

การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ใช้วิธีการดักจับไอน้ำแบบใช้สารดักไอน้ำ

ปริญญานิพนธ์

ของ

โอริโนโค เยื่อง

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2551

การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ใช้วิธีการดักจับไอน้ำแบบใช้สารดักไอน้ำ

ปริญญานิพนธ์

ของ

โอริโนโค เยื่อง

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2551

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ใช้วิธีการดักจับไอน้ำแบบใช้สารดักไอน้ำ

บทคัดย่อ
ของ
โอริโนโค เยื่อง

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2551

โอริโนโค เยื่อง. (2551). การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ใช้วิธีการดักจับไอน้ำแบบใช้สาร
ดักไอน้ำ. ปรินซ์นิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล).กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย
อัษฎมงคล ,ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิ้นสุภา จัษฎ์เฉลิม

การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นวิธีการถนอมอาหารในรูปแบบหนึ่งโดยอาศัยทฤษฎีการ
ระเหิดน้ำภายใต้ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ในปรินซ์นิพนธ์นี้เป็นการกล่าวถึงการ
ออกแบบเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งแบบใหม่โดยใช้สารดักจับไอน้ำ เช่น สารซิลิกาเจล และสารโมเลกุล
ลาซีฟ ในการดักจับไอน้ำที่เกิดจากช่วงของการอบแห้ง สำหรับวัตถุดิบที่นำมาทำการทดสอบนั้น ได้แก่
เนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อกุ้ง กุ้งแห้ง หนูนุ่ม แอปเปิ้ลเขียว และสาหร่าย

โดยความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบดังกล่าวอยู่ระหว่างร้อยละ 55 ถึง 94 ของน้ำหนักตัวของ
วัตถุดิบ ความชื้นสุดท้ายที่ได้จากการทดลอง อยู่ระหว่างร้อยละ 3 ถึง 5 ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบนั้นๆ ซึ่ง
เป็นไปตามทฤษฎี สารซิลิกาเจลสามารถดักจับไอน้ำได้น้อยเมื่อเทียบกับสารโมเลกุลลาซีฟ ซึ่งสามารถดัก
จับไอน้ำได้ดีกว่า ภายใต้ช่วงของความดันระหว่าง 0.5 ถึง 1.5 มินิบาร์ สำหรับสารโมเลกุลลาซีฟสามารถดัก
จับไอน้ำได้ร้อยละ 8 ถึง 12 ของน้ำหนักตัวของสารที่นำมาใช้ ซึ่งสรุปได้ว่า ระบบการอบแห้งแบบแช่
เยือกแข็งที่ใช้สารดักจับไอน้ำในการดักจับไอน้ำสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทั้งเนื้อสัตว์ ผัก และผลไม้ เป็น
อย่างดี

DESIGN AND CONSTRUCTION OF FREEZED DRYER WITH USING VAPOR
ABSORPTION MATERIAL IN A VAPOR TRAP

AN ABSTRACT
BY
ORINOCO YEUNG

Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Engineering degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

May 2008

Orinoco Yeung. (2008). *Design and Construction of Freezed Dryer with Vapor Absorption Material in a vapor trap*. Master thesis, ME.Eng. (Mechanical Engineering).

Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst.

Prof. Dr. Pichai Asadamongkon. Asst. Prof. Dr.Sinsupha ChuiChulcherm.

Freezed Drying is a process to preserve food by using the basic theory of Sublimation under pressure lower than the atmospheric condition. The thesis describes the novel design of The freezed dryer using vapor adsorption material such as silica gel and molecular sieves to adsorb vapor that produced during drying period. Raw materials used in the experiments were beef, chicken, shrimp, banana, jack fruit, green apple and seaweed.

The initial moisture contents were in a range of 55 to 94% weight. The final moisture content obtained in the experiments were in a range of 3 – 5 % depending on the materials which corresponding to the theory. Silica gel hardly adsorbed the water vapor while molecular sieves performed better under the pressure of 0.5 to 1.5 mbar. The molecular sieves were able to adsorb the vapor of in a range of 8 to 12 % its own weight. In conclusion, the freezed drying system using adsorption material can be applied to process either meat or vegetable and fruit successfully.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ใช้วิธีการดักจับไอน้ำแบบใช้สารดักไอน้ำ

ของ

โอริโนโค เยื่อง

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวិศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญสิริ จีระเดชากุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน

.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพรรณ ธงชัย)

.....กรรมการ

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิ้นสุภา จั๋ยจุลเจิม)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิ้นสุภา จั๋ยจุลเจิม)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย อัมมมงคล ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินศุภา จุ้ยจุลเจิม กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้แนวคิดในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับปริญญานิพนธ์ ตลอดจนช่วยตรวจแก้ปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กับ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ระดับบัณฑิตศึกษา สาขา วิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถทาง วิชาการ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างยิ่ง ประโยชน์และคุณค่าของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยเล่มนี้ จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ ในเนื้อหารายละเอียดต่างๆ เป็นอย่างดี และจะมีส่วนในการพัฒนาประเทศชาติให้เจริญก้าวหน้าต่อไป

โอริโนโค เยื่อง

สารบัญ

บทที่	หน้า
1	บทนำ..... 1
	ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย..... 1
	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 1
	ขอบเขตของงานวิจัย..... 1
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย..... 2
2	ปริทัศน์วรรณกรรม..... 3
	การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 3
3	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 13
	บทนำ..... 14
	หลักการออกแบบแช่เยือกแข็ง..... 14
	ขั้นตอนในการออกแบบแช่เยือกแข็ง..... 15
	ประเภทของการออกแบบแช่เยือกแข็ง..... 21
	การแช่แข็งอาหาร..... 25
	หลักการการถ่ายเทความร้อน..... 31
	หลักการทำงานของเครื่องออกแบบแช่เยือกแข็ง..... 36
	ชุดดักจับไอน้ำ..... 39
4	การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของ..... 44
	ขั้นตอนในการดำเนินงาน..... 44
	ผลการทดลอง..... 45
	ตัวอย่างการคำนวณ..... 71

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5	
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	76
สรุปผลงานวิจัย.....	76
ปัญหาที่พบขณะดำเนินการวิจัย.....	76
ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	77
บรรณานุกรม.....	78
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก ตารางการทดลอง.....	81
ภาคผนวก ข คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย.....	107
ภาคผนวก ค แบบ Drawing ต่างๆของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....	110
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	119

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ตารางแสดงปริมาณน้ำในอาหาร.....	16
2 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆสำหรับอาหารแต่ละชนิด.....	17
3 ตารางแสดงความดันไอของน้ำแข็ง.....	18
4 ตารางเปรียบเทียบระหว่างการบรรจุในแบบต่างๆ.....	20
5 ตารางแสดงถึงอุณหภูมิต่างๆและชั่วโมงที่ใช้ในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ของผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ต่างๆ.....	21
6 ตารางแสดงค่าของการแช่แข็งผลไม้ ผัก ด้วยเวลาในการฟอกขาว (blanching time) ระหว่าง 2 ถึง 4 นาที.....	23
7 ตารางแสดงคุณสมบัติของโมเลกุลซีฟในประเภทต่างๆ.....	43
8 ตารางแสดงผลของความชื้นก่อนอบและหลังอบของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่ได้จากการอบ แห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยมีน้ำหนักของวัตถุดิบอยู่ที่ 300 กรัม และมีซิลิกาเจลเป็น สารดักจับไอน้ำ.....	70
9 ตารางแสดงผลของความชื้นก่อนอบและหลังอบของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่ได้จากการอบ แห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยมีน้ำหนักของวัตถุดิบอยู่ที่ 100 กรัม และมีmolecular sievesเป็นสารดักจับไอน้ำ.....	71
10 ตารางแสดงผลการคำนวณค่าไฟฟ้าของสสารห่วย ที่อบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยมีสาร ซิลิกาเจลกับน้ำแข็งแห้งเป็นสารดักจับไอน้ำ.....	74
11 ตารางแสดงจำนวนหน่วยและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งวัตถุดิบแต่ละ ชนิด โดยมีสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ.....	74
12 ตารางแสดงจำนวนหน่วยและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งวัตถุดิบแต่ละ ชนิด โดยมีสารโมเลกุลซีฟในการดักจับไอน้ำ.....	75
13 ตารางแสดงค่าอัตราการระเหิดและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ต่างๆ.....	75
14 ตารางแสดงผลการทดลองการอบเนื้อหมู น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือก แข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ.....	82
15 ตารางแสดงผลการทดลองการอบเนื้อไก่ น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือก แข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ.....	85

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง

หน้า

16	ตารางแสดงผลการทดลองการอบเนื้อกุ้ง น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ.....	89
17	ตารางแสดงผลการทดลองการอบกล้วย น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ.....	92
18	ตารางแสดงผลการทดลองการอบแอปเปิ้ลเขียว น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ.....	95
19	ตารางแสดงผลการทดลองการอบสาหร่าย น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ.....	98
20	ตารางแสดงผลการทดลองการอบขนุน น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ.....	101
21	ตารางแสดงผลการทดลองการอบเนื้อหมู น้ำหนัก 100 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้โมเลกุลซีฟเป็นสารดักจับไอน้ำ.....	103
22	ตารางแสดงผลการทดลองการอบแอปเปิ้ลเขียว น้ำหนัก 100 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้โมเลกุลซีฟเป็นสารดักจับไอน้ำ.....	105

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ

หน้า

1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งทุเรียนด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....	3
2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งทุเรียนด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดเป็นเวลา 12 ชั่วโมง.....	4
3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งทุเรียนด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดเป็นเวลา 30 ชั่วโมง.....	4
4	ภาพแสดงเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ.....	5
5	ภาพแสดงภายในถังดักจับไอน้ำที่มีเครื่องควบแน่นในการดักจับไอน้ำที่เกิดจากการอบแห้ง....	5
6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งเห็ดฟางด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ เป็นเวลา 21 ชั่วโมง	6
7	ภาพแสดงลักษณะของเห็ดฟางก่อนทำการอบและหลังทำการอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ.....	6
8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งเห็ดฟางด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ เป็นเวลา 33 ชั่วโมง.....	7
9	ภาพแสดงลักษณะของเห็ดฟางระหว่างเห็ดฟางที่เป็นวัตถุดิบ เห็ดฟางที่ทำการอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิด และเห็ดฟางที่เป็นได้คั้นรูปหลังทำการอบ.....	7
10	ภาพแสดงเครื่องอบแห้งแบบเยือกแข็งที่ใช้ในการทดสอบของนางสาวภัทราพร สุวรรณกิจบริหาร.....	8
11	ภาพแสดงเครื่องอบแห้งแบบเยือกแข็งที่ใช้ในการทดสอบของนางสาววันเพ็ญ นิลสนธิ และ คณะ.....	8
12	ภาพแสดงลักษณะเนื้อกุ้งโดยการต้ม.....	9
13	ภาพแสดงลักษณะเนื้อกุ้งโดยการอบ.....	9
14	ภาพแสดงลักษณะเนื้อกุ้งโดยการตากแห้ง.....	10
15	ภาพแสดงลักษณะเนื้อกุ้งโดยการแช่เยือกแข็ง.....	10
16	ภาพแสดงลักษณะของผักคะน้าสด.....	11
17	ภาพแสดงลักษณะของผักคะน้าที่ทำการตากแห้ง.....	11

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
18 ภาพแสดงลักษณะของฝักค่น้ำที่ทำการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....	12
19 ภาพแสดงเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งรุ่น GT 500-D ของ LYOVAC.....	13
20 แผนภาพวัฏภาพของน้ำ Phase Diagram.....	14
21 ภาพแสดงขั้นตอนในการทำการอบแห้งแบบระเหิดในรูปของกราฟระหว่างเวลากับอุณหภูมิ.....	15
22 รูปแสดงผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาด้วยถุงออลูมิเนียมฟอยด์.....	19
23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 22 °C (1. พริกไทย 2. ลูกพีท 3. มันฝรั่ง 4. เนื้อสัตว์).....	22
24 กราฟแสดงผลที่ได้จากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดโดยการเปรียบเทียบในเรื่องของรสชาติ สี และการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง.....	24
25 กราฟแสดงอิทธิพลของการทำความเย็นยิ่งยวดต่ออัตราการเกิดนิวเคลียสผลึกและการเติบโตของผลึก.....	27
26 ภาพแสดงการแข็งตัวของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นชิ้นบางๆ.....	29
27 แผนภูมิแสดงค่าของ P และ R ของสมการแพลงค์.....	31
28 รูปแสดงกระบวนการในการระเหิดของน้ำแข็ง.....	32
29 รูปแสดงประเภทต่างๆของการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง....	33
30 รูปแสดงกระบวนการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นที่แห้งแล้ว....	34
31 ภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบระเหิด.....	36
32 ภาพแสดง diagram ของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....	36
33 ภาพแสดงลักษณะของปั๊มสุญญากาศของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....	37
34 ภาพแสดงลักษณะของถังดักจับไอน้ำของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....	37
35 ภาพแสดงลักษณะของตู้ควบคุมของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....	38
36 ภาพแสดงลักษณะของระบบทำความเย็นของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....	38
37 ภาพแสดงลักษณะของห้องอบของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....	39

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

38	ภาพแสดงโครงสร้างของชุดดักจับไอ.....	40
39	ภาพแสดงลักษณะของสารซิลิกาเจล.....	40
40	ภาพแสดงลักษณะของสารโมเลกุลต่ำ.....	42
41	กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งเนื้อหมูน้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสาร ดักจับไอประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอ.....	46
42	กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งเนื้อหมูน้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสารดักจับไอประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอ....	46
43	ภาพแสดงลักษณะเนื้อหมูก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสาร ดักจับไอประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอ.....	47
44	ภาพแสดงลักษณะเนื้อหมูหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสาร ดักจับไอประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอ.....	47
45	กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งเนื้อไก่ น้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสาร ดักจับไอประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอ.....	48
46	กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งเนื้อไก่ น้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสารดักจับไอประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอ....	49
47	ภาพแสดงลักษณะเนื้อไก่ก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสาร ดักจับไอประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอ.....	49
48	ภาพแสดงลักษณะเนื้อไก่หลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสาร ดักจับไอประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอ.....	50
49	กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งเนื้อกุ้ง น้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสาร ดักจับไอประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอ.....	51
50	กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งเนื้อกุ้ง น้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสารดักจับไอประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอ	51
51	ภาพแสดงลักษณะเนื้อกุ้งก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสาร ดักจับไอประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอ.....	52

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า[illegible]

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- 65 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งขนุนน้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสาร
ดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ..... 61
- 66 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งขนุนน้ำหนัก 300
กรัมโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ..... 61
- 67 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อขนุนก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดย
มีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ..... 62
- 68 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อขนุนหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดย
มีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ..... 62
- 69 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งเนื้อหมูนํ้าหนัก 100 กรัมโดยใช้
โมเดลคูลาซีในการดูดจับไอน้ำ..... 63
- 70 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งเนื้อหมูนํ้าหนัก
100 กรัมโดยใช้ molecular sieves ในการดักจับไอน้ำ..... 64
- 71 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อหมูนํ้าหนัก 100 กรัมก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ
แช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ..... 64
- 72 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อหมูนํ้าหนัก 100 กรัมหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ
แช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ..... 65
- 73 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งแอปเปิ้ลเขียวน้ำหนัก 100 กรัม โดย
ใช้โมเดลคูลาซีในการดูดจับไอน้ำ..... 66
- 74 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งแอปเปิ้ลเขียวหนัก
100 กรัมโดยใช้ molecular sieves ในการดักจับไอน้ำ..... 66
- 75 ภาพแสดงลักษณะของแอปเปิ้ลเขียวน้ำหนัก 100 กรัมก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบ
แห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ..... 67
- 76 ภาพแสดงลักษณะของแอปเปิ้ลเขียวน้ำหนัก 100 กรัมหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบ
แห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ..... 67
- 77 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งเนื้อหมูนํ้าหนัก 50 กรัม โดยใช้
โมเดลคูลาซีในการดูดจับไอน้ำ..... 68

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- 78 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งเนื้อหมูน้ำหนัก 50 กรัมโดยใช้ molecular sieves ในการดักจับไอน้ำ..... 69
- 79 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อหมูน้ำหนัก 50 กรัมก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ..... 69
- 80 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อหมูน้ำหนัก 50 กรัมหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ..... 70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย

การถนอมอาหารหรือแปรรูปอาหารเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ยุคสมัยโบราณ จนถึงปัจจุบัน สำหรับกรรมวิธีในการถนอมอาหารนั้น จุดประสงค์เพื่อทำลาย หรือเป็นการหยุดยั้ง การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในอาหาร ซึ่งวิธีการถนอมและแปรรูปอาหารนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบตามความเหมาะสม เนื่องด้วยประเทศไทยนั้น ประชากรโดยส่วนใหญ่จะเป็นการประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก ในแต่ละปีนั้น มีผลไม้ออกสู่ตลาดมากมาย ตามฤดู ในบางครั้งมีมากจนล้นตลาด ซึ่งเป็นผลให้ผลไม้เหล่านั้นมีราคาตกต่ำลง เพื่อให้ผลไม้เหล่านั้นสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องแปรรูปผลไม้เหล่านั้นเพื่อให้ราคาของ ผลผลิตภักณฑ์มีค่าสูงขึ้น เป็นผลให้มีความคิดในการออกแบบ และทำการสร้างเครื่องอบแห้งแบบ ระเบิดหรือการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งขึ้น ซึ่งเป็นวิธีดีวิธีหนึ่งในการแปรรูปวัตถุดิบ ทั้งนี้ทั้งนั้น เนื่องจากการอบแห้งแบบระเบิดนี้ สามารถรักษาสภาพทางกายภาพต่างๆของวัตถุดิบไว้หลัง การอบ ทั้งในรูปของ รสชาติ กลิ่น และ สี อีกทั้งยังสามารถรักษาคูณค่าทางอาหารต่างๆของ วัตถุดิบนั้นๆด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งให้มีประสิทธิภาพ สามารถนำไปใช้ในทางด้านอุตสาหกรรมต่อไป
2. ทำการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบอบแห้งโดยการอบแห้งเนื้อสัตว์และผลไม้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งขนาดบรรจุวัตถุดิบได้ 100 – 500 กรัม ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ
2. ใช้ระบบดักจับไอน้ำเป็นชนิดสารดูดซับความชื้น
3. ความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งเท่ากับ 3 – 5 % ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

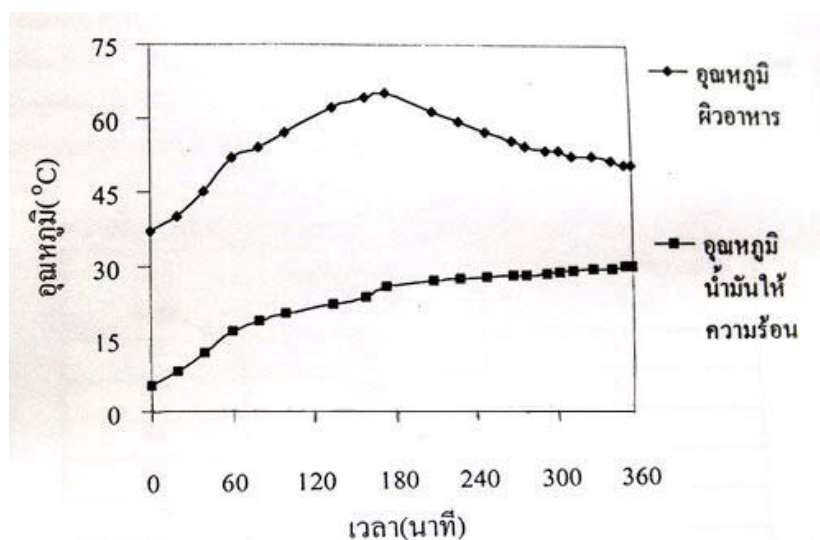
1. เพื่อให้สามารถนำเครื่องที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนั้นมาใช้ได้จริงทางด้านอุตสาหกรรมขนาดครอบครัว และ ทางด้านเกษตร
2. เพื่อเป็นต้นแบบให้กับอุตสาหกรรมที่จะพัฒนาต่อไป
3. เป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาครั้งต่อไป เพื่อทดแทนการนำเข้าของเครื่องจักร ซึ่งเป็นการพัฒนาที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

บทที่ 2

ปรีทศวรรณกรรม

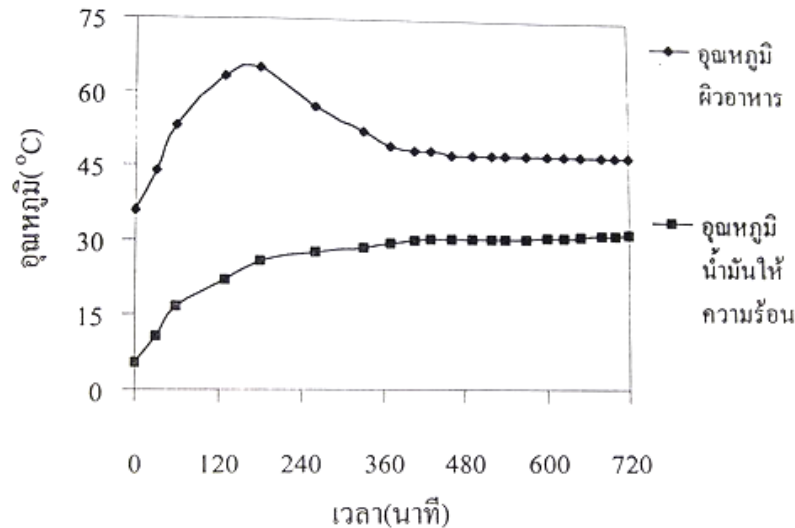
2.1 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติพันธ์ สุนทราศรี ชาคริต เกียรติคุณรัตน์ และเด่น จันทร์ทองอ่อน (พ.ศ. 2543) ได้มีการสร้างเครื่องอบแห้งแบบระเหิด แล้วทำการทดสอบการอบแห้งเนื้อทุเรียนโดยผลการทดลองที่ได้นั้นออกมาในรูปแบบของกราฟแสดงระหว่างเวลากับอุณหภูมิ ซึ่งจากผลการทดสอบนั้น เนื้อทุเรียนที่ได้มี สี รส และคุณค่าทางอาหาร ดีกว่าการอบแห้งแบบอื่นๆ แต่เครื่องมีข้อจำกัดในเรื่องของพลังงานที่ใช้และความจุของเครื่อง รวมไปถึงผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งยังคงมีความชื้นสูง ซึ่งยังต้องทำการปรับปรุงในครั้งต่อไป

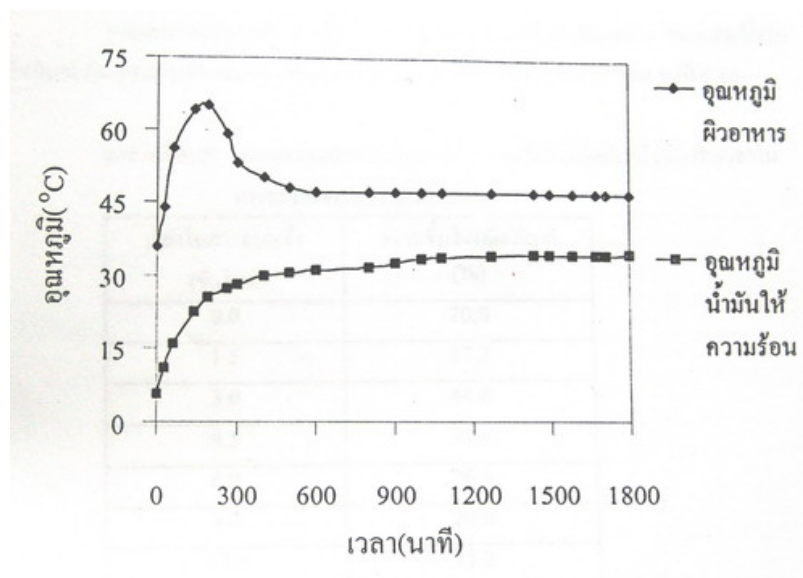


ภาพประกอบ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งทุเรียนด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ที่มา : กิตติพันธ์ สุนทราศรี; ชาคริต เกียรติคุณรัตน์ และ เด่น จันทร์ทองอ่อน. เครื่องอบแห้งแบบระเหิด (Freeze Dryer). หน้า 62.

