0 °C ในระบบเมตริก และระบบสากล

ปริมาตรจำเพาะของอากาศชั้นคือปริมาตรต่อหนึ่งหน่วย มวลของอากาศแห้ง

ความชื้นสมมูลของวัสดุ ความชื้นสมมูลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการลดความชื้นวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่เช่นอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดหนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วยเราเรียกความชื้นในขณะนั้นว่าความชื้นสมมูล ค่าความชื้นสมมูลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความชื้นสมมูลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและ Water Activity ในวัสดุ ซึ่งก็มีความหมายเหมือนกันเพราะ Water Activity นี้มีค่าเท่ากับความชื้น สัมพัทธ์ของอากาศ เมื่อวัสดุและอากาศอยู่ในสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ และสมมุติด้วยว่า ไอน้ำเป็นก๊าซในอุดมคติ

ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ หมายถึง ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวให้เป็นไอที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ความร้อนแฝงของน้ำในวัสดุอาหารจะมีค่าสูงกว่า น้ำที่อยู่อย่างอิสระโดยเฉพาะเมื่อความชื้นต่ำจากข้อมูลความชื้นสมมูล ความร้อนที่ใช้ในการระเหย น้ำออกจากรวมวัสดุขึ้นอยู่กับความชื้นและอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุต่ำ ค่าความร้อน แฝงของการระเหยจะสูง

ความร้อนจำเพาะ หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงหนึ่งองศา ที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ ค่าความร้อนจำเพาะที่อยู่ในผลิตภัณฑ์อาหารมักขึ้นอยู่กับความชื้นของอาหารในลักษณะเชิงเส้น หรือสัดส่วนของส่วนประกอบในตัวอย่างอาหาร เช่น น้ำ ไขมัน แป้ง เป็นต้น

ความหนาแน่น เป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับวิเคราะห์การลดความชื้น ความหนาแน่นแบ่ง ออกเป็นสองชนิด คือ ความหนาแน่นจริง และความหนาแน่นปรากฏ ความหนาแน่นจริง หมายถึง อัตราส่วนของมวลของวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุ ส่วนความหนาแน่นปรากฏ (Bulk Density) มักใช้กับวัสดุเม็ดที่กองรวมกันเป็นปริมาณมาก และหมายถึงอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรทั้งหมดซึ่งรวมปริมาตรของเม็ดวัสดุและปริมาตรของอากาศที่แทรกตัวอยู่ตามช่องว่าง

ช่วงอัตราการลดความชื้นคงที่ ในขณะที่ลดความชื้นจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุ และอากาศเหมือนกับการถ่ายเทความร้อน และมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์คือ เกิดขึ้นเฉพาะที่รอบ ๆ ผิววัสดุเท่านั้น ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการลดความชื้นคือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม เมื่อต้องการให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนหรือความร้อนแฝงของการ ระเหยน้ำในวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นทำได้โดยเพิ่มความเร็วม อันเป็นผลให้ความหนาของชั้นอากาศนิ่งที่อยู่รอบ ๆ ผิววัสดุมีค่าลดลง หรือโดยการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งจะส่งผลต่างของอุณหภูมิของ กระแสการไหลอิสระกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกเพิ่มขึ้น หรือโดยการลดความชื้นสัมพัทธ์อากาศซึ่ง จะให้ค่าผลต่างของอัตราส่วนความชื้นของน้ำกับกระแสการไหลอิสระมีค่าเพิ่มขึ้นหรือโดยการเพิ่ม ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งอาจทำได้โดยลดขนาดวัสดุให้เล็กลงและช่วงอัตราการลดความชื้นลดลง

ช่วงอัตราการลดความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤติ การถ่ายเทความร้อน และมวลมิได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น แต่เกิดภายในเนื้อของวัสดุด้วยการเคลื่อนที่ของน้ำจาก ภายในวัสดุมายังผิวซ้ากว่าการพาความร้อนจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการลดความชื้นลดลง อัตราการระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุในขณะนั้น อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก

Water Activity (a_w) คืออัตราส่วนระหว่างค่าความดันไอของน้ำในสารละลายต่อความดันไอน้ำบริสุทธิ์ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ในกรณีของอาหารจะหมายถึง ค่าสัดส่วนการลดลงของน้ำในอาหาร หรืออีกนัยหนึ่งเป็นค่าความดันไอของน้ำในอาหารนั่นเอง ค่า Water Activity ของอาหารจะมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของความดันไอของความชื้นในอากาศต่อความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่า Water Activity มีค่าเท่ากับ

ความชื้นสัมพัทธ์
100

ค่า Water Activity ของอาหารสดจะมีค่าสูงกว่าอาหารแห้ง

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสารอาหาร (วิตามิน และสารต้านอนุมูลอิสระ) รวมถึงสารออกฤทธิ์สำคัญในระหว่างการลดความชื้นอาหารและวัสดุชีวภาพถูกแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบของอันดับการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของจุลชีวศาสตร์การลดความชื้น

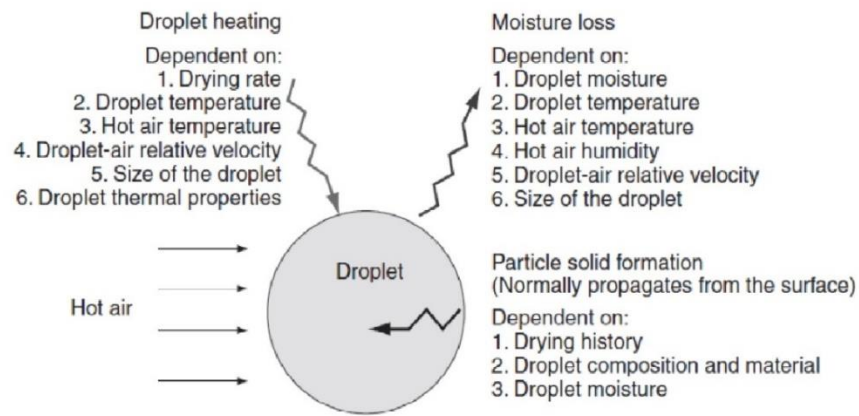
2.9 อัตราความชื้น [54]

ในการแสดงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบจะสามารถแสดงได้ด้วยปริมาณน้ำต่อปริมาณมวลรวมเปียก (ค่า wet base) หรือปริมาณน้ำต่อปริมาณวัตถุดิบแห้ง (ค่า dry base) ในขณะที่ปริมาณรวมจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อคำนวณความชื้นแบบ wet basis จะทำให้ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในการคำนวณทางอุตสาหกรรมจะใช้ค่าความชื้นที่คำนวณแบบ dry basis ซึ่งมวลแห้งเป็นฐานในการคำนวณ เนื่องจากมวลแห้งนี้มีค่าคงที่ตลอดการอบ จึงมีความสะดวกมากกว่า ถ้าให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ wet basis เท่ากับ $\%MC_{wb}$ และให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ dry basis เท่ากับ $\%MC_{db}$ แล้ว ค่าทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กันดังต่อไปนี้

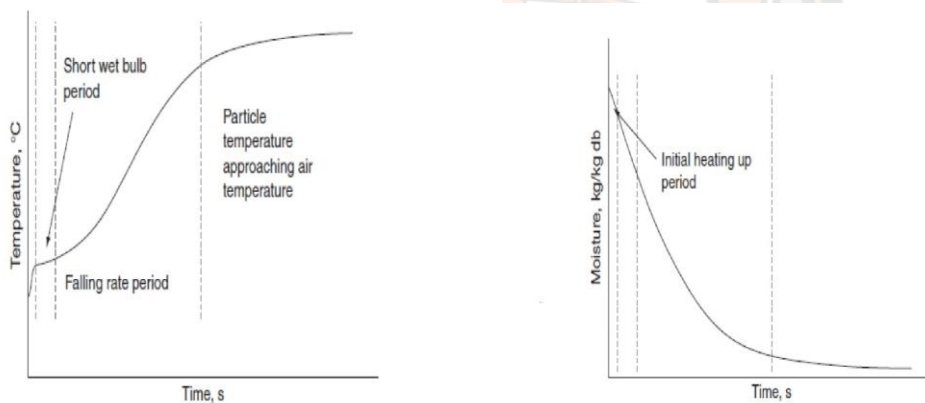
$$\begin{aligned} \text{ความชื้นมาตรฐานเปียก} & \quad \%MC_{wb} = \frac{M_w}{M_w + M_s} \times 100 \\ \text{ความชื้นมาตรฐานแห้ง} & \quad \%MC_{db} = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \end{aligned}$$

2.10 กลไกการระเหยน้ำออก

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาจะไม่คงที่ ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นบริเวณผิวนอกของวัสดุจะเกิดการระเหยได้อย่างรวดเร็ว เมื่อสัมผัสกับความร้อน แต่ความชื้นที่อยู่ภายในจะเกิดการระเหยออกไปได้ช้ากว่า เนื่องจากต้องเคลื่อนที่จากด้านในสู่ด้านนอกก่อน ซึ่งการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในอาจเกิดจากหลายกลไก อาทิ การแพร่ของของเหลว (Liquid Diffusion) การแพร่ของไอ (Vapor Diffusion) การแพร่แบบ Knudsen (Knudsen Diffusion) ซึ่งเกิดขึ้นในการลดความชื้นที่อุณหภูมิและความดันต่ำมากๆ เป็นต้น กลไกที่เกิดระหว่างการลดความชื้น แสดงในภาพที่ 6 โดยแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลง (การถ่ายโอน) ของมวลสารและพลังงานที่เกิดขึ้น



ภาพ 6 การถ่ายโอนมวลสารและพลังงานระหว่างการลดความชื้น



ภาพ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

2.11 แรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับกลูโคส

การซึมตามรูเล็ก (Capillary action) คือปรากฏการณ์ที่ของไหลที่สัมผัสกับวัตถุแล้วมีลักษณะสูงขึ้นหรือต่ำลง เนื่องจากอิทธิพลของแรงยึดติดและแรงเชื่อมแน่น เช่น บริเวณที่น้ำสัมผัสกับผิวแก้วจะมีระดับน้ำสูงขึ้นเล็กน้อย เพราะแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลของแก้วมีมากกว่าแรงเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของน้ำ แต่ถ้าเป็นบริเวณที่ปรอทสัมผัสกับผิวแก้วระดับปรอทจะต่ำลงเล็กน้อย เนื่องจากแรงเชื่อมแน่นระหว่างอะตอมของปรอทมีมากกว่าแรงยึดติดระหว่างอะตอมของปรอทกับโมเลกุลของแก้ว (ภาพที่ 7) และเมื่อนำหลอดแก้วขนาดเล็กที่มีรัศมี r จุ่มลงใน

ของไหลที่มีแรงยึดติดมากกว่าแรงเชื่อมแน่น [62] จะเห็นของไหลสูงขึ้นเป็นระยะ h โดยของไหลมีแรงดึงผิว F ทำมุม θ กับแนวตั้ง สามารถแสดงความสัมพันธ์สมการที่ (3) ได้ดังนี้

$$\gamma = \frac{F}{2\pi r} \quad (1)$$

$$F = 2\gamma\pi r \quad (2)$$

พิจารณาแรงกดขึ้นทั้งหมด

$$F\cos\theta = 2\gamma\pi r\cos\theta$$

พิจารณาแรงกดลงทั้งหมด

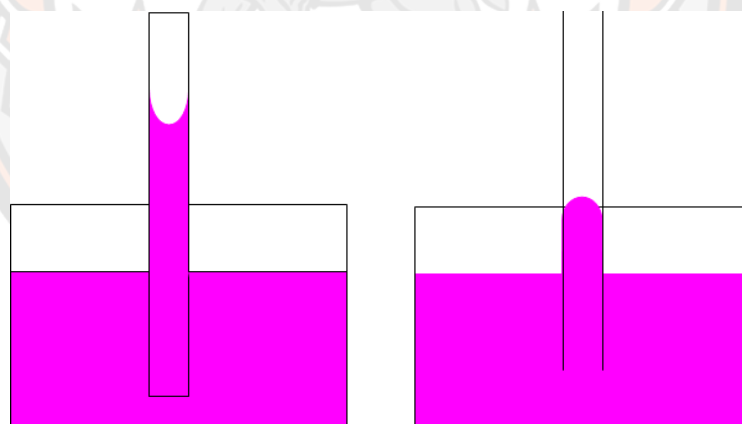
$$W = mg = \rho Vg = \rho\pi r^2 hg$$

ตามหลักสมดุล;

ผลรวมแรงขึ้น = ผลรวมแรงลง

$$2\gamma\pi r\cos\theta = \rho\pi r^2 hg$$

$$\gamma = \frac{\rho r h g}{2\cos\theta} \quad (3)$$



แรงยึดติด > แรงเชื่อมแน่น

แรงยึดติด < แรงเชื่อมแน่น

ภาพ 8 ผลของแรงเชื่อมแน่นและแรงยึดติดต่อการเกิดแรงคาปิลลารีในของเหลว

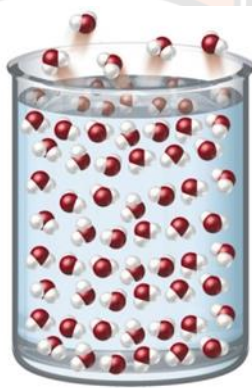
2.12 การเปลี่ยนแปลงสถานะของของเหลว

การเปลี่ยนแปลงสถานะ (Phase Changes) ของของเหลวเกิดขึ้นเมื่อของเหลวได้รับความร้อน อุณหภูมิของของเหลวจะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคมีการสั่นมากขึ้นและเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อนุภาคข้างเคียงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งบางอนุภาคของของเหลวมีพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (โมเลกุล อะตอม หรือไอออน) อนุภาคของของเหลวจึงเริ่มเคลื่อนที่และ

อยู่ห่างกันมากขึ้น ของเหลวจึงเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นของก๊าซ โดยการเปลี่ยนสถานะสามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี ได้แก่

2.13 การระเหย

การระเหย (Evaporation) เป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนสถานะของของเหลวให้กลายเป็นไอโดยโมเลกุลที่ผิวหน้าของของเหลว หลุดออกไปจากของเหลวกลายเป็นโมเลกุลในภาวะไอ ปฏิกิริยาการนี้ จะเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของของเหลวเท่านั้น เมื่อน้ำของเหลวบรรจุในภาชนะที่ไม่มีฝาปิดและปล่อยให้ทิ้งไว้ ของเหลวจะค่อยๆ ระเหยออกไป ส่งผลให้มีปริมาตรลดลงและหมดไปในที่สุด การระเหยมีความสัมพันธ์ต่อพื้นที่ผิวหน้า ยิ่งมีพื้นที่ของผิวหน้ามากเท่าไร การระเหยก็ยิ่งเกิดได้เร็วขึ้นเท่านั้น



ภาพ 9 การเปลี่ยนสถานะบริเวณผิวหน้าของเหลวด้วยการระเหย

หากการระเหยเกิดในระบบปิด ช่วงเวลาแรกอัตราการระเหยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากของเหลวยังมีพลังงานจลน์เฉลี่ย (Average kinetic energy) สูง และเมื่อเวลาผ่านไป โมเลกุลเกิดการชนกันเองหรือชนผนัง เกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ โมเลกุลจะมีพลังงานลดลงเคลื่อนที่ช้าลงและเข้ามาใกล้ชิดกันมากขึ้นจนโมเลกุลบางส่วนเกิดการควบแน่นกลับมาเป็นของเหลว อัตราการระเหยจึงเริ่มลดลงและอัตราการควบแน่นเป็นของเหลวจะเพิ่มขึ้น หากอัตราเร็วของการระเหยมีค่าเท่ากับอัตราเร็วของการควบแน่น จะเกิดความดันไอ (Vapor pressure) สมดุลของสารประกอบซึ่งมีความสัมพันธ์กับประเภทของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล และมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับจุดเดือด-จุดหลอมเหลวของสารประกอบ (ภาพที่ 9) หากความดันไอของสารประกอบมีค่ามาก แสดงให้เห็นว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมีค่าน้อย มีแนวโน้มว่าต้องการพลังงานเปลี่ยนสถานะน้อย จุดเดือด-จุดหลอมเหลวจึงต่ำ ในทางตรงกันข้าม หากความดันไอต่ำ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจะมีค่ามาก จึงมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานสำหรับเปลี่ยนสถานะสูง แนวโน้มจุดเดือด-จุดหลอมเหลวจึง

สูง กรณีตัวอย่างของการระเหย ได้แก่ การระเหยของเหงื่อจากผิวหนัง โมเลกุลของน้ำ (เหงื่อ) จะดูดพลังงานจากผิวหนังเพื่อใช้สำหรับการระเหย ส่งผลให้อุณหภูมิของร่างกายลดลง เราจึงรู้สึกเย็นในขณะที่มีการระเหยของเหงื่อ

2.14 การถ่ายเทความร้อนในการระเหย

ความสามารถในการระเหย ขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ให้เข้าไปในสารละลายผ่านพื้นผิวให้ความร้อน ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าไปในระบบสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$q = UA \Delta T \quad (4)$$

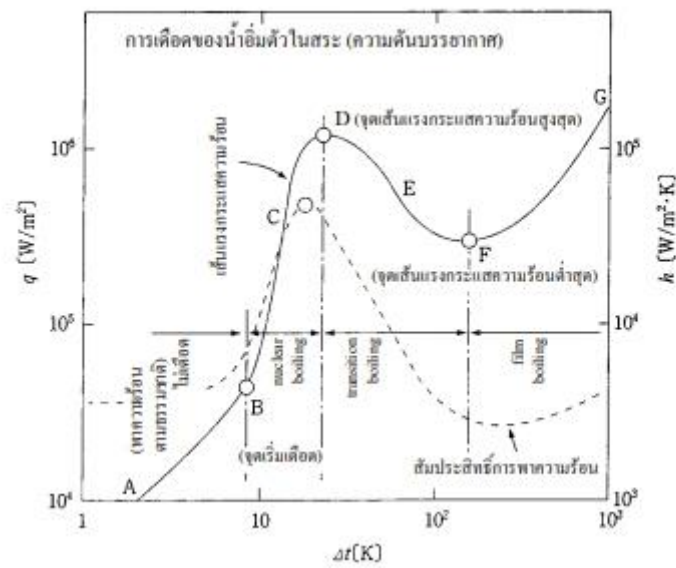
โดย U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม $W/(m^2 \cdot K)$
 A คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อน m^2
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างสารละลายกับตัวกลางความร้อน

2.15 การเดือด

การเดือด (Boiling) เป็นสมบัติเชิงกายภาพอีกอย่างหนึ่งของของเหลว หลักการเดือดของของเหลวปรากฏ เมื่อให้ความร้อนแก่ของเหลว เพื่อให้โมเลกุลของของเหลวมีพลังงานจลน์สูงขึ้นรุนแรงกว่าการระเหย จนในที่สุดโมเลกุลของของเหลวสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและหลุดออกไปจากของเหลวกลายเป็นไอได้ทั่วทุกบริเวณ ทำให้ของเหลวเต็มไปด้วยฟองปล่าน เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า การเดือดของของเหลว และเรียกอุณหภูมิขณะที่ของเหลวเดือดว่า จุดเดือด (Boiling point) ความดันไอของของเหลวที่จุดเดือดจะเท่ากับความดันบรรยากาศขณะนั้น (ภาพที่ 10)



ภาพ 10 การเดือดของของเหลว เมื่อได้รับความร้อนจนความดันไอของสารเท่ากับความดันบรรยากาศ



ภาพ 11 เส้นกราฟการเดือด (เส้นทึบ : เส้นแรงกระแสความร้อน q
เส้นประ : สัมประสิทธิ์การนำความร้อน h)

2.16 ปัจจัยที่มีผลต่อจุดเดือด-จุดหลอมของของเหลว

การเปลี่ยนแปลงสถานะของของเหลวด้วยการเดือดเกิดขึ้นอย่างรุนแรง ของเหลวต่างชนิดกัน มีจุดเดือดที่แตกต่างกันเนื่องจากหลายปัจจัย ได้แก่

2.16.1 ความดันบรรยากาศ

ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) ส่งผลต่อจุดเดือด-ของของเหลวโดยตรง เนื่องจากความดันไอของของเหลวที่จุดเดือดจะเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นถ้าความดันบรรยากาศเปลี่ยนไป จุดเดือดของของเหลวจะเปลี่ยนไปด้วย ถ้าความดันบรรยากาศสูงจุดเดือดของของเหลวจะสูง ในทางตรงกันข้าม ถ้าความดันบรรยากาศต่ำจุดเดือดของของเหลวจะต่ำ ซึ่งหลักการนี้สามารถนำไปใช้สำหรับการกลั่นแยกของเหลวผสมแบบลดความดัน กรณีศึกษา ที่แสดงผลของความดันบรรยากาศต่อจุดเดือด

เมื่อต้มน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศ น้ำจะเดือดที่ 100 °C แต่เมื่อต้มน้ำที่ความดันต่ำกว่า 1 บรรยากาศ น้ำจะเดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C เช่น ต้มน้ำบนภูเขาหรือในสถานที่ซึ่งมีความสูงมากกว่าระดับระดับน้ำทะเล 1,100 เมตร น้ำจะเดือดที่ 96 °C เป็นต้น ผลของความสูงที่มีต่อความดันพบว่า ที่ระดับความสูงมากขึ้น ความดันบรรยากาศจะยิ่งลดลง เนื่องจากจุดเดือดของของเหลวขึ้นอยู่กับความดันของบรรยากาศ ดังนั้น การบอกจุดเดือดของของเหลวใดๆ จึงต้องระบุความดันด้วย ดังเช่นกรณีศึกษาต่อไปนี้

น้ำมีจุดเดือดปกติที่อุณหภูมิ 100 °C ที่อุณหภูมิ 1 บรรยากาศ เอทานอลมีจุดเดือดปกติที่อุณหภูมิ 78 °C และความดัน 1 บรรยากาศ เป็นต้น หากไม่ระบุความดันบรรยากาศจะเป็นการให้ความหมายของสถานะที่ไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อก้าวถึงจุดเดือดโดยทั่วไปและไม่ระบุความดัน เราจะเข้าใจตรงกันว่า เป็นจุดเดือดที่ความดัน 1 บรรยากาศโดยปริยาย ซึ่งเรียกว่า จุดเดือดปกติ (Normal boiling point)

2.16.2 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

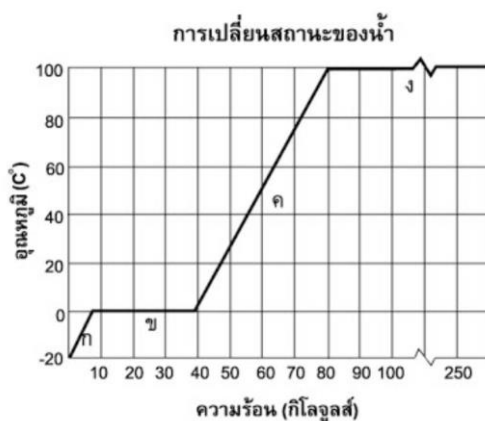
เนื่องจากการเดือดของของเหลวต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่ง เพื่อแยกโมเลกุลของของเหลวออกจากกัน เนื่องจากของเหลวมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (Intermolecular force) ดังนั้น ยิ่งของเหลวมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากจุดเดือดก็จะยิ่งสูงตาม ของเหลวที่โมเลกุลมีขั้วจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากกว่าของเหลวที่ไม่มีขั้ว เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลชนิดแวนเดอร์วาลส์มีขั้ว (แรงขั้วคู่-ขั้วคู่ และแรงขั้วคู่-ขั้วคู่เหนี่ยวนำ) ส่งผลให้ของเหลวมีจุดเดือด-จุดหลอมเหลวสูงกว่า ของเหลวที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลชนิดไม่มีขั้ว มีแรงยึดเหนี่ยวชนิด แวนเดอร์วาลส์ (แรงลอนดอนหรือแรงกระจาย) นอกจากนี้ หากของเหลวที่โมเลกุลมีขั้วยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงระหว่างโมเลกุลชนิดพันธะไฮโดรเจนแล้ว จุดเดือด-จุดหลอมเหลวยิ่งสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของ

โมเลกุลมีขั้วของแรงแวนเดอร์วาลส์ทั่วไป เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนมีค่ามากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ [63]

สำหรับของเหลวประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล คือแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของมวลโมเลกุล ของเหลวที่มีมวลโมเลกุลสูงจะมีแรงแวนเดอร์วาลส์มากกว่า และมีจุดเดือด-จุดหลอมเหลวจะสูงกว่าของเหลวที่มีมวลโมเลกุลต่ำ สำหรับของเหลวจำพวกสารประกอบอินทรีย์ซึ่งมีไอโซเมอร์ (Isomer) หลากหลายชนิด ไอโซเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายตรง (Normal chain or straight chain) จะมีจุดเดือด-จุดหลอมเหลวสูงกว่าไอโซเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งหรือมีสาขา (Branch chain) จะมีจุดเดือด-จุดหลอมเหลวต่ำ

2.16.3 ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Heat of vaporization, ΔH_{vap}) เป็นสมบัติเฉพาะตัวของสารที่บอกปริมาณพลังงานที่ต้องใช้หรือคายออกมาในการเปลี่ยนสถานะของเหลว 1 โมลให้ระเหยกลายเป็นไอ เมื่อมีอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดของสารนั้น ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอนี้มีหน่วยดังนี้; จูลต่อโมล (J/mol) หรือ แคลอรีต่อกรัม (Cal/g) หรือ บีทียูต่อปอนด์ (Btu/lb) เช่น ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำมีค่า 40.8 กิโลจูลต่อโมล ในขณะที่ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของเมทานอลมีค่า 37.4 กิโลจูลต่อโมล ที่ความดันบรรยากาศปกติ เป็นต้น เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอมีค่าจำเพาะเราจึงสามารถจำแนกชนิดของสารเบื้องต้นจากค่าดังกล่าว



ภาพ 12 กราฟความร้อนแฝงที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ

(ก : สถานะของแข็ง ข : หลอมละลาย ค : สถานะของเหลว ง : การระเหย)

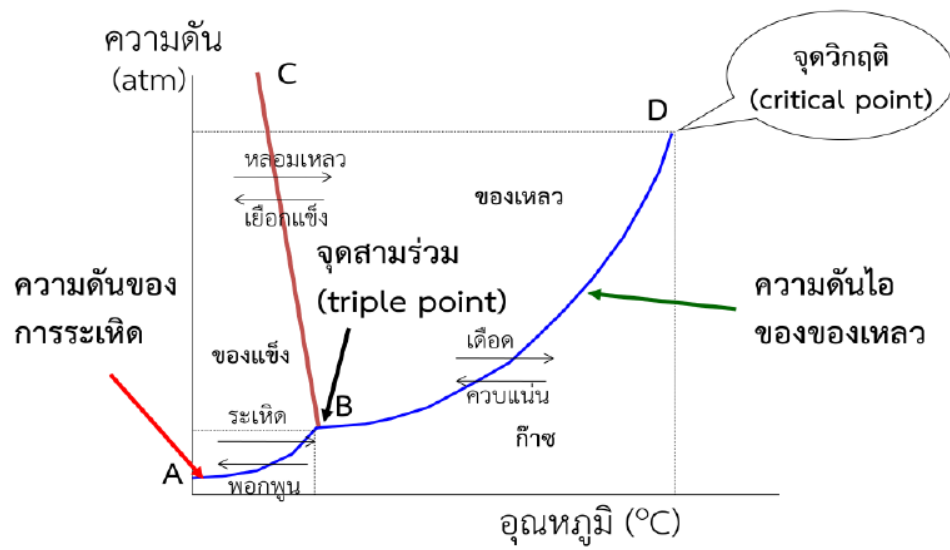
2.17 แผนภาพวัฏภาค

แผนภาพวัฏภาค (Phase diagram) แสดงสภาวะสสารที่มีความเสถียรในสถานะของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ เป็นที่ทราบกันดีว่า สสารแบ่งเป็น 3 สถานะ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ สามารถเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างกันได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม สามารถเขียนแผนผังการเปลี่ยนแปลงของสสารที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ไว้ด้วยกันได้และเรียกว่า แผนผังวัฏภาค ดังแสดงตามภาพที่ 13

จากภาพที่ 13 แผนผังวัฏภาคแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน แต่ละส่วนจะมีอยู่เพียง 1 วัฏภาค (phase) คือของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ เท่านั้น เส้น AB แสดงสมดุลวัฏภาคระหว่างของแข็งกับก๊าซ และแบ่งสถานะของแข็งออกจากสถานะก๊าซ เส้น BC แสดงสมดุลวัฏภาคระหว่างของแข็งกับของเหลว และแบ่งสถานะของแข็งออกจากสถานะของเหลว โดยทั่วไป แนวโน้มของเส้น BC ส่วนใหญ่จะเบนไปทางด้านขวามือ ยกเว้น น้ำ เพราะน้ำที่สถานะของแข็งจะมีปริมาตรมากกว่าสถานะของเหลว จึงส่งผลให้ ความหนาแน่นของน้ำที่สถานะของแข็งมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของน้ำที่สถานะของเหลว และเส้น BD แสดงสมดุลวัฏภาคระหว่างของเหลวกับก๊าซ และแบ่งสถานะของเหลวออกจากสถานะก๊าซ

จุด B ที่เส้นสมดุลทั้ง 3 กัน แสดงถึง อุณหภูมิและความดันที่ส่งผลให้ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ อยู่ร่วมกันในภาวะสมดุลกันที่จุดเดียวกัน เรียกว่า **จุดร่วมสาม (Triple point)** จุด D คือ **จุดวิกฤต (Critical point)** หรืออุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature, T_c) หรือความดันวิกฤต (Critical pressure, P_c) เป็นจุดสุดท้ายที่สามารถแบ่ง และมองเห็นขอบเขตสมดุลระหว่างของเหลวกับก๊าซได้อย่างชัดเจน เมื่อเราพิจารณาจุดที่อยู่เหนือขอบเขตนี้ไป สารจะมีพฤติกรรมแตกต่างไปจากของเหลวและก๊าซ หรือกล่าวได้ว่า เราจะไม่สามารถพิจารณา และแบ่งแยกสถานะของสารระหว่างของเหลวและก๊าซได้อีกต่อไป

จากข้อภาพที่ 13 ข้างต้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลชนิดพันธะไฮโดรเจนของ น้ำ-น้ำ และน้ำ-แข็ง สามารถแยกออกจากกันได้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำๆ ด้วยเหตุนี้เราสามารถออกแบบเครื่องอบแห้งจากมันสุญญากาศให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ความดันไอสูง) เมื่อลดความดันลงต่ำมากๆ พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งจากมันสุญญากาศ พลังงานที่เกี่ยวข้องสามารถศึกษาจากเทอร์โมไดนามิกส์ดังจะกล่าวต่อไป



ภาพ 13 ภูมิภาคของสารทั้งสามสถานะที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงสถานะไปมาระหว่างกัน
ด้วยอุณหภูมิและความดัน



2.18 เทอร์โมไดนามิกส์ของการลดความชื้น (Thermodynamics of Drying)

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับปริมาณของก๊าซ และพบว่า "ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน ก๊าซต่างชนิดกันที่มีปริมาตรเท่ากันจะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากัน" นั้นหมายความว่า ก๊าซทุกชนิดจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนโมเลกุลของก๊าซเพิ่มขึ้นเช่นกัน ต่อมาสามารถยืนยันความสัมพันธ์ ที่มีใจความว่า "ที่ความดันและอุณหภูมิของก๊าซคงที่ ปริมาตรของก๊าซจะแปรผันตรงกับจำนวนโมเลกุลหรือจำนวนโมลของก๊าซนั้น" สามารถแสดงความสัมพันธ์ ได้ดังสมการ (5)

$$V \propto n$$

$$V = Kn$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ร่วมกับกฎของบอยล์ และชาร์ล

$$V \propto \frac{1}{P} \quad \text{กฎของบอยล์}$$

$$V \propto T \quad \text{กฎของชาร์ล}$$

ดังนั้น

$$V \propto \frac{nT}{P}$$

$$V = \frac{nRT}{P}$$

หรือ $PV = nRT$ กฎก๊าซสมบูรณ์ (5)

เมื่อความดันและอุณหภูมิคงที่

เมื่อ K คือค่าคงที่

R คือค่าคงที่ของก๊าซ

จากกฎรวมก๊าซ ก๊าซ 1 mol ที่สภาวะ STP; $P = 1 \text{ atm}$, $V = 22.4 \text{ dm}^3$, $T = 273 \text{ K}$

$$\begin{aligned} R &= \frac{PV}{nT} \\ &= \frac{1 \text{ atm} \times 22.4 \text{ dm}^3}{1 \text{ mol} \times 273 \text{ K}} \\ &= 0.0821 \text{ atm} \cdot \text{dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

เมื่อ $P = 101293 \text{ Pa}$ และ $V = 2.24 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

$$R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

ก๊าซสมบูรณ์ (Ideal Gas) เป็นก๊าซที่ไม่มีอยู่จริง มีพฤติกรรมตรงข้ามกับก๊าซจริง มีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของก๊าซไม่ว่าที่อุณหภูมิหรือความดันใด ไม่มีปริมาตรสามารถบีบอัดให้หายไปและไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ในบางสภาวะก๊าซจริงอาจมีสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซสมบูรณ์ได้ กล่าวคือ ที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำมากๆ ก๊าซจริงจะมีสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซสมบูรณ์มากที่สุดที่

อุณหภูมิห้อง และความดัน 1 บรรยากาศ และในสภาวะนี้เมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอปริมาตรจะขยายตัวหลายเท่ามาก

ตาราง 2 คุณสมบัติของความดันของน้ำที่เปลี่ยนแปลง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

904
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-4
Saturated water—Temperature table

Temp., T °C	Sat. press., P _{sat} kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633

2BV series water ring vacuum pump property parameters

Curve No.	Model	Max. suction capacity		Ultimate vacuum mbar(MPa)	Motor power kW	Speed r.p.m	Operating liquid flow rate L/min	Noise dB(A)	Weight kg
		m ³ /min	m ³ /h						
60V	2BV2-060	0.45	27	33mbar (-0.097MPa)	0.81	2840	2.5	62	37
61V	2BV2-061	0.86	52		1.45	2840	2.5	65	41
70V	2BV2-070	1.33	80		2.35	2860	3	66	66
71V	2BV2-071	1.83	110		3.85	2880	4.7	72	85
110V	2BV5-110	2.75	165		4	1440	7.2	63	120
111V	2BV5-111	3.83	230		5.5	1440	8.8	68	150

โดยปริมาณน้ำที่ต้องการดึงออกจากระบบ ภายใต้ระบบปิดตามความสัมพันธ์ของสมการก๊าซ สมบูรณ์ หากต้องการระเหยในระบบปิด น้ำกลายเป็นไอจะมีการขยายตัว เพื่อให้แรงดันในระบบปิด ยังคง 760 mmHg จะสามารถคำนวณปริมาตรไอน้ำที่ต้องดึงออกจากระบบได้ ดังนี้

Gas Laws : ปริมาณน้ำ 1 Kg (1 lite) จะกลายเป็นไอน้ำปริมาตรเท่าไรที่ความดันบรรยากาศ

$$V = \frac{nRT}{P}$$

$$= 1,000/18 \text{ mol} \times 0.082 \text{ L} \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \times 373 \text{ K} / 1 \text{ atm}$$

$$= 1,699.22 \text{ lite}$$

ดังนั้น น้ำ 50 Kg จะกลายเป็นไอน้ำ 84,961.11 lite หรือ ประมาณ 85 m³

การออกแบบเครื่องดังกล่าว ภายใน 1 นาที ต้องนำไอน้ำออก = 84,961.11 lite/60 min = 1,416 lite หรือประมาณ 1.5 m³ เป็นอย่างน้อย จึงกำหนดเป้าหมายการออกแบบเครื่องอบแห้ง ระบบปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่ความต้องการให้น้ำในระบบระเหยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 °C เป็นดังนี้ต้องสร้างแรงดันบรรยากาศไม่เกิน 7.3851 kPa หรือ 55.3928 mmHg จากตารางของ Vacuum Pump ที่มีจำหน่ายในตลาด จึงเลือกรุ่น Pump สามารถสร้างสุญญากาศที่ 33 mbar หรือ 3.3 kPa

จากข้อมูล 25 °C Saturated Pressure 3.1698 kPa และ 30 °C Saturated Pressure 4.2469 kPa ในระบบที่ออกแบบจึงมีจุดเดือดไม่เกิน

$$= 25 \text{ °C} + (3.3 \text{ kPa} - 3.1698 \text{ kPa}) \times (30 \text{ °C} - 25 \text{ °C}) / (4.2469 \text{ kPa} - 3.1698 \text{ kPa})$$

$$= 25.6044 \text{ °C}$$

2.19 ความร้อนของการเปลี่ยนสถานะของน้ำเป็นไอน้ำ

เมื่อพิจารณาพลังงานใช้สำหรับการเปลี่ยนสถานะของน้ำเพื่อกลายเป็นไอน้ำ พบว่า ช่วงที่อุณหภูมิของระบบคงที่นั้น พลังงานที่ให้กับระบบจะใช้สำหรับการเอาชนะแรงระหว่างโมเลกุล พิจารณาความร้อนทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะของน้ำผ่าน ของเหลว-ก๊าซ เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำ พบว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลง การคำนวณพลังงานจึงเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ มวลของของน้ำ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นพลังงานที่ใช้ คือ $mc\Delta T$ และขั้นตอนสุดท้าย ให้ความร้อนจนโมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นและหมุนอย่างรุนแรงจนหลุดเป็นโมเลกุลเดี่ยวในสถานะก๊าซ ความร้อนของระบบจะถูกดึงออกไปโดยโมเลกุลของสารในสถานะที่หลุดออกมาในสถานะก๊าซ ส่งผลให้อุณหภูมิการเดือดคงที่อีกครั้ง ดังนั้นพลังงานที่ใช้คือ ΔH_{vap} หรือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ (Latent Heat, $\Delta H_{\text{vap}} = m \times L$) เมื่อ L คือค่าความร้อนแฝงของน้ำ ฉะนั้นพลังงานรวม (ΔH) ของการเปลี่ยนแปลงสถานะ น้ำ-ไอน้ำ ของกรณีนี้ แสดงได้ถึงความสัมพันธ์สมการ (2.4) เครื่องหมายของพลังงานรวมจะเป็นบวกเนื่องจากระบบดูดความร้อน (Endothermic system)

$$\Delta H = mc\Delta T + \Delta H_{\text{vap}} \quad (6)$$

ที่สภาวะความดันคงที่ $\Delta H_p = Q_p$ สมการที่ 2.4 จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$Q_p = mc\Delta T + \Delta H_{\text{vap}} \quad (7)$$

สภาวะการระเหยน้ำภายใต้แรงดันบรรยากาศ

จุดเดือด (Boiling Point) ที่ 1 atm = 100 องศาเซลเซียส

$$Q_1 = mc\Delta T$$

$$= 60 \text{ kg} \times 4.187 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times (100 ^\circ\text{C} - 30 ^\circ\text{C})$$

$$= 17,585.4 \text{ kJ}$$

$$Q_2 = mL$$

$$= 50 \text{ kg} \times 2,257 \text{ kJ/kg}$$

$$= 112,850 \text{ kJ}$$

$$\text{Total } Q = Q_1 + Q_2 = 17,585.4 \text{ kJ} + 112,850 \text{ kJ} = 130,435.4 \text{ kJ}$$

$$\text{Use LPG} = 130.435.4 \text{ kJ} / 50.22 \text{ MJ/kg} = 2.597 \text{ kg of LPG}$$

2.20 ระบบควบแน่นไอน้ำ

การออกแบบเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศมีข้อจำกัดจากการขยายตัวอย่างมหาศาลของไอน้ำ ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงมากในการดึงไอน้ำออกจากระบบ ดังที่แสดงการคำนวณก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามโครงการวิจัยนี้ได้นำเอาระบบควบแน่นไอน้ำเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการอบ โดยดึงเอาไอน้ำที่เกิดขึ้นจากระบบการอบให้เคลื่อนที่ออกมาและเพิ่มระบบควบแน่นคอนเดนเสท (condensate) เพื่อให้เกิดการควบแน่นของน้ำ เป็นการลดมวลรวมของระบบ ซึ่งจะช่วยให้สามารถถ่ายเทมวลของความร้อนออกจากระบบได้ดี เพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ อีกทั้งยังช่วยประหยัดพลังงานในการดึงน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ รวมทั้งลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอีกด้วย

2.20.1 อุปกรณ์ควบแน่น (Condenser)

การออกแบบอุปกรณ์ควบแน่น เป็นสิ่งที่ละเอียดอ่อน อุปกรณ์จะต้องสามารถถ่ายเทความร้อนในอัตราที่ต้องการได้ ในกรณีนี้คือถ่ายเทความร้อนจากการควบแน่นของไอน้ำที่ไหลเข้าในอุปกรณ์ได้อย่างเพียงพอ เพื่อให้เกิดการควบแน่นทั้งหมด

สมการการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [64] สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta P_t = \frac{\rho_t v_t^2}{2} \left(\frac{L}{d_i} f_t + p \right) \cdot n$$

โดย ΔP_t คือ Tube side pressure drop

ρ_t	คือ	Fluid density
v_t	คือ	Fluid velocity tube side
L	คือ	Tube length
d_i	คือ	Tube inside diameter
f_t	คือ	Darcy friction factor tube side
p	คือ	Pumping power
n	คือ	Number of tube passage

หรือสมการจาก Heat exchanger design handbook [65] ดังนี้

$$\Delta P_t = \frac{2f_t G_t^2 L n}{d_i \rho_t \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{0.14}}$$

โดย	G_t	คือ	Tube side mass flow rate per unit cross section area
	μ_t	คือ	Tube inside fluid viscosity
	μ_{tw}	คือ	Tube inside fluid density

ความดันตกคร่อมอุปกรณ์ควบแน่น ในส่วนของของไหลที่ไหลภายในท่อ จะขึ้นอยู่กับมิติของท่อและคุณสมบัติของของไหลเป็นสำคัญ รวมถึงของไหลในท่อนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อน ผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการข้างต้นจึงมีความแม่นยำพอที่จะนำไปเป็นค่าสำหรับการออกแบบได้

ของไหลประกอบด้วย 2 สถานะคือสถานะก๊าซและของเหลว โดยเริ่มต้นของไหลจะอยู่ในสถานะก๊าซเคลื่อนที่เข้ามาในระบบ เมื่อสัมผัสกับผิวท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดควบแน่น ก๊าซจะเกิดการควบแน่นกลายเป็นฟิล์มของเหลวที่เคลือบผิวท่อไว้ เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้น ของเหลวจะหยดลงมาตามแรงโน้มถ่วง ปริมาณความร้อนที่จะต้องนำออกไป เพื่อให้เกิดการควบแน่นนั้น อย่างน้อยที่สุดจะต้องเท่ากับความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากไอกลายเป็นของเหลว ค่าความร้อนดังกล่าวสามารถคำนวณหาได้จากคุณสมบัติของน้ำ

ขนาดของพื้นที่ผิวท่อสำหรับการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้เพียงพอกับอัตราการไหลของไอที่ไหลมาควบแน่น ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอกับพื้นผิวท่อภายในอุปกรณ์ควบแน่นจะเป็นลักษณะการพา (Convection) ความร้อนที่เกิดการแลกเปลี่ยนสามารถหาได้ดังนี้

$$Q = h_{avg} A \Delta T_{LMD}$$

โดย	Q	คือ	ความร้อนที่เกิดแลกเปลี่ยน
	h_{avg}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาเฉลี่ยที่อุณหภูมิตั้ง
	A	คือ	พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน
	ΔT_{LMD}	คือ	ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมระหว่างอุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำ

หล่อเย็น

2.21 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดความชื้นด้วยเทคนิคสุญญากาศ

นัฐวุฒิ วิเศษโสภณ และคณะได้ทำการพัฒนากล้วยกวน โดยปรับอัตราส่วนการใช้สับประรด สตรอว์เบอร์รี โปรตีนถั่วเหลือง สกัด และรีบาวตีไอโซต์ วิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีกายภาพ คุณค่าทางโภชนาการ อายุการเก็บรักษา จุลินทรีย์ และทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค ผลการศึกษาพบว่า สตรกกล้วยกวนที่ผู้บริโภคมอบรับประกอบด้วยกล้วย น้ำว่า 48% สับประรด 15.67% สตรอว์เบอร์รี 9.40% น้ำกระเจี๊ยบแดงเข้มข้น 6.27% น้ำตาลทรายขาว 2.35% น้ำตาลมะพร้าว 0.78% น้ำกะทิ 18.81% กลูโคสไซรัป 1.57% โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 1.07% รีบาวตีไอโซต์ 0.012% และเกลือ 0.19% ค่าเฉลี่ยการยอมรับของผู้บริโภคด้วยวิธีทดสอบแบบ 9 ระดับ เท่ากับ 6.22 ± 1.67 ค่า สี L^* a^* และ b^* ความแข็ง (N) ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (o Brix) เท่ากับ 29.72 ± 0.10 5.97 ± 0.09 5.92 ± 0.06 4.56 ± 0.15 4.38 ± 0.01 และ 53.33 ± 0.58 ตามลำดับ คุณค่าทางโภชนาการ ของกล้วยกวน 100 กรัม ให้พลังงาน 316 กิโลแคลอรี มีคาร์โบไฮเดรต 58.2% โปรตีน 4.57% และไขมัน 7.17% และมีอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ไม่น้อยกว่า 90 วัน [73]

สุเทพ กสิกรรม ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องกวนเนื้อผลไม้แบบ กระจกสแตนเลสชั้นเดียว ขนาดความจุ 43 ลิตร เป็นกระทะ 2 ชั้น มีวัสดุตัวกลางนำความร้อน เพื่อให้มีการ กระจายความร้อน ได้อย่างสม่ำเสมอที่บริเวณห้องกระทะกวน การควบคุมอุณหภูมิขณะกวนโดยการติดตั้ง อุปกรณ์ เครื่องมือวัดอุณหภูมิและอุปกรณ์ควบคุมในการปิด-เปิดเชื้อเพลิงแบบอัตโนมัติ ได้ออกแบบและพัฒนาใบกวนให้มีรูปทรง และทำมุมที่เหมาะสมสัมพันธ์กับพื้นผิวห้องกระทะได้ดีเพื่อให้มีการพลิกเนื้อ ทุเรียนและมีประสิทธิภาพในการกวนได้ดีโดย ออกแบบให้มีใบกวน 3 ใบ ความเร็วรอบในการกวน ประมาณ 23-25 รอบต่อนาที ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ ไฟฟ้า 220 โวลต์ ขนาด 0.5 แรงม้า ใช้แก๊สหุงต้ม เป็นเชื้อเพลิง เตาเป็นเหล็กแผ่นเรียบเสริมด้วยวัสดุกัน ความร้อน ความสามารถในการกวนครั้งละไม่ เกิน 15 กิโลกรัม ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง 40 นาที อัตราการ สิ้นเปลืองแก๊สเชื้อเพลิง ประมาณ 1.60 กิโลกรัมต่อชั่วโมงผลจากการทดสอบเครื่องต้นแบบ สามารถทำงานได้สะดวกยิ่งขึ้น ลดการไหม้

ของเนื้อทุเรียนกวน ได้ดีและคุณภาพเนื้อทุเรียนกวนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อทุเรียนกวนที่กวนด้วยแรงงานคนทุเรียนกวน [74]

เสาวลักษณ์ จิตรบรรณเกิดกุล และคณะศึกษาการผลิตทุเรียนกวนจากการนำเนื้อทุเรียนสดและเนื้อทุเรียนสดที่นำมาต้มกับน้ำให้เดือดจนได้เป็นของเหลวข้น แล้วผสมกับน้ำตาลร้อยละ 10 ทำการกวนในกระโถนแบบเปิด จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีลักษณะเหนียวเป็นมันไม่ติดกระโถน ได้น้ำหนักผลิตภัณฑ์จาก ทั้งสองกรรมวิธีการผลิตร้อยละ 45 มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี เฉลี่ยเท่ากับ 0.75 ลักษณะทางกายภาพ ด้านสี (ค่า L^* , a^* และ b^*) ค่าแรงกด (หมายถึงความแข็ง) และค่าแรงดึง (หมายถึงความเหนียว) ของตัวอย่างที่กวนโดยตรง มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่มีการต้มก่อน เมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เป็นเวลา 7 สัปดาห์ ไม่พบเชื้อจุลินทรีย์รวมถึงยีสต์รา ตลอดระยะเวลาการเก็บ สำหรับผลิตภัณฑ์เงาะผสม สับปะรด กวนผลิตได้โดยการต้มเนื้อเงาะปั่นและเนื้อสับปะรดปั่นให้ได้ลักษณะข้น แล้วนำมาผสมกัน จากนั้นทำการกวนสองแบบคือแบบที่เติมน้ำตาลร้อยละ 2 กับแบบที่ไม่เติมน้ำตาล โดยกวนให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีลักษณะเหนียวแห้ง แว่วใส และไม่ติดกระโถน ตัวอย่างทั้งที่เติมน้ำตาลและไม่เติมน้ำตาลมีน้ำหนักผลิตภัณฑ์ร้อยละ 23 ตัวอย่างที่มีน้ำตาลมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีเฉลี่ยต่ำกว่าเล็กน้อยกับตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาล และค่าสีของตัวอย่างที่เติมน้ำตาลจะเข้มกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลอยู่เล็กน้อย ค่าแรงกดและค่าแรงดึงของทั้งสองตัวอย่างใกล้เคียงกัน ส่วนผลการตรวจสอบทางจุลินทรีย์ของตัวอย่างที่เติมน้ำตาลไม่พบเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงยีสต์รา ตลอดระยะเวลาการเก็บ 9 สัปดาห์ ขณะที่พบเชื้อยีสต์ราในตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลที่ระยะเวลาเก็บรักษา 5 สัปดาห์ [76]

อัมฤทธิ์ สีก่ออม และ คณะพัฒนาผลิตภัณฑ์ลำไยกวนสำหรับเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพและศึกษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยมีแนวคิดการใช้เทคนิคการเสริมพฤษเคมีธรรมชาติในการผลิตลำไยกวน ที่สามารถทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติส่งผลดีต่อสุขภาพได้ การศึกษานี้ใช้สูตรพื้นฐานจากผู้ประกอบการ และมี การปรับปรุงสูตรการผลิตด้วยการเติมขิง และกล้วยอบ เพื่อใช้เป็นแหล่งพฤษเคมี ผลการศึกษาที่ได้พบว่า การพัฒนาวิธีการ และส่วนผสมของลำไยกวนที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ลำไยกวนให้เป็นอาหารเพื่อสุขภาพที่ดีที่สุด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มี ศักยภาพสูงสุด คือ ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด 842 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงสุด ($p < 0.05$) [77]