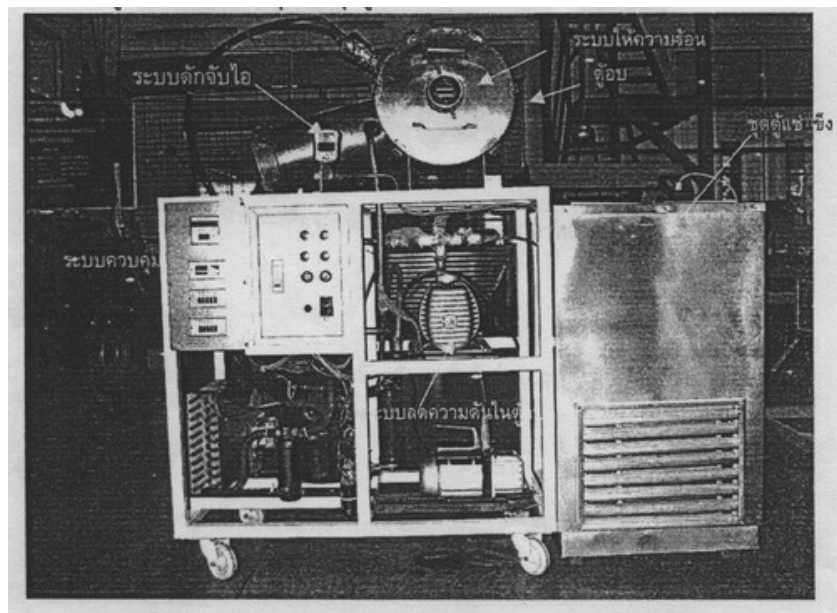


ภาพประกอบ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งทุเรียนด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
 ที่มา : กิตติพันธ์ สุนทราศรี; ชาคริต เกียรติคุณรัตน์ และ เด่น จันทร์ทองอ่อน. เครื่องอบแห้งแบบระเหิด (Freeze Dryer). หน้า 66.

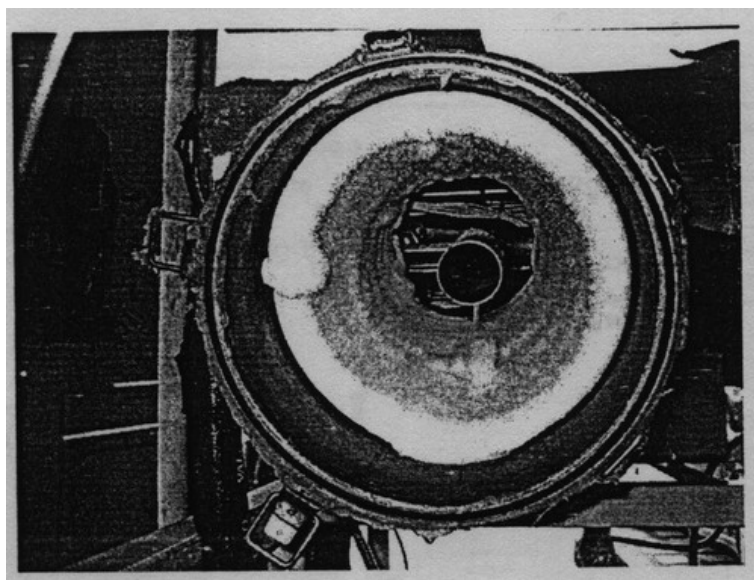


ภาพประกอบ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งทุเรียนด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดเป็นเวลา 30 ชั่วโมง
 ที่มา : กิตติพันธ์ สุนทราศรี; ชาคริต เกียรติคุณรัตน์ และ เด่น จันทร์ทองอ่อน. เครื่องอบแห้งแบบระเหิด (Freeze Dryer). หน้า 72.

พิชัย อัมมมงคล (พ.ศ. 2546) ได้มีการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ เพื่อทำการอบแห้งเห็ดฟางซึ่งแห้งเป็นขึ้น



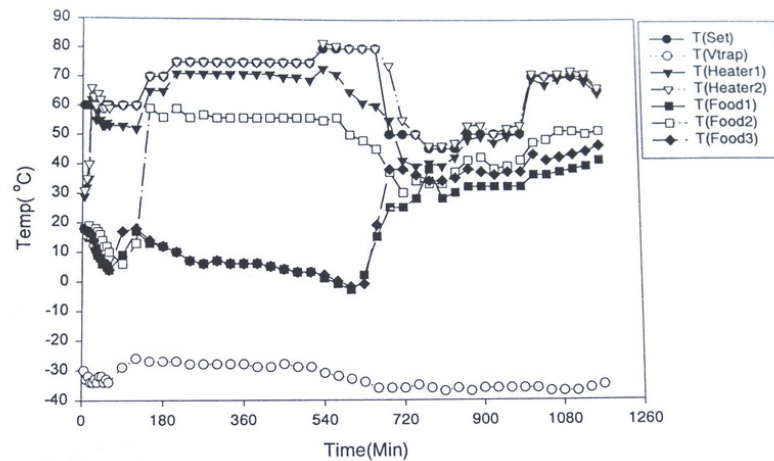
ภาพประกอบ 4 ภาพแสดงเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ
ที่มา : พิชัย อัมมมงคล. การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ. หน้า 6.



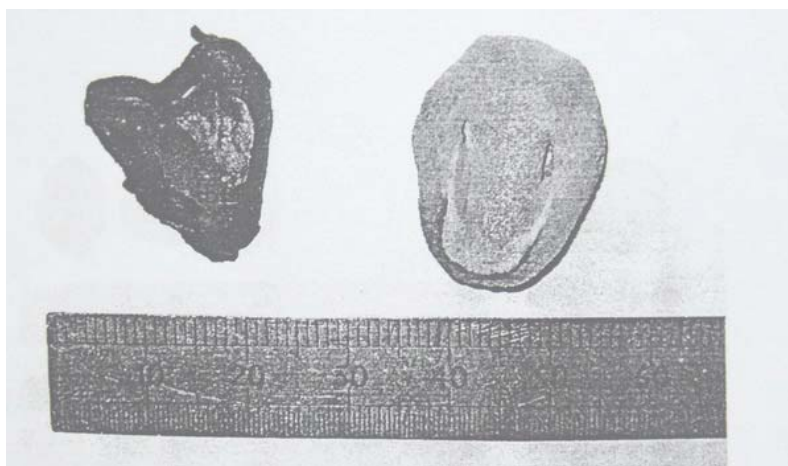
ภาพประกอบ 5 ภาพแสดงภายในถังดักจับไอน้ำที่มีเครื่องควบแน่นในการดักจับไอน้ำที่เกิดจากการอบแห้ง

ที่มา : พิชัย อัมมมงคล. การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ. หน้า 7.

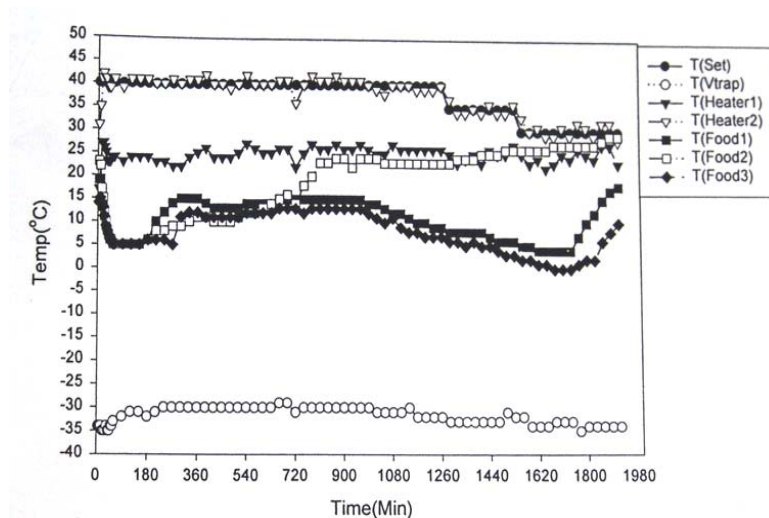
โดยความชื้นเริ่มต้นมีค่าเป็น 87% โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเฉลี่ยในการอบแห้งเท่ากับ 28 ชม. ซึ่งหลังการอบแห้งแล้วผลิตภัณฑ์มีค่าความชื้นเท่ากับ 5% โดยน้ำหนัก น้ำหนักที่วัดได้หลังอบแห้งมีค่าเป็น 130 กรัม จากเดิมที่มีน้ำหนัก 950 กรัม



ภาพประกอบ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งเห็ดฟางด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ เป็นเวลา 21 ชั่วโมง
ที่มา : พิชัย อัสภูมิมงคล. การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ. หน้า 8.

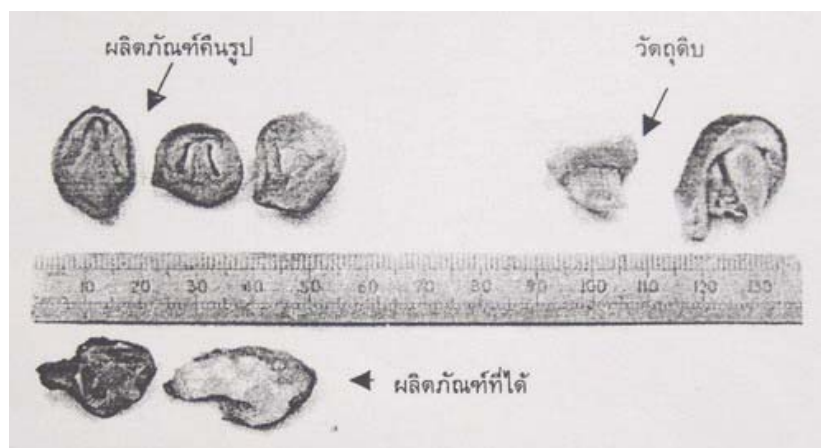


ภาพประกอบ 7 ภาพแสดงลักษณะของเห็ดฟางก่อนทำการอบและหลังทำการอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ
ที่มา : พิชัย อัสภูมิมงคล. การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ. หน้า 8.



ภาพประกอบ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งเห็ดฟางด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ เป็นเวลา 33 ชั่วโมง

ที่มา : พิชัย อัฐมมงคล. การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ. หน้า 9.



ภาพประกอบ 9 ภาพแสดงลักษณะของเห็ดฟางระหว่างเห็ดฟางที่เป็นวัตถุดิบ เห็ดฟางที่ทำการอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบระเหิด และเห็ดฟางที่เป็นได้คั้นรูปหลังทำการอบ

ที่มา : พิชัย อัฐมมงคล. การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ. หน้า 9.

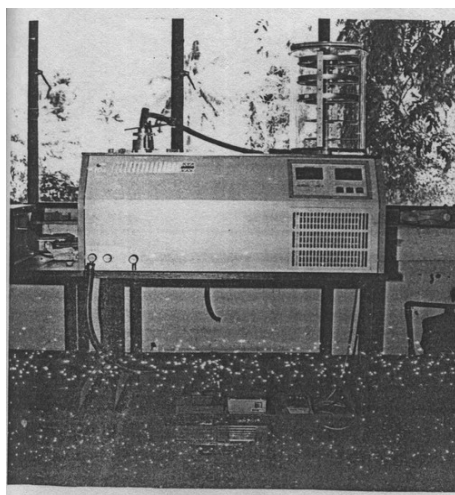
ภัทราพร สุวรรณกิจบริหาร (พ.ศ. 2540) ได้ทำการศึกษาและทดลองการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze Dryer) โดยนำผลไม้เมืองร้อน 10 ชนิดมาทดสอบ โดยผลที่ได้นั้นแสดงอยู่ในรูปของกราฟระหว่างเวลา กับอุณหภูมิ จากการที่ได้ทดสอบนั้นวิธีการอบแห้งแบบเยือกแข็งนั้นสามารถทำได้ดีกับผลไม้ชนิด พุเรียน ขนุน สับปะรด และมะม่วง แต่เมื่อนำผลไม้อบแห้งนั้นมาทดลองโดยการดูดซับน้ำแล้ว ไม่สามารถทำให้ได้ความชื้นเท่ากับผลไม้สด



ภาพประกอบที่ 10 ภาพแสดงเครื่องอบแห้งแบบเยือกแข็งที่ใช้ในการทดสอบของนางสาวภัทราพร สุวรรณกิจบริหาร

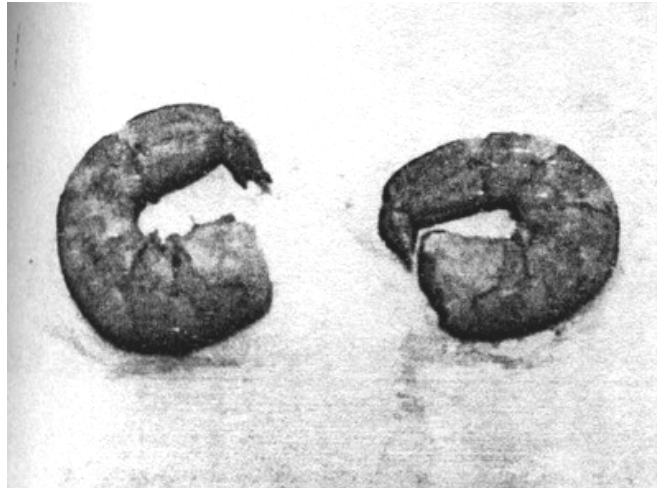
ที่มา : ภัทราพร สุวรรณกิจบริหาร. การศึกษาการทำผลไม้แห้งจาก Freezed Dryer. หน้า 72.

วันเพ็ญ นิลสนธิ ศิริลักษณ์ สุขสุจริตพร ศันสนีย์ วงศ์พรหม และอุมาพร จันทกุม (พ.ศ. 2540) ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งเนื้อสัตว์ และผักสด โดยการตากแห้งและโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี จากที่ได้มีการทดลองนั้น พบว่า ตัวอย่างที่ทำแห้งในสภาพแช่แข็ง กับการทำแห้งโดยแสงแดดนั้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบ 11 ภาพแสดงเครื่องอบแห้งแบบเยือกแข็งที่ใช้ในการทดสอบของนางสาววันเพ็ญ นิลสนธิ และคณะ

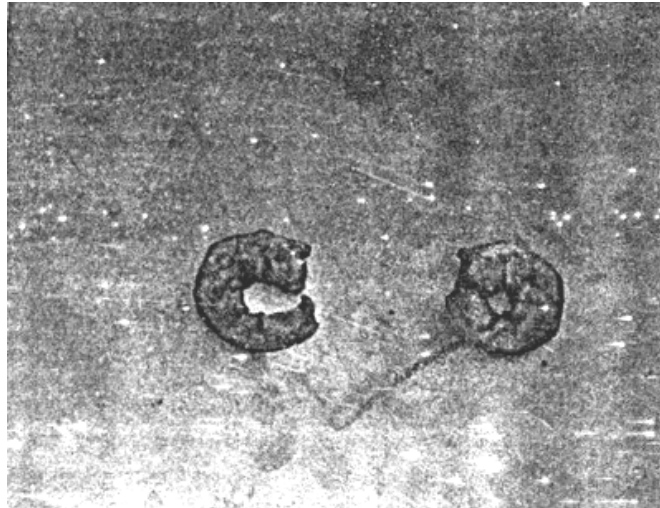
ที่มา : วันเพ็ญ นิลสนธิ และคนอื่นๆ. การทำแห้งในสภาพแช่แข็งเพื่อถนอมอาหาร. หน้า 33.



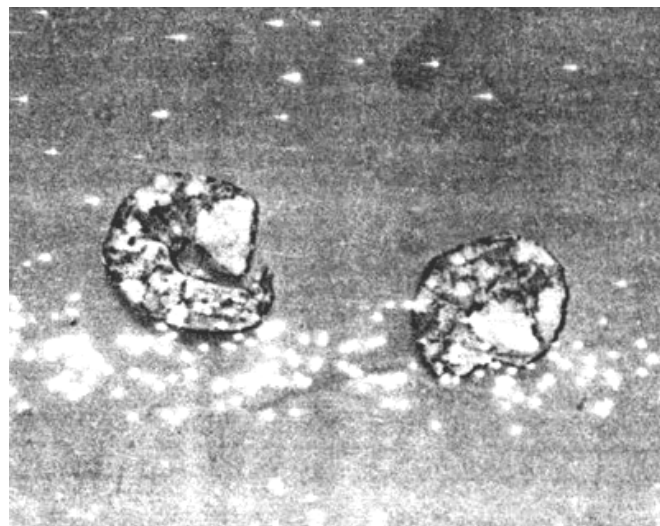
ภาพประกอบ 12 ภาพแสดงลักษณะเนื้อกึ่งโดยการต้ม
ที่มา : วันเพ็ญ นิลสนธิ และคนอื่นๆ. การทำแห้งในสภาพแช่แข็งเพื่อถนอมอาหาร. หน้า 65.



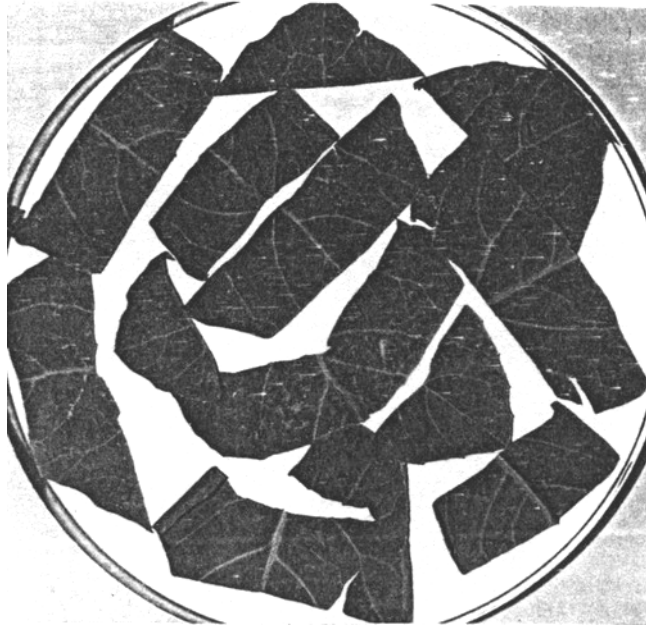
ภาพประกอบ 13 ภาพแสดงลักษณะเนื้อกึ่งโดยการอบ
ที่มา : วันเพ็ญ นิลสนธิ และคนอื่นๆ. การทำแห้งในสภาพแช่แข็งเพื่อถนอมอาหาร. หน้า 65.



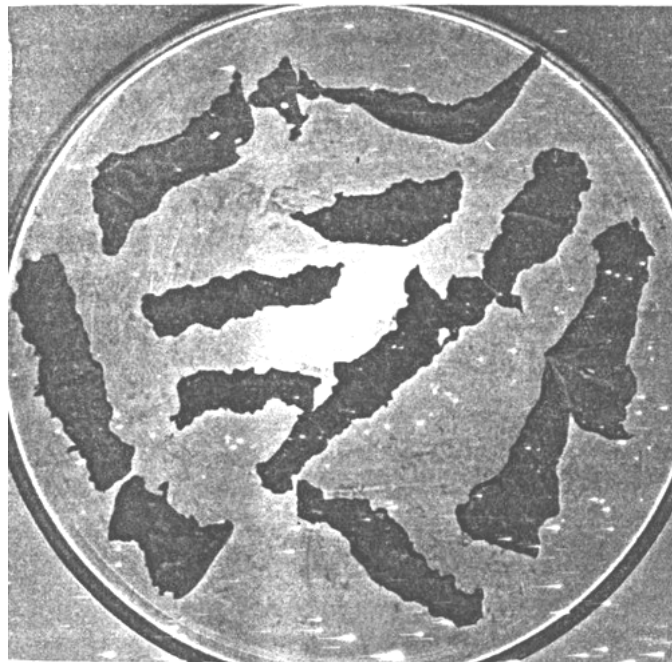
ภาพประกอบ 14 ภาพแสดงลักษณะเนื้อกึ่งโดยการตากแห้ง
ที่มา : วันเพ็ญ นิลสนธิ และคนอื่นๆ. การทำแห้งในสภาพแช่แข็งเพื่อถนอมอาหาร. หน้า 65.



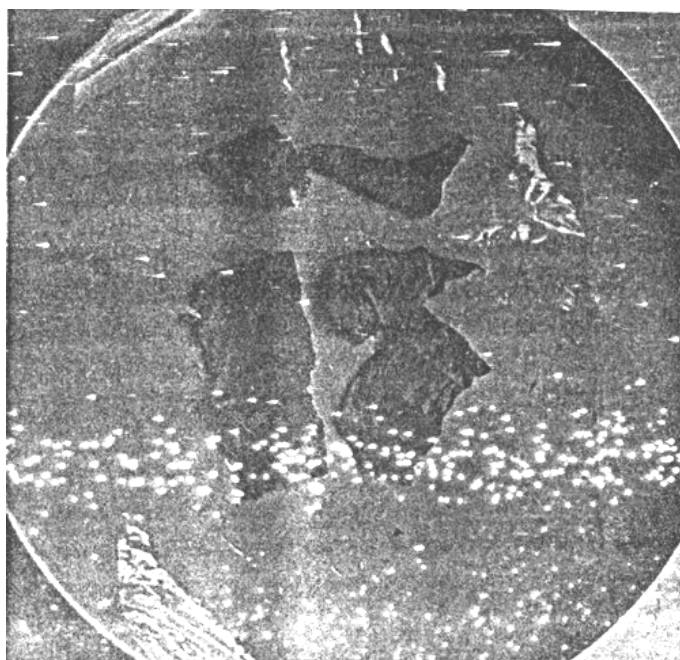
ภาพประกอบ 15 ภาพแสดงลักษณะเนื้อกึ่งโดยการแช่เยือกแข็ง
ที่มา : วันเพ็ญ นิลสนธิ และคนอื่นๆ. การทำแห้งในสภาพแช่แข็งเพื่อถนอมอาหาร. หน้า 65.



ภาพประกอบ 16 ภาพแสดงลักษณะของผักคะน้าสด
ที่มา : วันเพ็ญ นิลสนธิ และคนอื่นๆ. การทำแห้งในสภาพแช่แข็งเพื่อกนอมอาหาร. หน้า 62.