วิชมณี ยืนยงพุทธกาล และคณะพัฒนาผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปใหม่ด้วยการเตรียมขั้นต้นวิธีออสโมซิสในสภาวะ สูญญากาศจากวัตถุดิบผลไม้ ได้แก่ น้อยหน่า ลองกอง และมังคุด จากการศึกษาผลการใช้สารละลาย ออสโมติกในรูปแบบสารละลายผสมระหว่างน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลมะพร้าวพบว่าทำให้ค่าการถ่ายเทมวลสาร (WL SG และ WR) รวมถึงปริมาณความชื้น ค่า aw ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ค่าสี (L^* a^* และ b^*) และคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏและด้านสีของผลไม้ที่ผ่านการ ออสโมซิสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จาก

การศึกษาผลของการเติม แคลเซียมและวิตามินซีร่วมกับการใช้สภาวะสุญญากาศในการออสโมซิส พบว่า อิทธิพลร่วมของ 3 ปัจจัย มีผลต่อค่าปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) ปริมาณแคลเซียม ปริมาณวิตามินซี ค่าสี a^* ค่าสี b^* และค่าความแน่นเนื้อ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีอิทธิพลต่อค่า WL ค่า WR ปริมาณความชื้น ค่าสี L^* และคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสทั้งหมด ($p > 0.05$) จากการศึกษาผล การศึกษาปริมาณกลีเซอรอลต่อคุณภาพ ผลิตภัณฑ์ผลไม้กึ่งแข็งขึ้นรูปใหม่ พบว่า การแปรปริมาณ ความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการทำแห้ง ค่า aw ค่าสี (L^* a^* และ b^*) ค่าความ แน่นเนื้อ ความชอบทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะ ปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และด้านความชอบ โดยรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) สิ่งทดลอง ที่เหมาะสมที่สุด คือ การใช้สารละลาย ออสโมติกในรูปแบบสารละลายผสมระหว่างน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส 50% กับน้ำตาลมะพร้าว 10% โดยเติมแคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 2% และกรดแอสคอร์บิก 1% ร่วมกับการใช้สภาวะ สุญญากาศ โดยเติมกลีเซอรอล 15% ในการขึ้นรูปใหม่ โดยได้รับคะแนนความชอบ โดยรวมมากกว่า ผลไม้กึ่งแข็งขึ้นรูปใหม่ที่ไม่ผ่านการออสโมซิส ($p \leq 0.05$) [78]

อรอง จันทรประสาทสุข ศึกษาลักษณะทางกายภาพเคมีและสมบัติของการเป็นสารออกฤทธิ์ ทางชีวภาพของเนื้อผลสับแปรรูปของ สายพันธุ์ MD2 ปัตตาเวีย (ศรีราชา) และควีน (ตราดสี ทอง) ที่นิยมบริโภคในเขตภาคตะวันออกโดยตัวอย่างผลสับแปรรูปจะอยู่ในระยะเก็บเกี่ยวทำการบันทึก น้ำหนัก ความยาว และเส้นรอบวง นำไปล้างด้วยน้ำสะอาด ปอกเปลือกวัดค่าสีและองค์ประกอบทาง เคมีพื้นฐานของเนื้อสับแปรรูปแล้วนำเนื้อสับแปรรูปมาคั้นน้ำ จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาล กรด อินทรีย์ คุณค่าทาง โภชนาการ และสมบัติของการเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ จากผลการทดลอง พบว่า น้ำหนัก ความยาวและความยาวเส้นรอบวงเฉลี่ยของผลสับแปรรูปควีนมีค่าต่ำสุด และ ลักษณะทางกายภาพของผลสับแปรรูป MD2 และ ปัตตาเวีย มีค่าที่ใกล้เคียงกัน สีของ เนื้อผล สับแปรรูปสายพันธุ์ MD2 มีสีเหลืองเข้มใกล้เคียงกับสีของเนื้อผลสับแปรรูปควีน ในขณะที่เนื้อผล ของสับแปรรูปปัตตาเวียมีสีเหลืองซีด จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทาง เคมีพื้นฐานของเนื้อผล สับแปรรูป พบว่าเนื้อผลสับแปรรูปปัตตาเวียมีปริมาณความชื้นสูงสุด และมีองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ไชมัน โปรตีน เยื่อใย คาร์โบไฮเดรต และพลังงาน ที่แตกต่าง กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และพบว่าปริมาณน้ำตาลซูโครส มีมากกว่าน้ำตาลฟรุคโตสและกลูโคสประมาณ 2-5 เท่าขึ้นกับชนิด ของสายพันธุ์ และสับแปรรูปที่มีปริมาณน้ำตาล รวมสูงสุดได้แก่ สายพันธุ์ MD2 และพบว่ากรดซิตริก เป็นกรดอินทรีย์หลักที่มีปริมาณสูงสุด ของน้ำสับแปรรูปทั้ง 3 สายพันธุ์สับแปรรูป MD2 เป็นสาย พันธุ์ที่มีปริมาณวิตามินซีสูงสุด และมีปริมาณวิตามินซีมากกว่าสายพันธุ์ปัตตาเวียประมาณ 7 เท่า นอกจากนี้ยังพบว่า สับแปรรูป MD2 มีค่า TPC FRAP เพอร์เซ็นต์การยับยั้งสารต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณ เบต้าแคโรทีนสูงสุดด้วย สำหรับผลกิจกรรมของเอนไซม์โบรมิเลน พบว่า น้ำสับแปรรูป MD2 ควีนมีกิจกรรมของเอนไซม์โบรมิเลนสูงสุด ผลการทดลองที่ได้นี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูล

พื้นฐานในการเลือกใช้ประโยชน์จากเนื้อผลสับประรดทั้ง 3 สายพันธุ์สำหรับประยุกต์ใช้ทางอาหารและยารักษาโรคได้ [79]

วรรณพิชญ์ จุลกัลป์ และคณะ ศึกษาสภาวะในการลดความชื้นที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การลดความชื้น และคุณภาพทางกายภาพของมะม่วงเบาแบบสุญญากาศ การทดลองที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C ที่ความดัน 30 mmHg โดยใช้มะม่วงเบารูปร่างที่แตกต่างกัน (ส่วนขอบด้านหน้าของผล (ส่วนที่ 1 และ 3) ส่วนกลางของผล (ส่วนที่ 2 และ 4) และส่วนขอบด้านข้างของผล (ส่วนที่ 5 และ 6)) ด้วยวิธีการลดความชื้นแบบสุญญากาศ (VD) เปรียบเทียบกับวิธีการลดความชื้นด้วยการพาความร้อนจากลมร้อน (CD) ผลการทดลองพบว่าการอบแห้งด้วยวิธี VD ที่อุณหภูมิสูง จะใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นกว่าและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง มะม่วงอบแห้งหตุตัวต่ำ ค่าความเป็นสีเหลืองสูง ความแข็งน้อย และสัณฐานโครงสร้างที่มีลักษณะโปร่ง มีรูพรุนจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งวิธี CD ที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการอบแห้งด้วยวิธี VD ที่ 80 °C เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการอบแห้ง การอบแห้งมะม่วงส่วน 2,4 1,3 และ 5,6 ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 300, 300 และ 240 นาที ตามลำดับ [66]

รัตนันท์ เหลือมพล และคณะ ทำการศึกษาสมการอบแห้งแบบชั้นบางสำหรับการอบแห้งแคโรทโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับปั๊มความร้อน เพื่อนำสมการที่ได้ไปหาค่าอัตราส่วนความชื้น ในการทดลองใช้แครอทที่มีหน้าประมาณ 0.5 cm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3 cm มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 10.11 d.b. สภาวะที่ใช้ในการอบแห้งคือ ใช้อุณหภูมิคงที่ 60 °C และใช้ความดัน 0.2, 0.5 และ 0.7 bar ความเร็วอากาศ 1.2 m/s ทำการอบแห้งจนน้ำหนักของแครอทไม่เปลี่ยนแปลงจึงหยุดกระบวนการอบแห้ง ระหว่างกระบวนการอบแห้งจะบันทึกค่าน้ำหนักทุก 5 นาที จากการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นและอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ความดันในการอบแห้งต่ำจะใช้เวลาในการอบแห้งเร็วที่สุด โดยสภาวะที่มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 60 °C และความดัน 0.2 bar ใช้เวลาในการอบแห้งเร็วที่สุดประมาณ 330 นาที และจากการวิเคราะห์สมการการอบแห้งแบบชั้นบางโดยใช้วิธีการคำนวณแบบถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression) พบว่าสมการของ Midilli สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นได้ สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด สำหรับการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 60 °C ความดัน 0.2 และ 0.7 bar โดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับปั๊มความร้อน [67]

บุญยาพร แสนแปง และคณะ ศึกษาผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสานของฮีตเตอร์ร่วมกับปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 45, 55 และ 65 °C ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของใบมะกรูด รวมทั้งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง โดยผลการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งใบมะกรูดมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น และการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงที่สุด ในขณะที่ระบบปั๊มความร้อนมีอัตรา

การอบแห้งน้อยที่สุดจึงส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบผสมผสานสั้นกว่าระบบป้อนความร้อนและฮีตเตอร์เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน ส่วนผลการศึกษาค่าสีของใบมะกรูดหลังการอบแห้งพบว่าการใช้ระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 45 °C และ 55 °C ส่งผลให้ใบมะกรูดอบแห้งมีค่าสีดีที่สุด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากปริมาณของสารและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระพบว่าใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 55 °C มีปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะนั้นพบว่า การอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ใช้พลังงานมากที่สุด ดังนั้นหากพิจารณาจากผลการศึกษาโดยรวมทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานของฮีตเตอร์ร่วมกับป้อนความร้อนที่อุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 330 นาทีส่งผลให้ใบมะกรูดอบแห้งมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพดีที่สุดในที่ที่ใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยที่สุด [68]

ชญาณิช รัตนมงคล และคณะ ศึกษาการอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยทำการศึกษาภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 kPa และอุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งมะม่วงที่สภาวะสุญญากาศทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการลดความดันและเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง โดยที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ 5 kPa และอุณหภูมิ 70 °C จะมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ $3.03 \frac{g_{\text{water}}}{g_{\text{dry mass}} \cdot h}$ หลังการอบแห้งผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งและค่าแอมพลิจูดของแรงดันเท่ากับ 4.98 N และ 0.278 ตามลำดับ ส่วนค่าสี L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 68.71, 7.17 และ 49.13 ตามลำดับ ส่วนค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 38.44 kWh/kg [69]

นพพร กุดทิง และคณะ ได้ศึกษาป้อนสุญญากาศในเครื่องอบแห้งสุญญากาศด้วยเครื่องสูบลมความร้อน โดยใช้ป้อนสุญญากาศแบบลิควิดริง (Liquid ring) เป็นตัวดูดอากาศออกจากห้องอบแห้งเพื่อให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของป้อนสุญญากาศคืออุณหภูมิ ความดันอากาศ และการระบายความร้อน งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองอบแห้งพริกเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดันต่างๆ ในการลดความชื้นพริก ที่สภาวะอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นต่างๆ และการระบายความร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพป้อนสุญญากาศ จะช่วยเป็นแนวทางในการออกแบบหรือตัดสินใจในการลดความชื้นพริกที่สภาวะอุณหภูมิและความดันต่างๆ และการเลือกใช้งานน้ำหล่อเย็นป้อนสุญญากาศให้เหมาะสมเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพใช้สูงและประหยัดพลังงาน ตลอดจนคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการลดความชื้นอยู่ในเกณฑ์ดี [70]

ภาคย์ มาลัยกฤษณะชลี ศึกษาสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งมะม่วงสุกแบบไม่คงที่กับแบบคงที่ด้วย ตัวกลาง 2 ชนิด คือ ลมร้อน และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ โดยเปรียบเทียบกระบวนการในด้านผลิตภาพ และคุณภาพ จากตัวแปรทางด้านจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทำแห้ง สมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์และสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของตัวอย่าง เพื่อที่จะพัฒนากระบวนการ

ทำแห้งให้ดีขึ้น จากผลการวิจัยพบว่าในการทำแห้งด้วยตัวกลางที่เป็นลมร้อน การลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ การเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลม และลักษณะการไหลของลมแบบหมุน ทำให้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นลง และยังลดการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวของตัวอย่างลงได้มากขึ้น และยังพบว่าการทำแห้งโดยใช้สภาวะอุณหภูมิของลมร้อนแบบไม่คงที่ช่วยเพิ่มอัตราการแห้ง และลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของตัวอย่างลงได้เช่นเดียวกัน โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่ำกลับส่งผลให้ตัวอย่างใช้ระยะเวลาในการคั้นน้ำน้อยกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมสูง และการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะสามารถลดระยะเวลาในการคั้นน้ำของตัวอย่างลงได้ สำหรับกระบวนการทำแห้งโดยใช้ตัวกลางเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำทั้งในสภาวะคงที่และไม่คงที่จะมีอัตราการแห้งสูงกว่าตัวกลางที่เป็นลมร้อน รวมถึงมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของตัวอย่าง คือ การหดตัว และการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน จากการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค พฤติกรรมการคั้นน้ำ และการหดตัวของตัวอย่างร่วมกันพบว่าการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำทั้งในสภาวะคงที่และไม่คงที่จะส่งผลให้ตัวอย่างมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนสูง เกิดการยุบตัวต่ำกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการคั้นน้ำ และโครงสร้างระดับจุลภาค พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่จะมีรูพรุนจำนวนมากกว่า และมีอัตราการคั้นน้ำที่สูงกว่าแสดงให้เห็นว่าการใช้สภาวะไม่คงที่มีผลให้โครงสร้างของตัวอย่างมีความพรุนมากกว่าการใช้สภาวะคงที่ อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้สภาวะคงที่และไม่คงที่ในการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำมีอัตราการแห้ง การหดตัว และการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างไม่แตกต่างกัน การศึกษาสมบัติการดูดความชื้น (hygroscopic property) ของตัวอย่างสด และ ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งโดยใช้วิธีการทางอุณหพลศาสตร์ด้วยพารามิเตอร์สำคัญ คือ net isosteric heat of sorption (qst) และ differential entropy (ΔS) พบว่า qst และ ΔS มีค่าลดลงแบบเอกซ์ โพนเนนเชียลกับปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ ตัวอย่าง โดยที่ปริมาณความชื้นเท่ากันตัวอย่างที่ผ่าน การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำในสภาวะไม่คงที่ จะมีค่า qst และ ΔS มากกว่าตัวอย่าง ที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน แสดงให้เห็นว่าการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำใน สภาวะไม่คงที่ส่งผลให้โครงสร้างของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด [71]

สิริภิญญา กระต่ายทอง ได้พัฒนาวิธีการทำแห้งแบบใหม่ภายใต้แนวคิดการผสมผสาน ข้อดีของการใช้ตัวกลางในการทำแห้ง 2 ชนิดคือลมร้อน (Hot Air Drying, HAD) และสุญญากาศ เรียกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ (low pressure hot air drying, LPHAD) โดยเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งแบบ LPHAD ทั้งด้านผลิตภาพ และคุณภาพจากตัวแปรทางด้านจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทำแห้ง สมบัติทางด้านสีการหดตัวและการคั้นน้ำ กลับกับ HAD ซึ่งเป็นวิธีการทำแห้งที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมใน

กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Deff) ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รวมถึงยังช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวของตัวอย่าง โดยการทำแห้งด้วยลม ร้อนที่ อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2 m/s เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะนำไปใช้ศึกษา เปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำ ร้อนยวดยิ่ง ที่สภาวะความดันต่ำ สำหรับการทำแห้งมะม่วงสุกด้วย ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 °C และความดัน 6, 8 และ 10 kPa พบว่า การใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับความดันสูงส่งผลให้มีค่า สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง โดยระดับความดัน เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยเรื่อง อุณหภูมิและขึ้นมะม่วงที่ทำแห้งด้วยวิธี LPHAD ที่สภาวะ ต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงสีและการหด ตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่มีการ หดตัวต่ำกว่าขึ้นมะม่วงที่ทำแห้งด้วย วิธี HAD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$) การหดตัวของขึ้น มะม่วงเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของ ผลไม้อบแห้งที่สำคัญ ผลิตกัณฑ์อบแห้งที่มีการหดตัวต่ำจะมีลักษณะ ปรากฏและลักษณะทาง ประสาทสัมผัสที่ดีและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งคุณสมบัติด้านการหดตัว มีความสอดคล้องกับ คุณสมบัติด้านการคืนตัวของขึ้นมะม่วงอบแห้ง โดยขึ้นมะม่วงที่มีการหดตัวต่ำ ส่งผลให้มีอัตราการ คืนตัวสูง [72]

จากการค้นคว้าพบว่าการพัฒนาเทคโนโลยีในการกวนผลไม้มานานแล้วและมีหลากหลาย รูปแบบแต่ยังไม่มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการลดความชื้นโดยสุญญากาศ ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดใน การออกแบบเครื่องกวนสับประรดโดยใช้ระบบสุญญากาศในการลดความชื้นซึ่งจะส่งผลให้เกิดการ ประหยัดพลังงาน ประหยัดเวลา และควบคุมคุณภาพของสับประรดได้เนื่องจากสามารถควบคุม อุณหภูมิกับเวลาในการลดความชื้นได้

ตาราง 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	รายละเอียด	เครื่องมือที่ใช้	ผลการวิจัย
ชญาณีศ รัตนมงคล	ศึกษาสภาวะการลด ความชื้นแบบสุญญากาศ ร่วมกับอินฟราเรดของ มะม่วง	ชุดทดสอบการลด ความชื้นแบบ สุญญากาศร่วมกับ อินฟราเรด	การลดความชื้นแบบ สุญญากาศร่วมกับ อินฟราเรดใช้ระยะเวลา น้อยและได้ผลิตภัณฑ์ที่มี คุณภาพ อีกทั้งยัง ประหยัดพลังงาน
รตินันท์ เหลือมพล	ศึกษาสมการลด ความชื้นแครอทโดยใช้ เครื่องอบแห้ง สุญญากาศร่วมกับปั๊ม ความร้อน	อบแห้งสุญญากาศ ร่วมกับปั๊มความร้อน	สภาวะที่มีอัตราการลด ความชื้นสูงที่สุดคือ ที่ อุณหภูมิ 60 °C และความ ดัน 0.2 bar ใช้เวลาในการ ลดความชื้นเร็วที่สุด ประมาณ 330 นาที
ปุณยาพร แส่นแปง	ศึกษาผลของการลด ความชื้นด้วยระบบปั๊ม ความร้อน ระบบฮีต เตอร์และระบบ ผสมผสานของฮีตเตอร์ ร่วมกับปั๊มความร้อน	อบแห้งระบบ ผสมผสานของฮีต เตอร์ร่วมกับปั๊ม ความร้อน	การลดความชื้นด้วยระบบ ผสมผสานของฮีตเตอร์ ร่วมกับปั๊มความร้อนที่ อุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 330 นาทีส่งผลให้ใบ มะกรูดอบแห้งมีสมบัติทาง เคมีและทางกายภาพดี ที่สุดโดยใช้พลังงานใน การลดความชื้นน้อยที่สุด
วรรณพิชญ์ จุลกัลป์	ศึกษาสภาวะในการลด ความชื้นที่มีผลต่อ จลนพลศาสตร์การลด ความชื้น	อบแห้งแบบ สุญญากาศ (VD)	การลดความชื้นด้วยวิธี VD ที่ 80 °C เป็นสภาวะที่ดี ที่สุดในการลดความชื้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา วิเคราะห์ประสิทธิภาพเปรียบเทียบเวลากับพลังงาน วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งวิธีการดำเนินงานนี้จะทำการศึกษาและเก็บข้อมูลการกวนสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยถังกวนสับปะรดมีความจุขนาด 50 ลิตรตั้งอยู่บนเครื่องชั่งน้ำหนักภายในมีใบกวนพร้อมมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า ติดตั้งอยู่ในถังกวน ที่สภาวะอุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C ที่ควบคุมอุณหภูมิในการกวนไม่เกิน 100 °C จุดเดือดของน้ำในสับปะรดไม่เกิน 80 °C รายละเอียดการวิจัยมีดังนี้

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย
2. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

การพัฒนากระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระเหยของน้ำ สำหรับกระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศนี้มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 1) สับปะรดสุกพันธุ์ภูเก็ต (Phuket Pineapple)

อุปกรณ์และเครื่องมือที่

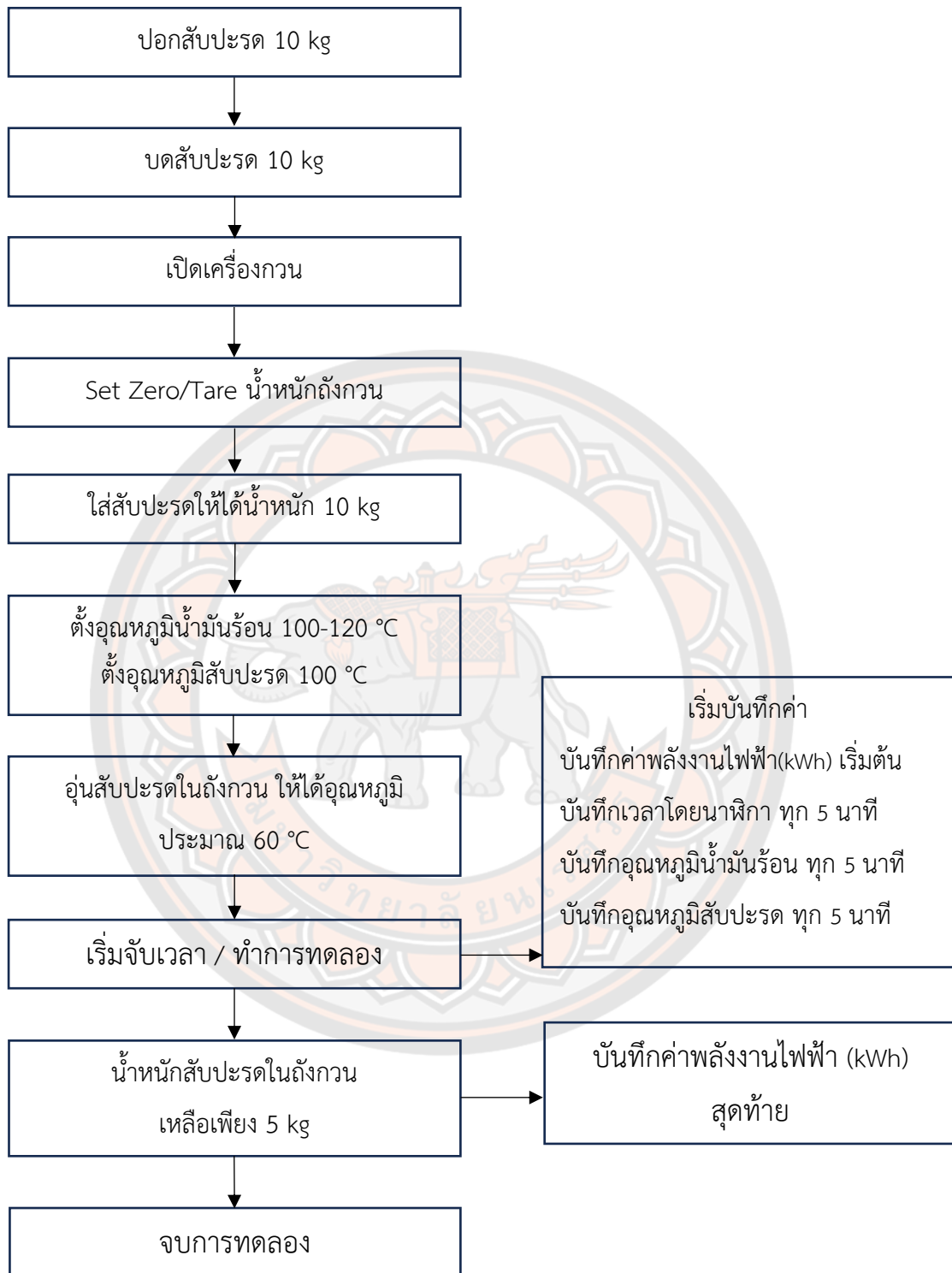
- 1) หม้อต้มน้ำมันร้อน (Hot Oil Boiler)
- 2) ขดลวดความร้อนระบบไฟฟ้า (Electric Heater)
- 3) เครื่องวัดอุณหภูมิน้ำมันร้อน (Thermocouple Primus PT100 Accuracy Class A \pm 0.15 °C)
- 4) ป้อน้ำมันร้อน
- 5) ถังกวนสับปะรด (Double Jacket Tank)

- 6) เครื่องชั่งน้ำหนัก (Load Cell / model YZ108CL CAP 150kg. Accuracy class according to OIML R60)
- 7) เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple Primus PT100 Accuracy Class A ± 0.15 °C)
- 8) เกจวัดแรงดันสุญญากาศ (Pressure Gauge / Nuova Fima Vacuum Gauge / Accuracy class: 1,6 as per EN 837-1)
- 9) ถังควบแน่น (Condensing Tank)
- 10) ส่วนควบแน่นไอน้ำ
- 11) ถังเก็บน้ำ
- 12) ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)
- 13) หอระบายความร้อนของน้ำ (Cooling Tower)
- 14) ปั๊มน้ำ
- 15) POWER METER (อุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า)

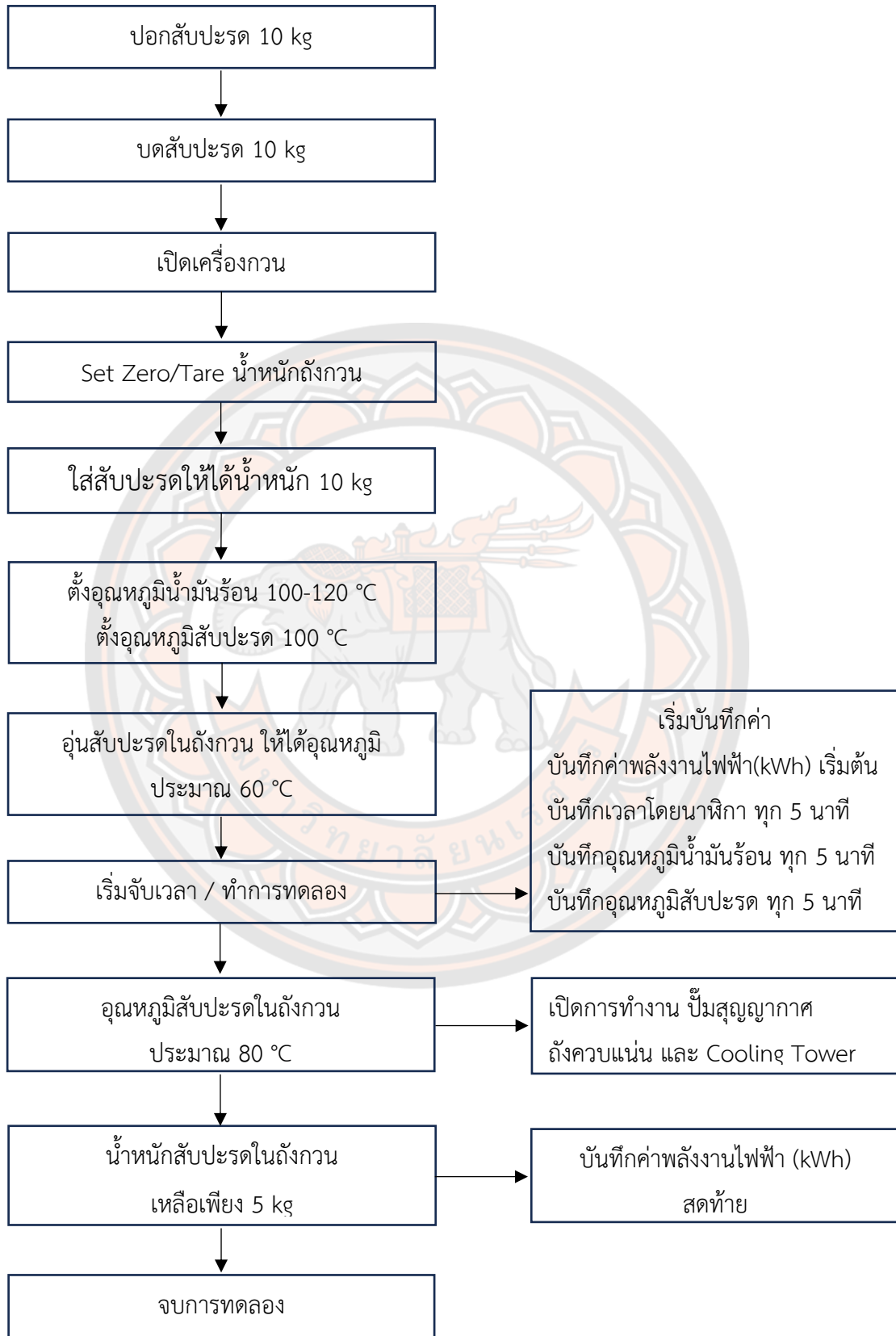
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทำการทดสอบสับปะรดกวนโดยใช้เทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศที่สภาวะอุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C ที่ควบคุมอุณหภูมิในการกวนไม่เกิน 100 °C จุดเดือดของน้ำในสับปะรดไม่เกิน 80 °C เปรียบเทียบกับการกวนสับปะรดแบบไม่ใช่สุญญากาศที่สภาวะอุณหภูมิ 100 °C และพิจารณาลักษณะทางกายภาพ สี ความสิ้นเปลืองพลังงาน ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นจะมีการพิจารณาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงภาพที่ 14 ทำการวิเคราะห์ตัวแปรและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ ดังนี้

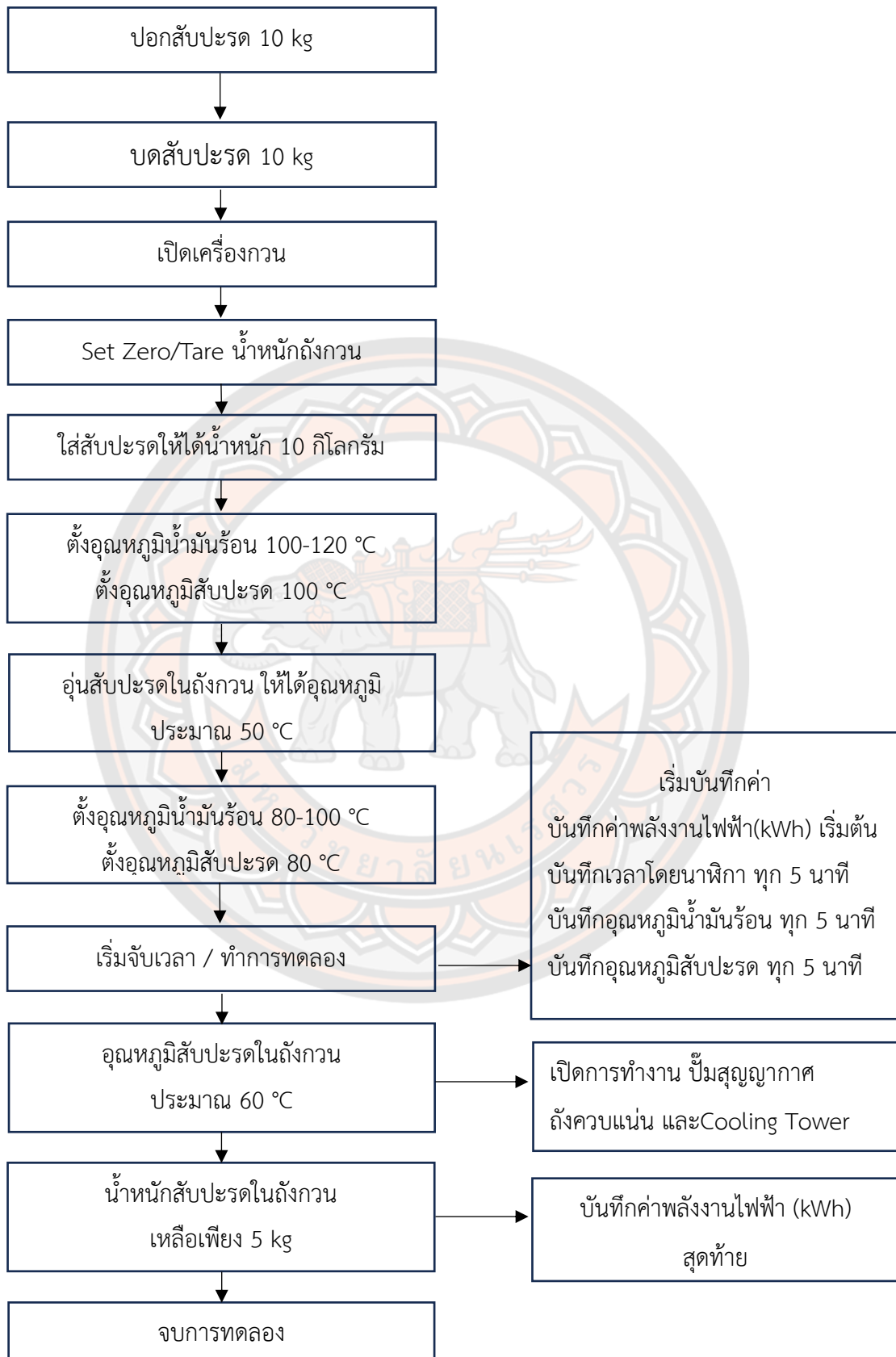
1. พัฒนาและออกแบบเครื่องกวนสับปะรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ
2. การทำงานของเครื่องกวนสับปะรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ
3. เก็บข้อมูล และทดสอบเครื่องกวนสับปะรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ
4. วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ สี ของสับปะรดกวน
5. ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ



ภาพ 14 ขั้นตอนการทดสอบภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C



ภาพ 15 ขั้นตอนการทดสอบภายใต้สุญญากาศ 100 °C



ภาพ 16 ขั้นตอนการทดสอบภายใต้สุญญากาศ 80 °C

1. การออกแบบเครื่องกวนสับปรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ

กำหนดปริมาณสับปรดที่จะทำการทดลอง อยู่ที่ 10 กิโลกรัม และต้องการดึงน้ำออกจากสับปรด 5 กิโลกรัม ในระยะเวลาประมาณ 60 นาที โดยสับปรดต้องมีอุณหภูมิในการกวนไม่เกิน 100 °C จุดเดือดของน้ำในสับปรดไม่เกิน 80 °C

การออกแบบถังกวนสับปรด (Double Jacket Tank)

ปริมาณสับปรดในกวนควรมีปริมาณไม่น้อยกว่า 20% ของปริมาตรถังกวนเพื่อให้ใบกวนสามารถทำงานได้อย่างเต็มที่และคุ้มค่าเพียงพอที่จะทำผลิตภัณฑ์เพื่อทดลอง (Test Product) แต่ปริมาณสับปรดในถังกวนไม่ควรเกิน 60% ในกรณีที่เป็นกรกวนในสุญญากาศเพื่อให้มีพื้นที่เหลือสำหรับให้อุ่นน้ำที่เกิดการระเหยในระบบขยายตัว ดังนั้นขนาดถังกวนที่ใช้กวนสับปรดขนาด 10 กิโลกรัม สามารถเลือกได้ตั้งแต่ 17 ลิตร และไม่ควรมากเกิน 50 ลิตร ถังที่เลือกใช้เป็นถังสองชั้นโดยถังชั้นนอกให้น้ำมันร้อนผ่านเพื่อให้ความร้อนกับสับปรดในถังกวนและสามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันร้อนกับสับปรดในถังกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งมีใบกวนพร้อมมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า ติดตั้งบนถังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากถังขนาด 17 ลิตรมีขนาดเล็กเกินไปที่จะติดตั้งระบบดังกล่าวทั้งหมด จึงเลือกสร้างถังขนาด 50 ลิตร

ออกแบบเครื่องให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า(Electric Heater) ที่สภาวะการระเหยน้ำภายใต้สภาวะสุญญากาศ พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ Boiling Point = 80 °C โดยหา Q สูตร

$$\begin{aligned} Q_1 &= mc\Delta t \\ &= 5 \text{ kg} \times 4.187 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times (80^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}) \\ &= 418.7 \text{ KJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= ml \\ &= 5 \text{ kg} \times 2,308 \text{ kJ/kg} \\ &= 11,540 \text{ KJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total } Q_{\text{รวม}} &= Q_1 + Q_2 \\ &= 418.7 \text{ KJ} + 11,540 \text{ kJ} \\ &= 11,958.7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่เครื่องให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าสร้างได้ต้องไม่น้อยกว่า 11,958.7 kJ per Hr. ต่อการระเหยน้ำ 5 กิโลกรัม โดยคำนวณค่า safety factor ไว้ที่ 2.0 เท่า = 11,958.7 kJ x 2 = 23,917.4 หรือ ประมาณ 24,000 kJ

การเลือกขดลวดความร้อน ขนาดที่ต้องใช้ ต้องมีขนาดประมาณ $24,000 \text{ kJ} \times 0.277778 \text{ Wh/kJ} = 6,666.67 \text{ Wh}$

(โดยที่ 1 kJ = 0.277778 Wh or 1 Wh = 3.6 kJ)

ขดลวดความร้อนในอุตสาหกรรมที่มีขนาดจำหน่ายที่มีขนาดใกล้เคียงคือ 6,000 W



ภาพ 17 ฮีตเตอร์ต้มน้ำ 6000 W

การออกแบบถังควบแน่น (Condensing Tank)

เพื่อให้ไอน้ำที่เกิดจากถังถูกควบแน่นเป็นหยดน้ำทำให้ปริมาตรของไอน้ำลดลงเพิ่มประสิทธิภาพในการระเหยและรักษาภาวะสุญญากาศในถังกวน จึงออกแบบเป็นท่อสองชั้นโดยท่อชั้นนอกให้มีน้ำเย็นจากหอระบายความร้อนด้วยน้ำไหลผ่านมาแลกเปลี่ยนกับท่อขนาดเล็กที่มีไอน้ำจากถังกวนออกมาและกลายเป็นหยดน้ำไหลลงไปยังถังเก็บน้ำด้านล่างและจะทำการถ่ายทิ้งเมื่อเสร็จการทำงานทุกครั้ง

การเลือกหอระบายความร้อนด้วยน้ำ (Cooling Tower)

หอระบายความร้อนของน้ำต้องสามารถดึงพลังงานความร้อนออกได้ไม่น้อยกว่า 24,000 KJ

โดยที่ $1 \text{ KJ} = 0.9478171 \text{ BTU}$

เพราะฉะนั้น $24,000 \text{ KJ} = 22,747.61 \text{ BTU}$

หรือไม่น้อยกว่า 3RT แต่จากข้อมูลของ Cooling Tower แบบอุตสาหกรรมมีในตลาดราคาเหมาะสมขนาดต่ำสุดที่มีจำหน่าย คือขนาด 10RT

쿨링ทาวเวอร์	ใบพัด (HP)	ปั๊ม (HP)	แรงดัน (m)	อัตราการไหล (m ³ /hr)	ขนาดท่อน้ำ IN/OUT (Ømm)	พื้นที่ติดตั้ง (กxย) สำหรับ ปั๊ม 1 ตัว (mxm)	พื้นที่ติดตั้ง (กxย) สำหรับ ปั๊ม 2 ตัว (mxm)
10 RT	0.5	3	28	11.7	50	1.89x1.70	2.48x1.70
15 RT	0.5	3	28	11.7	50	1.89x2.04	2.48x2.04
20 RT	0.5	3	28	11.7	50	1.89x2.04	2.59x2.04
25 RT	1	5	32	25	65	2.43x2.175	3.02x2.175
30 RT	1	5	32	25	65	2.62x2.36	3.2x2.36
40 RT	1	5	32	25	65	2.98x2.73	3.6x2.395
50 RT	1	10	36	40	80	3.14x2.85	3.77x2.45
60 RT	1.5	10	36	40	80	3.14x2.85	3.77x2.45
70 RT	1.5	10	36	40	80	3.37x3.13	4.05x2.878
80 RT	1.5	10	36	40	80	3.42x3.13	4.05x2.878
100 RT	2	15	28	90	100	4.09x3.58	4.78x3.58

ภาพ 18 ข้อมูลพื้นฐานของคูลิ่งทาวเวอร์ (Cooling Tower)

การเลือกปั๊มสุญญากาศ(Vacuum Pump)

การออกแบบกำหนดให้ระบบสุญญากาศสามารถดึงน้ำออกจากระบบให้ได้ 5 กิโลกรัม ภายใน 60 นาที ดังนั้นถ้าต้องการระเหยในระบบปิดให้น้ำกลายเป็นไอที่อุณหภูมิไม่เกิน 80 °C แสดงว่าแรงดันในระบบปิดต้องไม่เกิน 47.416 kPa หรือ 0.468 atm (ตารางที่ 9 Thermodynamic Table A-4) ต้องนำไอน้ำออกปริมาตรเท่าไร ใช้กฎ Gas Laws

Gas Laws : ปริมาณน้ำ 1 Kg (1 lite) จะกลายเป็นไอน้ำปริมาตรเท่าไรที่ความดันดังกล่าว

$$V = \frac{nRT}{p}$$

$$= \frac{1,000/18 \text{ mol} \times 0.082 \text{ L} \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \times (273+80) \text{ K}}{0.468 \text{ atm}}$$

$$= 3436.13 \text{ lite}$$

ดังนั้น น้ำ 5 Kg จะกลายเป็นไอน้ำ 17,180.65 lite หรือ ประมาณ 17 m³

การทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเครื่องที่ออกแบบสามารถนำไอน้ำออก = 17,180.65 lite/60 min หรือ 286.34 lite/min.

เนื่องจากปั๊มสุญญากาศจะมีข้อมูลที่สำคัญ 2 สิ่งที่ต้องรู้คือ

1. Maximum suction capacity คือกรณีที่ระบบมีไอน้ำเท่ากับค่าที่ระบุนี้ เข้าสู่ปั๊มสุญญากาศดังกล่าวจะสามารถดึงไอน้ำออกได้ทั้งหมดตามเวลาภายใต้สภาวะแรงดันบรรยากาศภายนอก ซึ่งจะส่งผลให้ไม่ส่งผลให้แรงดันในระบบจะเท่ากับแรงดันบรรยากาศภายนอกไม่เกิดสภาวะสุญญากาศ

2. Ultimate Vacuum mbar คือ แรงดันสุญญากาศที่ปั๊มสามารถสร้างได้สูงสุดในกรณีที่ในถังดังกล่าวไม่มีการรบกวนจากภายนอกและไม่มีไหลคหรือไม่มีการระเหยจากของเหลวเพิ่มภายในระบบปิด

จาก สเปกของปั๊มระบุว่าสามารถสร้างสุญญากาศได้ถึง 33 mbar หรือ 3.3 kPa

จากข้อมูล 25 °C Saturated Pressure 3.1698 kPa และ 30 °C Saturated Pressure 4.2469 kPa (จาก Thermodynamic Table A-4 หน้าที่ 905)

ดังนั้นจุดเดือนของต่ำสุดของน้ำที่ปั๊มสุญญากาศนี้สามารถทำได้ในอุดมคติ คือ

$$= \frac{25^{\circ}\text{C} + (3.3 \text{ kPa} - 3.1698 \text{ kPa}) \times (30^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})}{(4.2469 \text{ kPa} - 3.1698 \text{ kPa})}$$

$$= 25.6044^{\circ}\text{C}$$

แต่เนื่องจากระบบระเหยน้ำที่ออกแบบมาจะมีไอน้ำระเหยออกตลอดเวลาเกิดการขยายตัวของไอน้ำทำให้ปั๊มต้องทำหน้าที่ในการดึงเอาปริมาณไอน้ำออกพร้อมทั้งสร้างสุญญากาศ ส่งผลให้สุญญากาศในถังกวนที่ปั๊มสุญญากาศสามารถสร้างได้มีค่าสูงกว่าสเปกที่ระบุไว้มาก

ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกขนาดของปั๊มให้สูงกว่าเพื่อที่จะสามารถดึงเอาไอน้ำออกจากถังกวนได้ทั้งหมดไม่น้อยกว่า 286.34 lite/min. ตามที่คำนวณ และยังคงสามารถสร้างสุญญากาศภายในถังกวนให้ต่ำกว่า 47.416 kPa หรือ 0.468 atm เพียงพอที่จะทำให้ไอน้ำในสัปดาห์ระเหยที่อุณหภูมิไม่เกิน 80 °C โดยคำนวณค่า safety factor ในการดึงน้ำออกไว้ที่ 4.0 เท่า = 286.34 lite/min. x 4 = 1,145.35 lite/min. หรือ ประมาณ 1.2 m³/min จึงเลือกปั๊มสุญญากาศรุ่น 2VB2-070 ซึ่งมีค่า Maximum suction capacity = 1.33 m³/min ดังภาพ 17

Curve No.	Model	Max. suction capacity		Ultimate vacuum mbar(MPa)	Motor power kW	Speed r.p.m	Operating liquid flow rate L/min	Noise dB(A)	Weight kg
		m ³ /min	m ³ /h						
60V	2BV2-060	0.45	27	33mbar (-0.097MPa)	0.81	2840	2.5	62	37
61V	2BV2-061	0.86	52		1.45	2840	2.5	65	41
70V	2BV2-070	1.33	80		2.35	2860	3	66	66
71V	2BV2-071	1.83	110		3.85	2880	4.7	72	85
110V	2BV5-110	2.75	165		4	1440	7.2	63	120
111V	2BV5-111	3.83	230		5.5	1440	8.8	68	150
121V	2BV5-121	4.66	280		7.5	1440	11	69	210
131V	2BV5-131	6.66	400		11	1460	16	73	280
161V	2BV5-161	8.33	500		15	970	22	74	390
110V	2BV6-110	2.75	165		4	1440	67	63	150
111V	2BV6-111	3.83	230		5.5	1440	10	68	200
121V	2BV6-121	4.66	280		7.5	1440	12	69	230
131V	2BV6-131	6.66	400		11	1460	17	73	315
161V	2BV6-161	8.33	500		15	970	23	74	426

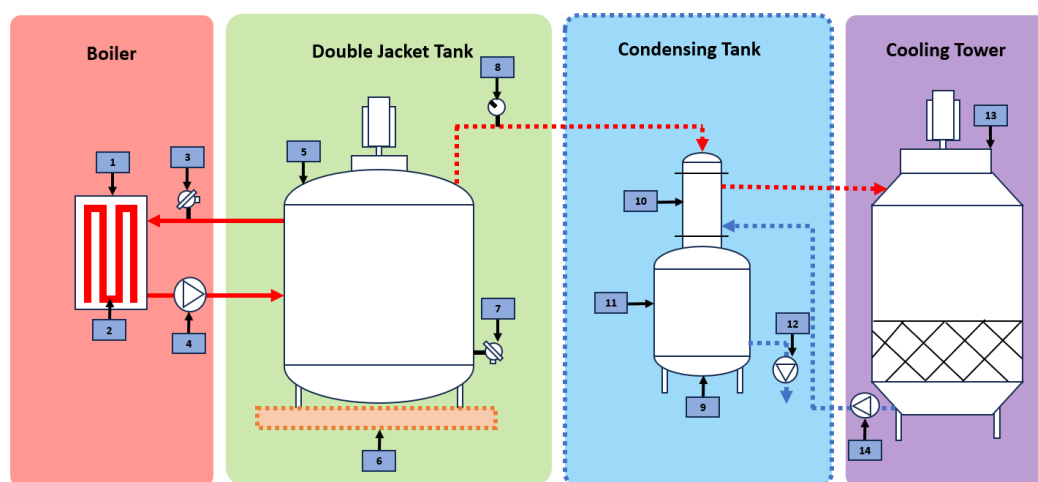
ภาพ 19 คุณสมบัติปั๊มสุญญากาศ 2BV



ภาพ 20 เครื่องกวนสับปรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ

เครื่องกวนสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยถังกวนสับปะรดมีความจุขนาด 50 ลิตรตั้งอยู่บนเครื่องชั่งน้ำหนักภายในมีใบกวนพร้อมมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า ติดตั้งอยู่ในถังกวน ที่สภาวะอุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C ที่ควบคุมอุณหภูมิในการกวนไม่เกิน 100 °C จุดเดือดของน้ำในสับปะรดไม่เกิน 80 °C

2. การทำงานของเครื่องกวนสับปะรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ



ภาพ 21 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องกวนสับปะรด

- 1) หม้อต้มน้ำมันร้อน (Hot Oil Boiler)
- 2) ขดลวดความร้อนระบบไฟฟ้า (Electric Heater)
- 3) เครื่องวัดอุณหภูมิน้ำมันร้อน (Thermocouple Primus PT100 Accuracy Class A \pm 0.15 °C)
- 4) ปั๊มน้ำมันร้อน
- 5) ถังกวนสับปะรด (Double Jacket Tank)
- 6) เครื่องชั่งน้ำหนัก (Load Cell / model YZ108CL CAP 150 kg. Accuracy class according to OIML R60)
- 7) เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple Primus PT100 Accuracy Class A \pm 0.15°C)
- 8) เกจวัดแรงดันสุญญากาศ (Pressure Gauge / Nuova Fima Vacuum Gauge / Accuracy class: 1,6 as per EN 837-1)
- 9) ถังควบแน่น (Condensing Tank)
- 10) ส่วนควบแน่นไอน้ำ
- 11) ถังเก็บน้ำ

- 12) ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)
- 13) หอระบายความร้อนของน้ำ(Cooling Tower)
- 14) ปั๊มน้ำ

เครื่องให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า (Electric Heater) Tube Heat Exchanger

หม้อต้มน้ำมันร้อน (Hot Oil Boiler) เป็นหม้อสแตนเลสระบบปิดที่บรรจุน้ำมันเป็นตัวกลางในการให้ความร้อน ให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อนระบบไฟฟ้า (Electric Heater) การทำงานโดยการทดสอบนี้จะตั้งค่าให้ระบบอ่านค่าอุณหภูมิน้ำมันร้อนในถังได้โดยเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple Primus PT100 Accuracy Class A $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$) สามารถตั้งค่าควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันร้อนได้โดยตั้งค่าและแสดงผลอุณหภูมิของน้ำมันร้อนที่ตู้ควบคุมหลัก และมีปั๊มน้ำมันร้อนส่งน้ำมันร้อนเข้าสู่ถังกวน ดังภาพ 21