ภาพประกอบ 17 ภาพแสดงลักษณะของผักคะน้าที่ทำการตากแห้ง
ที่มา : วันเพ็ญ นิลสนธิ และคนอื่นๆ. การทำแห้งในสภาพแช่แข็งเพื่อกนอมอาหาร. หน้า 62.



ภาพประกอบ 18 ภาพแสดงลักษณะของผักคะน้าที่ทำการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง
ที่มา : วันเพ็ญ นิลสนธิ และคนอื่นๆ. การทำแห้งในสภาพแช่แข็งเพื่อถนอมอาหาร. หน้า 62.

C.T.Kiiranoudis Z.B.Maroulis และ D.Marinos-Kouris (พ.ศ. 2535) ได้ทำการทดลองถึงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยใช้หัวหอม และพริกไทย ซึ่งผลที่ได้นั้น ผลการอบแห้งนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการอบแห้งและสภาวะแวดล้อมในการอบแห้ง

W.H.Mink และ G.F.Sachsel ได้ศึกษาหาระยะเวลาของการอบแห้ง ซึ่งผลที่ได้นั้นแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของไอน้ำ ไม่ได้เป็นตัวควบคุมอัตราการแห้ง แต่การเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำหรือการแผ่รังสีนั้นเป็นตัวควบคุมอัตราการแห้งของผลิตภัณฑ์

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดและเนื้อหาดังหัวข้อต่อไปนี้

หัวข้อ 3.1 บทนำ

หัวข้อ 3.2 หลักการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

หัวข้อ 3.3 ขั้นตอนในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

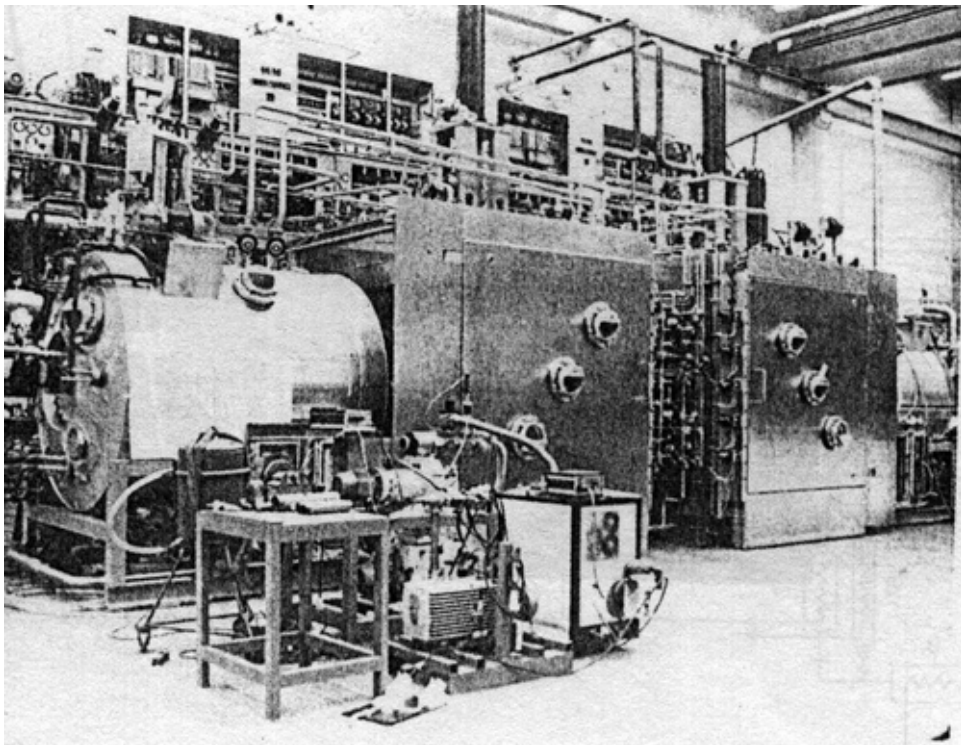
หัวข้อ 3.4 ประเภทของการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

หัวข้อ 3.5 การแช่แข็งอาหาร

หัวข้อ 3.6 หลักการการถ่ายเทความร้อน

หัวข้อ 3.7 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

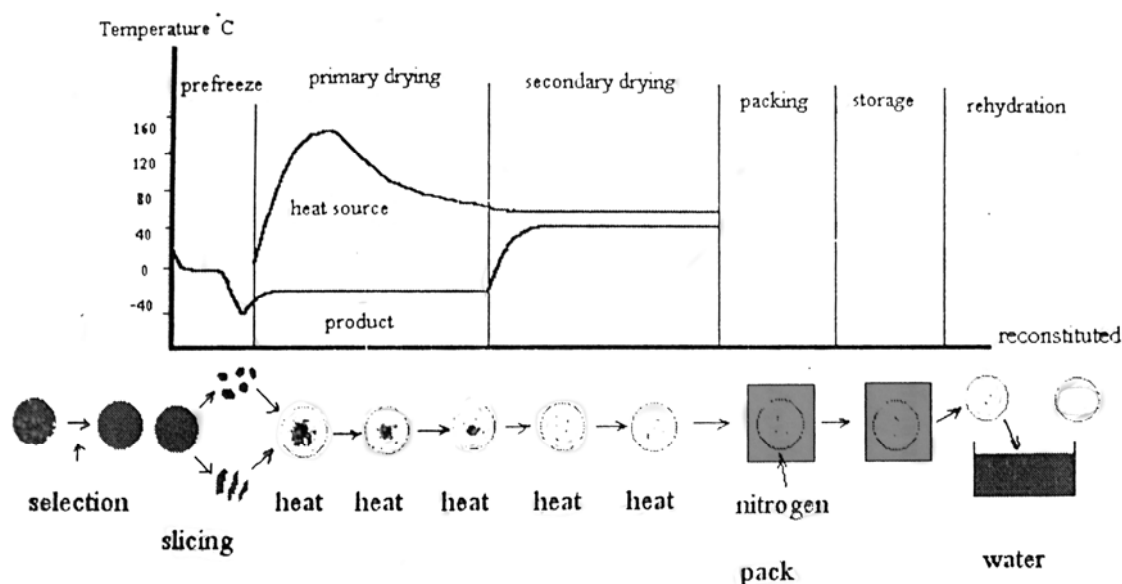
หัวข้อ 3.8 ชุดดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 19 ภาพแสดงเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งรุ่น GT 500-D ของ LYOVAC
ที่มา : Georg – Wilhelm Oetjen (1999). Freeze – Drying p. 185

แผนภาพข้างต้นนั้น เป็นแผนภาพแสดงถึงสถานะของน้ำ ณ จุด Triple point (Phase Diagram) น้ำประกอบด้วย 3 สถานะ นั่นคือ สถานะของแข็ง ของเหลว และ ก๊าซ ในกระบวนการอบแห้งโดยทั่วไปนั้น จะเป็นการอบแห้งโดยอาศัยการระเหย ซึ่งจะเป็นไปตามเส้นกราฟจากจุด A ไปยังจุด B แต่ในกระบวนการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้น เพื่อให้วัตถุดิบนั้นๆเกิดการตกผลึกจึงต้องทำการแช่แข็งให้อุณหภูมิของวัตถุดิบนั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง เป็นไปตามเส้นกราฟจากจุด A ไปยังจุด D แล้วทำการอบแห้ง โดยการอบแห้งนั้นจะทำการลดความดันเพื่อให้เกิดการระเหิดของน้ำภายในวัตถุดิบแทนการระเหย ตามเส้นกราฟจากจุด D ไปยังจุด E

3.3 ขั้นตอนในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง



ภาพประกอบ 21 ภาพแสดงขั้นตอนในการทำการอบแห้งแบบระเหิดในรูปของกราฟระหว่างเวลา กับอุณหภูมิ

ที่มา : กิตติพันธ์ สุนทราศรี; ชาศริต เกียรติคุณวัฒน์ และ เด่น จันทร์ทองอ่อน. เครื่องอบแห้งแบบระเหิด (Freeze Dryer). หน้า 8

ในกระบวนการทำการอบแบบแช่เยือกแข็งนั้นจะประกอบด้วยกระบวนการทั้งหมด 4 ขั้นตอน อันได้แก่

1. Prefreezing คือ กระบวนการแช่แข็งวัตถุดิบโดยทำให้อุณหภูมิของวัตถุดิบนั้นต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จุดประสงค์เพื่อลดปฏิกิริยาทางเคมีและลดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในวัตถุดิบ และทำการแยกตัวผลึกของน้ำที่เป็น free water ออกจากสารละลาย เป็นผลให้สารละลาย เป็นการเตรียม

เพื่อนำไปสู่การอบแห้งในขั้นต่อไป ในการแช่แข็งนั้น เนื่องจากจุดเยือกแข็งของวัตถุดิบแต่ละชนิดนั้นมีค่าไม่เท่ากัน ฉะนั้นจึงคำนวณทราบค่าจุดเยือกแข็งของวัตถุดิบแต่ละชนิดที่จะนำมาทำการแช่แข็งด้วย

ความเร็วที่ใช้ในการแช่แข็งวัตถุดิบ จะมีผลต่อโครงสร้างผลึกของวัตถุดิบด้วย ในกระบวนการแช่เยือกแข็งนั้น ควรที่จะทำการแช่แข็งด้วยอัตราการแช่แข็งที่เร็ว เนื่องจากอัตราการแช่แข็งที่เร็วจะส่งผลให้ขนาดของผลึกนั้นมีขนาดเล็ก เป็นผลให้โครงสร้างภายในของวัตถุดิบนั้นๆ ไม่เกิดการเสียรูป หรือเสียรูปน้อยกว่าอัตราการแช่แข็งที่ช้า ซึ่งอัตราการแช่แข็งที่ช้า จะส่งผลให้เนื้อของวัตถุดิบมีลักษณะเหลว หลังจากทำการละลาย

ตาราง 1 ตารางแสดงปริมาณน้ำในอาหาร

Food	% Water	Food	% Water
Tomatoes	94	Cherries	82
Asparagus	92	Grape	81
Leek	91	Oysters	80
Gooseberries	90	Bananas	75
Strawberries	90	Potatoes	74
Beans ,green	89	Poultry	74
Peaches	87	Meat ,beef, lean	72
Oranges	84	Durians	70
Apples	83	Eggs	70
Carrots	83	Meat ,beef ,fat	51
Pears	83		

ที่มา : กิติพันธ์ สุนทราศรี; ชาศริต เกียรติคุณรัตน์ และ เด่น จันทร์ทองอ่อน. เครื่องอบแห้งแบบระเหิด (Freeze Dryer). หน้า 11

ตาราง 2 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆสำหรับอาหารแต่ละชนิด

product	Frozen out water at °C (% of the total water)				UFW (% of total water)
	-10	-15	-20	-30	
Lean beef	82	85	87	88	12
Haddock	84	87	89	91	9
Whole	89	91	92	93	7
egg ,liquid	85	86	87	87	13
Yolk	91	93	94	94	6
Egg White	80	85	88	89	11
Yeast	85	90	93	96	(3)
Fruit juice	80	86	89	92	(7)
Peas					

ที่มา : Georg – Wilhelm Oetjen (1999). Freeze – Drying p. 3

2. Primary Drying คือ กระบวนการรอบภายใต้ความดันสุญญากาศ เพื่อให้เกิดการระเหิดของน้ำภายในวัตถุดิบ

ในขั้นตอนนี้ จะเป็นการอบเพื่อกำจัดส่วนของน้ำที่เป็น free water ออก ไอที่เกิดจากการระเหิดนั้น จะถูกดูดออกโดยปั๊มสุญญากาศ โดยไอที่ถูกดูดออกนั้น จะถูกจับตัวที่ตัวดักจับไอ (Vapor Trap) ซึ่งอาจเป็นเครื่องควบแน่น (Condenser) หรือสารดูดความชื้น แต่ในปริญญานิพนธ์นี้จะใช้สารดักจับไอน้ำในการดักจับความชื้น

ตาราง 3 ตารางแสดงความดันไอของน้ำแข็ง

อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	ความดัน (mT)	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	ความดัน (mT)
0	4579	-20	776
-1	4217	-21	705
-2	3880	-22	640
-3	3568	-23	580
-4	3280	-24	526
-5	3013	-25	476
-6	2765	-26	430
-7	2537	-27	389
-8	2326	-28	351
-9	2313	-29	318
-10	1950	-30	286
-11	1785	-31	259
-12	1632	-32	238
-13	1490	-33	213
-14	1361	-34	187
-15	1241	-35	169
-16	1132	-36	151
-17	1031	-37	136
-18	939	-54	18
-19	854	-84	2

ที่มา : ภัทรพร สุวรรณกิจบริหาร. การศึกษาการทำผลไม้แห้งจาก Freezed Dryer. หน้า 12 – 13

สิ่งที่ควรคำนึงถึงในขั้นตอนนี้คือ การรักษาอุณหภูมิแตกต่าง และความดันระหว่างผลิตภัณฑ์กับเครื่องควบแน่น ซึ่งอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นนั้นจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ไอน้ำย้อนกลับสู่ห้องอบ และปั๊ม ซึ่งส่งผลให้ปั๊มหยุดทำงาน

3. Secondary Drying คือ กระบวนการอบเพื่อลดความชื้นของผลิตภัณฑ์โดยการระเหย

หลังจากผ่านขั้นตอนการอบขั้นแรกแล้ว ยังคงมีน้ำหลงเหลืออยู่ภายในวัตถุดิบอยู่ ซึ่งเป็นส่วนของน้ำที่เป็น bound water อันเนื่องจากส่วนที่เป็น bound water เป็นส่วนไม่เกิดการตกผลึก โดยความชื้นที่เหลือนั้นประมาณ 15% โดยน้ำหนักเปียกของวัตถุดิบ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการอบเพื่อลดความชื้นโดยการระเหย ให้ความชื้นสุดท้ายนั้นมีค่าประมาณ 2-5% โดยน้ำหนักเปียกของวัตถุดิบ ขณะที่ทำการอบนั้น น้ำที่ยังคงเหลืออยู่อันเนื่องจากน้ำส่วนที่เป็น bound water ไม่เกิดการตกผลึก จะเกิดการระเหย ซึ่ง Pikat ได้กล่าวไว้ว่า มีสภาวะที่เกิดขึ้นทั้งหมด 4 สภาวะ คือ

1. ขณะเริ่มต้นของกระบวนการ การลดลงของน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะเหลืออยู่ในขั้น Plateau-Level
2. ในขั้น plateau จะเกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับน้ำที่มีอยู่ด้วยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
3. ความเร็วในการอบนั้นจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความร้อนให้แก่พื้นผิวของวัตถุดิบ
4. ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในตู้อบในกระบวนการนี้ จะเป็นการลดความดันให้มีความดันที่ลดน้อยลง เช่น จากความดันที่ 0.26 mbar เป็น 0.065 mbar โดยไม่มีการเปลี่ยนความเร็วในการอบ

4. Packing, Storage and Rehydration คือ ขั้นตอนการบรรจุเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งการทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นกับสู่ความชุ่มชื้น เพื่อให้คืนรูปสู่สภาพเดิม (Rehydration)



ภาพประกอบ 22 รูปแสดงผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาด้วยถุงอลูมิเนียมฟอยด์

แสง และอากาศนั้นจะมีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์นั้นๆมีอายุการเก็บรักษาที่น้อยลง ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้ภาชนะบรรจุที่ทึบแสง โดยส่วนใหญ่แล้ว นิยมใช้อลูมิเนียมฟอยด์ และขณะที่ทำการบรรจุ

จะใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจนแทนที่อากาศภายใน ภาชนะบรรจุ เพื่อไม่ให้ผลิตภัณฑ์นั้นเกิดการทำปฏิกิริยากับอากาศ

Rehydration เป็นการให้ความชื้นแก่ผลิตภัณฑ์เพื่อให้กลับสู่สภาพเดิม โดยส่วนใหญ่แล้วจะให้ผลดี มีสภาพคล้ายกับวัตถุดิบก่อนนำเข้ากระบวนการอบ รสชาติ และรูปทรงยังคงเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ตาราง 4 ตารางเปรียบเทียบระหว่างการบรรจุในแบบต่างๆ

	การบรรจุใส่ถุง (แบบธรรมดา)	การบรรจุใส่ถุงฟรอยด์ (ใส่ถุงบรรจุสารดูด ออกซิเจน)	การบรรจุใส่กระป๋อง ดีบุก
ข้อดี	1. สะดวกในการบรรจุ เนื่องจากสามารถหา ซื้อเครื่องจักรได้ง่าย 2. ราคาประหยัด เนื่องจากไม่ต้องมี เครื่องจักรชนิดพิเศษ ในการบรรจุ	1. ช่วยทำให้สินค้า สามารถเก็บได้นานขึ้น เนื่อง อกจากบรรจุแบบ สุญญากาศ 2. ลดความเสียหายจาก การขนส่งได้ดีกว่าแบบ บรรจุถุงธรรมดา	1. ช่วยทำให้สินค้า สามารถเก็บได้นานขึ้น เนื่องจากบรรจุแบบ สุญญากาศ 2. ลดความเสียหาย จากการขนส่งได้ดีกว่า แบบอื่น ๆ
ข้อเสีย	1 อายุการเก็บของ สินค้าน้อยกว่าแบบ อื่นๆ 2 อาจเกิดความ เสียหายในตัวสินค้า ระหว่างการขนส่งได้	1. มีค่าใช้จ่ายในการบรรจุ เพิ่มมากขึ้น	1. มีค่าใช้จ่ายในการบรรจุ เพิ่มมากกว่าแบบ อื่นๆ

3.4 ประเภทของการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

3.4.1 การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งทางการแพทย์

ในด้านการแพทย์นั้นมีการนำวิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เพื่อรักษาโครงสร้างและองค์ประกอบและการเกิดปฏิกิริยาของสารนั้นๆ โดยสารเหล่านั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เมื่ออุณหภูมิสูง จึงนำวิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งในกระบวนการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้วิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้น ได้แก่ เอ็นไซม์ เลือด วัคซีน ฮอร์โมน ยาปฏิชีวนะ เป็นต้น

ตารางที่ 5 ตารางแสดงถึงอุณหภูมิมีค่าต่างๆและชั่วโมงที่ใช้ในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ต่างๆ

Material (10 mm thick)	Safe Temp. (°C)	Condenser Temp. (°C)	Hour* (approx.)
Blood plasma	- 10 to - 25	- 40	16
Serum	- 25	- 40	18
Vaccinia	- 30 to - 40	- 50	22
Influenza Vaccine	- 30	- 50	24
Human Tissue	- 30 to - 40	- 50	48

3.4.2 เนื้อสัตว์ที่ทำการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ในช่วงค.ศ. 1960 การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้น เป็นวิธีการรักษาอาหาร ซึ่งเป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง

Wallstreet Journal (พ.ศ.2503) ได้เสนอไว้ว่า เนื้อ และวัตถุดิบอื่นๆ โดยการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้น จะให้น้ำหนักเบา สามารถเก็บรักษาได้เป็นปี และยังสามารถคงสภาพของรสชาติ ได้ดีกว่าการอบแห้งแบบก่อนๆ

Tschigeou (พ.ศ.2503) ได้กล่าวไว้ว่า กระบวนการแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้น ได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารทางทหารของโซเวียต ในการอบแห้งอาหารสัตว์และเนื้อม้า ในรูปของผลิตภัณฑ์อาหารโดยรวม

The Time (พ.ศ.2503) ได้เขียนไว้ว่าในการค้นพบวิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้น จะมีผลกระทบมาก ซึ่งเป็นเทคนิคที่เป็นที่ยอมรับในการเก็บรักษาและสามารถนำมาใช้ในด้านผลิตภัณฑ์ยาได้ดีเท่ากับการอบแห้งอาหาร

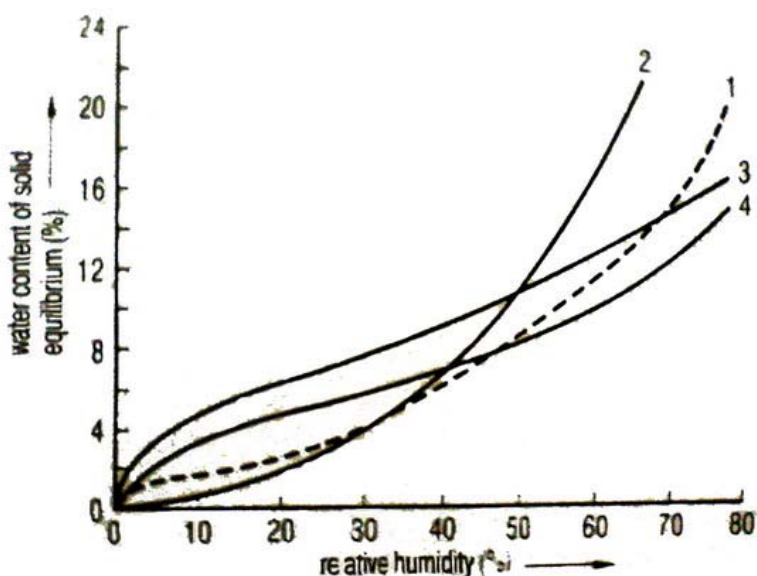
การแช่แข็งวัตถุดิบภายในห้องอบ จะสามารถทำให้ระเหยน้ำได้ 15-25% เป็นการช่วยลดระยะเวลาในกระบวนการและ ยังเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตด้วย ซึ่งการระเหยของน้ำนั้นจะทำให้ได้ในระยะเวลาอันสั้น และไม่ต้องมีการติดตั้งระบบแช่แข็งเพิ่มเติม ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการแช่แข็งนั้น ได้แก่

ค่าประกอบการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางในการทำมาเย็น(Cooling medium) ของวัตถุดิบ

การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ ขณะที่ทำการแช่แข็ง

ปริมาณน้ำที่อยู่ในวัตถุดิบ ที่ไม่สามารถทำการแช่แข็งได้

หลักการทั่วไปของกระบวนการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้น ค่าของอัตราการแช่แข็ง และอุณหภูมิสุดท้ายในการแช่แข็ง จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การแช่แข็งด้วยอัตราการแช่แข็งที่ช้า จะได้ผลึกของน้ำที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้การระเหิดนั้นเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้น แต่ข้อเสียคือ จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นที่ได้จากการแช่แข็งของสารละลายที่ไม่เกิดการแข็งตัวเกิดความหนืดสูง นอกจากนี้โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นนั้น จะทำให้วัตถุดิบนั้นเสียรูปทรงได้



ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 22°C (1. พริกไทย 2. ลูกพีท 3. มันฝรั่ง 4. เนื้อสัตว์)

ที่มา : Georg – Wilhelm Oetjen (1999). Freeze – Drying p. 240.