ถังกวนสับปะรด (Double Jacket Tank)

ถังกวนสับปะรด(Double Jacket Tank) มีความจุขนาด 50 ลิตรตั้งอยู่บนเครื่องชั่งน้ำหนัก (Load Cell / model YZ108CL CAP 150kg. Accuracy class according to OIML R60) และแสดงผลน้ำหนักผ่านจอแสดงผลแบบดิจิทัล (Digital Display) ที่สามารถตั้งค่าเริ่มต้น 0 kg ได้ (Tare/Set Zero) เพื่อใช้ในการติดตามน้ำหนักตลอดการทดลอง โดยถังมีทั้งหมด 2 ชั้น

ถังชั้นนอกจะเป็นชั้นที่มีน้ำมันร้อนที่ส่งมาจากถังต้มน้ำมันร้อนโดยปั๊มและน้ำมันร้อนจะไม่มีสัมผัสสับปะรดในถังกวนแต่จะมีการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันร้อนที่อยู่รอบถังไปยังสับปะรดกวนในถังชั้นในเมื่อน้ำมันร้อนถ่ายเทความร้อนไปแล้วอุณหภูมิน้ำมันร้อนจะลดลงและถูกส่งวนกลับไปให้ความร้อนในถังต้มน้ำมันร้อน

ถังชั้นในไว้ใส่สับปะรดหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการกวน มีใบกวนทำงานด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้สับปะรดสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น และมีฝาปิดที่สามารถทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศ มีการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple Primus PT100 Accuracy Class A $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$) สำหรับวัดอุณหภูมิของสับปะรดในถังกวนและสามารถตั้งค่าควบคุมอุณหภูมิของสับปะรดในถังกวนได้ที่ตู้ควบคุมหลัก ด้านบนฝาปิดของถังกวนจะมีท่อระบายไอน้ำ ให้ออกไปตามท่อสแตนเลสและติดตั้งเกจวัดแรงดันสุญญากาศ(Pressure Gauge / Nuova Fima Vacuum Gauge / Accuracy class: 1,6 as per EN 837-1) ส่งไอน้ำที่ได้โดยท่อระบายไอน้ำจากถังกวนไปยังถังควบแน่นในลำดับถัดไป และมีการติดตั้งมอเตอร์ พร้อมใบกวนใช้กวนสับปะรดในถังชั้นในเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายความร้อนเข้าสู่สับปะรดกวน โดยสามารถกวนสับปะรดได้ทั้งภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติโดยการเปิดใบกวนและไม่ปิดฝากลังกวนเพื่อให้ไอน้ำสามารถระเหยออกได้อย่างอิสระ และสามารถกวนภายใต้สภาวะ

สุญญากาศโดยการปิดฝาถังให้เป็นระบบปิดเพื่อบังคับให้ไอน้ำระเหยออกไปตามท่อส่งไปยังถังควบแน่นและระบบในลำดับถัดๆไป ดังภาพ 21

ถังควบแน่น (Condensing Tank)

ถังควบแน่น(Condensing Tank) จะภายในแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือส่วนควบแน่นไอน้ำให้กลายเป็นน้ำโดยด้านบนจะเป็นท่อนำไอน้ำจากถังกวนเข้ามา ส่วนที่หนึ่งนี้ทำจากท่อสองชั้น ชั้นนอกทำจากสแตนเลสปิดหัวท้าย ด้านในจะมีท่อสแตนเลสขนาดเล็กให้ไอน้ำผ่านมาแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้เกิดการควบแน่น ส่วนน้ำหล่อเย็นที่มาใช้ลดอุณหภูมิไอน้ำจะไหลมาจาก Cooling Tower อุณหภูมิประมาณ 20-25 °C เข้าสู่ด้านล่างของท่อใหญ่ชั้นนอกจะแลกเปลี่ยนและนำความร้อนที่ได้ไอน้ำอุณหภูมิสูงกว่า 80 °C ส่งผลให้น้ำหล่อเย็นอุณหภูมิสูงขึ้นและจะถูกส่งไปลดอุณหภูมิที่ Cooling Tower เพื่อให้ น้ำหล่อเย็นเย็นลง ส่วนของไอน้ำที่ไหลผ่านมาจากท่อเล็กๆด้านในมาจากด้านบนลงล่าง และเมื่ออุณหภูมิไอน้ำลดลงก็จะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำลงสู่ด้านล่างไปยัง ส่วนที่สองซึ่งเป็นถังเก็บน้ำ เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะทำการปล่อยน้ำที่ได้จากการควบแน่นนี้ทิ้งทุกครั้ง โดยส่วนองถังเก็บน้ำจะมีท่อเชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศดังภาพ 21

ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) จะทำหน้าที่ดึงไอน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการควบแน่นของถังควบแน่นและสร้างสภาวะสุญญากาศเพื่อให้เกิดการระเหยในถังกวนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C โดยจะทำการเชื่อมต่อกับถังควบแน่นดังภาพ 21

หอระบายความร้อนของน้ำ(Cooling Tower)

หอระบายความร้อนของน้ำ(Cooling Tower) จะเป็นถังสำหรับลดอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น โดยน้ำร้อนที่รับความร้อนมีอุณหภูมิสูงจากถังควบแน่นจะไหลเป็นหยดน้ำจากด้านบนลงด้านล่างและมีพัดลมดูดอากาศติดไว้ด้านบนโดยจะดูดอากาศเย็นจากด้านล่างขึ้นด้านบนทิศทางสวนทางกับการไหลของน้ำร้อนเพื่อดึงความร้อนออกจากหยดน้ำ จะได้น้ำเย็นที่ถังเก็บน้ำซึ่งอยู่ด้านล่างระบบก็จะทำการสูบน้ำเย็นที่ได้โดยใช้ปั๊มน้ำเพื่อส่งกลับไปยังถังควบแน่นต่อไปดังภาพ 21

Power Meter

เนื่องจากเครื่องที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาใช้ระบบไฟฟ้าในการทำงานทั้งหมด ดังนั้นจึงทำการติดตั้ง power meter (LEOS AC 3 Phase Multi Function+RS485 / Accuracy (KW-H)

0.5%) ไว้ที่ระบบไฟฟ้าก่อนจ่ายเข้าเครื่อง เพื่อใช้วัดค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ในการทดลองของทั้งระบบ

3. เก็บข้อมูล และทดสอบเครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ

การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ

1. นำสับประรดสุกที่มีขนาดลูกและสีเปลือกเท่า ๆ กัน มาปอกเปลือก และล้างน้ำให้สะอาด จำนวน 30 kg
2. นำสับประรดไปบดให้มีความละเอียดจำนวน 30 kg
3. นำสับประรดที่บดแล้วแบ่งเป็น 3 ส่วน ส่วนละ 10 kg เท่าๆ กัน
4. นำสับประรดที่แบ่งแล้วใส่ลงในถังกวนที่มีการติดมอเตอร์และใบกวนโดยกำหนดใช้ Vacuum 100 และ 80 °C ที่ใช้ Ambient 100 °C



ภาพ 22 สับประรดสุกพันธุ์ภูเก็ต



ภาพ 23 หม้อกวนสับปะรด

ควบคุมการตรวจวัดค่าพลังงานโดยใช้ Power Meter ในการตรวจวัดพลังงานรวมทั้งระบบ ควบคุมขบวนการโดยใช้ เครื่องเดียวกันในการทดลอง ซึ่งจะประกอบด้วยระบบการกวน ระบบการถ่ายเทความร้อน ระบบการผลิตพลังงานความร้อนของระบบ เป็นชุดเดียวกันตลอดการทดลอง แต่ใช้สถานะในการทดลองต่างกันคือ ในสถานะบรรยากาศปกติจะทำการปิด Vacuum Pump ระบบ สนับสนุน และเปิดฝาถังให้เกิดการระเหยในบรรยากาศปกติ ส่วนการทดลองภายใต้สุญญากาศจะเปิด Vacuum Pump และระบบสนับสนุน

ทดสอบเครื่องกวนสับปะรดด้วยเทคนิคการควบคุมแน่นภายใต้สถานะสุญญากาศ

เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของสมรรถนะการควบคุมแน่นสำหรับการกวนสับปะรด โดยใช้สับปะรดสุกพันธุ์ภูเก็ต จากการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ และวัดคุณภาพหลังการลดความชื้น โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพหลังการลดความชื้น 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิในถังกวนสับปะรด ความดัน ซึ่งเครื่องกวนสับปะรดควบคุมระบบให้ความร้อนด้วย PLC โดยจะนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้จาก Thermocouple แบบ PT100 วัดอุณหภูมิสับปะรดในถังกวน (T1) และ thermocouple แบบ PT100 อีกชุดวัดอุณหภูมิน้ำมันร้อน (T2) มาใช้สั่งการควบคุม Heater ไฟฟ้า และช่วงที่อุณหภูมิของ PLC ที่ยอมรับให้คลาดเคลื่อนจากค่าที่ตั้งคือ $\pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยเงื่อนไขการทำงานของ PLC คือ ในการทดลอง ดังนี้

- **เงื่อนไขที่ 1** จะตั้งค่าอุณหภูมิสับปะรดกวน (T1) ในช่วง 90°C ถึง 100°C ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 90°C PLC จะสั่งให้ Heater ไฟฟ้า ทำงาน 100%
- **เงื่อนไขที่ 2** เมื่ออุณหภูมิอุณหภูมิสับปะรดกวน (T1) เกินกว่า 100°C PLC จะลดการทำงานของ Heater ไฟฟ้า ลงเหลือ 10%

- **เงื่อนไขที่ 3** แต่ถ้าอุณหภูมิอุณหภูมิสับประตวน (T1) อยู่ในช่วง 90-100 °C PLC จะให้ Heater ไฟฟ้าทำงานที่ 50% เพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำมันร้อน
- **เงื่อนไขที่ 4** อุณหภูมิน้ำมันร้อน (T2) ในช่วง 90 °C ถึง 100 °C ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 90 °C PLC จะสั่งให้ Heater ไฟฟ้า ทำงาน 100%
- **เงื่อนไขที่ 5** อุณหภูมิน้ำมันร้อน (T2) เกินกว่า 100 °C PLC จะลดการทำงานของ Heater ไฟฟ้า ลงเหลือ 10%
- **เงื่อนไขที่ 6** อุณหภูมิน้ำมันร้อน (T2) อยู่ในช่วง 90-100 °C PLC จะให้ Heater ไฟฟ้าทำงานที่ 50% เพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำมันร้อน

4. วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ สี ของสับประตวน [80]

การประมวลผลภาพ ขั้นตอนการประมวลผลภาพนำภาพถ่ายที่ได้อ้อมวิเคราะห์เป็นค่าสี ในหน่วย RGB ด้วยโปรแกรม ImageJ จากนั้นแปลงหน่วยสีจาก RGB เป็น L* a* b* ในขั้นตอนของ กระบวนการแปลงหน่วยสีทำการอ้างอิงจากวิธีมาตรฐานของ CIE (1995) โดยเริ่มจากแปลงค่า RGB ให้เป็น sRGB (standard RGB) ขั้นตอนแรกนำ ค่า RGB ไปหารด้วย 255 โดยจะได้เป็นค่า NR NG และ NB เพื่อปรับให้เป็นพื้นฐาน จากนั้นทำการคำนวณค่า sRGB ด้วยสมการ (1)-(3)

$$r = \begin{cases} [(NR + 0.055)/1.005]^{2.4}, & NR > 0.04045 \\ NR/12.92, & NR \leq 0.04045 \end{cases} \quad (1)$$

$$g = \begin{cases} [(NG + 0.055)/1.005]^{2.4}, & NG > 0.04045 \\ NG/12.92, & NG \leq 0.04045 \end{cases} \quad (2)$$

$$b = \begin{cases} [(NB + 0.055)/1.005]^{2.4}, & NB > 0.04045 \\ NB/12.92, & NB \leq 0.04045 \end{cases} \quad (3)$$

โดย NR , NG และ NB คือ ค่า RGB ที่ปรับค่าแล้ว ส่วนค่า r, g และ b คือค่า sRGB จากนั้นนำ sRGB ที่ได้ไปคำนวณเพื่อแปลงค่าให้เข้าสู่ปริภูมิสี XYZ ด้วยสมการ (4)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = 100 \times \begin{bmatrix} 0.4124564 & 0.3575761 & 0.1804375 \\ 0.2126729 & 0.7151522 & 0.0721750 \\ 0.0193339 & 0.1191920 & 0.9503041 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \quad (4)$$

จากนั้นนำ ค่า XYZ ไปหารด้วย X_n Y_n Z_n โดยที่ค่า X_n, Y_n และ Z_n คือค่า tri-stimulus อ้างอิงของวัตถุสีขาวตามมาตรฐานของ CIE สำหรับแสง D65, 2° โดยค่า $X_n = 95.047, Y_n = 100$ และ $Z_n = 108.883$ จากนั้นคำนวณค่า $L^*a^*b^*$ ตามสมการ (5) - (10)

$$f\left(\frac{x}{X_n}\right) = \begin{cases} 7.787x + \frac{16}{116}, & x \leq 0.008856 \\ x^{1/3}, & x > 0.008856 \end{cases} \quad (5)$$

$$f\left(\frac{y}{Y_n}\right) = \begin{cases} 7.787y + \frac{16}{116}, & y \leq 0.008856 \\ y^{1/3}, & y > 0.008856 \end{cases} \quad (6)$$

$$f\left(\frac{z}{Z_n}\right) = \begin{cases} 7.787z + \frac{16}{116}, & z \leq 0.008856 \\ z^{1/3}, & z > 0.008856 \end{cases} \quad (7)$$

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (8)$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad (9)$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad (10)$$

นอกจากนี้ยังได้ทำการคำนวณค่าความต่างของสี (DELTA E) ระหว่างสี 2 สีที่ต้องการทราบถึงความแตกต่างทำการคำนวณดังสมการ (11)

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (11)$$

โดยที่ $\Delta E =$ ความต่างของสีระหว่างสีทั้งสองสี

$L_1^*, a_1^*, b_1^* =$ ค่าสีในหน่วย CLELAB ในตำแหน่งที่ 1 (ค่าที่ 1)

$L_2^*, a_2^*, b_2^* =$ ค่าสีในหน่วย CLELAB ในตำแหน่งที่ 2 (ค่าที่ 2)

เมื่อคำนวณค่าตามสมการ (8)–(10) เสร็จสิ้นแล้วจะได้ค่าตัวแปรทางสถิติ L^* a^* b^* ออกมา เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป ในปัจจุบันมีการนำเทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายมาใช้งาน ตรวจสอบคุณภาพของผลผลิตและชิ้นงานอยู่บ้าง

วิเคราะห์ข้อมูลความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

เครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ พลังงานที่ใช้ในกระบวนการได้แก่ พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า โดยปัจจุบันอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นถึงคุณภาพผลิตภัณฑ์และพลังงานที่ใช้ นั่นคือจะต้องไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ Specific energy consumption, SEC นิยามของสมการ เป็นค่าการใช้พลังงานเฉพาะ (Specific energy consumption, SEC) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ (Input) และปริมาณผลผลิตที่ได้ (Output) ในช่วงเวลาเดียวกัน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$SEC = \frac{\text{Energy (E)}}{\text{Product (Q)}}$$

เมื่อ SEC = ค่าดัชนีชี้วัดการใช้พลังงาน
E = ปริมาณพลังงานที่ใช้
Q = ปริมาณผลผลิตในช่วงเดียวกัน

โดยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เป็นบ่งชี้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ นั่นคือ หากค่า SEC สูง จะมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ และหากค่า SEC ต่ำ จะมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง

5. ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตสับประรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ(Net Present Value: NPV) [81]

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์และมูลค่าปัจจุบัน ของต้นทุนของเครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศนี้เพื่อชี้ให้เห็นว่าเครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้นจะให้ผลประโยชน์คุ้มค่าหรือไม่ ซึ่งมีสูตรที่ใช้คำนวณ ดังนี้

$$NPV = (B_0 - C_0) + \frac{(B_1 - C_1)}{(1+r)} + \frac{(B_2 - C_2)}{(1+r)^2} + \dots + \frac{(B_n - C_n)}{(1+r)^n}$$

$$\text{หรือ} = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \quad \text{หรือ} = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

โดยที่

- B_t = มูลค่าของผลประโยชน์จากโครงการที่เกิดขึ้นในปีที่ t
 C_t = มูลค่าของต้นทุนจากโครงการที่เกิดขึ้นในปีที่ t
 r = อัตราคิดลด (Discount Rate)
 n = อายุของโครงการหรือปีที่สิ้นสุดอายุของโครงการ

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาให้ทราบถึงผลทางเศรษฐกิจอยู่ในเกณฑ์ที่จะลงทุนได้หรือไม่ ค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) จะช่วยในการตัดสินใจได้ดังนี้ คือ ถ้า NPV มีค่ามากกว่าศูนย์ย่อมหมายความว่างานวิจัยนี้ให้ผลคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ถ้าค่า NPV น้อยกว่าศูนย์ งานวิจัยนี้ก็ไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และถ้าค่า NPV ของงานวิจัยนี้เท่ากับศูนย์พอดีแสดงว่าการเลือกลงทุนหรือไม่สำหรับงานวิจัยนี้จะไม่มีการกระทบต่อระบบเศรษฐกิจแต่อย่างใด

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR)

อัตราผลตอบแทนภายใน คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการเท่ากับเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิพอดี หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือตัวชี้วัด IRR เป็นค่าแสดงถึงอัตราผลตอบแทนที่แท้จริงของงานวิจัยนี้ เพื่อใช้พิจารณาว่างานวิจัยนี้จะคืนทุนในอัตราเท่าใด ซึ่งคำนวณได้จากสูตร ซึ่งมีสูตรที่ใช้คำนวณ ดังนี้

$$NPV=0 = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+IRR)^t}$$

- โดยที่ r = อัตราคิดลด (Discount Rate)
 IRR = อัตราคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับศูนย์

เกณฑ์การตัดสินใจในการลงทุนเครื่องกว่นสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ นำค่า IRR ไปเปรียบเทียบกับอัตราค่าเสียโอกาสของเงินทุน โดยอ้างอิงจากอัตราดอกเบี้ย

เงินกู้ของสถาบันการเงิน หรือ อัตราดอกเบี้ย พันธบัตรรัฐบาล โดยมากหากเป็นการลงทุนจากหน่วยงานภาครัฐ จะอ้างอิงจากอัตราดอกเบี้ยพันธบัตรรัฐบาลอายุ 10 ปี

ถ้าหาก $IRR > r$ แสดงว่าเครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศมีความคุ้มค่าในการลงทุน ถ้าหาก $IRR < r$ แสดงว่าไม่สมควรลงทุน และถ้าหาก $IRR = r$ แสดงว่าเครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศไม่ก่อให้เกิดผลกระทบใด ๆ

อย่างไรก็ดี เนื่องจากการประมาณต้นทุนและผลประโยชน์ของเครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นการพยากรณ์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นก่อนที่จะมีการดำเนินงานวิจัยจริง ซึ่งในการดำเนินงานวิจัยจริงอาจมีปัจจัยบางอย่างเปลี่ยนแปลงไป การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนจึงควรพิจารณาถึงความไม่แน่นอนโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) คือ การวัดความเปลี่ยนแปลงของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราส่วนระหว่างผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย และอัตราผลตอบแทนทางการเงินของงานวิจัย ในกรณีที่สมมติฐานที่ใช้ในการประมาณต้นทุนและผลประโยชน์ของงานวิจัยเปลี่ยนแปลงไป เพื่อทดสอบว่าในสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป งานวิจัยนี้ยังคงมีความเหมาะสมทางการเงินหรือไม่

รายได้สุทธิ (Net income)

$$\text{รายได้สุทธิ} = \text{รายได้} - \text{ต้นทุน}$$

ระยะเวลาคืนทุน(Payback Period)

ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสมจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับค่าเงินลงทุน ผลที่ได้รับจากการประเมินการลงทุนวิธีนี้ทำให้ทราบว่าจะได้รับเงินทุนซ้ำหรือเร็วเท่าใด เพราะยิ่งถ้าคืนทุนเร็วโอกาสเสี่ยงที่จะขาดทุนในอนาคตก็จะน้อยลงสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{จำนวนเงินที่ลงทุน}}{\text{กระแสเงินสดที่ได้รับจากการลงทุนในแต่ละปี}}$$

3.3 สถานที่ดำเนินการวิจัย

บริษัท เดอะ คลาวด์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่อยู่ 158/30 หมู่1 ตำบลสุรศักดิ์ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110

บทที่ 4

ผลการวิจัย

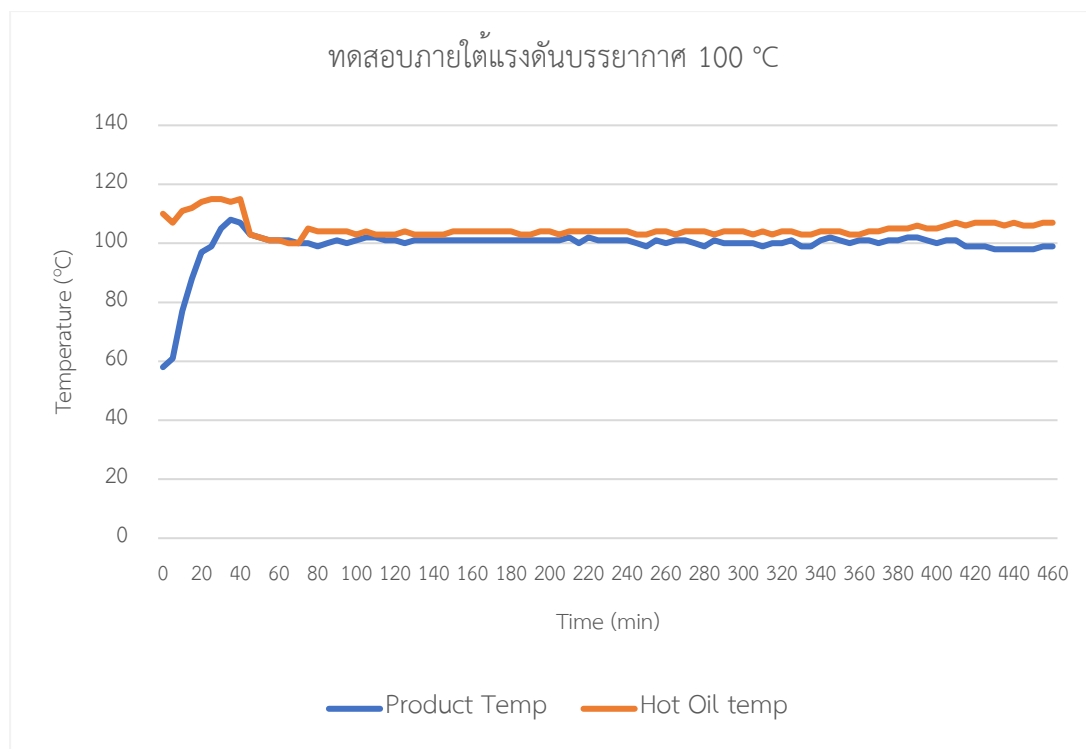
งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยเครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ กำหนดปริมาณสับประรดที่จะทำการทดลอง อยู่ที่ 10 กิโลกรัมและต้องการดึงน้ำออกจากสับประรด 5 กิโลกรัม ในระยะเวลาประมาณ 60 นาที โดยสับประรดต้องมีอุณหภูมิในการกวนไม่เกิน 100 °C จุดเดือดของน้ำในสับประรดไม่เกิน 80 °C ซึ่งวิธีการดำเนินงานนี้จะทำการศึกษาและเก็บข้อมูลการกวนสับประรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยถังกวนสับประรดมีความจุขนาด 50 ลิตรตั้งอยู่บนเครื่องชั่งน้ำหนักภายในมีใบกวนพร้อมมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า ติดตั้งอยู่ในถังกวน ที่สภาวะอุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C ที่ควบคุมอุณหภูมิในการกวนไม่เกิน 100 °C จุดเดือดของน้ำในสับประรดไม่เกิน 80 °C ในการศึกษาจะวิเคราะห์ถึงสภาวะที่เหมาะสมในการกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของสับประรดในด้านสี ระยะเวลาที่ใช้ในการกวนสับประรด ความจำเป็นพลังงานจำเพาะ จลนพลศาสตร์ รวมไปถึงต้นทุนในกระบวนการกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ

วิเคราะห์ผลการทดสอบเครื่องกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ สามารถวิเคราะห์ผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จลนพลศาสตร์การกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ
2. ลักษณะทางกายภาพสี
3. การวิเคราะห์ต้นทุนในกระบวนการกวนสับประรดด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ

4.1 จลนพลศาสตร์การลดความชื้น

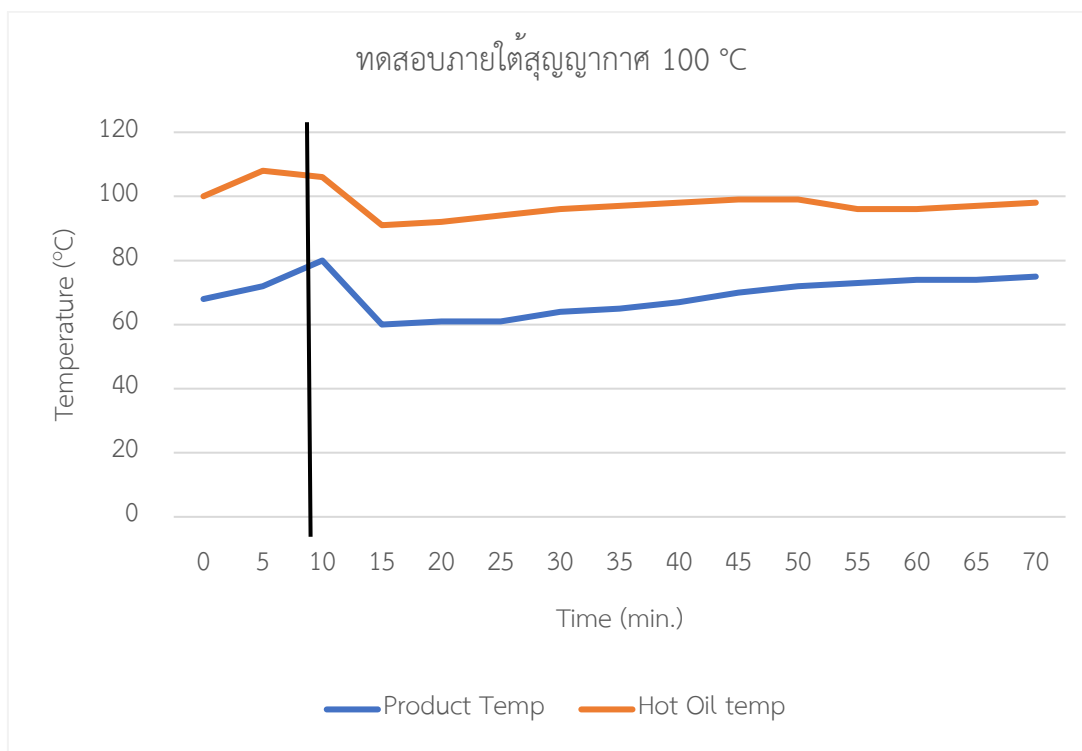
ก่อนเริ่มการทดลองทั้งหมด จะทำการอุ่นสับประรดให้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 60 °C โดยตั้งค่าน้ำมันร้อนไม่เกิน 120 °C และเมื่อได้อุณหภูมิสับประรดใกล้เคียงจึงจะเริ่มตั้งค่าควบคุมตามการทดลอง



ภาพ 24 ทดสอบภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C

การทดลองเริ่มเมื่อทำการอุ่นสับปะรดได้อุณหภูมิที่ 60 °C จึงเริ่มจับเวลา ในนาทีที่ 0-30 นาที อุณหภูมิสับปะรดเพิ่มขึ้นจาก 60 °C ไปถึง 105 °C โดยที่อุณหภูมิของน้ำมันร้อนขึ้นจาก 110 °C ใน นาทีที่ 0 เพิ่มขึ้นเป็น 115 °C ในนาทีที่ 30 ซึ่งในนาทีที่ 30 อุณหภูมิของน้ำมันร้อนยังคงไม่เกิน อุณหภูมิ 120 °C ตามที่ตั้งไว้ แต่อุณหภูมิของสับปะรดสูงกว่า 100 °C เกินกว่าที่ตั้งไว้ ทำให้ระบบสั่ง ให้ขจัดความร้อนหยุดทำงาน ตั้งแต่นาทีที่ 30 อุณหภูมิของสับปะรดยังสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ อุณหภูมิของน้ำมันร้อนเริ่มลดลง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของสับปะรดในช่วงนี้ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก พลังงานความร้อนที่มีอยู่ในน้ำมันร้อนยังสูงและทำการถ่ายเทมายังสับปะรดจนกระทั่งนาทีที่ 40 เริ่ม เห็นว่าอุณหภูมิของสับปะรดถึงสูงสุดและเริ่มลดลงซึ่งเป็นทิศทางการลดลงแบบเดียวกับน้ำมันร้อน จนกระทั่งช่วงนาทีที่ 45 อุณหภูมิของสับปะรดและน้ำมันร้อนเริ่มใกล้เคียงกันและเท่ากันในบางช่วง เนื่องจากสับปะรดเกิดการระเหยไอน้ำที่ระเหยไปดึงพลังงานความร้อนออกจากสับปะรดทำให้ สับปะรดอุณหภูมิลดลงเมื่อสับปะรดอุณหภูมิลดลงก็ดึงพลังงานความร้อนจากน้ำมันร้อนซึ่งในช่วงนี้ แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ใช้ในการระเหยใกล้เคียงกับพลังงานที่น้ำมันร้อนถ่ายเทให้สับปะรด และ ตลอดช่วงเวลาการทดลองจากนาทีที่ 45 ไปถึงนาทีที่ 320 พบว่าอุณหภูมิสับปะรดกับอุณหภูมิของ น้ำมันร้อนใกล้เคียงกันตลอดช่วงการทดลองซึ่งมีค่าห่างกันไม่เกิน 8 °C แสดงให้เห็นว่าการออกแบบ เครื่องให้ความร้อนและถังกวนสับปะรดสามารถถ่ายเทพลังงานความร้อนได้เพียงพอต่อการระเหยของ

สับปะรด ซึ่งจากผลการทดลองกวนสับปะรดในสภาวะบรรยากาศปกติ ควบคุมอุณหภูมิสับปะที่ 100 °C น้ำหนักเริ่มต้นที่ 10 กิโลกรัม น้ำหนักสุดท้ายที่ 5 กิโลกรัม ใช้เวลาทั้งหมด 320 นาที พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 9.9 kWh

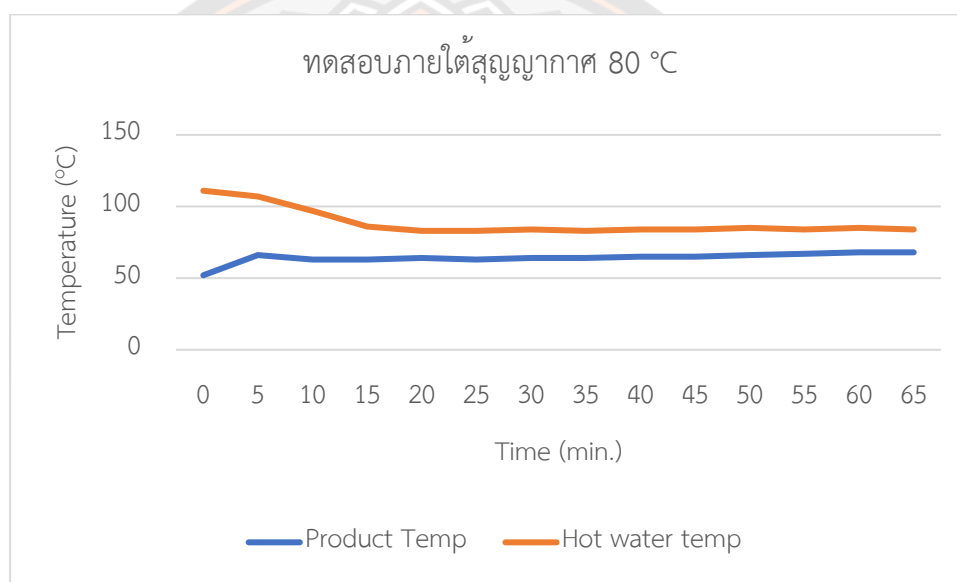


ภาพ 25 ทดสอบภายใต้สุญญากาศ 100 °C

ในช่วงนาที่ที่ 0 ถึง นาที่ที่ 10 อุณหภูมิของน้ำมันร้อนและสับปะรดเพิ่มขึ้นตามปกติและยังไม่เกินค่าที่ตั้งไว้ ในนาที่ที่ 10 ได้เปิดระบบการทำงานของสุญญากาศ ให้เกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุณหภูมิของสับปะรดลดลงอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิของสับปะรด 80 °C ในนาที่ที่ 10 เหลือเพียง 60 °C ในนาที่ที่ 15 และเกิดการระเหยน้ำอย่างรวดเร็วได้จากน้ำหนักสับปะรดในถังกวนจาก 9.3 กิโลกรัม ในนาที่ที่ 10 เหลือเพียง 8.1 กิโลกรัม ในนาที่ที่ 15 แสดงให้เห็นว่าระบบสุญญากาศมีประสิทธิภาพในการระเหยน้ำสูงมาก และทำให้เกิดการดึงพลังงานความร้อนจากน้ำมันร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิน้ำมันร้อนลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน หลังจากนั้นนาที่ที่ 15 อุณหภูมิของสับปะรดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องสูงสุดเพียง 73 °C และไม่ถึง 100 °C ตามที่ตั้งค่าไว้ และอุณหภูมิของน้ำร้อนสูงกว่าอุณหภูมิของสับปะรดประมาณ 27-31 °C แสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันร้อนมายังสับปะรดไม่เพียงพอต่ออัตราการดึงพลังงานความร้อนที่เกิดจากการระเหยของสับปะรด และจากข้อมูลของอุณหภูมิของน้ำมันร้อนไม่เกิน 100 °C ตลอดทั้งกระบวนการแสดงว่า

เครื่องให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าไม่สามารถสร้างพลังงานความร้อนได้เพียงพอต่ออัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนของน้ำมันร้อน ดังนั้นเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการระเหยได้มากขึ้นโดยการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนและระบบการกวนหรือให้ความร้อนกับสับปะรดในรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่านี้

ซึ่งจากผลการทดลองกวนสับปะรดในสภาวะสุญญากาศ ควบคุมอุณหภูมิสับปะที่ 100 °C น้ำหนักเริ่มต้นที่ 10 กิโลกรัม น้ำหนักสุดท้ายที่ 5 กิโลกรัม ใช้เวลาทั้งหมด 50 นาที พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 5.4 kWh

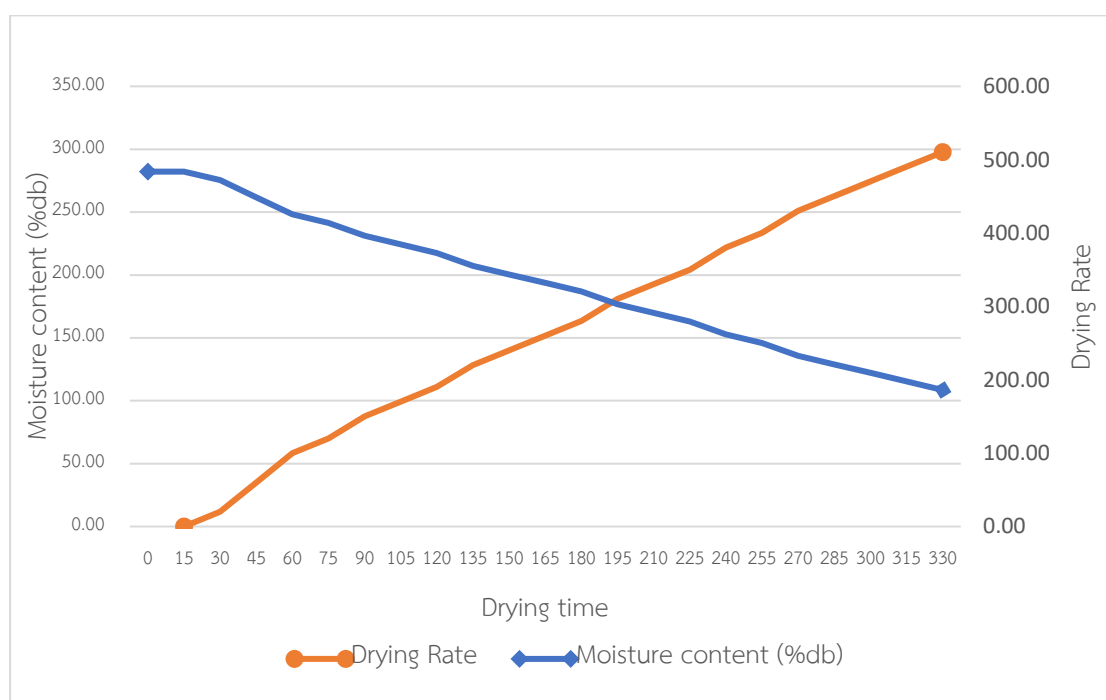


ภาพ 26 ทดสอบภายใต้สุญญากาศ 80 °C

การทดลองกวนในสภาวะสุญญากาศที่ 80 °C นี้ เพื่อทำการทดสอบเทียบประสิทธิภาพกับการกวนในสภาวะสุญญากาศ ที่ 100 °C ได้ตั้งค่าน้ำมันร้อนอยู่ในช่วง 80-100 °C และตั้งค่าอุณหภูมิสับปะรดที่ 80 °C จากภาพ 26 อุณหภูมิของสับปะรดจาก 52 °C ในช่วงเวลาที่ 0 อุณหภูมิสับปะรดจะสูงขึ้นไปถึง 66 °C ในเวลาที่ 5 และจะทำการเปิดระบบสุญญากาศในเวลาที่ 5 ทำให้ให้เกิดการระเหยอย่างรวดเร็วในถึงกวนส่งผลให้อุณหภูมิสับปะรดลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียง 63 ในเวลาที่ 10 อุณหภูมิของน้ำมันร้อนลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียง 83 °C เนื่องจากมีการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากน้ำมันร้อนไปยังสับปะรด ในเวลาที่ 10-65 อุณหภูมิของสับปะรดจะอยู่ในช่วง 63-71 °C แสดงให้เห็นว่าจุดเดือดของสับปะรดในถึงกวนน่าจะอยู่ในการทดลองนี้ประมาณ 70 °C และการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากน้ำมันร้อนไปยังสับปะรดในถึงกวนไม่เพียงพอต่ออัตราการระเหยของน้ำในถึงกวน จากเวลาที่ 20 จะเห็นว่า น้ำมันร้อนอยู่ในช่วง 83-85 °C แสดงให้เห็นว่า การสร้างพลังงาน

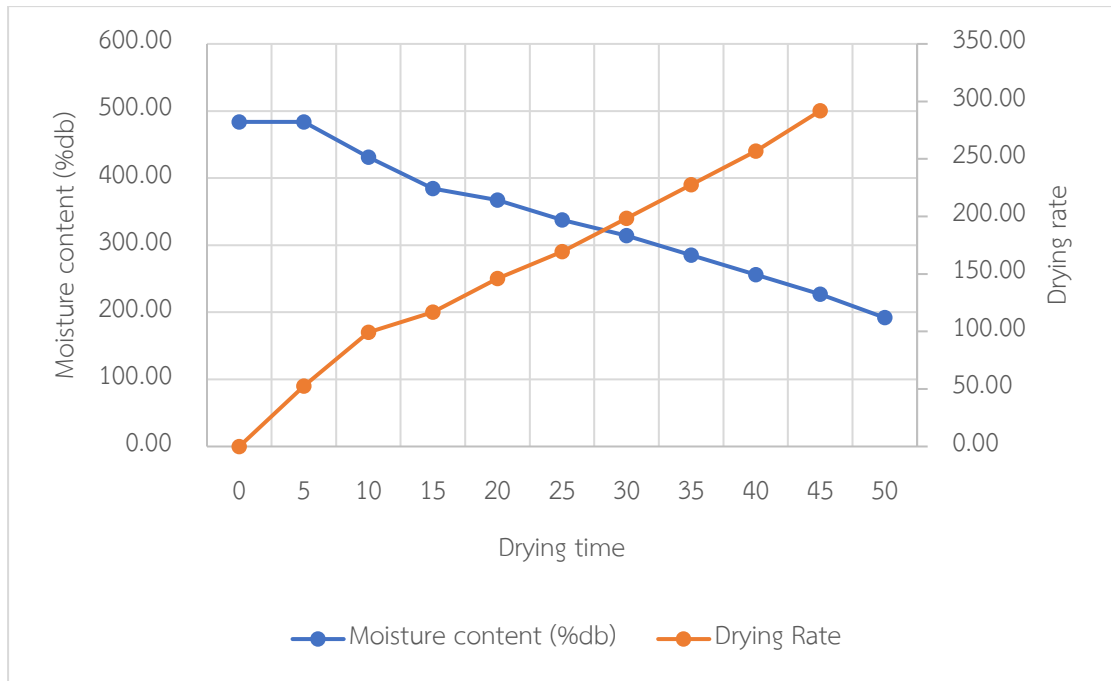
ความร้อนของเครื่องให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า (Boiler) เพียงพอต่ออัตราการถ่ายเทพลังงานของน้ำมันร้อนไปยังสับปะรดในถังกวน

ซึ่งจากผลการทดลองกวนสับปะรดในสภาวะสุญญากาศ ควบคุมอุณหภูมิสับปะที่ 100 °C น้ำหนักเริ่มต้นที่ 10 กิโลกรัม น้ำหนักสุดท้ายที่ 5 กิโลกรัม ใช้เวลาทั้งหมด 65 นาที พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 7.5 kWh



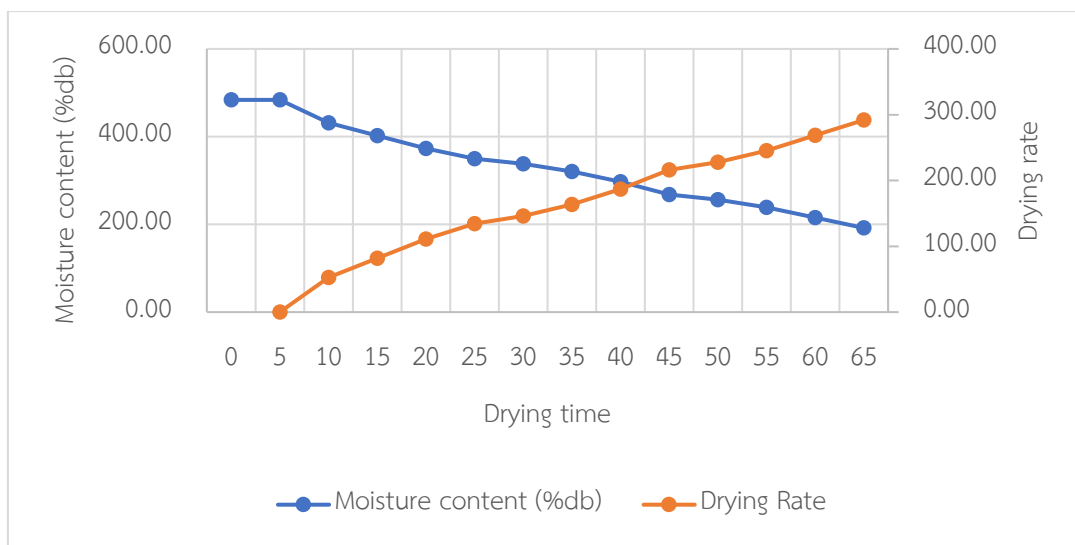
ภาพ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดความชื้นกับความชื้นในการกวนสับปะรดภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C

จากภาพที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเทียบกับเวลา และอัตราส่วนการลดความชื้นผลิตภัณฑ์กับเวลา จากผลการทดลองกวนสับปะรดในสภาวะบรรยากาศปกติ ควบคุมอุณหภูมิสับปะที่ 100 °C น้ำหนักเริ่มต้นที่ 10 กิโลกรัม น้ำหนักสุดท้ายที่ 5 กิโลกรัม ใช้เวลาทั้งหมด 320 นาที พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 9.9 kWh มีความชื้นเริ่มต้น 483.77 %db มีความชื้นสุดท้าย 186.05 %db และมีค่าอัตราความชื้น ณ เวลาสุดท้าย 297.72 kg/hr



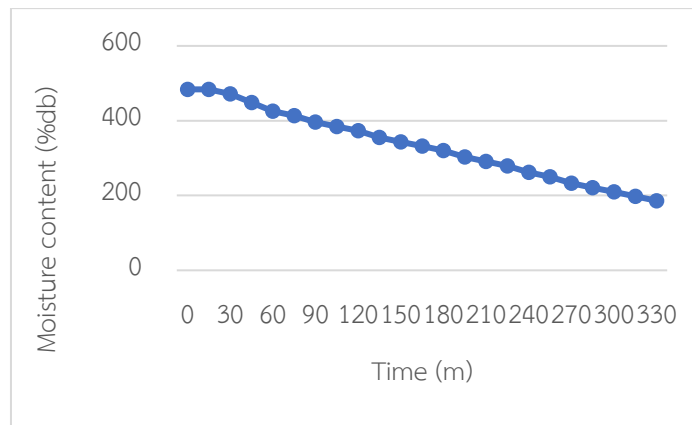
ภาพ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดความชื้นกับความชื้นในการลดความชื้นสับปะรดภายใต้
อุณหภูมิ 100 °C

จากภาพที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเทียบกับเวลา และอัตราส่วนการลดความชื้นผลิตภัณฑ์กับเวลา จากผลการทดลองกวนสับปะรดภายใต้อุณหภูมิ 100 °C ควบคุมอุณหภูมิสับปะที่ 100 °C น้ำหนักเริ่มต้นที่ 10 กิโลกรัม น้ำหนักสุดท้ายที่ 5 กิโลกรัม ใช้เวลาทั้งหมด 50 นาที พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 5.4 kWh มีความชื้นเริ่มต้น 483.77 %db มีความชื้นสุดท้าย 191.89 %db และมีค่าอัตราการลดความชื้น ณ เวลาสุดท้าย 291.89 kg/hr

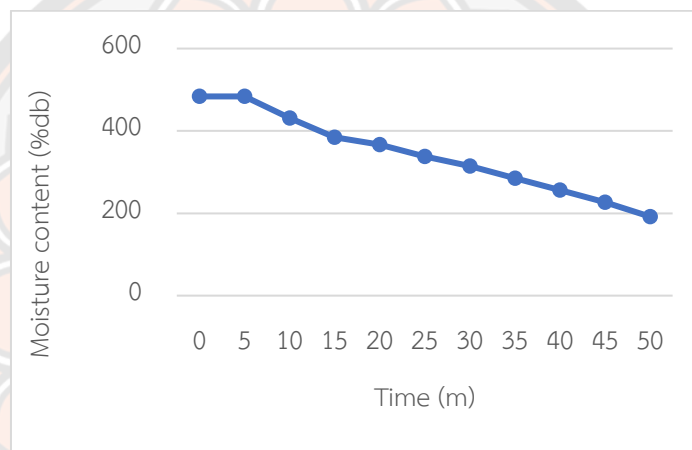


ภาพ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดความชื้นกับความชื้นในการลดความชื้นสับปะรดภายใต้
อุณหภูมิ 80 °C

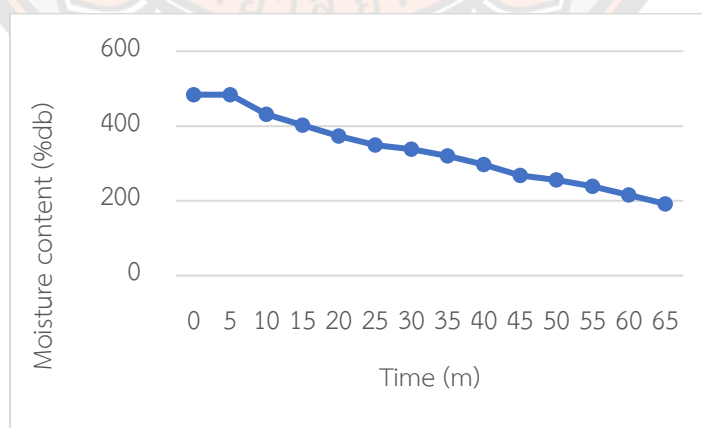
จากภาพที่ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเทียบกับเวลา และอัตราส่วนการลดความชื้นผลิตภัณฑ์กับเวลา จากผลการทดลองกวนสับปะรดภายใต้อุณหภูมิ 80 °C ควบคุมอุณหภูมิสับปะที่ 100 °C น้ำหนักเริ่มต้นที่ 10 กิโลกรัม น้ำหนักสุดท้ายที่ 5 กิโลกรัม ใช้เวลาทั้งหมด 65 นาที พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 6.7 kWh มีความชื้นเริ่มต้น 483.77 %db มีความชื้นสุดท้าย 191.89 %db และมีค่าอัตราการความชื้น ณ เวลาสุดท้าย 291.89 kg/hr



(a)

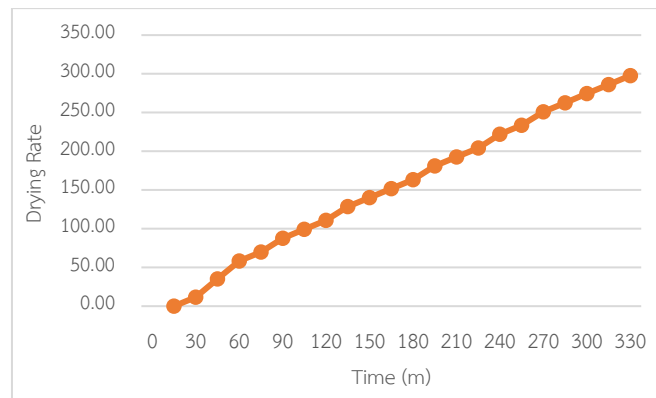


(b)