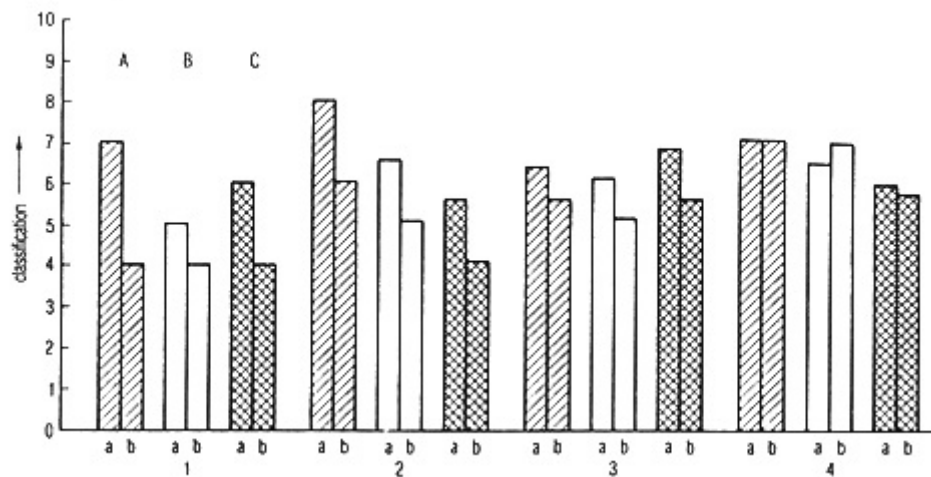
3.4.3 ผลไม้ มักรัง ผัก และน้ำผลไม้ด้วยการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

Spiess (พ.ศ.2514) ได้มีการทดลอง ผัก และผลไม้ทั้งหมด 16 ชนิด ในการทำการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ซึ่งผลการทดลองนั้น ได้ดังข้อมูล

ตาราง 6 ตารางแสดงค่าของการแช่แข็งผลไม้ ผัก ด้วยเวลาในการฟอกขาว (blanching time) ระหว่าง 2 ถึง 4 นาที

Product	Type	Size	Blanched At 100 °C	Freezing Temp. (°C)	T_{sh} (°C)	P_{ch} (mbar)	RM (%)
Cauliflower	Unknown	Rosebud	+	-24	60	1.0	2.8
Beans	Wade	1.5 cm	+	-30	70	1.3	2.0
Mushroom	Cultivated	0.3 cm	+	-30	60	1.3	2.2
Peas	Signet	Size III	+	-40	70	1.0	2.8
Pepper	Red,	1 cm	+	-24	80	1.3	2.4
Strawberries	green	stripes	-	-27	60	1.0	2.1
Aspberry	Senga-S	Halves	-	-27	60	1.0	2.1
Currant, red	Unknown	Whole	-	-40	60	1.0	2.1
	Unknown	Whole	-	-40	60	1.0	2.0

ที่มา : Georg – Wilhelm Oetjen (1999). Freeze – Drying p. 242.



A. Color	B. Taste	C. Consistency	
Strawberries	2. Carrots	3. beans	4. Paprika
Senga Sengana	a. Nantaiser	a. Wade	a. Green
Hummi Trisca	b. Dutch early	b. Unknown	b. red

ภาพประกอบ 24 กราฟแสดงผลที่ได้จากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด โดยการเปรียบเทียบในเรื่องของรสชาติ สี และการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง
ที่มา : Georg – Wilhelm Oetjen (1999). Freeze – Drying p. 243.

จากการอบแบบแช่เยือกแข็ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ จะมีสีและรสชาติไม่เปลี่ยนแปลง ในการแช่แข็งอย่างรวดเร็วด้วยความเร็วในการไหลของอากาศที่ -40°C จะให้ผลที่ดีกว่าการแช่แข็งด้วยอัตราเร็วที่ช้าโดยไม่มีการหมุนเวียนของอากาศที่ -30°C ความดันภายในห้องอบจะมีค่ามากกว่า 1.3 mbar (TM) โดยประมาณ ให้ลดเหลือเพียง 0.85 mbar โดยประมาณ

มันเป็นสิ่งที่ไม่น่าเป็นไปได้ตามสมมติฐานที่ได้กล่าวไว้ ค่าความดันภายในห้องอบ P_{ch} จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าของความดันไอ P_s ของน้ำแข็ง จากการที่ไอน้ำนั้นไม่เกิดการถ่ายเทภายใต้เงื่อนไขอันเนื่องมาจากเขม่าที่เกิดขึ้นภายในห้องอบ การวัดด้วยวิธี BTM (Barometer temperature measurement) นั้น จะแสดงให้เห็นได้ว่า ความแตกต่างระหว่าง P_s และ P_{ch} นั้น เช่น 0.65 mbar และ 0.5 mbar ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและความหนาของผลิตภัณฑ์ ความสัมพันธ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำแข็งนั้นถูกเผาจนหมด จากการวัดใน Wallstreet Journal ซึ่งที่สามารถแสดงให้เห็นถึงคือ ค่า T_{ice} จะต้องมีค่ามากกว่า -20°C สำหรับวัตถุดิบ ส่วนอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนนั้นจะมีค่ามากกว่า $+60^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ จำพวกถั่ว และ จำพวกเห็ด เพียงเล็กน้อย สำหรับ strawberries และ raspberry นั้น จะเกิดความเสียหายมากกว่า

Kapsalis (พ.ศ.2514) ได้แสดงให้เห็นถึงความชื้นที่ยังคงอยู่นั้น ซึ่งประกอบด้วย ค่า RM ของถั่วที่ไม่มากหรือน้อยไป เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาผ่านไป 84 วัน ที่อุณหภูมิ 43°C และ ค่า RM มากกว่า 5% วิตามิน B1 จะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ carotene นั้นลดลงไป 36% ในทางกลับกัน ค่าวิตามิน B1 ค่า RM ลดลงจาก 33% เป็น 81% แต่สำหรับ carotene นั้นยังคงสามารถคงค่า RM 50% เท่าเดิม เหตุผลอื่นที่ไม่ได้กล่าวถึงได้นำ Kapsalis สู่ความคิดที่ว่า ค่า RM ที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการเก็บรักษา

3.5 การแช่แข็งอาหาร

ในการแช่แข็งอาหารนั้นเป็นกระบวนการที่ใช้ในการรักษาคุณภาพทางอาหาร อีกทั้งยังเป็นการทำให้เอนไซม์แล้วปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นลดลง เป็นผลให้อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นั้นลดลง ในการแช่แข็งอาหารนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อการแช่แข็งเพื่อให้ได้คุณภาพที่สูง จะขึ้นอยู่กับกระบวนการในการแช่แข็ง และชนิดของอาหารเป็นหลัก

3.5.1 คุณสมบัติของการแช่แข็ง⁴

จุดเยือกแข็งลดต่ำลง

จุดเยือกแข็งของอาหารแต่ละชนิดนั้นจะขึ้นอยู่กับสารละลายที่อยู่ภายในอาหารชนิดนั้นๆ โดยภายในอาหารจะประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนประกอบใหญ่ และประกอบด้วยสารละลายบางส่วน ทำให้จุดเยือกแข็งของอาหารชนิดนั้นๆ มีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำบริสุทธิ์ โดยน้ำหนักโมเลกุล และความเข้มข้นของตัวถูกละลายในอาหาร จะมีผลต่อจุดเยือกแข็งของอาหารชนิดนั้นๆ

จากความสัมพันธ์ทางอุณหพลศาสตร์ของสมดุลระหว่างสถานะ จุดเยือกแข็งที่ต่ำลงนั้นสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\frac{\lambda'}{R_g} \left[\frac{1}{T_{AO}} - \frac{1}{T_A} \right] = \ln X_A \quad (3.1)$$

เมื่อ

T_{AO} คือ จุดเยือกแข็งของของเหลวบริสุทธิ์ A

X_A คือ สัดส่วนของโมลของน้ำในสารละลาย

T_A คือจุดเยือกแข็งของสารละลาย

R_g คือ ค่าคงที่ของก๊าซของความร้อนแฝงของการหลอมเหลว

λ' คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว

สำหรับสารละลายเจือจาง สามารถเขียนได้

$$\frac{\lambda'}{R_g} \left[\frac{T_A - T_{AO}}{T_{AO}^2} \right] = \ln(1 - X_B) \quad (3.2)$$

เมื่อ $T_A - T_{AO}$ น้อยมาก ซึ่งส่งผลให้ $T_A - T_{AO} \approx T_{AO}$

ถ้า $T_A - T_{AO} = \Delta F_F$

และ $\ln(1 - X_B) = X_B + 1/2 X_B^2 + 1/3 X_B^3 + \dots$

$$\text{ฉะนั้น} \quad \frac{\lambda' \Delta F_F}{R_g T_{AO}^2} = X_B \quad (3.3)$$

เมื่อสารละลายเจือจางมาก $X_B \leq 1$ ให้ L เป็นความร้อนแฝงของการหลอมเหลวต่อหน่วยมวลจะได้ว่า

$$\Delta F = \frac{R_g T_{AO}^2 W_A m}{1000 L} \quad (3.4)$$

เมื่อ

m คือ โมลาลิตี (Molality) หรือค่าคงที่จุดเยือกแข็งของโมแลล

3.5.2 การเกิดผลึกน้ำแข็ง

กระบวนการตกผลึกประกอบด้วย 2 ระยะด้วยการ ได้แก่ การเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation) และการเติบโตของผลึก (crystal growth)

การเกิดนิวเคลียสของผลึก แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

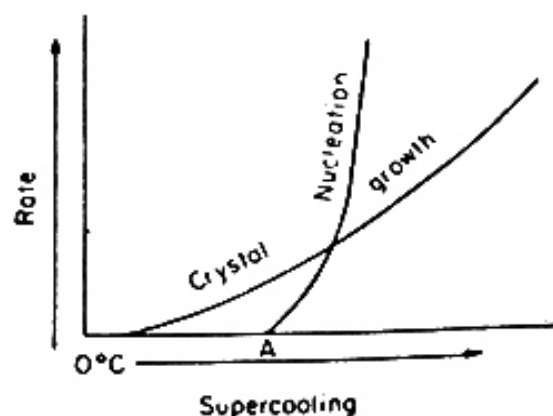
การเกิดนิวเคลียสของผลึกที่เป็นเนื้อเดียวกัน และการเกิดผลึกของนิวเคลียสของสารเนื้อผสม ในการเกิดนิวเคลียสของสารเนื้อเดียวกันนั้น จะไม่ค่อยพบในเชิงปฏิบัติ โดยการเกิดนิวเคลียสผลึกนั้น จะเกิดที่อุณหภูมิ $-41^\circ C$ ที่สภาวะของเหลวเย็นยิ่งยวด เป็นการเกิดนิวเคลียสผลึกของสารเนื้อเดียวกัน เนื่องมาจากการเรียงตัวของโมเลกุลจนกลายเป็นอนุภาคเล็กๆอย่างเป็นระเบียบ

สำหรับการเกิดนิวเคลียสผลึกของสารเนื้อผสมนั้น จะพบได้ทั่วไปในการแช่แข็งอาหารโดยการเกิดนิวเคลียสผลึกที่อุณหภูมิสูงกว่า การเกิดนิวเคลียสของสารเนื้อเดียวกัน โมเลกุลของน้ำจะจับตัวกับอนุภาคของแข็ง

ในกรณีของการเติบโตของผลึกนั้น จะเกิดขึ้นหลังจากการเกิดนิวเคลียสผลึกที่มีปริมาณระดับหนึ่ง ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอัตราการโตของผลึก คือ

- อัตราการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของผลึกกับโมเลกุลของน้ำ
- อัตราการแพร่ของโมเลกุลน้ำจากสารละลายที่ยังไม่แข็งตัวไปยังผิวผลึก
- อัตราความร้อนที่ถูกกำจัดออกไป

ปัจจัยเหล่านี้ล้วนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิลดลง อัตราการเติบโตของผลึกนั้นจะมีความมากขึ้น และขนาดของผลึกที่เกิดขึ้นจากการแช่แข็งนั้น จะมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงอิทธิพลของการทำความเย็นยิ่งยวดต่ออัตราการเกิดนิวเคลียสผลึกและการเติบโตของผลึก

ที่มา : รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. วิศวกรรมแปรรูปอาหาร : การถนอมอาหาร. หน้า 126.

จากภาพประกอบ 25 แสดงให้เห็นว่า ในการแช่แข็งด้วยอัตราการแช่แข็งช้า จะทำให้นิวเคลียสของผลึกมีขนาดใหญ่ ณ อุณหภูมิที่ 0°C จนถึงอุณหภูมิที่จุด A ในขณะเดียวกัน ถ้าอัตราการแช่แข็งที่รวดเร็ว จะทำให้นิวเคลียสผลึกนั้นมีขนาดเล็ก โดยอุณหภูมิของวัตถุดิบจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิ ณ จุด A

ในการเกิดผลึกใหม่นั้น เป็นสภาวะที่เกิดขึ้น เนื่องเกิดการเปลี่ยนรูปร่างจากขณะที่ทำการแช่แข็ง โดยไม่สามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของผลึกให้คงที่ และเป็นที่พบเห็นโดยทั่วไป แม้ว่า

การเกิดผลึกที่คงตัวนั้น จะเกิดขึ้นง่ายก็ตาม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้น จะมีผลกระทบต่อคุณภาพของอาหารที่นำมาแช่แข็งนั้นๆ ซึ่งวิธีในการควบคุมการตกผลึกใหม่นั้น จะสามารถทำได้ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่แข็งอาหารให้มีอุณหภูมิที่ต่ำและคงที่

3.5.3 เวลาในการแช่แข็ง

สำหรับเวลาในการแช่แข็งนั้น จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความจุของระบบ รวมทั้งยังมีผลกระทบต่อคุณภาพของการแช่แข็งด้วย ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการแช่แข็งคือ

ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์กับตัวกลางในการทำควมเย็น

ลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากผลิตภัณฑ์หรือภายในผลิตภัณฑ์

- ขนาด ชนิด และรูปทรงของภาชนะบรรจุ
- ขนาด รูปทรง และคุณสมบัติทางด้านความร้อนของผลิตภัณฑ์

ในการคำนวณเวลาในการแช่แข็งนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องนำมาคำนึง ได้แก่ สัมประสิทธิ์ความต้านทานในการถ่ายเทความร้อน ดังสมการ

$$1/h_s = 1/h_c + (x/k) + 1/h_r \quad (3.5)$$

เมื่อ

h_s คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผิวทั้งหมด ($W/m^2 \cdot K$)

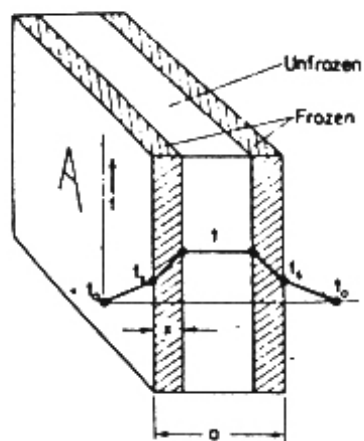
h_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพา ($W/m^2 \cdot K$)

h_r คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสี ($W/m^2 \cdot K$)

x คือ ความหนาของวัสดุที่บรรจุ (m)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุบรรจุ ($W/m \cdot K$)

กำหนดให้อาหารที่นำมาแช่แข็งนั้นอยู่ในรูปทรงสี่เหลี่ยมขึ้นบางๆ มีพื้นที่หน้าตัดมีค่าเท่ากับ A โดยการถ่ายเทความร้อนให้แก่อาหารนั้น จะถ่ายเททางด้านความหนาของชิ้นอาหาร ด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เท่ากันทั้ง 2 ด้าน เมื่อเวลาผ่านไปเป็นระยะเวลา t จะเกิดการแข็งตัวมีค่าเป็น x



ภาพประกอบ 26 ภาพแสดงการแข็งตัวของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นชิ้นบางๆ
ที่มา : รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. วิศวกรรมแปรรูปอาหาร : การถนอมอาหาร. หน้า 133.

ความร้อนที่เกิดขึ้นในแนวการแช่แข็งมีค่าเป็น

$$q = AL\rho(dx/dt) \quad (3.6)$$

จากสมการการถ่ายเทความร้อนแบบการนำของอาหารแช่แข็ง มีค่า

$$q = A(T_F - T_s)(k/x) \quad (3.7)$$

ปริมาณความร้อนจากผิวอาหารไปยังตัวทำความเย็น

$$q = Ah_s(T_s - T_a) \quad (3.8)$$

ดังนั้นปริมาณการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดในอาหาร คือ

$$q = \frac{(T_F - T_a)A}{(1/h_s + x/k)} \quad (3.9)$$

$$\frac{(T_F - T_a)A}{(1/h_s + x/k)} = A\rho(dx/dt) \quad (3.10)$$

เมื่อ	T_a	คือ อุณหภูมิของตัวทำความเย็น ($^{\circ}C$)
	T_F	คือ จุดเยือกแข็งเริ่มต้นของอาหาร และเป็นอุณหภูมิที่ยังไม่แข็งตัว ($^{\circ}C$)
	T_s	คือ อุณหภูมิที่ผิวของอาหาร ($^{\circ}C$)
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารแช่แข็ง
	L	คือ ความร้อนแฝงของการนำความร้อนของอาหารแช่แข็ง
	ρ	คือ ความหนาแน่นของอาหาร (kg/m^3)
	h_s	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิว ($W/m^2 \cdot K$)

กำหนดให้ a เป็นความหนาของ slab เมื่อเวลาที่ $t=0$ ความหนา $x=0$ และเวลาในการแช่แข็งที่ $t = t_F$ ความหนาของ $x=a/2$ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$t_F(T_F - T_a) = L\rho(a/2h_s + a^2/8k) \quad (3.11)$$

$$t_F = \frac{L\rho}{T_F - T_a} \left[\frac{a}{2h_s} + \frac{a^2}{8k} \right] \quad (3.12)$$

ซึ่งเป็นสมการของเพลงค์ และสมการทั่วไปของเพลงค์นั้นมีค่าเป็น

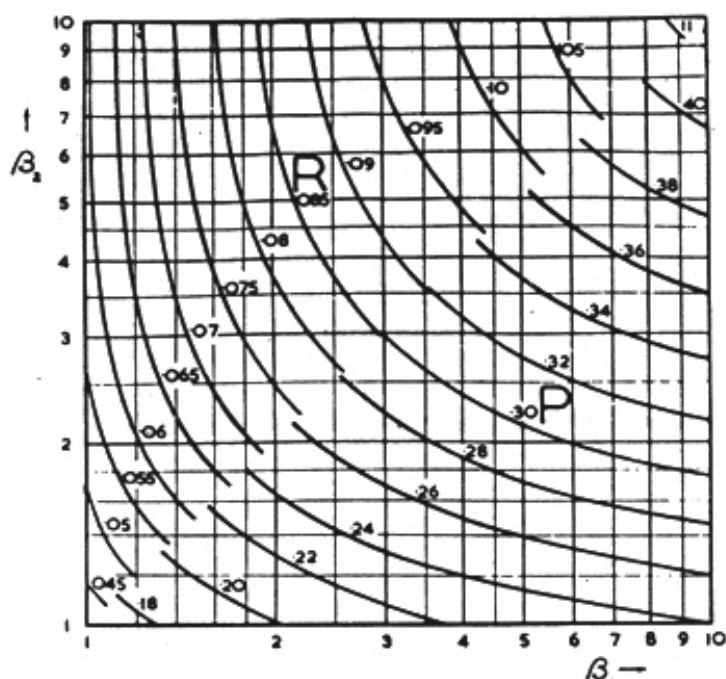
$$t_F = \frac{L\rho}{T_F - T_a} \left[\frac{Pa}{h_s} + \frac{Ra^2}{k} \right] \quad (3.13)$$

เมื่อค่า P และ R ขึ้นกับลักษณะฐานฐานของอาหารที่แช่แข็ง คือ ถ้ามีรูปร่าง

- เป็นสี่เหลี่ยมขึ้นบาง ค่า $P = 1/2, R = 1/8$
- เป็นทรงกระบอกยาวมาก ค่า $P = 1/4, R = 1/16$
- เป็นลูกทรงกลมหรือลูกบาศก์ ค่า $P = 1/6, R = 1/24$

และค่า a เป็นความหนาของทรงสี่เหลี่ยมขึ้นบางหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกหรือทรงกลม

เมื่ออาหารมีสัณฐานเป็นก้อน ค่า P และ R จะอยู่ระหว่างค่าของชิ้นบางและลูกบาศก์ ค่าของ P และ R จาสามารถหาได้จากแผนภูมิที่ โดยค่า β_1 เป็นค่าผลคูณระหว่างค่าคงที่และค่า a ที่มีขนาดเล็กที่สุด ส่วน β_2 เป็นค่าผลคูณระหว่างค่าคงที่กับค่า a ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด

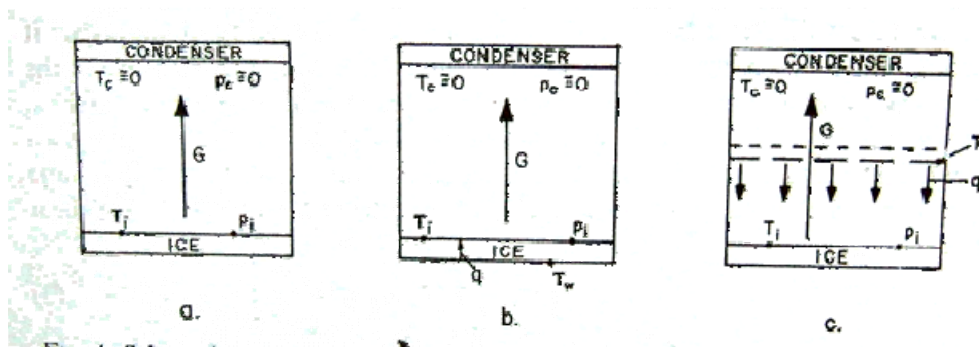


ภาพประกอบ 27 แผนภูมิแสดงค่าของ P และ R ของสมการแฟลงค์

ที่มา : รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. วิศวกรรมแปรรูปอาหาร : การถนอมอาหาร. หน้า 136.

3.6 หลักการการถ่ายเทความร้อน⁸

ทุกๆปอนด์ของน้ำที่เกิดการระเหิดที่บริเวณพื้นผิวของน้ำแข็ง จะต้องใช้พลังงานความร้อนแฝงในการระเหิด ในการทำการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้น จะมีการถ่ายเทมวล ถ่ายเทความร้อน และ อัตราการอบแห้งนั้น ขึ้นอยู่กับตัวต้านทานของการถ่ายเทความร้อน จึงได้มีการพิจารณาถึงการอบแห้งแบบระเหิดด้วยสภาวะดังนี้



ภาพประกอบ 28 รูปแสดงกระบวนการในการระเหิดของน้ำแข็ง

ที่มา : S. A. Goldblith; L. Rey; W. W. Rothmayr. Freeze Drying and Advanced Food Technology. P.181.