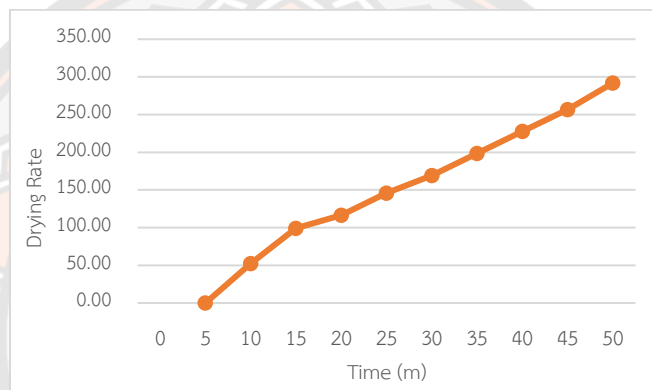


(c)

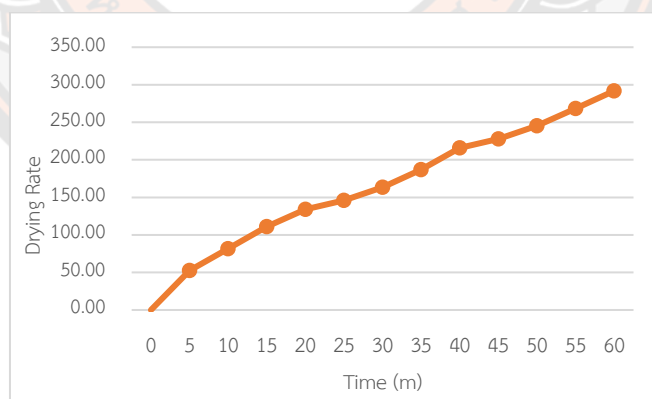
ภาพ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา (a) ภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100°C (b) ภายใต้สุญญากาศ 100°C และ (c) ภายใต้สุญญากาศ 80°C



(a)

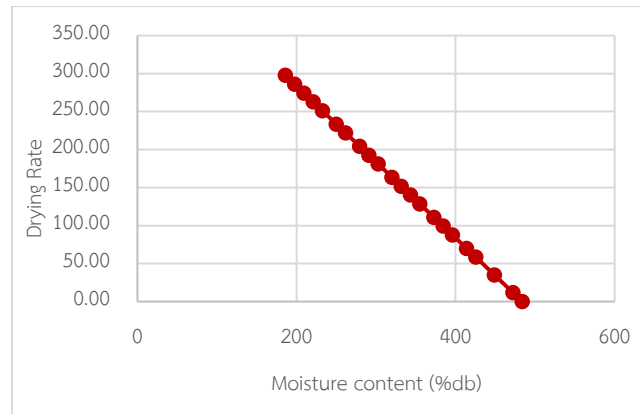


(b)

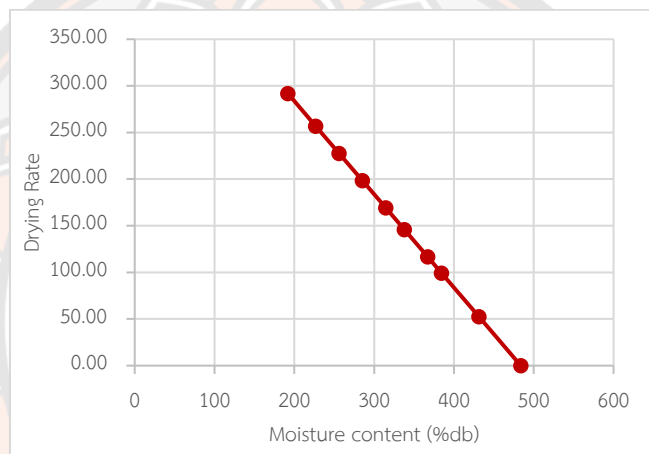


(c)

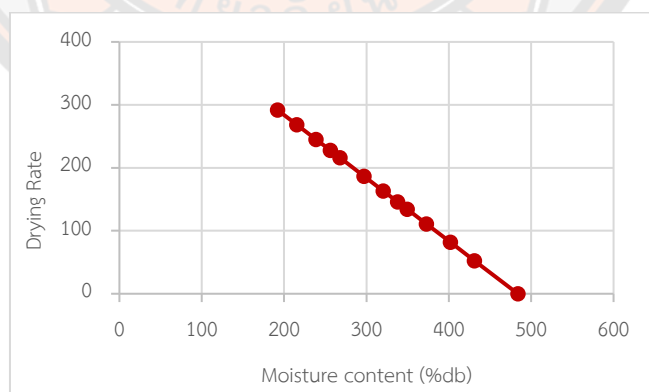
ภาพ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดความชื้นกับเวลา (a) ภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C
(b) ภายใต้สุญญากาศ 100 °C และ (c) ภายใต้สุญญากาศ 80 °C



(a)



(b)



(c)

ภาพ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดความชื้นกับอัตราส่วนความชื้น (a) ภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C (b) ภายใต้สุญญากาศ 100 °C และ (c) ภายใต้สุญญากาศ 80 °C

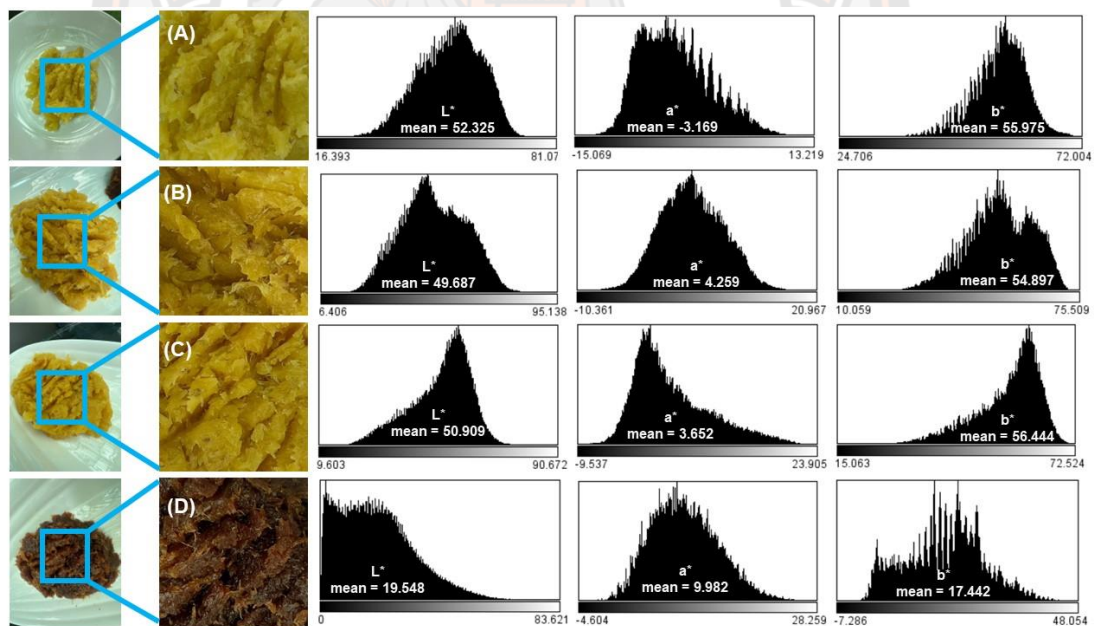
จากภาพ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความชื้นกับเวลาภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C, ภายใต้สุญญากาศ 100 °C และ ภายใต้สุญญากาศ 80 °C จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการลดความชื้น จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าภาพ 28 (b) และ(c) อัตราส่วนความชื้นลดลงรวดเร็วที่สุด แต่จะมีอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้แตกต่างกัน ภายใต้สุญญากาศเดียวกัน

จากภาพ 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดความชื้นกับอัตราความชื้นภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C ภายใต้สุญญากาศ 100 °C และ ภายใต้สุญญากาศ 80 °C จากการศึกษาพบว่าอัตราการลดความชื้นเป็นแบบลดลงเรื่อย ๆ จนอัตราการลดความชื้นเป็นศูนย์

4.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

ผลการวิเคราะห์ภาพถ่าย

ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายของสีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติ ผลที่ได้จากการทดสอบค่าด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรค่าสี L^* a^* b^*



ภาพ 33 ค่าที่อ่านได้จากตัวอย่างสับปะรดสดและสับปะรดกวนในการทดลอง โดยใช้ Image Processing แบบ Color Difference Delta E

โดยที่

ภาพที่ A สับปะรดสดบด

ภาพที่ B สับปะรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่ 80 °C

ภาพที่ C สับประรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่ 100 °C

ภาพที่ D สับประรดกวนภายใต้บรรยากาศปกติ ที่ 100 °C

ตาราง 4 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง

ผลิตภัณฑ์	Color value			
	L*	a*	b*	Delta E
สับประรดสด	52.325	-3.169	55.975	-
สับประรดกวน T 80 °C	49.687	4.259	54.897	4.686
สับประรดกวน T 100 °C	50.909	3.652	56.444	4.958
สับประรดกวนปกติ	19.548	9.982	17.442	46.253

โดยที่ ค่า L* ความสว่าง with 0 being a perfect black of 0% reflectance or transmission; 50 a middle gray; 100 a perfect white of 100% reflectance or a perfect clear of 100% transmission

a* สีแดง/สีเขียว redness-greenness of the color. Positive values of a* are red; negative values of a* are green; 0 is neutral.

b* สีเหลือง/สีน้ำเงิน yellowness-blueness of the color. Positive values of b* are yellow; negative values of b* are blue; 0 is neutral.

จากตาราง 4 ค่า L* ค่าความสว่าง จากค่าที่อ่านได้สับประรดสดมีค่าสูงสุด (L*=52.325) โดยมีสับประรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 100 °C (L*=50.909) สับประรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 80 °C (L*=49.687) มีค่าความสว่างใกล้เคียงมากตามลำดับ ส่วนสับประรดกวนภายใต้บรรยากาศปกติที่ 100 °C (L*=19.548) มีค่าความสว่างต่ำกว่าและแตกต่างจากสับประรดสดและผลการทดลองอื่นอย่างมาก

ค่า a* ค่าของการแสดงผลสีแดง/สีเขียว จากค่าที่อ่านได้สับประรดสดมีค่าต่ำสุด (a*=-3.169) โดยสับประรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 100 °C (a*=3.652) และสับประรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 80 °C (a*=4.259) มีค่าการแสดงผลสีแดง/สีเขียวใกล้เคียงสับประรดสดตามลำดับ ส่วนสับประรดกวนภายใต้บรรยากาศปกติที่ 100 °C (a*=9.982) มีค่าของการแสดงผลสีแดง/สีเขียวสูงกว่าและแตกต่างจากสับประรดสดและผลการทดลองอื่นอย่างมาก

ค่า b* ค่าของการแสดงผลสีเหลือง/สีน้ำเงิน จากค่าที่อ่านได้สับประรดสดมีค่า (b*=55.975) โดยสับประรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 100 °C (b*=56.444) มีค่าการแสดงผลสีเหลือง/สีน้ำเงิน

ใกล้เคียงโดยสูงกว่าค่าสีของสับปรดสดเล็กน้อย สับปรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 80 °C ($b^*=54.987$) มีค่าการแสดงผลสีเหลือง/สีน้ำเงินใกล้เคียงโดยค่าสีต่ำกว่าสับปรดสดเล็กน้อย ส่วนสับปรดกวนภายใต้บรรยากาศปกติที่ 100 °C ($b^*=17.442$) มีค่าของการแสดงผลสีเหลือง/สีน้ำเงินแตกต่างโดยมีค่าการแสดงผลต่ำกว่าสับปรดสดและผลการทดลองอื่นอย่างมาก

เมื่อนำค่าการแสดงผลความสว่าง (L^*) ค่าของการแสดงผลสีแดง/สีเขียว(a^*) และค่าของการแสดงผลสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^*) มาคำนวณเพื่อมาหาค่าเฉลี่ยการแสดงผลของความสว่างและการแสดงผลของสี

ตาราง 5 ตารางแสดงผลของค่าเฉลี่ยการแสดงผลของความสว่างและการแสดงผล โดยใช้ Image Processing แบบ Color Difference Delta E ในการอ่านค่า

ระยะ	แปรผล
$0.0 < \Delta E < 1.0$	สังเกตการณ์ไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่าง
$1.0 < \Delta E < 2.0$	ผู้สังเกตการณ์ที่มีประสบการณ์เท่านั้นที่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้
$2.0 < \Delta E < 3.5$	ผู้สังเกตการณ์ที่ไม่มีประสบการณ์สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้
$3.5 < \Delta E < 5.0$	ผู้สังเกตการณ์เห็นความแตกต่างของสีได้
$5.0 < \Delta E$	ผู้สังเกตการณ์สังเกตเห็นเป็นสองสีที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

จากตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ค่าที่อ่านได้ Delta E หรือ ΔE คือค่าเฉลี่ยของการแสดงผลความสว่างและการแสดงผลสีของโดยมีสับปรดสดเป็นค่าอ้างอิง ค่าที่อ่านได้ของสับปรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 80 °C ($\Delta E=4.686$) และสับปรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 100 °C ($\Delta E=4.958$) มีค่าอยู่ระหว่าง $3.5 < \Delta E < 5.0$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสีได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับตัวอย่างอ้างอิงตามลำดับ แต่ทั้งสองตัวอย่างนี้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าเฉลี่ยของการแสดงผลความสว่างและการแสดงผลสี (ΔE) ของสับปรดกวนภายใต้บรรยากาศปกติที่ 100 °C ($\Delta E=46.253$) มีค่าสูงกว่า $5.0 < \Delta E$ อย่างมาก และมีค่ามากกว่าสับปรดที่อบภายใต้สภาวะสุญญากาศและสับปรดสดอย่างมากเช่นกัน ซึ่งจะส่งผลให้ผู้สังเกตสังเกตเห็นสองสีที่ต่างกันได้ ซึ่งจากผลของค่าเฉลี่ยของการแสดงผลความสว่างและการแสดงผลสี (ΔE) สรุปได้ว่า สับปรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 80 °C และสับปรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 100 °C มีค่าค่าเฉลี่ยของการแสดงผลความสว่างและการแสดงผลใกล้เคียงกับสับปรดสดที่สุดตามลำดับ ส่วนสับปรดกวนภายใต้บรรยากาศปกติที่ 100 °C มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของการแสดงผลความสว่างและการแสดงผลสีจากสับปรดสดและสับปรดที่กวนภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า

4.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ตาราง 6 ผลการกวนสับปรดด้วยเครื่องกวนสับปรดควบคุมระบบให้ความร้อนด้วย PLC

ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนัก	น้ำหนัก	เวลา (นาที)	พลังงาน kWh	SEC kWh/kg
		เริ่มต้น (kg)	สุดท้าย (kg)			
สับปรด	สภาวะสุญญากาศ ที่ 80 °C	10	5	65	6.7	1.34
	สภาวะสุญญากาศ ที่ 100 °C	10	5	50	5.4	1.08
	บรรยากาศปกติ ที่ 100 °C	10	5	320	9.9	1.98

จากผลการทดลอง สรุปได้ว่าค่าการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิต (Specific Energy Consumption : SEC) ของการกวนสับปรดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 100 °C จะมีค่าน้อยที่สุด ต่ำกว่าการกวนสับปรดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 °C ถึง 32% และต่ำกว่าการกวนสับปรดภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 100 °C ถึง 45% ตามลำดับ

จากผลการทดลองด้านเวลาที่ใช้ในการผลิต การกวนสับปรดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 100 °C ใช้เวลาน้อยที่สุดเพียง 50 นาที น้อยกว่าการกวนสับปรดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 °C ที่ใช้เวลา 65 นาที ใช้เวลามากกว่าขบวนการข้างต้นมากกว่าถึง 30% และ การกวนสับปรดภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 100 °C ใช้เวลาในการผลิตสูงที่สุดมากกว่าขบวนการผลิตอื่นๆข้างต้นอย่างมีนัยยะสำคัญถึง 320 นาที โดยใช้เวลามากกว่าขบวนการแรกถึง 540%

ดังนั้นสรุปได้ว่า การกวนสับปรดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 100 °C มีประสิทธิภาพสูงที่สุดอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยการกวนสับปรดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 °C มีประสิทธิภาพรองลงมาไม่มาก และการกวนสับปรดภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 100 °C มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

4.4 ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการ ควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ สามารถกำหนดสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของการกวนสับปะรดโดยมีสมมติฐานของการวิเคราะห์ ดังนี้

ข้อมูลเบื้องต้น

ราคาเครื่อง 1,000,000 บาท/เครื่อง ระยะเวลาการใช้งานเครื่อง 10 ปี ค่าบำรุงรักษาปีแรก 50,000 บาท (โดยมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นตามอัตราค่าแรง 2.8% ต่อปี)

กำลังการผลิต 35 กิโลกรัมวัตถุดิบต่อชั่วโมง เนื่องจากมีการระเหยน้ำออกเพื่อทำแยมจะมี น้ำหนักเหลือเพียงครึ่ง เดียว ดังนั้นกำลังการผลิตสับปะรดกวนคือ $35/2 = 17.5$ กิโลกรัมสับปะรดกวน/ชั่วโมง

ระยะเวลาทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน 1 ปี มี 365 วัน โดยหักวันหยุด คือ 1 ปีมี 52 สัปดาห์ เพราะฉะนั้นจะมีวันอาทิตย์ 52 วัน

วันหยุด ตามพ.ร.บ.คุ้มครองแรงงาน พ.ศ.2541 มาตรา 29, มาตรา 64 และกฎกระทรวง (ฉบับที่ 4) พ.ศ. 2541 จำนวนไม่น้อยกว่า 13 วัน

ดังนั้นจึงมีวันทำงาน 300 วันต่อปี

ต้นทุนของวัตถุดิบ

ราคาสับปะรดสดผลใหญ่เฉลี่ยกิโลกรัมละ 7.37 บาท

ราคาสับปะรดสดผลเล็กเฉลี่ยกิโลกรัมละ 2.77 บาท

การทำสับปะรดกวนจะใช้สับปะรดที่ขายไม่ได้ราคาหรือสับปะรดตกเกรดมาผลิตเนื่องด้วยราคาสับปะรดเป็นราคาทั้งลูกรวมเปลือก ดังนั้นเมื่อนำมาปอกเปลือกน้ำหนักเนื้อสับปะรดจะเหลือประมาณครึ่งหนึ่ง และสับปะรดกวนจะมีน้ำหนักเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของเนื้อสับปะรด

ดังนั้นราคาต้นทุนสับปะรดสดต่อสับปะรดกวนต่อ 1 กิโลกรัม = $2.77 \text{ บาท}/(1/2 \times 1/2)$

$$= 11.08 \text{ บาท}$$

ต้นทุนของวัตถุดิบ = $11.08 \text{ บาท/kg} \times 17.5 \text{ kg/ครั้ง} \times 8 \text{ ครั้ง/วัน} \times 300 \text{ วัน/ปี}$

$$= 465,360 \text{ บาท/ปี}$$

ต้นทุนของแรงงาน

ค่าจ้างขั้นต่ำ 363 บาท ในพื้นที่ กรุงเทพฯ, นครปฐม, นนทบุรี, ปทุมธานี, สมุทรปราการ, สมุทรสาคร ตามประกาศของกระทรวงแรงงาน เรื่อง อัตราค่าจ้างขั้นต่ำ ฉบับที่ 12 ซึ่งมีผลให้บังคับใช้ วันที่ 1 มกราคม 2567 การผลิตใช้คนแรงงาน 2 คน ทำงานทั้งหมด 300 วันต่อปี

$$\begin{aligned}\text{ต้นทุนของแรงงาน} &= 300 \text{ วัน/ปี} \times 2 \text{ man-day} \times 363 \text{ บาท/วัน} \\ &= 217,800 \text{ บาท/ปี}\end{aligned}$$

ต้นทุนของพลังงาน

พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 5.4 kWh สามารถผลิตสับปะรดหวานได้ 5 กิโลกรัม

$$\begin{aligned}\text{ต้นทุนพลังงานต่อ 1 กิโลกรัมสับปะรดหวาน} &= 5.4 \text{ kWh} / 5 \text{ kg} \times 5.5 \text{ บาท/kWh} \\ &= 5.94 \text{ บาท/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ต้นทุนของพลังงาน} &= 5.94 \text{ บาท/kg} \times 17.5 \text{ kg/ครั้ง} \times 8 \text{ ครั้ง/วัน} \times 300 \text{ วัน/ปี} \\ &= 249,480 \text{ บาท/ปี}\end{aligned}$$

รายได้

ราคาสับปะรดหวาน 130 บาทต่อกิโลกรัม รายได้ 70% จากการขายส่ง

$$\begin{aligned}\text{รายได้} &= 130 \text{ บาท} \times 70\% \times 17.5 \text{ kg/ครั้ง} \times 8 \text{ ครั้ง/วัน} \times 300 \text{ วัน/ปี} \\ &= 3,822,000 \text{ บาท}\end{aligned}$$

สมมุติฐาน

$$\text{อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (Loan Rate)} = 7.00\%$$

$$\text{อัตราเงินเฟ้อ (Inflation)} = 3.00\%$$

$$\text{อัตราการเพิ่มค่าแรงงาน} = 2.80\%$$

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)} = 1 \text{ ปี}$$

$$\text{มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)} = 24,325,652 \text{ บาท}$$

$$\text{อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR)} = 308.64 \%$$

จากการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของของกระบวนการผลิตสับปะรดหวานด้วยเทคนิคการ ควบนั่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ ราคาเครื่อง 1,000,000 บาท ระยะเวลากการใช้งานเครื่อง 10 ปี ค่าบำรุงรักษาปีแรก 50,000 บาท ต้นทุนของวัตถุดิบ 465,360 บาท/ปี ต้นทุนของแรงงาน 217,800

บาท/ปี ต้นทุนของพลังงาน 249,480 บาท/ปี มีรายได้ 3,822,000 บาท/ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 308.64 % ค่ามูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์สุทธิ (NPV) เท่ากับ 24,325,652 บาท ดังนั้นเครื่องผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศมีจุดคุ้มทุน 1 ปี



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทำการทดสอบสับปะรดกวนโดยใช้เทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศที่สภาวะอุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C ที่ควบคุมอุณหภูมิในการกวนไม่เกิน 100 °C จุดเดือดของน้ำในสับปะรดไม่เกิน 80 °C เปรียบเทียบกับการกวนสับปะรดแบบไม่ใช้สุญญากาศที่สภาวะอุณหภูมิ 100 °C โดยใช้ น้ำหนักสับปะรดเริ่มต้น 10 กิโลกรัม และน้ำหนักสุดท้าย 5 กิโลกรัม จากการศึกษาพบว่าสับปะรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่ 100 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดคือ 1.08 kWh/kg โดยการกวนสับปะรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่ 100 °C ใช้ระยะเวลาในการกวน 50 นาที พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 5.4 kWh มีความชื้นเริ่มต้น 483.77 %db มีความชื้นสุดท้าย 191.89 %db และมีค่าอัตราการลดความชื้น ณ เวลาสุดท้าย 291.89 ในขณะที่การกวนสับปะรดภายใต้แรงดันบรรยากาศ 100 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 1.98 kWh/kg ระยะเวลาในการกวน 320 นาที พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 9.9 kWh มีความชื้นเริ่มต้น 483.77 %db มีความชื้นสุดท้าย 186.05 %db และมีค่าอัตราการลดความชื้น ณ เวลาสุดท้าย 297.72

ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายของสับปะรดด้วยโปรแกรมทางสถิติ ผลที่ได้จากการทดสอบค่าด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรค่าสี $L^* a^* b^*$ ซึ่งจากผลของค่าเฉลี่ยของการแสดงผลความสว่างและการแสดงผลสี (ΔE) สรุปได้ว่า สับปะรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 80 °C และสับปะรดกวนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 100 °C มีค่าค่าเฉลี่ยของการแสดงผลความสว่างและการแสดงผลใกล้เคียงกับสับปะรดสดที่สุดตามลำดับ ส่วนสับปะรดกวนภายใต้บรรยากาศปกติที่ 100 °C มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของการแสดงผลความสว่างและการแสดงผลสีจากสับปะรดสดและสับปะรดที่กวนภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า

จากการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของของกระบวนการผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ ราคาเครื่อง 1,000,000 บาท ระยะเวลาการใช้งานเครื่อง 10 ปี ค่าบำรุงรักษาปีแรก 50,000 บาท ต้นทุนของวัตถุดิบ 465,360 บาท/ปี ต้นทุนของแรงงาน 217,800 บาท/ปี ต้นทุนของพลังงาน 249,480 บาท/ปี มีรายได้ 3,822,000 บาท/ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 308.64 % ค่ามูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์สุทธิ (NPV) เท่ากับ 24,325,652 บาท ดังนั้นเครื่องผลิตสับปะรดกวนด้วยเทคนิคการควบแน่นภายใต้สภาวะสุญญากาศมีจุดคุ้มทุน 1 ปี ซึ่งเครื่องกวนสับปะรดนี้เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองกวนสับปรดในสภาวะสุญญากาศจะเห็นว่าการทำงานของเครื่องทดลองนี้มีสภาวะอัตราการระเหยดีกว่าอัตราการให้ความร้อน จากอุณหภูมิของสับปรดกวน (T1) เฉลี่ยต่ำกว่า 70 °C และอุณหภูมิของน้ำมันร้อน (T2) เฉลี่ยต่ำกว่า 85 °C เกือบตลอดทั้งขบวนการ ซึ่งต่ำกว่าค่าควบคุมที่ตั้งไว้

จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสามารถพัฒนาเครื่องที่ใช้ทดสอบดังกล่าวหรือเครื่องขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรม สามารถลดระยะเวลาในการทำงานได้และเพิ่มประสิทธิภาพได้อีกจากการออกแบบและพัฒนาระบบการให้ความร้อน ระบบถ่ายเทความร้อน และระบบการผลิตพลังงานความร้อนให้มีขนาดใหญ่และประสิทธิภาพดีขึ้นให้เท่ากับหรือมากกว่าอัตราการระเหย



บรรณานุกรม

- [1] Electricity Generating Authority of Thailand. (2018). EIA คาดปี 2040 โลกยังใช้พลังงานฟอสซิลและนิวเคลียร์ร้อยละ 83, กรุงเทพมหานคร.
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). สศก. แผนนโยบายขับเคลื่อนภาคเกษตรสอดคล้องข้อเสนอ World Bank ชี้ภาคเกษตรถูกแย่งสำคัญเปลี่ยนผ่านก้าวสู่ประเทศที่มีรายได้สูง, ในข่าวที่ 12/2563 Office of Agricultural Economics: กรุงเทพมหานคร.
- [3] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2561). เกษตรฯ เร่งแก้วิกฤตสับปรดหลังราคาดีดวางมาตรการรอบด้านพร้อมรับมือผลผลิตกระจุกปลายปี, ในข่าวที่ 70/2561. Office of Agricultural Economics: กรุงเทพมหานคร.
- [4] กิตติ สระแก้ว. (2561). สถิติการใช้ผลผลิตสับปรด, กลุ่มส่งเสริมพืชไร่อุตสาหกรรม, Editor., สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. p. 9.
- [5] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2561). สถานการณ์การผลิตและการตลาดรายสัปดาห์ 19-25 ม.ค. 61, Office of Agricultural Economics: กรุงเทพมหานคร.
- [6] Wang, L. (2014). Energy efficiency technologies for sustainable food processing. *Energy efficiency*. 7(5): p. 791-810.
- [7] Artnaseaw Apichart, Theerakulpisut Somnuk, and Benjapiyaporn Chatchai. (2010). Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. *Biosystems engineering*. 105(1): p. 130-138.
- [8] เสน่ห์ โรจนดิษฐ์. (2563). GE316 (GEO3106) 48220 อุทกภูมิศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. p. 44.
- [9] สถาบันวิจัยและพัฒนา. แผนยุทธศาสตร์ 5 ปี (พ.ศ. 2555-พ.ศ. 2559) ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2557.
- [10] สุภา ศิรินาม. (2016). พลังงานแห่งอนาคต. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ. 2(2): p. 68-79.
- [11] สุกร เหลืองกำจร. (2018). EIA คาดปี 2040 โลกยังใช้พลังงานฟอสซิลและนิวเคลียร์ร้อยละ 83, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย: กรุงเทพมหานคร.
- [12] กระทรวงพลังงาน. (2563). ผลการดำเนินงานของกระทรวงพลังงาน (ตามแผนบูรณาการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม), สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์ สำนักปลัดกระทรวงพลังงาน: กรุงเทพมหานคร. p. 16.

- [13] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2019). **สถานการณ์การผลิตและการตลาดรายสัปดาห์ 17-23 พฤษภาคม 2562**, 2019: [Online].
- [14] ปฏิวัติ เกิดมงคล, จุฬารักษ์ เบญจปิยะพร, ฉัตรชัย เบญจปิยะพร, และอภิชาติ อัจฉนาเสียว. (2017). การนำความร้อนทิ้งของระบบทำน้ำเย็นมาใช้ในการอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด. **Ladkrabang Engineering Journal**. 34(1): p. 68-74.
- [15] ธัญนันท์ ฤทธิมณี และสุรศักดิ์ นุ่มมีศรี. (มปป). **การวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตและแปรรูปผลิตภัณฑ์ชาเมี่ยงโดยใช้เทคโนโลยีสะอาดบนฐานแนวคิดเศรษฐกิจพอเพียง**.
- [16] Gardner, J.P., T.M. Brown, and H.C. Ferguson. (2000). Ultraviolet galaxy counts from space telescope imaging spectrograph observations of the Hubble deep fields. **The Astrophysical Journal Letters**. 542(2): p. L79.
- [17] Jödicke, K., S. Arendt, W. Hofacker, and W. Speckle. (2020). The influence of process parameters on the quality of dried agricultural products determined using the cumulated thermal load. **Drying Technology**. 38(3): p. 321-332.
- [18] Badawy, H.A.A., S.M.M. Abd-Elmageed, and R.I.M. Almoselhy. Effect of Drying Process on the Quality of Table Olives.
- [19] Nicoletti, J.F., J. Telis-Romero, and V.R.N. Telis. (2001). Air-drying of fresh and osmotically pre-treated pineapple slices: fixed air temperature versus fixed slice temperature drying kinetics. **Drying Technology**. 19(9): p. 2175-2191.
- [20] อรอน จันท์ประสาทสุข. (มปป). **การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีจำเพาะของเนื้อผลสับประรด**.
- [21] Chanprasartsuk, O.-o., C. Chamnoiprom, K. Charoenchai, S. Phunpheng, and S. Panupintu. (2020). Dynamic changes of physicochemical properties of pineapple juice during fermentation with allochthonous and autochthonous yeasts under different conditions. **Science Technology and Engineering Journal (STEJ)**. 6(1): p. 67-77.
- [22] Campos, D.A., T.B. Ribeiro, J.A. Teixeira, L. Pastrana, and M.M. Pintado. (2020). Integral Valorization of Pineapple (*Ananas comosus* L.) By-Products through a Green Chemistry Approach towards Added Value Ingredients. **Foods**. 9(1): p. 60.
- [23] นิจฉรา ทูลธรรม. (2020). ผลของแกนสับประรดในผลิตภัณฑ์ปลาร้าถั่วเหลืองต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส (EFFECT OF PINEAPPLE CORES IN AN IMITATED FERMENTED FISH (PLA-RA) PRODUCTS MADE BY SOYBEAN ON THE

- GROWTH OF MICROORGANISMS AND SENSORY ATTRIBUTES). **Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology)**. 12(23).
- [24] Kang, Y., C. Sun, and T. Gao. (2019). **Dietary intake of antioxidant vitamins and mortality: a meta-analysis from large cohort studies**.
- [25] Genkinger, J.M., E.A. Platz, S.C. Hoffman, G.W. Comstock, and K.J. Helzlsouer. (2004). Fruit, vegetable, and antioxidant intake and all-cause, cancer, and cardiovascular disease mortality in a community-dwelling population in Washington County, Maryland. **American journal of epidemiology**. 160(12): p. 1223-1233.
- [26] Joshipura, K.J., F.B. Hu, J.E. Manson, M.J. Stampfer, E.B. Rimm, F.E. Speizer, G. Colditz, A. Ascherio, B. Rosner, and D. Spiegelman. (2001). The effect of fruit and vegetable intake on risk for coronary heart disease. **Annals of internal medicine**. 134(12): p. 1106-1114.
- [27] Bhui, K., S. Prasad, J. George, and Y. Shukla. (2009). Bromelain inhibits COX-2 expression by blocking the activation of MAPK regulated NF-kappa B against skin tumor-initiation triggering mitochondrial death pathway. **Cancer letters**. 282(2): p. 167-176.
- [28] Helmy, S.A., H.M. El-Bedaiwy, and S.M. El-Masry. (2020). Effect of pineapple juice on the pharmacokinetics of celecoxib and montelukast in humans. **Therapeutic Delivery**, (0).
- [29] Pathak, P. **Medicinal Properties of Fruit and Vegetable Peels**. in *Advances in Bioengineering*. 2020, Springer. p. 115-128.
- [30] Debnath, R., D. Majumder, P. Nath, D. Ghosh, and D. Maiti. (2020). Bromelain plus peroxidase reduces non-Hodgkin lymphoma progression in vivo via up-regulation of antioxidant enzymes and modulating apoptotic protein expression. **Nutrition and cancer**. 72(7): p. 1200-1210.
- [31] Yanuck, S.F., J. Pizzorno, H. Messier, and K.N. Fitzgerald. (2020). Evidence Supporting a Phased Immuno-physiological Approach to COVID-19 From Prevention Through Recovery. **Integrative Medicine**. 19(1): p. 8-35.
- [32] Secor Jr, E.R., W.F. Carson Iv, M.M. Cloutier, L.A. Guernsey, C.M. Schramm, C.A. Wu, and R.S. Thrall. (2005). Bromelain exerts anti-inflammatory effects in an

- ovalbumin-induced murine model of allergic airway disease. **Cellular immunology**. 237(1): p. 68-75.
- [33] Onken, J.E., P.K. Greer, B. Calingaert, and L.P. Hale. (2008). Bromelain treatment decreases secretion of pro-inflammatory cytokines and chemokines by colon biopsies in vitro. **Clinical Immunology**. 126(3): p. 345-352.
- [34] อรอน จันทรประสาทสุข. (2558). โครงการวิจัยการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีจำเพาะของเนื้อผลสับประรด **Characterization of specific physico-chemical properties of pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.) flesh**, 2558. p. 59.
- [35] Chan, Y.K., d.E.G. Coppens, and G.M. Sanewski. (2002). Breeding and variety improvement. **Bartholomew, DP, Paull, RE, Rohrbach. KG (eds.) The pineapple, botany, production and uses**. CABI Publishing, New York: p. 33-35.
- [36] Sharma, A., P. Sharma, J. Singh, S. Singh, and L. Nain. (2020). Prospecting the Potential of Agroresidues as Substrate for Microbial Flavor Production. **Frontiers in Sustainable Food Systems**. 4: p. 18.
- [37] Faulds, C.B., B. Bartolomé, and G. Williamson. (1997). Novel biotransformations of agro-industrial cereal waste by ferulic acid esterases. **Industrial Crops and Products**. 6(3-4): p. 367-374.
- [38] Banerjee, S., A. Arora, R. Vijayaraghavan, and A.F. Patti. (2020). Extraction and crosslinking of bromelain aggregates for improved stability and reusability from pineapple processing waste. **International Journal of Biological Macromolecules**.
- [39] Putriana, L., Z. Bachruddin, C. Hanim, A. Kurniawati, L.M. Yusiati, and O. Widayati. **The Effect of Bromelain from Pineapple (*Ananas comosus*) on Increasing Protein Digestibility of Milk Replacer for Lamb**. IOP Publishing.
- [40] Montatip, P. and N. Chandet. Stability of Crude Bromelain in Pineapple (*Ananas comosus*).
- [41] Md Salleh, N.F.S., C. Tamby Chik, N. Abdullah, and N. Baba. (2020). Pineapple cookies characteristics and sensory hedonic acceptance. **Journal of Tourism, Hospitality & Culinary Arts (JTHCA)**. 12(1): p. 1-11.
- [42] Bartolomé, A.P., P. Rupérez, and C. Fúster. (1995). Pineapple fruit: morphological

- characteristics, chemical composition and sensory analysis of Red Spanish and Smooth Cayenne cultivars. **Food Chemistry**. 53(1): p. 75-79.
- [43] Wei, C.-B., S.-H. Liu, Y.-G. Liu, L.-L. Lv, W.-X. Yang, and G.-M. Sun. (2011). Characteristic aroma compounds from different pineapple parts. **Molecules**. 16(6): p. 5104-5112.
- [44] Kathrin, V., C. Snehasis, P.P. Bhalerao, C. Reinhold, J. Frank, and C.B. Steingass. (2020). Effect of Pulsed Light Treatment on Natural Microbiota, Enzyme Activity, and Phytochemical Composition of Pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) juice. **Food and Bioprocess Technology**. 13(7): p. 1095-1109.
- [45] Kaewtathip, T. and S. Charoenrein. (2012). Changes in volatile aroma compounds of pineapple (*Ananas comosus*) during freezing and thawing. **International journal of food science & technology**. 47(5): p. 985-990.
- [46] อรอน จันทร์ประสาทสุข (2558). โครงการวิจัยการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีจำเพาะของเนื้อผลสับประรด **Characterization of specific physico-chemical properties of pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.) flesh**, 2558. p. 59.
- [47] ณรงค์ ศิริรัมย์. (2012). อาหารปลอดภัยนำครัวไทยสู่ครัวโลกและความอยู่รอดของอุตสาหกรรมอาหารไทย. **Journal of Food Health and Bioenvironmental Science**. 5(1): p. 71-84.
- [48] Daniel Workman. (2020). **Pineapples Exports by Country, 2020**. p. <https://joo.gl/HgQAq>.
- [49] นักศึกษาหลักสูตรนักบริหารการพัฒนากาเกษตรและสหกรณ์. (2561). **แนวทางการพัฒนาการปลูกสับประรด ของสหกรณ์ชาวไร่สับประรดสามร้อยยอด จำกัด จังหวัดประจวบคีรีขันธ์**.
- [50] กิตติ สถาพรประสาธน์. (2018). แบบจำลองการอบแห้งพริกไทยเทคนิคเจ็ดสเปาต์เต็ดเบดโดยใช้ระบบอนุमानพีซีซีโครงข่ายปรับตัวได้. **Srinakharinwirot Engineering Journal**. 13(1): p. 176-186.
- [51] Suna, S. (2019). Effects of hot air, microwave and vacuum drying on drying characteristics and in vitro bioaccessibility of medlar fruit leather (pestil). **Food Science and Biotechnology**. 28(5): p. 1465-1474.
- [52] Kowalska, J., H. Kowalska, A. Marzec, T. Brzeziński, K. Samborska, and A. Lenart. (2018). Dried strawberries as a high nutritional value fruit snack. **Food science**

- and biotechnology**. 27(3): p. 799-807.
- [53] Rani, P. and P.P. Tripathy. (2020). Modelling of moisture migration during convective drying of pineapple slice considering non-isotropic shrinkage and variable transport properties. **Journal of Food Science and Technology**: p. 1-14.
- [54] สุรชัย อจจกล้า. (2562). การศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้ระบบสุญญากาศ.
- [55] Shipunov, B.P. and A.V. Ryabykh. (2020). **Change in the heat of D-glucose dissolution in water exposed to electromagnetic field**.
- [56] Hamedi, F., M. Mohebbi, F. Shahidi, and E. Azarpazhooh. (2018). Ultrasound-assisted osmotic treatment of model food impregnated with pomegranate peel phenolic compounds: Mass transfer, texture, and phenolic evaluations. **Food and bioprocess technology**. 11(5): p. 1061-1074.
- [57] Junlakan, W. (2017). Vacuum Drying Kinetics of Mango (*Mangifera indica* L. Var.) Slices. **Burapha Science Journal (วารสาร วิทยาศาสตร์ บูรพา)**. 22(3): p. 358-373.
- [58] Chua, L.Y.W., C.H. Chong, B.L. Chua, and A. Figiel. (2019). Influence of drying methods on the antibacterial, antioxidant and essential oil volatile composition of herbs: a review. **Food and Bioprocess Technology**. 12(3): p. 450-476.
- [59] Orikasa, T., L. Wu, Y. Ando, Y. Muramatsu, P. Roy, T. Yano, T. Shiina, and A. Tagawa. (2010). Hot air drying characteristics of sweet potato using moisture sorption isotherm analysis and its quality changes during drying. **International Journal of Food Engineering**. 6(2).
- [60] Krokida, M.K. and C. Philippopoulos. (2006). Volatility of apples during air and freeze drying. **Journal of Food Engineering**. 73(2): p. 135-141.
- [61] Kyi, T.M., W.R.W. Daud, A.B. Mohammad, M. Wahid Samsudin, A.A.H. Kadhum, and M.Z.M. Talib. (2005). The kinetics of polyphenol degradation during the drying of Malaysian cocoa beans. **International journal of food science & technology**. 40(3): p. 323-331.
- [62] Chang, R. (2008). **General chemistry: the essential concepts**. Boston: McGraw-Hill.
- [63] Silberberg, M.S., P. Amateis, S. Lavieri, and R. Venkateswaran. (1996). **Chemistry: The molecular nature of matter and change**. Mosby St. Louis, Missouri, USA.
- [64] Kern, D.Q. **Heat exchanger design for fouling services**. Begel House Inc.

- [65] Fraas, A.P. (1989). **Heat exchanger design**. John Wiley & Sons.
- [66] วรณพิชญ์ จุลกัลป์. (2017). จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงเบาด้วยวิธีอบแห้งแบบสุญญากาศ. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**. 22(3): p. 358-373.
- [67] รตินันท์ เหลือมพล. (2561). สมการอบแห้งแบบชั้นบางของแครอทโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับปั๊มความร้อน. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**. 28(1): p. 147-155.
- [68] ปุณยาพร แสนแปง. (2564). ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนฮีตเตอร์และผสมผสานต่อคุณภาพของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงาน. **วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- [69] ชญานิศ รัตนมงคล. (2561). **จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล**. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- [70] นพพร กุดทิง. (2556). การศึกษาอิทธิพลการระบายความร้อน อุณหภูมิความดันของอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพของปั๊มสุญญากาศในกระบวนการเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับปั๊มความร้อน. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- [71] ภาคย์ มาลัยกษณะชลี. (2020). ผลของการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่ต่อจลนพลศาสตร์ สมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของมะม่วงสุก. **ปริญญาดุษฎีบัณฑิต**, มหาวิทยาลัยศิลปากร,
- [72] สิริกัญญา กระจ่างทอง. (2563). ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งการเปลี่ยนแปลงสี การหดตัว และการคืนตัวของมะม่วงสุกอบแห้ง. **ปริญญามหาบัณฑิต**, มหาวิทยาลัยศิลปากร,
- [73] นัฐวุฒิ วิเศษโสภา และ ปิ่นมณี ขวัญเมือง. (2019). การพัฒนาผลิตภัณฑ์กล้วยกวนโดยใช้สับปะรด สตรอว์เบอร์รี และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 57. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [74] สุเทพ กลสิกรรม. (2547). **วิจัยและพัฒนาเครื่องกวนเนื้อทุเรียน**. สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม.
- [75] ฉนิस्ता สำราญ และบงกช ทวีสุวรรณไกร. (2020). ผลของการใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อน (ระบบควบคุมการทำแห้งอัจฉริยะในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งสำหรับ SME สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย) ต่ออัตราการทำแห้งและคุณภาพของกุ่มแห้ง. **วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
- [76] เสาวลักษณ์ จิตรบรรเจิดกุล และนพรัตน์ วงศ์หิรัญเดชา. (มปป.). **การปรับปรุงคุณภาพและมาตรฐานของผลไม้กวน**. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [77] อัมฤทธิ์ สีกล่อม, ยุวดี กล้าพิทักษ์, วรารณ สุนันตะ, กมลวรรณ มโนวรรณ, และ นิอร โฉมศรี. (2563). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลำไยกวนเพื่อเป็นอาหารสุขภาพ. **วารสารวิจัยเทคโนโลยี**

นวัตกรรม. 4(2): p. 39-49.

- [78] วิชมนิ ยืนยงพุทธกาล และธีรรัตน์ อธิธิโสภณกุล. (2561). การสร้างมูลค่าเพิ่มให้ผลไม้ไทยโดยการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปใหม่ คล้ายของสดด้วยการเตรียมขั้นต้นวิธีออสโมซิสในสถานะสุญญากาศ: กรณีศึกษาน้อยหน่า ลองกอง และมังคุด. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [79] อรอง จันทร์ประสาทสุข. (2558). การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีจำเพาะของเนื้อผล สับประรด Characterization of specific physico-chemical properties of pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.) flesh. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [80] ธีรวัฒน์ ชื่นอัศตงคต. (2560). การพัฒนาเทคนิคจำแนกความแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองแบบไม่ทำลายผลด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีและการวิเคราะห์ภาพถ่าย. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- [81] สุริยล อุดชาชน. (2564). การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์และความเสี่ยงในการลงทุนโครงการโรงไฟฟ้าขยะในพื้นที่จังหวัดพิจิตร. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.



ภาคผนวก
ตารางผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ภาคผนวก ก ข้อมูลความชื้นและอัตราการลดความชื้นสับปะรดกวนภายใต้บรรยากาศปกติ ที่ 100 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	Product Temp	Hot water temp	Product weight	Moisture content (%db)	Drying Rate
0	77	111	10	483.77	0.00
5	88	112	10	483.77	0.00
10	97	114	9.9	477.93	5.84
15	99	115	9.9	477.93	5.84
20	105	115	9.8	472.10	11.67
25	108	114	9.7	466.26	17.51
30	107	115	9.6	460.42	23.35
35	103	103	9.4	448.74	35.03
40	102	102	9.3	442.91	40.86
45	101	101	9.1	431.23	52.54
50	101	101	9	425.39	58.38
55	101	100	8.9	419.56	64.21
60	100	100	8.8	413.72	70.05
65	100	105	8.8	413.72	70.05
70	99	104	8.7	407.88	75.89
75	100	104	8.6	402.04	81.73
80	101	104	8.5	396.21	87.56
85	100	104	8.5	396.21	87.56
90	101	103	8.4	390.37	93.40
95	102	104	8.3	384.53	99.24
100	102	103	8.2	378.69	105.08
105	101	103	8.1	372.85	110.92
110	101	103	8.1	372.85	110.92
115	100	104	8	367.02	116.75
120	101	103	7.9	361.18	122.59

ภาคผนวก ก ข้อมูลความชื้นและอัตราการลดความชื้นสับปะรดกวนภายใต้บรรยากาศปกติ ที่ 100 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา (นาที)	Product Temp	Hot water temp	Product weight	Moisture content (%db)	Drying Rate
125	101	103	7.8	355.34	128.43
130	101	103	7.8	355.34	128.43
135	101	103	7.7	349.50	134.27
140	101	104	7.6	343.67	140.10
145	101	104	7.5	337.83	145.94
150	101	104	7.5	337.83	145.94
155	101	104	7.4	331.99	151.78
160	101	104	7.4	331.99	151.78
165	101	104	7.3	326.15	157.62
170	101	104	7.2	320.32	163.45
175	101	103	7.1	314.48	169.29
180	101	103	7	308.64	175.13
185	101	104	6.9	302.80	180.97
190	101	104	6.9	302.80	180.97
195	101	103	6.8	296.96	186.81
200	102	104	6.7	291.13	192.64
205	100	104	6.7	291.13	192.64
210	102	104	6.6	285.29	198.48
215	101	104	6.5	279.45	204.32
220	101	104	6.4	273.61	210.16
225	101	104	6.3	267.78	215.99
230	101	104	6.2	261.94	221.83
235	100	103	6.2	261.94	221.83
240	99	103	6.1	256.10	227.67
245	101	104	6	250.26	233.51

ภาคผนวก ก ข้อมูลความชื้นและอัตราการลดความชื้นสับปะรดกวนภายใต้บรรยากาศปกติ ที่ 100 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา (นาที)	Product Temp	Hot water temp	Product weight	Moisture content (%db)	Drying Rate
250	100	104	5.9	244.42	239.35
255	101	103	5.8	238.59	245.18
260	101	104	5.7	232.75	251.02
265	100	104	5.7	232.75	251.02
270	99	104	5.6	226.91	256.86
275	101	103	5.5	221.07	262.70
280	100	104	5.4	215.24	268.53
285	100	104	5.4	215.24	268.53
290	100	104	5.3	209.40	274.37
295	100	103	5.3	209.40	274.37
300	99	104	5.2	203.56	280.21
305	100	103	5.1	197.72	286.05
310	100	104	5	191.89	291.88
315	101	104	4.9	186.05	297.72
320	99	103	4.9	186.05	297.72

ภาคผนวก ข สับปรตควนภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่ 100 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	Product Temp	Hot water temp	Product weight	Moisture content (%db)	Drying Rate
0	68	100	10	483.77	
5	72	108	10	483.77	0.00
10	80	106	9.1	431.23	52.54
15	60	91	8.3	384.53	99.24
20	61	92	8	367.02	116.75
25	61	94	7.5	337.83	145.94
30	64	96	7.1	314.48	169.29
35	65	97	6.6	285.29	198.48
40	67	98	6.1	256.10	227.67
45	70	99	5.6	226.91	256.86
50	72	99	5	191.89	291.88

ภาคผนวก ค สับปรตควนภายใต้อภวะสุญญากาศ ที่ 80 องศาเซลเซียส

เวลา (นาทึ)	Product Temp	Hot water temp	Product weight	Moisture content (%db)	Drying Rate
0	52	111	10	483.77	
5	66	107	10	483.77	0.00
10	63	97	9.1	431.23	52.54
15	63	86	8.6	402.04	81.73
20	64	83	8.1	372.85	110.92
25	63	83	7.7	349.50	134.27
30	64	84	7.5	337.83	145.94
35	64	83	7.2	320.32	163.45
40	65	84	6.8	296.96	186.81
45	65	84	6.3	267.78	215.99
50	66	85	6.1	256.10	227.67
55	67	84	5.8	238.59	245.18
60	68	85	5.4	215.24	268.53
65	68	54	5	191.89	291.88

ภาคผนวก ง Thermodynamic Table A-4

TABLE A-4												
Saturated water—Temperature table (Concluded)												
Temp., <i>T</i> °C	Sat. press., <i>P</i> _{sat} kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10,566	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070