พิจารณาตามภาพประกอบ 28 ชั้นน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิคงที่ โดยมีความดันเท่ากับ T_i ซึ่งอยู่ในถาดรองที่ประกอบด้วยเครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิ เนื่องจากมีค่าน้อยมาก จึงไม่ต้องนำค่าของความดันของไอน้ำมาพิจารณา โดยเรากำหนดให้ไม่ต้องพิจารณาถึงค่าของความต้านทานของช่องว่างระหว่างน้ำแข็งกับเครื่องควบแน่น ภายใต้สภาวะอุดมคติ อัตราการระเหิดสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ $G_{\max}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$G_{\max} = \frac{K_1 A p_i}{\sqrt{T_i}} \quad (3.14)$$

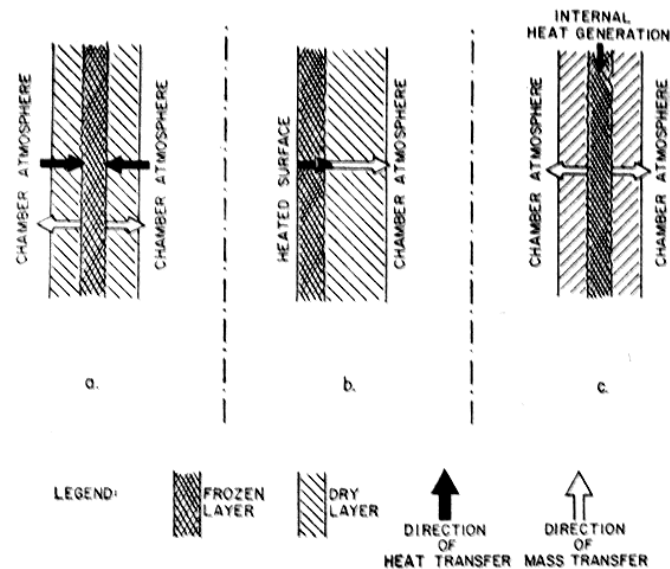
- เมื่อ $G_{\max}$ คือ อัตราการระเหิดสูงสุด (lb/hr)
 A คือ พื้นที่ผิวของการระเหิดของวัตถุ (ft²)
 T_i คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของน้ำแข็ง (°R)
 p_i คือ ความดันไอของน้ำแข็ง (Torr)
 K_1 คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของการระเหิดของสาร

ในกรณีนี้ของน้ำแข็ง ค่าของ $G_{\max}$ มีค่าเป็น

$$G_{\max} = \frac{2447 A p_i}{\sqrt{T_i}} \quad (3.15)$$

ในการพิจารณากรณีข้างต้นนั้น เราจะไม่คำนึงถึงความต้องการของความร้อนแฝงในการระเหิด

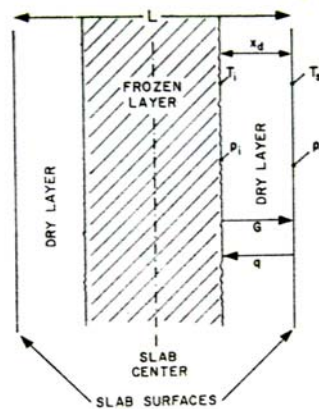
เราจะพิจารณาถึง 3 กรณีซึ่งได้กล่าวถึงประเภทพื้นฐานของความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้ความดันสุญญากาศดังรูปที่ 3.16



ภาพประกอบ 29 รูปแสดงประเภทต่างๆของการถ่ายเทความร้อนในระบบการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ที่มา : S. A. Goldblith; L. Rey; W. W. Rothmayr. Freeze Drying and Advanced Food Technology. P.184.

1. การถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อนจะผ่านแนววิถีเดิม(ชั้นที่เกิดความแห้ง) แต่มีทิศทางที่ตรงกันข้าม
2. การถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นน้ำแข็ง และการถ่ายเทมวลผ่านชั้นที่เกิดความแห้ง
3. การเกิดความร้อนภายในน้ำแข็ง (โดยคลื่นไมโครเวฟ) และการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นที่เกิดความแห้ง



ภาพประกอบ 30 รูปแสดงกระบวนการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นที่แห้งแล้ว

ที่มา : S. A. Goldblith; L. Rey; W. W. Rothmayr. Freeze Drying and Advanced Food Technology. P.185.

พิจารณาภาพประกอบ 30 เราจะสมมุติอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถที่จะรับได้ซึ่งมีค่าคงที่ และความดันย่อยของน้ำภายในห้องอบ มีค่าคงที่

ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนนั้นมีค่าเท่ากับ

$$q = Ak_d(T_s - T_i)x_d^{-1} \quad (3.16)$$

เมื่อ x_d คือ ความหนาของชั้นที่แห้งแล้ว
 k_d คือ สภาพการนำทางความร้อนของชั้นที่แห้งแล้ว

ซึ่งอัตราการระเหิดนั้นมีค่าเป็น

$$G = -\frac{dW}{dt} = Ab(p_i - p_s)x_d^{-1} \quad (3.17)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของน้ำในแผ่น
 t คือ เวลา(hr)
 b คือ สภาพการซึมของชั้นที่แห้งแล้ว
 p_s คือ ความดันย่อยของน้ำที่พื้นผิวของชั้นที่แห้งแล้ว (Torr)

ในขณะเดียวกัน พิจารณาที่หน้าสัมผัสของชั้นน้ำแข็งที่แห้งแล้ว ค่าความชื้นเริ่มต้น m_0 กับความชื้นสุดท้าย m_f นั้น เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เสียไป และอัตราการร่อนของหน้าสัมผัสนั้นมีค่าเป็น

$$-\frac{dW}{dt} = A\rho_d(m_0 - m_f)\frac{dx_d}{dt} \quad (3.18)$$

เมื่อ	ρ_d	คือ	ความหนาแน่นรวมของของแข็งในชั้นที่แห้งแล้ว (lb/ft^3)
	m_0	คือ	ความชื้นเริ่มต้น
	m_f	คือ	ความชื้นสุดท้าย

จากสมการที่ 3.17 และ สมการที่ 3.18 เป็นผลให้

$$x_d dx_d = \left(\frac{b}{\rho_d(m_0 - m_f)} \right) (p_i - p_s) dt \quad (3.19)$$

ผลจากสมการที่ 3.19 เมื่อทำการอินทิเกรตเพื่อหาค่าเวลาในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง มีค่าเป็น

$$\int_0^{L/2} x_d dx_d = \frac{b(p_i - p_s)}{\rho_d(m_0 - m_f)} \int_0^{t_d} dt \quad (3.20)$$

และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนั้นเป็น

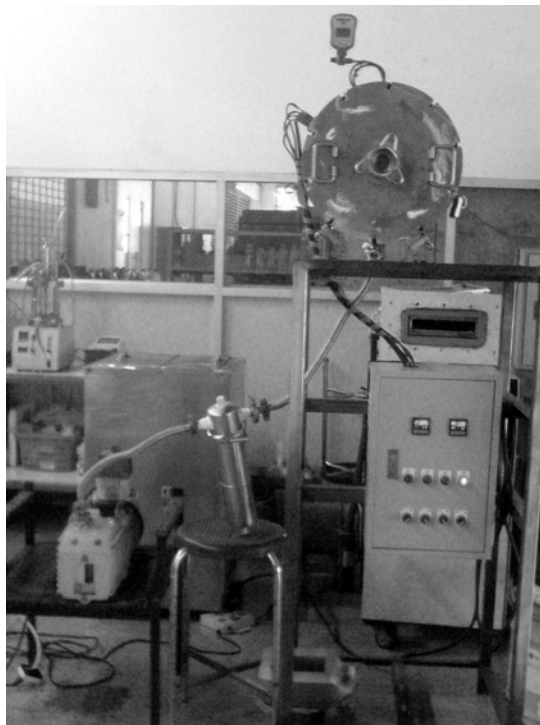
$$t_d = \frac{L^2 \rho_d (m_0 - m_f)}{8b(p_i - p_s)} \quad (3.21)$$

เมื่อ	L_d	คือ	ความหนาของผลิตภัณฑ์ (ft)
	t_d	คือ	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)

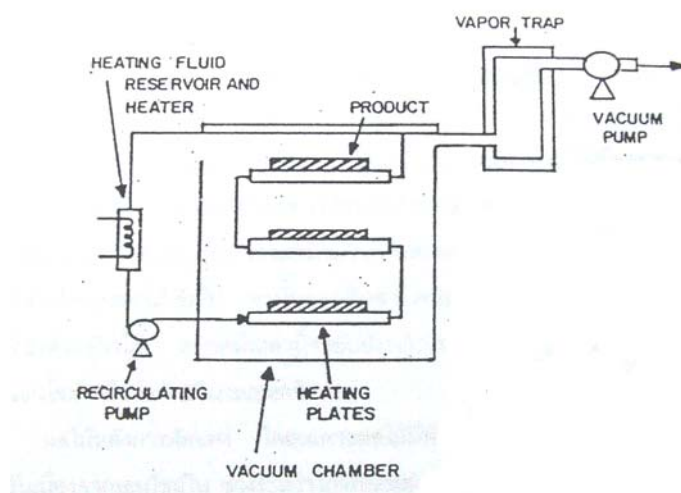
และ

$$t_d = \frac{L_d^2 \rho_d (m_0 - m_f) \Delta H_s}{8k_d (T_s - T_i)} \quad (3.22)$$

3.7 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง



ภาพประกอบ 31 ภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบระเหิด

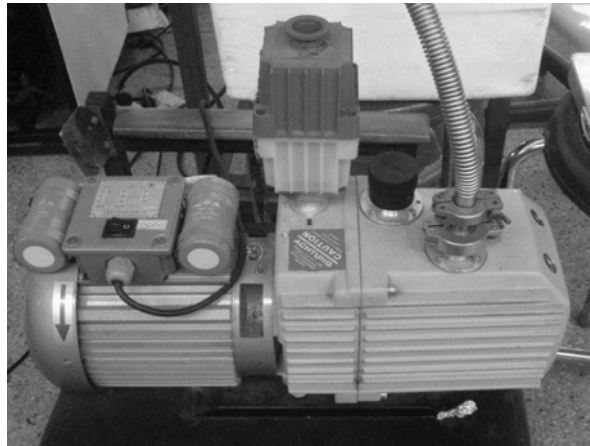


ภาพประกอบ 32 ภาพแสดง diagram ของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

สำหรับเครื่องอบแบบแช่เยือกแข็งนั้นมีอุปกรณ์หลักดังนี้

- ปัมสุญญากาศ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดความดันภายในห้องอบ สำหรับปั๊มที่ใช้ในการทดลองนั้น เป็นปั๊มสุญญากาศที่มีอัตราการไหล $17.1\text{ m}^3/\text{hr}$ ความดันต่ำสุดที่สามารถที่จะทำได้ อยู่ที่ 0.006 mbar แต่ในความเป็นจริงแล้วประสิทธิภาพของปั๊มจะอยู่ที่ 80% ขณะเดินเครื่อง



ภาพประกอบ 33 ภาพแสดงลักษณะของปั๊มสุญญากาศของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

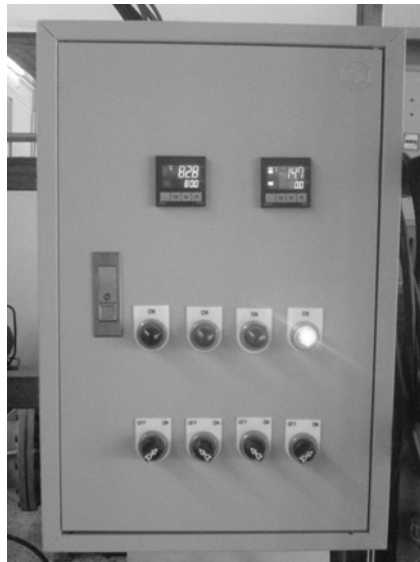
- ระบบดักจับไอน้ำที่ระเหิดอันเนื่องจากการอบ
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการดักจับไอน้ำที่เกิดจากการอบแห้ง ภายในจะบรรจุสารดักจับไอน้ำที่นี้ได้แก่ ซิลิกาเจล และ โมเลคูลาซีฟ



ภาพประกอบ 34 ภาพแสดงลักษณะของถังดักจับไอน้ำของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

- ระบบควบคุม

ตัวควบคุม ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน นอกจากนี้ยังแสดงค่าของอุณหภูมิต่างๆของผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 35 ภาพแสดงลักษณะของตัวควบคุมของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

- ระบบทำความเย็น

เป็นระบบที่ใช้ในการให้ความเย็นแก่วัตถุดิบก่อนที่จะทำการอบแห้ง เพื่อที่จะให้น้ำที่อยู่ในวัตถุดิบนั้นกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง ในที่นี้ความเย็นที่ระบบสามารถที่จะทำได้ อยู่ที่ 38 องศาเซลเซียสโดยประมาณ



ภาพประกอบ 36 ภาพแสดงลักษณะของระบบทำความเย็นของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

- ระบบทำความร้อน

เป็น chamber ที่ให้ความร้อนแก่วัตถุติบ ซึ่งภายในประกอบด้วยแผ่นให้ความร้อน 2 แผ่นที่ใช้ระบบไฟฟ้าในการควบคุมความร้อน นอกจากนี้ส่วนบนของห้องอบนั้นยังประกอบด้วยเครื่องวัดความดันของห้องอบ สำหรับโครงสร้างของห้องอบ เนื่องจากความดันที่เกิดขึ้นขณะทำการอบจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ ฉะนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่หนาเพียงพอต่อความดันที่เกิดขึ้นเพื่อไม่ให้ห้องอบนั้นเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความดันที่เกิดขึ้น



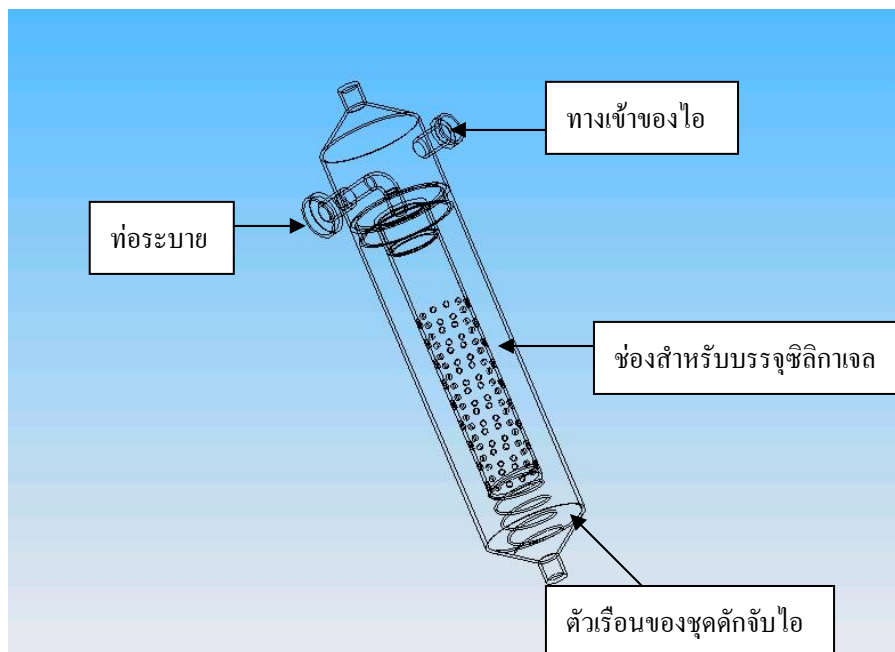
ภาพประกอบ 37 ภาพแสดงลักษณะของห้องอบของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

เมื่อนำวัตถุติบที่ทำการแช่แข็งแล้วนั้นเข้าเตาอบ ขณะที่เดินเครื่อง แผ่นความร้อนจะให้ความร้อนแก่วัตถุติบ ทำให้น้ำที่ตกผลึกนั้นเกิดการระเหิดขึ้น บั้มสุญญากาศจะทำงานเพื่อดูดอากาศ และไอน้ำที่อยู่ภายในระบบออก เพื่อให้ภายในห้องอบนั้นมีสภาวะ เป็นสุญญากาศที่ความดันคงที่ เพื่อให้เกิดไอน้ำจากการระเหิดนั้นในปริมาณมาก จึงจำเป็นที่ภายในห้องอบนั้นมีความดันที่ต่ำ เมื่อวัตถุติบได้รับความร้อน ทำให้เกิดการระเหิดขึ้น ไอน้ำที่ได้จากการระเหิดจะถูกจับตัวโดยอาศัยตัวจับไอน้ำ (Vapor Trap) แล้วเครื่องจะเดินเครื่องเรื่อยๆจนกว่าวัตถุติบนั้นจะอบได้ตามความชื้นที่ต้องการ

3.8 ชุดดักจับไอน้ำ

ในที่นี้ ชุดดักจับไอน้ำที่ออกแบบจะใช้เป็นตัวดักจับไอน้ำที่ใช้สารดักจับไอน้ำแทนการดักจับไอน้ำโดยใช้คอนเดนเซอร์ เนื่องจากการดักจับไอน้ำของสารดักจับไอน้ำสามารถที่จะดักจับไอน้ำที่เกิดจากการระเหิดโดยอาศัยการดูดของบั้มสุญญากาศได้ต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการดักจับไอน้ำโดยใช้

คอนเดนเซอร์ อีกทั้งยังเป็นการลดการสูญเสียด้านพลังงานด้วย แทนการใช้ระบบความเย็นโดยหลักการทำงานนั้น ไอที่เกิดจากการระเหิด จะถูกดูดโดยปั๊มสุญญากาศ จากนั้นจะผ่านตัวดักจับไอ ซึ่งภายในตัวดักจับไอนั้นจะประกอบด้วยสารดักจับไอ ซึ่งได้แก่สารซิลิกาเจล และสารโมเลกุลลาซีฟ แล้วสารเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวดักจับความชื้นที่เกิดจากการระเหิด



ภาพประกอบ 38 ภาพแสดงโครงสร้างของชุดดักจับไอ

3.8.1 ซิลิกาเจล (Silica Gel)



ภาพประกอบ 39 ภาพแสดงลักษณะของสารซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลเป็นสารประกอบของของแข็งที่ประกอบด้วยช่องว่างภายในมากมาย ซึ่งสารซิลิกาเจลเป็นสารประกอบระหว่าง กรดกำมะถัน และไฮเดียมซิลิเกต โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 2-20 nm มีพื้นที่ผิวระหว่าง 700-800 ตารางเมตรต่อกรัม หรืออาจจะกล่าวได้ว่า ในปริมาณของซิลิกาเจล 1 ข้อนชานั้น จะมีพื้นที่ผิวภายในที่ประกอบด้วยช่องว่างจำนวนมาก เท่ากับขนาดของสนามฟุตบอล โมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับ โดยช่องว่างเล็กๆเหล่านี้ จนกว่าที่ค่าของความดันไอ จะเท่ากับ ความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศโดยรอบ ซึ่งซิลิกาเจลสามารถดูดซับน้ำได้ถึง 35-40% ของน้ำหนักแห้ง ที่อุณหภูมิห้อง

ซิลิกาเจลเป็นที่รู้จักกันครั้งแรกในปี ค.ศ. 1919 เพื่อใช้ในการดูดซับไอน้ำและก๊าซในหน้ากาก ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ซึ่งได้นำมาใช้ในการป้องกันอาวุธทางด้านชีวภาพ และทางการแพทย์ และอื่นๆ นอกจากนี้ ในค.ศ. 1959 ซิลิกาเจลได้นำมาใช้ในงานด้านพิพิธภัณฑสถานในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ นับแต่นั้นเป็นต้นมา ซิลิกาเจลได้นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก

การหาค่าคุณภาพของซิลิกาเจล

การหาปริมาณซิลิกาเจลที่ต้องการในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ สามารถคำนวณได้จากค่าปริมาณของความชื้นรับ (moisture gained)

หาปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจล ปริมาณ 1 กิโลกรัม ในช่วงของความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นภายในกล่อง

หาค่าปริมาณทั้งหมดของซิลิกาเจลที่ต้องการในการคำนวณโดนความชื้นรับที่ได้หารด้วยความจุความชื้นของซิลิกาเจล

ซึ่งขั้นตอนดังที่ได้กล่าวมาได้รวบรวมให้อยู่ในรูปของสมการโดยได้รับการพัฒนาจาก Weintraub และ Tetreault ได้ดังสมการคือ

$$Q = (C_{eq} D) V (Nt) / (M_H F) \quad (3.31)$$

เมื่อ

Q คือ กิโลกรัมของซิลิกาเจลที่ต้องการ

C_{eq} คือ ความเข้มข้นของไอน้ำที่อิ่มตัว

D คือ ความแตกต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก กับความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่ภายในกล่องที่กำหนด

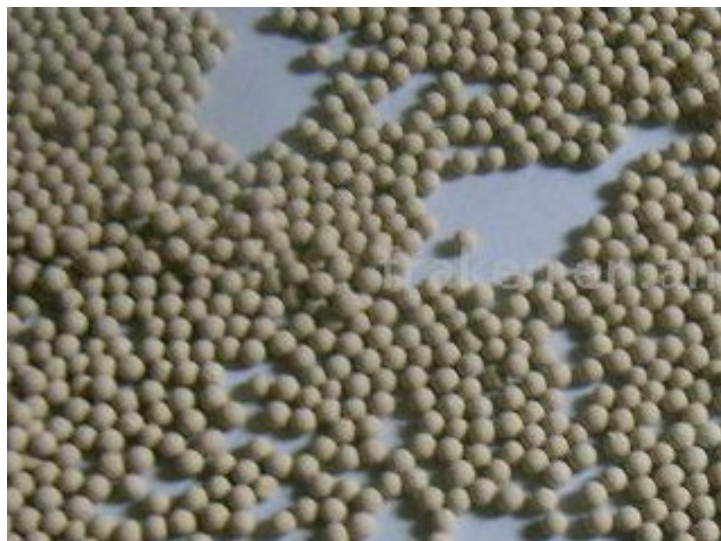
V คือ ปริมาตรของกล่องในหน่วยลูกบาศก์เมตร

N คือ จำนวนของอากาศที่เกิดการหมุนเวียนต่อวัน

- t คือ ค่าสูงสุดของเวลาซึ่งอยู่ภายในกล่องที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ยอมรับได้
- M_H คือ ความจุความชื้นของซิลิกาเจลภายในช่วงของความชื้นสัมพัทธ์จำเพาะ
- F คือ ค่าสูงสุดของช่วงของความชื้นสัมพัทธ์ที่ยอมรับได้ที่อยู่ภายในกล่อง

3.8.2 โม่เลculaซีฟ (MOLECULAR SIEVES)

เป็นสารดูดความชื้นที่สามารถดูดที่สามารถดูดความชื้นได้ดีกว่าซิลิกาเจล ซึ่งสามารถดูดจับไอน้ำได้มากกว่า 20% ของน้ำหนักตัว โดย โม่เลculaซีฟที่นำมาทดสอบนั้นเป็นประเภท 4A อัตราส่วนของส่วนประกอบของสารนี้เป็น $1 \text{ Na}_2\text{O} : 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 : 2.0 \pm 0.1 \text{ SiO}_2 : x \text{ H}_2\text{O}$ สำหรับการทดให้แห้งนั้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ จะต้องใช้อุณหภูมิอยู่ระหว่าง $200\text{-}315^\circ\text{C}$



ภาพประกอบ 40 ภาพแสดงลักษณะของสารโม่เลculaซีฟ

ตาราง 7 ตารางแสดงคุณสมบัติของโมเลกุลซีฟในประเภทต่างๆ

Table 2 - Properties and Characteristics of Molecular Sieves										
Catalog Number	Type	Form	Bead or particle size	Pore diameter (Å)	Bulk density (lb/cu ft)	Moisture (%)	Eq'm. H ₂ O capacity (theory)	pH (5% slurry)	Regeneration temp. (°C)	Max. Hads. BTU/lb H ₂ O
20,857-4	3A	bead	4-8 mesh	3	45-46	1.5	21	10.5	175-260	1800
20,858-2	3A	bead	8-12 mesh	3	45-46	1.5	21	10.5	175-260	1800
20,859-0	4A	bead	4-8 mesh	4	45	1.5	23	10.5	200-315	1800
20,860-4	4A	bead	8-12 mesh	4	45	1.5	23	10.5	200-315	1800
20,861-2	5A	bead	4-8 mesh	5	44	1.5	21.7	10.5	200-315	1800
20,862-0	5A	bead	8-12 mesh	5	44	1.5	21.7	10.5	200-315	1800
20,863-9	13X	bead	4-8 mesh	10	43	1.5	29.5	10.3	200-315	1800
20,864-7	13X	bead	8-12 mesh	10	43	1.5	29.5	10.3	200-315	1800
23,364-1	3A	powder	3-5μ	3	32	< 2	23	10.5	175-260	1800
23,366-8	4A	powder	2-3μ	4	30	< 2	28.5	10.5	200-315	1800

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานและผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะมีหัวข้อดังต่อไปนี้คือ

หัวข้อที่ 4.1 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

หัวข้อที่ 4.2 ผลการทดลอง

4.1 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ทำการหาค่าความชื้นก่อนทำการอบของผลิตภัณฑ์
2. นำวัตถุดิบไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสเป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชม. เพื่อให้น้ำที่เป็นส่วนประกอบภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้นกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง
3. นำสารดูดความชื้นไปชั่งน้ำหนักก่อนที่จะนำไปใช้ในการดูดซับไอน้ำขณะทำการอบวัตถุดิบ
4. เตรียมสารดูดความชื้นภายในตัวดักจับความชื้น
5. นำวัตถุดิบที่ได้ทำการแช่แข็งแล้วเข้าห้องอบเพื่อทำการอบ ภายใต้อุณหภูมิเริ่มต้นที่พอเหมาะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบที่นำมาทำการอบ
6. ทำการเก็บข้อมูล ความดันภายในห้องอบ อุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน และ อุณหภูมิของเทอร์โมคอปเปิล
7. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบนั้นทำการหาค่าความชื้นที่หลงเหลืออยู่
8. นำสารดูดความชื้นชั่งน้ำหนักหลังการอบ เพื่อหาค่าความสามารถในการดักจับไอน้ำ

4.2 ผลการทดลอง

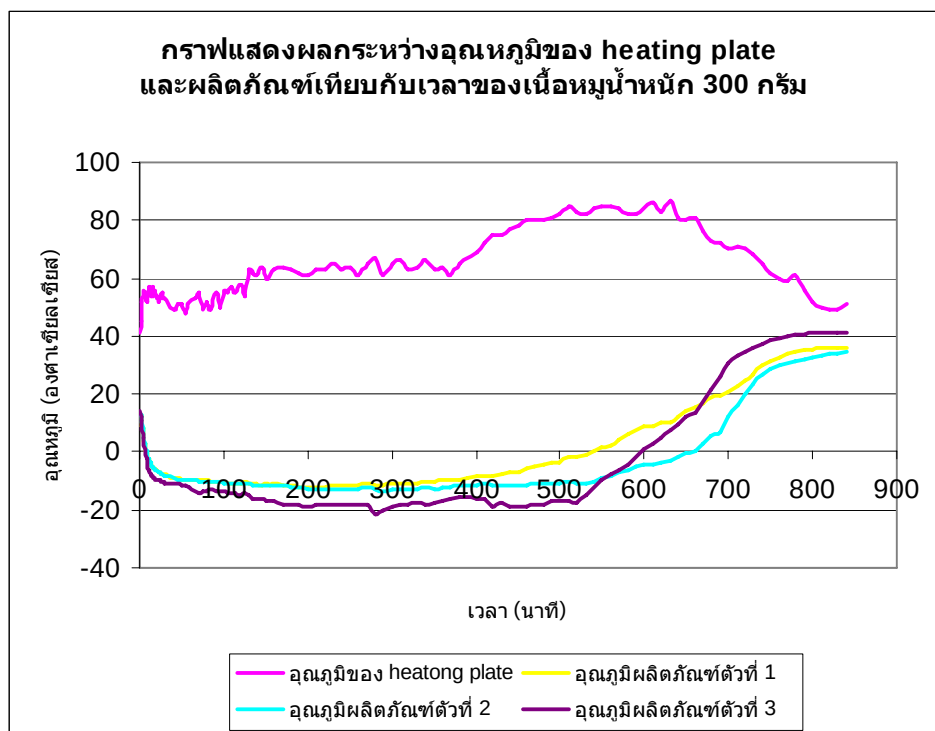
จากการทดลองการอบแห้งวัตถุดิบโดยวิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสารซิลิกาเจลในการดักจับไอน้ำนั้น ผลที่ได้จากการอบแห้งนั้น สารซิลิกาเจลไม่สามารถที่จะดักจับไอน้ำได้ ภายใต้ความดันเกือบสูญญากาศ จึงได้มีการแก้ไขโดยการใส่สารซิลิกาเจลควบคู่กับน้ำแข็งแห้งเพื่อในการดักจับไอน้ำระหว่างการอบแห้ง

สำหรับผลที่ได้จากการทดลองนั้น สามารถแสดงอยู่ในรูปของกราฟต่างๆ และภาพเปรียบเทียบระหว่างผลก่อนการทำการอบแห้ง และหลังการอบแห้งดังต่อไปนี้

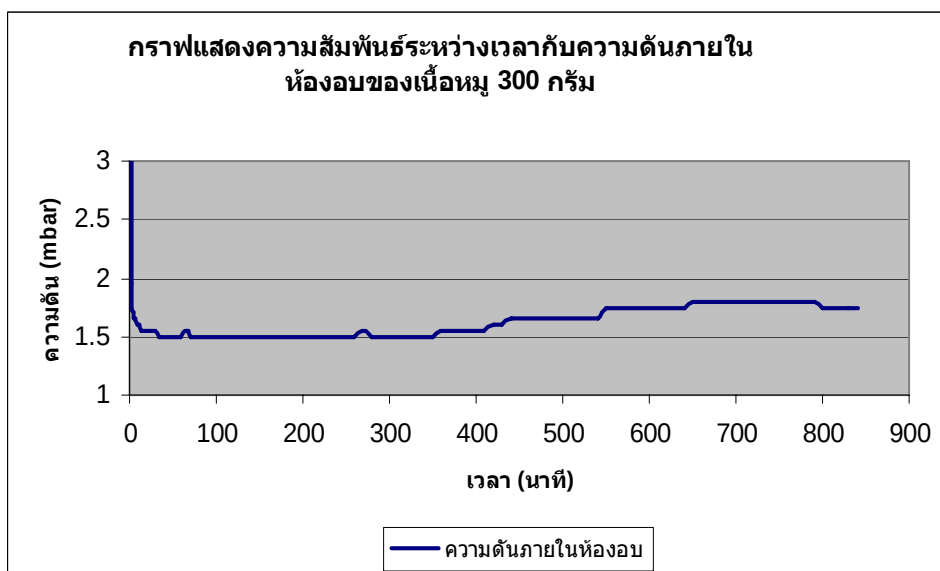
4.2.1 การทำการอบแห้งเนื้อหมูน้ำหนัก 300 กรัม เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยใช้สารดักจับไอน้ำประเภทซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งเป็นสารดักจับไอน้ำ

จากภาพประกอบที่ 41 และ 42 นั้น จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำการอบนั้นอยู่ที่ 41 องศาเซลเซียส ความดันที่เกิดขึ้นให้ 3 นาทีแรก อยู่ที่ 1.75 mbar หลังจากนั้นได้มีการเพิ่มความร้อนของแผ่นให้ความร้อนเป็นช่วงๆ โดย 2 ชั่วโมงแรก อุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนอยู่ในช่วง 40 – 60 องศาเซลเซียส ความดันภายในห้องอบได้มีการลดลงจนต่ำสุดอยู่ที่ 1.5 mbar หลังจากนั้นได้มีการเพิ่มความร้อนของแผ่นให้ความร้อนอยู่ในช่วง 60 – 70 องศาเซลเซียส ความดันภายในห้องอบนั้นยังมีค่าคงที่อยู่ที่ 1.5 mbar จากนั้นได้มีการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนอยู่ช่วงระหว่าง 70 -80 องศาเซลเซียส ความดันภายในห้องอบมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบนั้นยังมีความชื้นอยู่ เป็นผลให้ความดันภายในห้องอบนั้นเพิ่มขึ้น จนมีค่าอยู่ที่ 1.8 mbar หลังจากนั้นได้มีการลดความร้อนที่ให้แก่แผ่นให้ความร้อน ความดันได้มีการลดลงมีค่า 1.75 mbar หลังจากนั้นที่ 800 นั้นแสดงให้เห็นถึง ไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการอบวัตถุดิบนั้น มีค่าน้อยลง เป็นผลให้ความดันภายในห้องอบนั้นมีค่าลดลงด้วย

สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างวัตถุดิบก่อนทำการอบและหลังการอบนั้น จากภาพประกอบที่ 43 และ 44 นั้น มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ที่สีของวัตถุดิบ โครงสร้างไม่มีการเปลี่ยนแปลง



ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งเนื้อหมูน้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสารดักจับไอบประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบที่ 42 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งเนื้อหมูน้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสารดักจับไอบประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 43 ภาพแสดงลักษณะเนื้อหมูก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

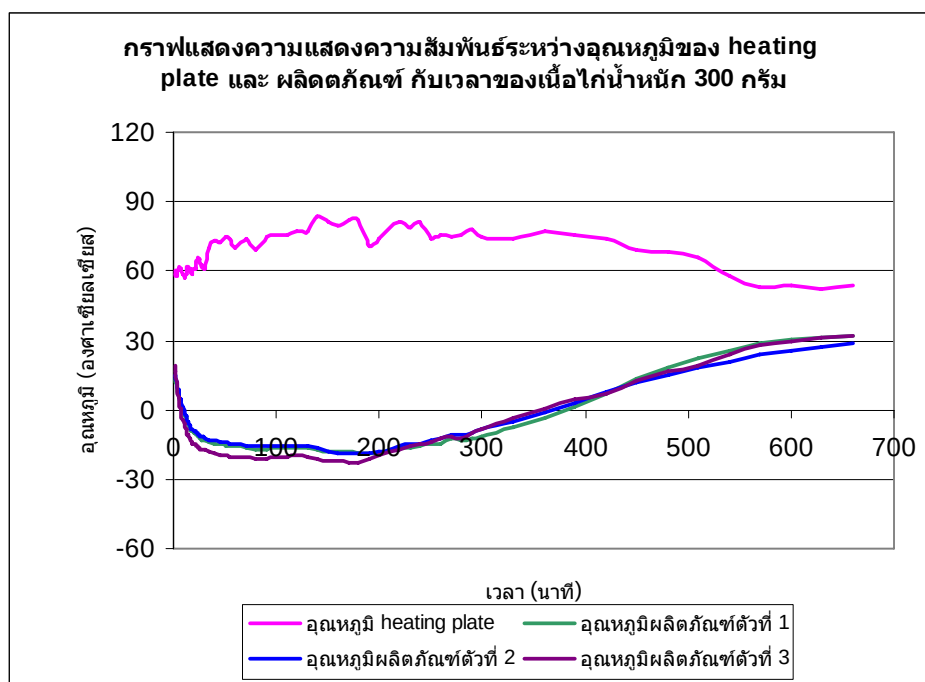


ภาพประกอบ 44 ภาพแสดงลักษณะเนื้อหมูหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

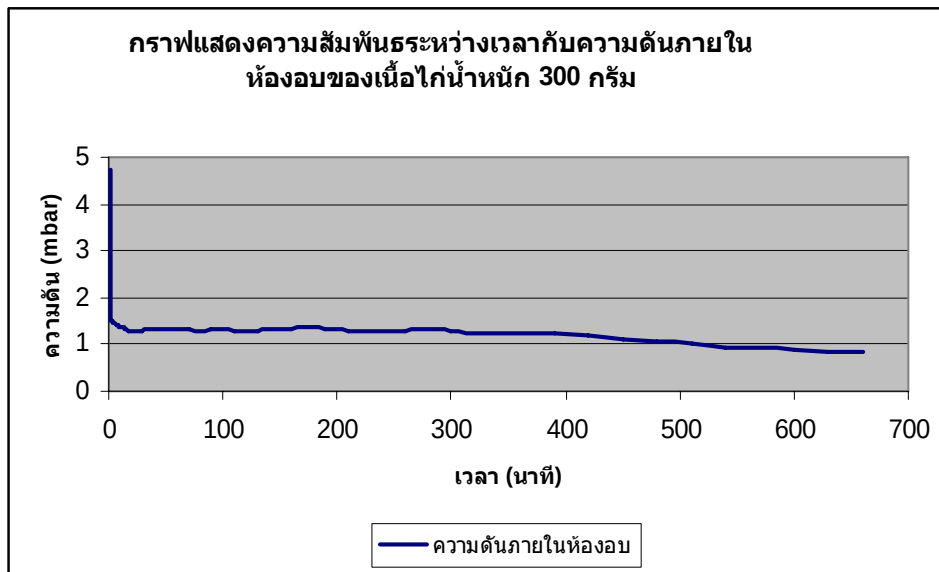
4.2.2 การทำการอบแห้งเนื้อไก่น้ำหนัก 300 กรัม เป็นเวลา 11 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยใช้สารดักจับไอน้ำประเภทซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งเป็นสารดักจับไอน้ำ

จากภาพประกอบ 45 และ 46 อุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำการอบอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส ความดันที่เกิดขึ้นภายใน 3 นาทีแรกอยู่ที่ 1.5 mbar หลังจากนั้นได้มีการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนขึ้นเรื่อยๆจนอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 81 องศาเซลเซียส ความดันได้ลดลงจนคงที่อยู่ที่ 1.3 mbar นาทีที่ 300 ความดันภายในห้องอบเริ่มลดลง นั้นหมายถึงไอน้ำที่เกิดจากการอบแห้งนั้นลดลง ส่งผลให้ความดันที่เกิดขึ้นภายในห้องอบนั้นมีค่าน้อยลง และความดันสุดท้ายภายในห้องอบนั้นอยู่ที่ 0.83 mbar

สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของวัตถุติดระหว่างก่อนทำการอบและหลังทำการอบนั้น จากภาพประกอบ 47 และ 48 จะเห็นได้ว่า หลังการอบนั้น มีสีที่เข้มกว่าก่อนอบ ส่วนลักษณะโครงสร้างนั้นยังมีโครงสร้างที่เหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งเนื้อไก่ น้ำหนัก 300 กรัม โดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งเนื้อไก่ น้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 47 ภาพแสดงลักษณะเนื้อไก่ก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

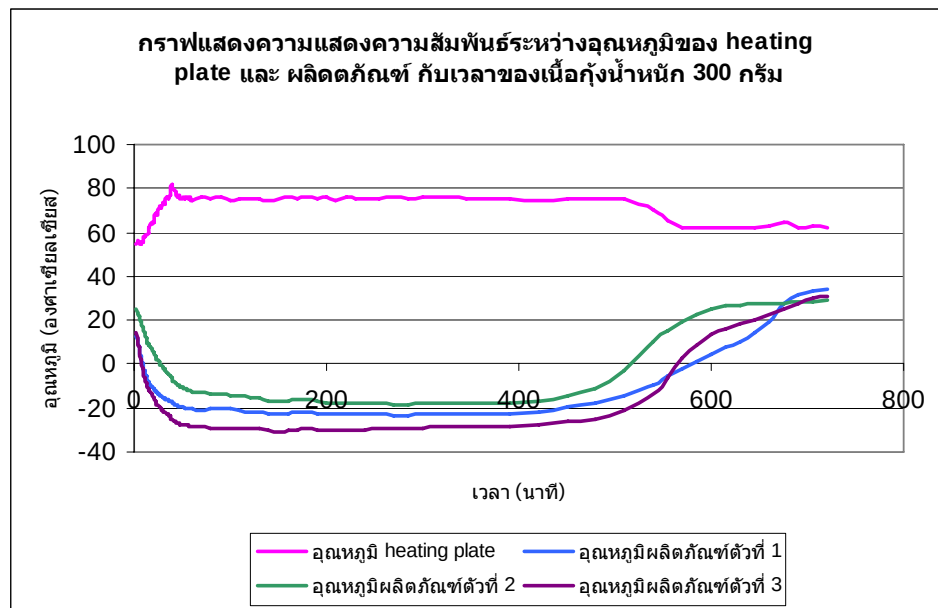


ภาพประกอบ 48 ภาพแสดงลักษณะเนื้อไก่หลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

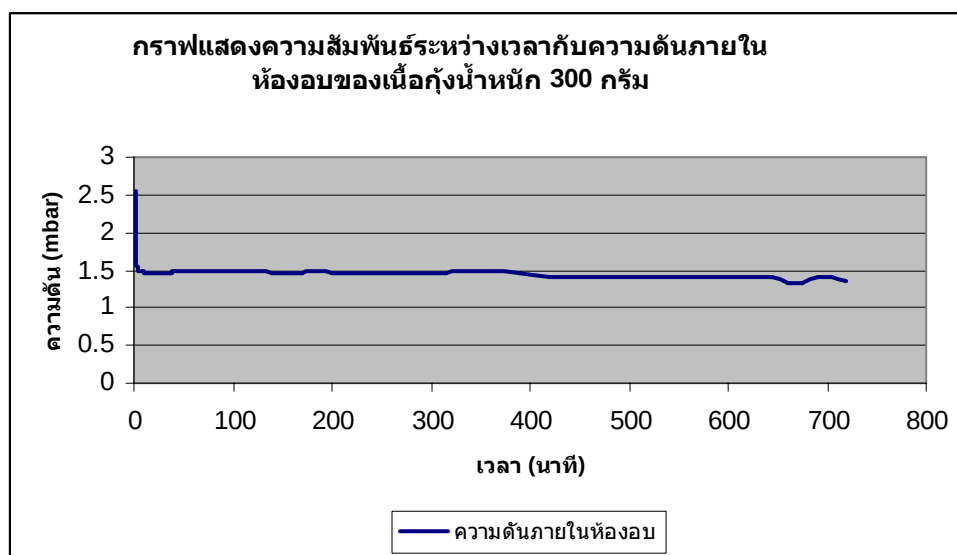
4.2.3 การทำการอบแห้งเนื้อกุ้งน้ำหนักรวม 300 กรัม เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยใช้สารดักจับไอน้ำประเภทซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งเป็นสารดักจับไอน้ำ

จากภาพประกอบ 49 และ 50 อุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำการอบอยู่ที่ 54.6 องศาเซลเซียส ความดันที่เกิดขึ้นภายใน 3 นาทีแรกอยู่ที่ 1.55 mbar โดยมีการเพิ่มความร้อนของแผ่นให้ความร้อนเรื่อยๆ จนมีค่า 75 องศาเซลเซียสโดยประมาณ และคงที่ ขณะที่ขณะนั้นความดันได้ลดลงจากเดิมเล็กน้อย มีค่าเป็น 1.45 mbar และค่าความดันแล้วลดลงต่อเนื่องจนความดันสุดท้ายอยู่ที่ 1.35 mbar ในชั่วโมงที่ 12

สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของวัตถุดิบระหว่างก่อนทำการอบและหลังทำการอบนั้น จากภาพประกอบที่ 51 และ 52 จะสังเกตได้ว่า ลักษณะเนื้อกุ้งก่อนการอบนั้น มีสีที่อ่อนกว่า เนื้อกุ้งหลังการอบ ส่วนลักษณะโครงสร้างของเนื้อกุ้งนั้นยังคงเหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งเนื้อกุ้งน้ำหนัก 300 กรัม โดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งเนื้อกุ้งน้ำหนัก 300 กรัม โดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 51 ภาพแสดงลักษณะเนื้อกุ้งก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยมีสารดักจับไอบะหมักรสชาติกาเจลดและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไ

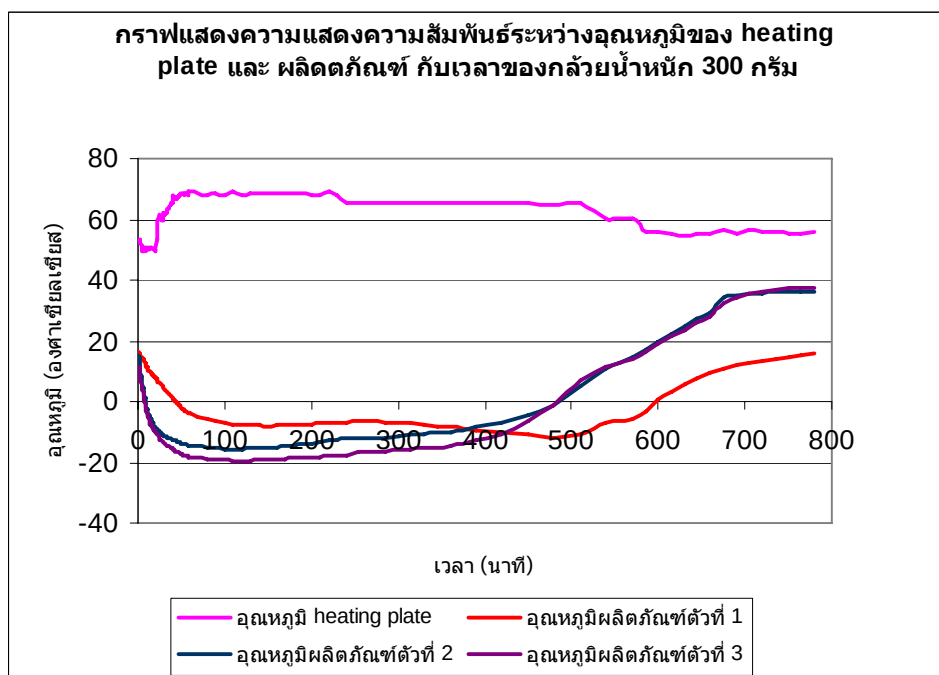


ภาพประกอบ 52 ภาพแสดงลักษณะเนื้อกุ้งหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยมีสารดักจับไอบะหมักรสชาติกาเจลดและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไ

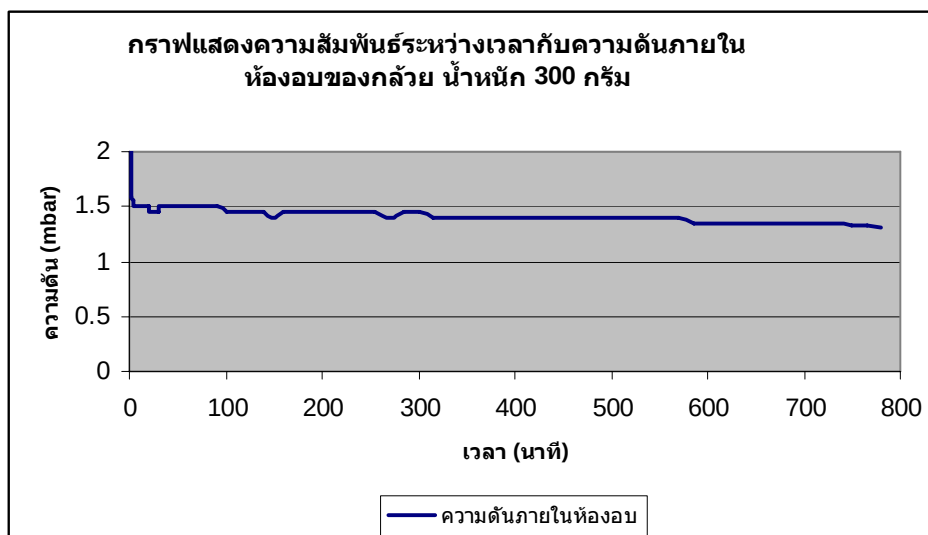
4.2.4 การทำการอบแห้งกล้วยน้ำหนัก 300 กรัม เป็นเวลา 13 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยใช้สารดักจับไอบะประเภตซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งเป็นสารดักจับไอบ

จากภาพประกอบ 53 และ 54 อุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำการอบอยู่ที่ 52.9 องศาเซลเซียส ความดันที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 3 นาทีแรก อยู่ที่ 1.6 mbar และได้มีการเพิ่มความร้อนเรื่อยๆ จนมีค่า 70 องศาเซลเซียสโดยประมาณ และมีค่าคงที่ ระหว่างนั้น ความดันลดลงต่อเนื่องจนความดันสุดท้ายนั้นอยู่ที่ 1.31 mbar

สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของวัตถุดิบระหว่างก่อนทำการอบและหลังทำการอบ จากภาพประกอบ 55 และ 56 จะสังเกตได้ว่า ลักษณะเนื้อของกล้วยก่อนทำการอบนั้นมีสีที่อ่อนกว่า หลังจากที่ได้ทำการอบแล้ว เนื้อกล้วยมีสีเข้มขึ้น สำหรับโครงสร้างนั้นมีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างเพียงเล็กน้อย



ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งกล้วยน้ำหนัก 300 กรัม โดยมีสารดักจับไอบะประเภตซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอบ



ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งกล้วย
น้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 55 ภาพแสดงลักษณะของกล้วยก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือก
แข็งโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

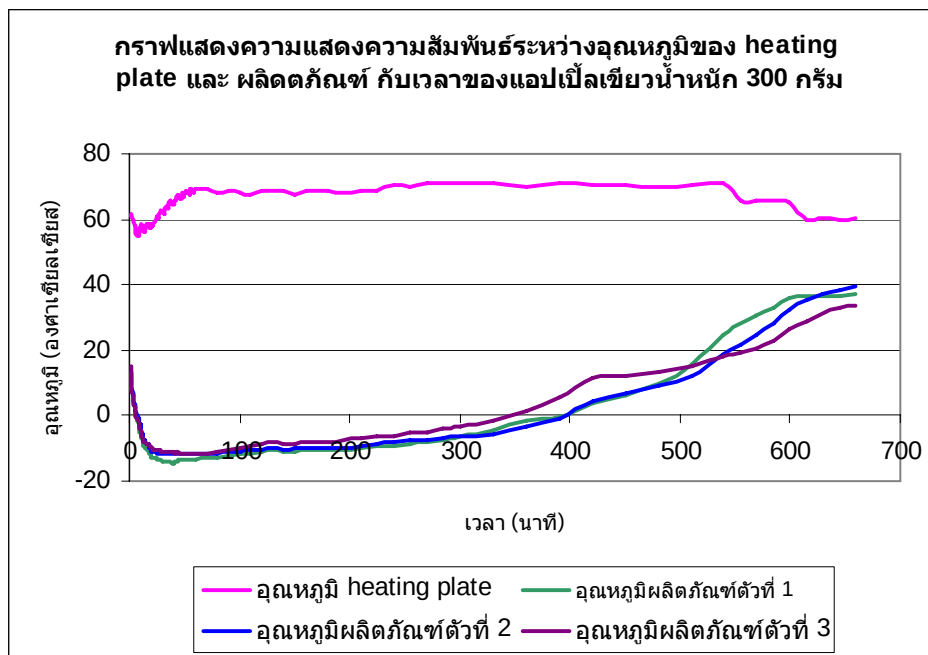


ภาพประกอบ 56 ภาพแสดงลักษณะของกล้วยหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

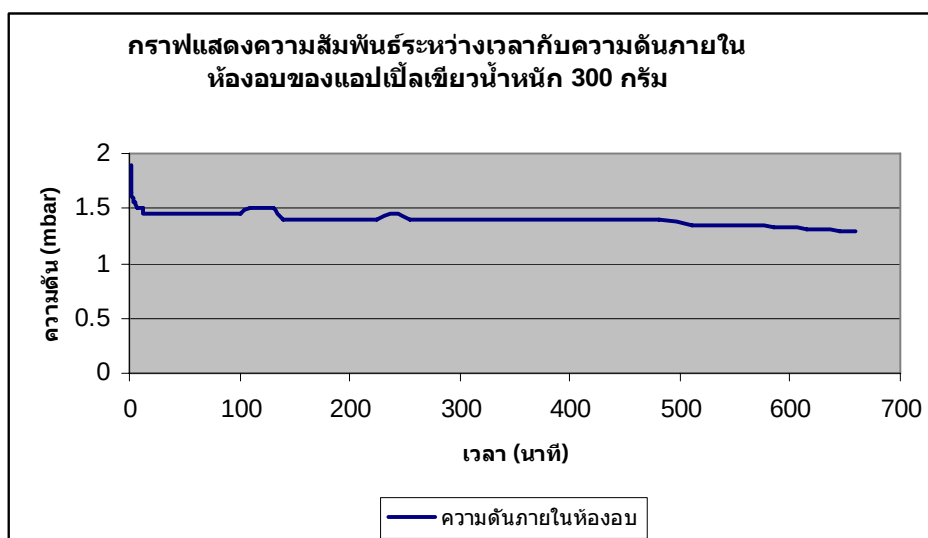
4.2.5 การทำการอบแห้งแอปเปิ้ลเขียวน้ำหนัก 300 กรัม เป็นเวลา 11 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้สารดักจับไอน้ำประเภทซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งเป็นสารดักจับไอน้ำ

จากภาพประกอบ 57 และ 58 อุณหภูมิเริ่มต้นในการอบอยู่ที่ 61 องศาเซลเซียส ความดันที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 3 นาทีแรกอยู่ที่ 1.6 mbar และได้มีการเพิ่มความร้อนเรื่อยๆจนมีค่า 70 องศาเซลเซียสโดยประมาณ และมีค่าคงที่ ความดันโดนส่วนใหญ่คงที่อยู่ที่ 1.5 mbar ขณะทำการอบ และแล้วลดลงต่อเนื่องจนความดันสุดท้ายภายในห้องอบมีค่า 1.3 mbar

สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของวัตถุดิบระหว่างก่อนทำการอบและหลังทำการอบ จากภาพประกอบที่ 59 และ 60 จะสังเกตได้ว่า หลังทำการอบแห้งนั้น เนื้อของแอปเปิ้ลมีสีที่เข้มขึ้นจากเดิม สำหรับโครงสร้างนั้น หลังทำการอบแห้งแล้ว โครงสร้างมีการเสียรูป มีการหดตัวเพียงเล็กน้อย



ภาพประกอบ 57 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งแอปเปิ้ลเขียวน้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 58 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งแอปเปิ้ลเขียวน้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 59 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อแอปเปิ้ลเขียวก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

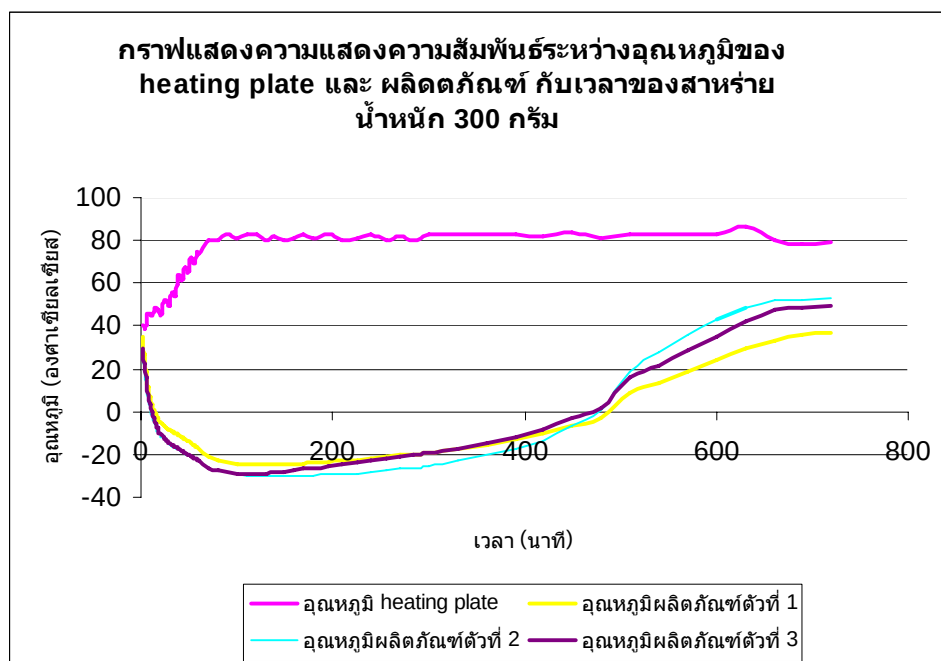


ภาพประกอบ 60 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อแอปเปิ้ลเขียวหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

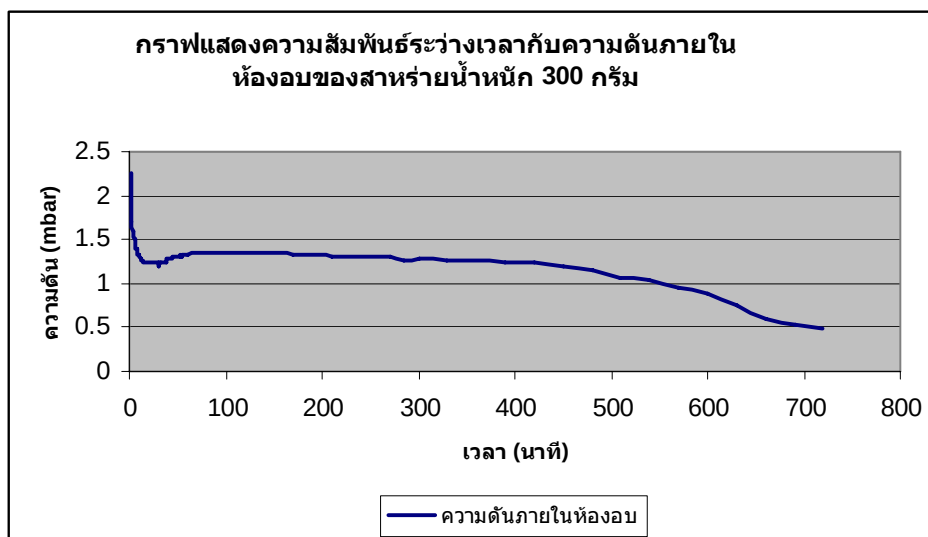
4.2.6 การทำการอบแห้งสาหร่ายน้ำหนัก 300 กรัม เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้สารดักจับไอน้ำประเภทซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งเป็นสารดักจับไอน้ำ

จากภาพประกอบ 61 และ 62 อุณหภูมิเริ่มต้นในการอบอยู่ที่ 40.4 องศาเซลเซียส ความดันที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 3 นาทีแรกอยู่ที่ 1.7 mbar และได้มีการเพิ่มความร้อนเรื่อยๆจนมีค่า 80 องศาเซลเซียสโดยประมาณ และมีค่าคงที่ ความดันภายในห้องอบขณะทำการอบส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 1.3 mbar แล้วลดลงต่อเนื่องจนมีค่าความดันต่ำสุดอยู่ที่ 0.49 mbar

สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของวัตถุดิบระหว่างก่อนทำการอบและหลังทำการอบ จากภาพประกอบที่ 63 และ 64 จะสังเกตได้ว่า ลักษณะของสาหร่ายหลังการอบนั้น มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย กล่าวคือ มีลักษณะคล้ายฟองอากาศเกิดขึ้นบนผิวบนของสาหร่าย นอกจากนั้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากวัตถุดิบก่อนทำการอบ



ภาพประกอบ 61 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งสาหร่ายน้ำหนัก 300 กรัม โดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 62 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งสาหร่ายน้ำหนัก 300 กรัมโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 63 ภาพแสดงลักษณะของสาหร่ายก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

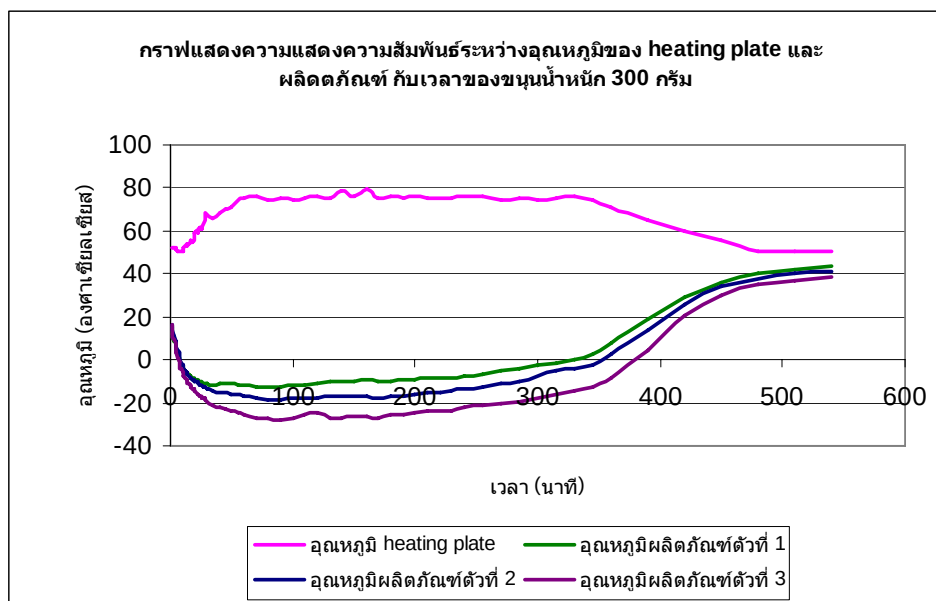


ภาพประกอบ 64 ภาพแสดงลักษณะของสาหร่ายหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

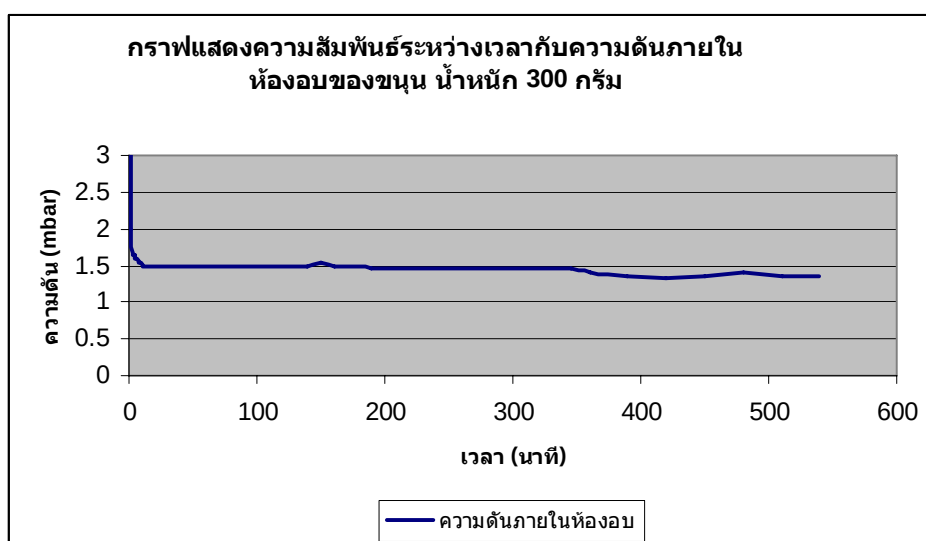
4.2.7 การทำการอบแห้งขนุนน้ำหนัก 300 กรัม เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้สารดักจับไอน้ำประเภทซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งเป็นสารดักจับไอน้ำ

จากภาพประกอบ 65 และ 66 อุณหภูมิเริ่มต้นในการอบอยู่ที่ 52 องศาเซลเซียส ความดันที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 3 นาทีแรกอยู่ที่ 1.65 mbar และได้มีการเพิ่มความร้อนเรื่อยๆจนมีค่า 75 องศาเซลเซียสโดยประมาณ และมีค่าคงที่ ความดันภายในห้องอบขณะทำการอบส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 1.45 mbar แล้วลดลงต่อเนื่องจนมีค่าความดันต่ำสุดอยู่ที่ 1.4 mbar

สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของวัตถุดิบระหว่างก่อนทำการอบและหลังทำการอบ จากภาพประกอบที่ 67 และ 68 จะสังเกตได้ว่า ลักษณะของเนื้อขนุนหลังการอบแห้งนั้น มีสีที่อ่อนกว่าเนื้อขนุนก่อนทำการอบแห้ง ส่วนโครงสร้างนั้น มีการเสียรูปเล็กน้อย เกิดการหดตัวเล็กน้อยจากเดิมก่อนที่จะทำการอบแห้ง



ภาพประกอบ 65 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งขนุนน้ำหนัก 300 กรัม โดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 66 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งขนุน น้ำหนัก 300 กรัม โดยมีสารดักจับไอน้ำประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 67 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อขุ่นก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสารดักจับไประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ



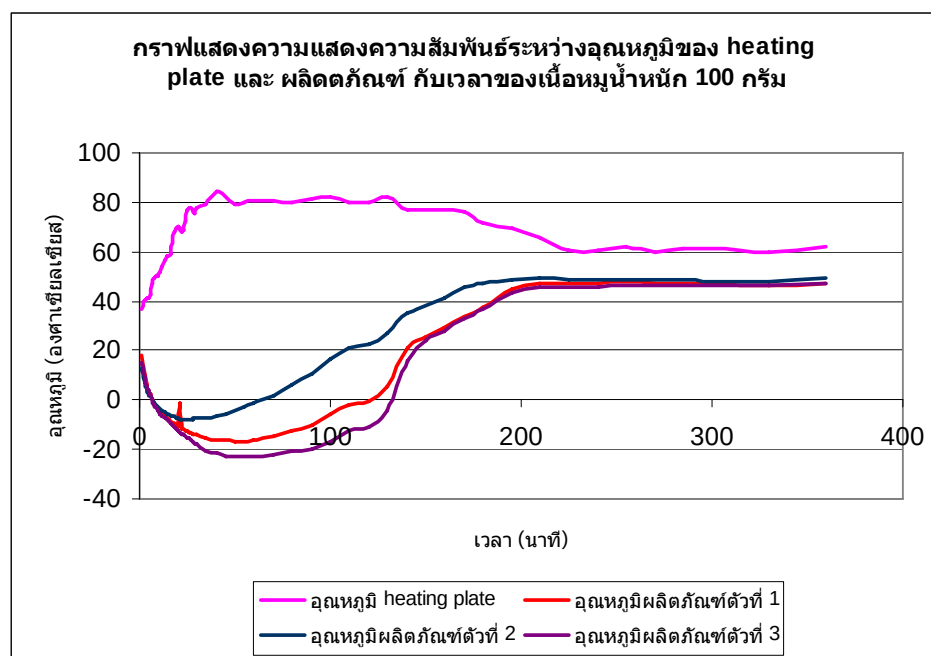
ภาพประกอบ 68 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อขุ่นหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีสารดักจับไประเภทสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

4.2.8 การทำการอบแห้งเนื้อหมูน้ำหนัก 100 กรัม เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้สารดูดความชื้นประเภทโมเลกุลลาซีฟเป็นสารดักจับไอน้ำ

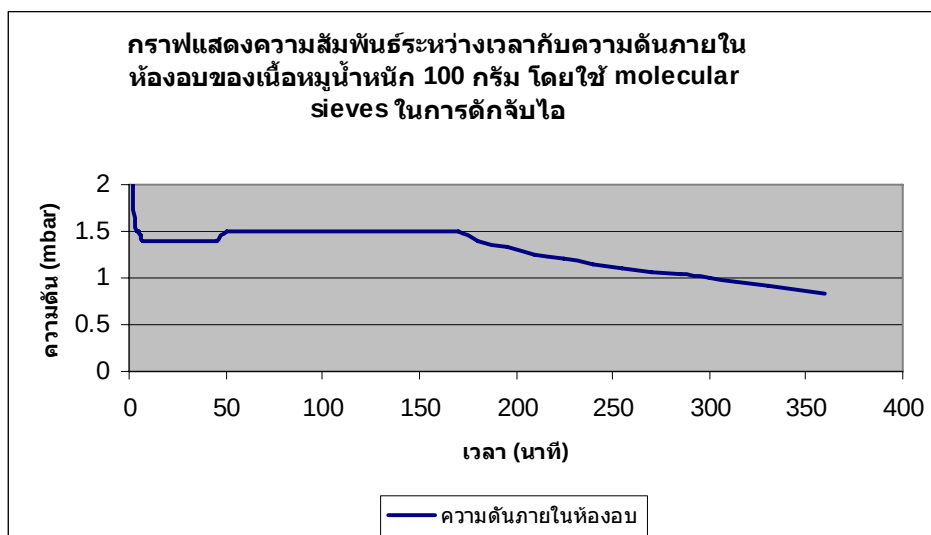
จากภาพประกอบที่ 69 และ 70 อุณหภูมิเริ่มต้นในการอบอยู่ที่ 36.7 องศาเซลเซียส ความดันที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 3 นาทีแรกอยู่ที่ 1.6 mbar และได้มีการเพิ่มความร้อนเรื่อยๆ จนมีค่า 80 องศาเซลเซียสโดยประมาณ และมีค่าคงที่ ความดันภายในห้องอบขณะทำการอบส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 1.5 mbar แล้วลดลงต่อเนื่องจนมีค่าความดันต่ำสุดอยู่ที่ 0.84 mbar

สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของวัตถุดิบระหว่างก่อนทำการอบและหลังทำการอบ จากภาพประกอบที่ 71 และ 72 จะสังเกตได้ว่า ลักษณะของเนื้อหมูหลังทำการอบนั้นมีสีที่เข้มกว่าเนื้อหมูก่อนทำการอบ ส่วนโครงสร้างนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง

สำหรับสารดูดความชื้นประเภทโมเลกุลลาซีฟ ในการอบแห้ง ได้มีการใช้โมเลกุลลาซีฟ น้ำหนัก 418.59 กรัม เพื่อใช้ในการดักจับไอน้ำ หลังจากที่ได้ทำการอบแห้งแล้ว โมเลกุลลาซีฟ สามารถดูดจับไอน้ำได้ 42.3 กรัม คิดเป็นร้อยละ 10.11 ของน้ำหนักตัวของโมเลกุลลาซีฟที่ใช้ในการดักจับไอน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ น้ำหนักของวัตถุดิบ 100 กรัมที่ทำการอบแห้ง น้ำที่เกิดจากการระเหิดทั้งหมด 65.52 กรัม สารโมเลกุลลาซีฟสามารถดักจับไอน้ำได้ 42.3 กรัม เปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์สามารถดูดน้ำ 64.56% ของน้ำทั้งหมดที่เกิดการระเหิดของวัตถุดิบ



ภาพประกอบ 69 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งเนื้อหมูน้ำหนัก 100 กรัม โดยใช้โมเลกุลลาซีฟในการดูดจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 70 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งเนื้อหมูน้ำหนัก 100 กรัมโดยใช้ molecular sieves ในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 71 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อหมูน้ำหนัก 100 กรัมก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ



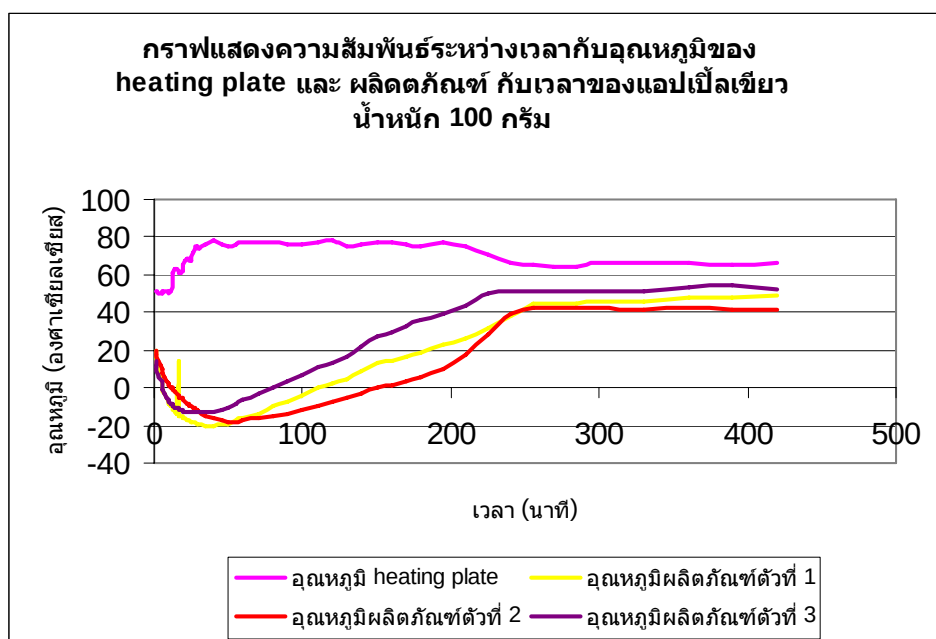
ภาพประกอบ 72 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อหมูนํ้าหนัก 100 กรัมหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอนํ้า

4.2.9 การทำการอบแห้งแอปเปิ้ลเขียวน้ำหนัก 100 กรัม เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้สารดูดความชื้นประเภทโมเลกุลาสีฟเป็นสารดักจับไอนํ้า

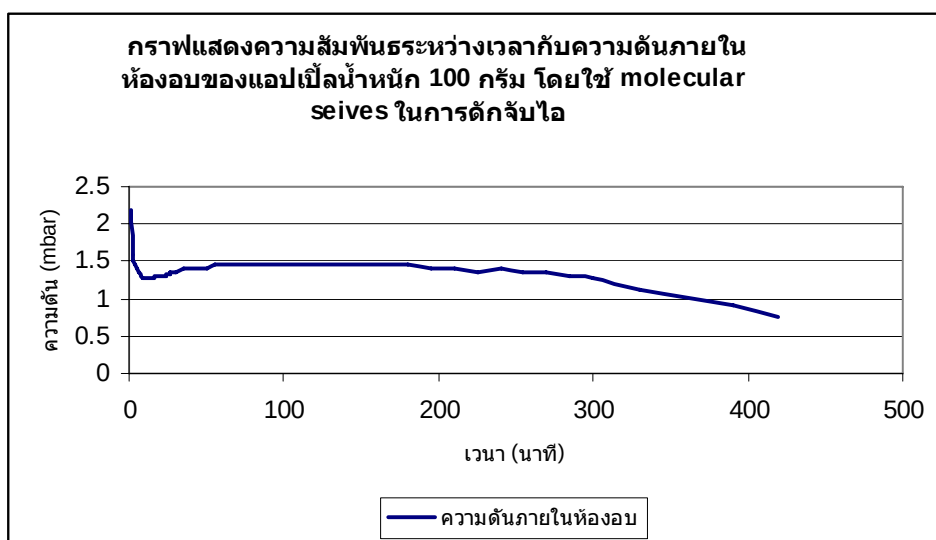
จากภาพประกอบ 73 และ 74 อุณหภูมิเริ่มต้นในการอบอยู่ที่ 51 องศาเซลเซียส ความดันที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 3 นาทีแรกอยู่ที่ 1.5 mbar และได้มีการเพิ่มความร้อนเรื่อยๆจนมีค่า 75 องศาเซลเซียสโดยประมาณ และมีค่าคงที่ ความดันภายในห้องอบขณะทำการอบส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 1.45 mbar แล้วลดลงต่อเนื่องจนมีค่าความดันต่ำสุดอยู่ที่ 0.76 mbar

สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของวัตถุดิบระหว่างก่อนทำการอบและหลังทำการอบ จากภาพประกอบที่ 75 และ 76 จะสังเกตได้ว่า ลักษณะเนื้อของแอปเปิ้ลเขียวหลังทำการอบนั้นมีสีที่เข้มกว่าเนื้อแอปเปิ้ลเขียวก่อนทำการอบ ส่วนโครงสร้างนั้น มีเนื้อบางส่วนที่เกิดการยุบตัว

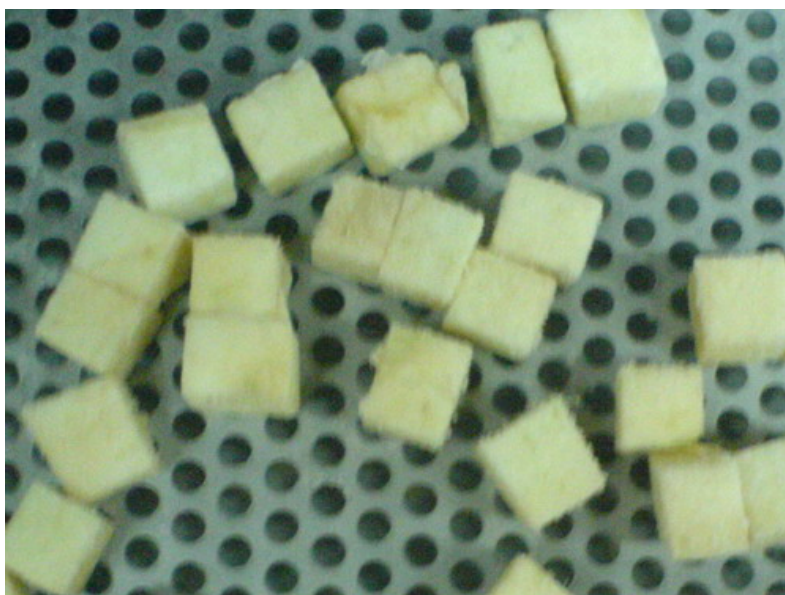
สำหรับสารดูดความชื้นประเภทโมเลกุลาสีฟ ในการอบแห้ง ได้มีการใช้โมเลกุลาสีฟ น้ำหนัก 438.91 กรัม เพื่อใช้ในการดูดจับไอนํ้า หลังจากที่ได้ทำการอบแห้งแล้ว โมเลกุลาสีฟ สามารถดูดจับไอนํ้าได้ 38.48 กรัม คิดเป็นร้อยละ 8.7 ของน้ำหนักตัวของโมเลกุลาสีฟที่ใช้ในการดักจับไอนํ้า เมื่อเปรียบเทียบกับ น้ำหนักของวัตถุดิบ 100 กรัมที่ทำการอบแห้ง น้ำที่เกิดจากการระเหิดทั้งหมด 84.69 กรัม สารโมเลกุลาสีฟสามารถดักจับไอนํ้าได้ 38.48 กรัม เปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์สามารถดูดน้ำ 45.49% ของน้ำทั้งหมดที่เกิดการระเหิดของวัตถุดิบ



ภาพประกอบ 73 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งแอปเปิ้ลเขียว น้ำหนัก 100 กรัม โดยใช้ไมเลคคิวลาซีฟในการดูดซับไอน้ำ



ภาพประกอบ 74 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งแอปเปิ้ลเขียว น้ำหนัก 100 กรัม โดยใช้ molecular sieves ในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 75 ภาพแสดงลักษณะของแอมป์เปลี่ยวน้ำหนัก 100 กรัมก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 76 ภาพแสดงลักษณะของแอมป์เปลี่ยวน้ำหนัก 100 กรัมหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ

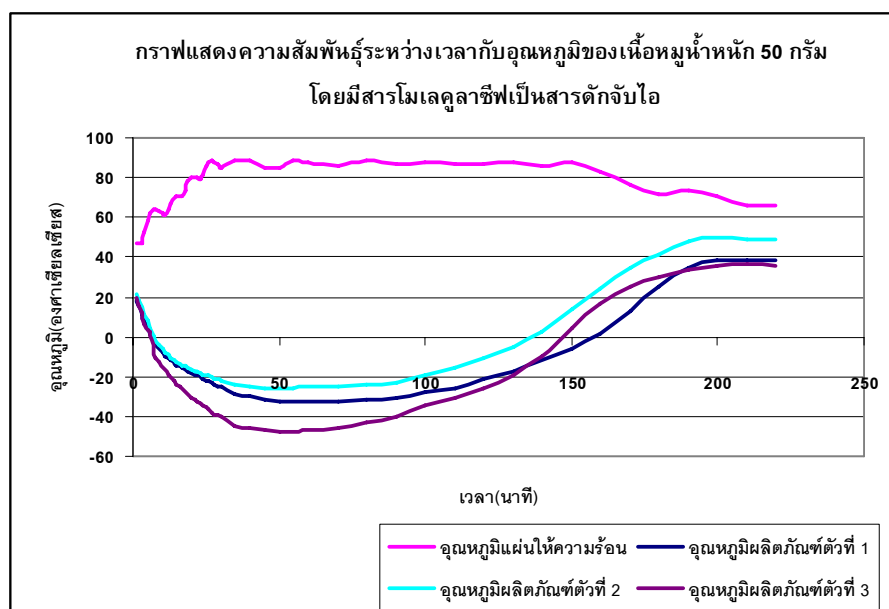
ผลของความชื้นที่เกิดจากการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งในการอบแห้งวัตถุดิบโดยใช้ สารซิลิกาเจลควบคู่กับน้ำแข็งแห้งเป็นสารดักจับไอน้ำ ได้ผลของความชื้นก่อนการอบและหลังการอบดังนี้

4.2.10 การทำการอบแห้งเนื้อหมูน้ำหนัก 50 กรัม เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้สารดูดความชื้นประเภทโมเลกุลลาซีฟเป็นสารดักจับไอน้ำ

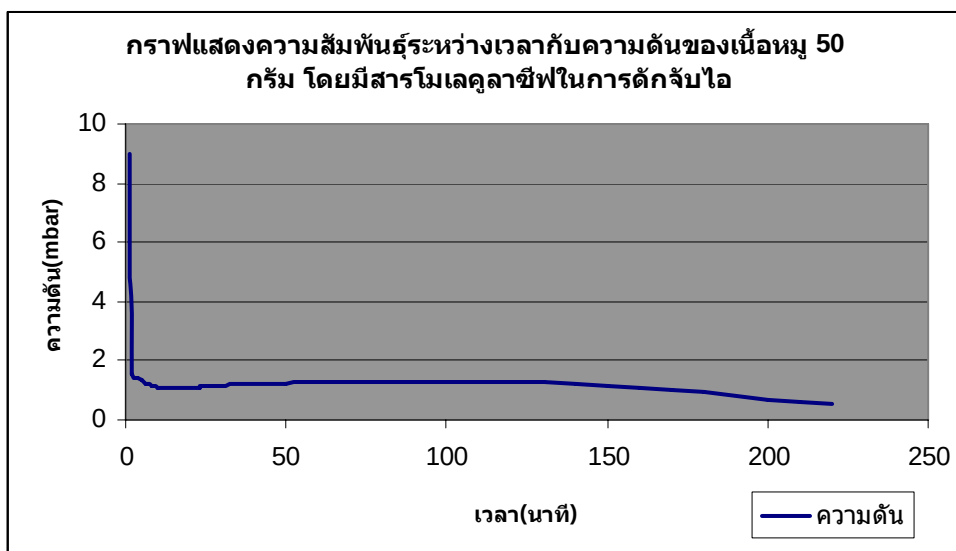
จากภาพประกอบ 77 และ 78 อุณหภูมิเริ่มต้นในการอบอยู่ที่ 47 องศาเซลเซียส ความดันที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 3 นาทีแรกอยู่ที่ 1.45 mbar และได้มีการเพิ่มความร้อนเรื่อยๆจนมีค่า 90 องศาเซลเซียสโดยประมาณ และมีค่าคงที่ ความดันภายในห้องอบขณะทำการอบส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 1.28 mbar แล้วลดลงต่อเนื่องจนมีค่าความดันต่ำสุดอยู่ที่ 0.52 mbar

สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของวัตถุดิบระหว่างก่อนทำการอบและหลังทำการอบ จากภาพประกอบที่ 79 และ 80 จะสังเกตได้ว่า ลักษณะของเนื้อหมูหลังทำการอบนั้นมีสีที่เข้มกว่าเนื้อหมูก่อนทำการอบ ส่วนโครงสร้างนั้น ไม่แตกต่างจากวัตถุดิบก่อนนำมาอบแห้ง

สำหรับสารดูดความชื้นประเภทโมเลกุลลาซีฟ ในการอบแห้ง ได้มีการใช้โมเลกุลลาซีฟน้ำหนัก 431 กรัม เพื่อใช้ในการดูดจับไอน้ำ หลังจากที่ได้ทำการอบแห้งแล้ว โมเลกุลลาซีฟสามารถดูดจับไอน้ำได้ 21.54 กรัม คิดเป็นร้อยละ 5 ของน้ำหนักตัวของโมเลกุลลาซีฟที่ใช้ในการดักจับไอน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ น้ำหนักของวัตถุดิบ 50 กรัมที่ทำการอบแห้ง น้ำที่เกิดจากการระเหิดทั้งหมด 84.69 กรัม สารโมเลกุลลาซีฟสามารถดักจับไอน้ำได้ 21.54 กรัม เปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์สามารถดูดน้ำ 67.29% ของน้ำทั้งหมดที่เกิดการระเหิดของวัตถุดิบ



ภาพประกอบ 77 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการอบแห้งแอปเปิ้ลเขียว น้ำหนัก 100 กรัม โดยใช้โมเลกุลลาซีฟในการดูดจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 78 กราฟแสดงค่าระหว่างความดันภายในห้องอบกับเวลาของการอบแห้งแอปเปิ้ลเขียวหนัก 100 กรัมโดยใช้ molecular sieves ในการดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 79 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อหมูแช่เยือกแข็งน้ำหนัก 50 กรัมก่อนทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ



ภาพประกอบ 80 ภาพแสดงลักษณะของเนื้อหมูน้ำหนัก 50 กรัมหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ

ตาราง 8 ตารางแสดงผลของความชื้นก่อนอบและหลังอบของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่ได้จากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยมีน้ำหนักของวัตถุดิบอยู่ที่ 300 กรัม และมี ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ

ชนิดของวัตถุดิบ	ความชื้นก่อนอบ(%น้ำ)	ความชื้นหลังอบ(%น้ำ)
เนื้อหมู	59.46	4.25
เนื้อกุ้ง	76.11	4.17
เนื้อไก่	55.64	4.46
กล้วย	72.35	3.98
ขนุน	76.36	4.71
สาหร่าย	93.92	4.35
แอปเปิ้ลเขียว	84.6	4.19

ผลของความชื้นที่เกิดจากการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งในการอบแห้งวัตถุดิบโดยใช้ molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ ได้ผลของความชื้นก่อนการอบและหลังการอบดังนี้

ตาราง 9 ตารางแสดงผลของความชื้นก่อนอบและหลังอบของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่ได้จากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยมีสาร molecular sieves เป็นสารดักจับไอน้ำ

ชนิดของวัตถุดิบ	ความชื้นก่อนอบ(% ^{ไอน้ำ})	ความชื้นหลังอบ(% ^{ไอน้ำ})
เนื้อหมู 100 กรัม	67.47	1.24
แอปเปิ้ลเขียว 100 กรัม	84.9	2.76
เนื้อหมู 50 กรัม	60.02	2.87

4.3 ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างที่นำมาคำนวณ : หมู 100 กรัม

$$p_i = 1.5 \text{ mbar} = 1.125 \text{ torr}$$

$$T_i = -23.2^\circ \text{C} = -9.76^\circ \text{F} = 449.91 \text{ R}$$

$$T_s = 79.5^\circ \text{C} = 175.1^\circ \text{F}$$

$$A = 0.036 \text{ m}^2 = 0.3875 \text{ ft}^2$$

$$k_d = 5 \times 10^{-2} \text{ BTU h}^{-1} \text{ ft}^{-1} \text{ }^\circ \text{F}^{-1}$$

$$k_i = 1 \text{ BTU h}^{-1} \text{ ft}^{-1} \text{ }^\circ \text{F}^{-1}$$

$$c = 3.14 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$h_s = 600 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$k = 1.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$L = 2.56 \times 10^5 \text{ J/kg}$$

$$m = 0.1 \text{ kg}$$

$$\text{ความชื้นก่อนอบ} = 60.02 \%$$

$$m_f = 1.5013$$

$$\text{ความชื้นหลังอบ} = 2.87 \%$$

$$m_0 = 0.0295$$

$$\rho = 1090 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{จุดเยือกแข็งของเนื้ออยู่ที่ } -2^\circ \text{C}$$

คำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการแช่แข็งเนื้อหมู 100 กรัม

$$\text{จาก } Q_{\text{freezing}} = mc\Delta T$$

$$Q_{\text{freezing}} = 0.1 \times 3.14 \times (28.7 - (-40))$$

$$Q_{\text{freezing}} = 21.5718 \text{ kJ}$$

คำนวณหาค่า product load ของการแช่แข็งเนื้อหมู

$$\text{product load} = \frac{mc\Delta T}{\text{chilling time in second}}$$

$$\text{product load} = \frac{21.5718}{5(3600)} = 1.198 \times 10^{-3} \text{ kW}$$

หาเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งของเนื้อหมู

$$t_F = \frac{L\rho}{T_F - T_a} \left[\frac{Pa}{h_s} + \frac{Ra^2}{k} \right]$$

ในกรณีที่วัตถุมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ $P = 1/6; R = 1/24$

$$\therefore t_F = \frac{(2.56 \times 10^5)(1090)}{(-2 - (-40))} \left[\frac{0.01(60)}{6(600)} + \frac{0.01^2(60)}{24(1.6)} \right]$$

$$\therefore t_F = 2371 \text{ sec} = 0.6587 \text{ hrs}$$

คำนวณหาค่าอัตราการระเหิดสูงสุด

$$\text{จาก } G_{\text{max}} = \frac{K_1 A p_i}{\sqrt{T_i}} = \frac{2447 A p_i}{\sqrt{T_i}}$$

$$\therefore G_{\max} = \frac{(2447)(0.3875)(1.125)}{\sqrt{449.91}} = 50.2917 \text{ lb/hr}$$

$$\therefore G_{\max} = 22.8119 \text{ kg/hr}$$

หาค่าพลังงานที่ต้องการในการระเหิด

จาก $q = G_{\max} (h_g - h_i)$ ที่ $T_i = -23.2^\circ \text{C}$

$$\therefore q = (22.8119)(2838.66) = 64755.228 \text{ kJ/hr}$$

หาเวลาที่ใช้ในการระเหิด

จาก $t_d = \frac{L^2 \rho (m_0 - m_f) \Delta H_s}{8k_d (T_s - T_i)}$ เมื่อ $L^2 = 1.076391 \times 10^{-3} \text{ ft}^2$
และ $\rho = 68.04648 \text{ lb/ft}^3$

$$\therefore t_d = \frac{(1.07639 \times 10^{-3})(68.04648)(1.5013 - 0.0295)(1220.6238))}{8(5 \times 10^{-2})(175.1 - (-9.76))}$$

$$\therefore t_d = 1.78 \text{ hr}$$

การคำนวณค่าไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

การใช้ไฟฟ้าในการแช่แข็งเนื้อหมูเป็นเวลา 5 ชม. อยู่ที่ 15 หน่วย (วัดจากมิเตอร์ไฟฟ้า)

การใช้ไฟฟ้าในการเดินเครื่องขณะอบแห้งเป็นเวลา 6 ชม. อยู่ที่ 3.45 หน่วย (วัดจากมิเตอร์ไฟฟ้า)

การใช้ไฟฟ้าของปั๊มสุญญากาศขณะทำการอบแห้ง โดยปั๊มมีกำลังไฟ 750 Watt เดินเครื่องเป็นเวลา 6 ชม. ใช้ไฟฟ้าไป 4.5 หน่วย

จำนวนไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการทำการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งของสาหร่ายนั้น อยู่ที่ 22.95 หน่วย และการคำนวณค่าไฟฟ้าซึ่งอัตราการคิดค่าใช้ไฟฟ้าที่ใช้นั้น อ้างอิงจากการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งได้ผลดังตาราง 10 ดังนี้

ตาราง 10 ตารางแสดงผลการคำนวณค่าไฟฟ้าของสหราชอาณาจักร ที่ออกแบบแบบแซ่เยือกแข็ง โดยมีสารซิลิกาเจลกับน้ำแข็งแห้งเป็นสารดักจับไอน้ำ

ค่าพลังงานไฟฟ้า	ราคาต่อหน่วย (บาท)	จำนวนหน่วยที่คิด (หน่วย)	คิดเป็นเงิน (บาท)
5 หน่วยแรก	0	5	0
10 หน่วยต่อไป(หน่วยที่ 6-15)	1.3576	10	13.576
10 หน่วยต่อไป(หน่วยที่ 16-25)	1.5445	7.95	12.279
รวม		22.95	25.855
ค่าไฟฟ้า F_t	0.8544	22.95	19.61
รวม		22.95	45.465

สำหรับค่าไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งวัตถุดิบแบบแซ่เยือกแข็งแต่ละชนิดนั้น ได้ผลตามตาราง 11 และ 12

ตาราง 11 ตารางแสดงจำนวนหน่วยและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งแบบแซ่เยือกแข็งวัตถุดิบแต่ละชนิด โดยมีสารซิลิกาเจลและน้ำแข็งแห้งในการดักจับไอน้ำ

ประเภทของวัตถุดิบ	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (หน่วย)	ค่าไฟฟ้าที่ใช้ (บาท)
เนื้อหมู 300 กรัม	33.55	73.05
เนื้อไก่ 300 กรัม	29.575	62.51
เนื้อกุ้ง 300 กรัม	30.9	66.02
กล้วย 300 กรัม	32.225	69.54
ขนุน 300 กรัม	25.6	51.97
แอปเปิ้ล 300 กรัม	29.575	62.51
สหราชอาณาจักร 300 กรัม	30.9	66.02

ตาราง 12 ตารางแสดงจำนวนหน่วยและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งวัตถุดิบแต่ละชนิด โดยมีสารโมเลกุลลาซีฟในการดักจับไอน้ำ

ประเภทของวัตถุดิบ	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (หน่วย)	ค่าไฟฟ้าที่ใช้ (บาท)
เนื้อหมู 100 กรัม	22.95	45.46
แอปเปิ้ล 100 กรัม	24.275	48.64
เนื้อหมู 50 กรัม	20.3	39.11

สำหรับอัตราการระเหิดและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ นั้น มีค่าตามตาราง 13 ดังต่อไปนี้

ตาราง 13 ตารางแสดงค่าอัตราการระเหิดและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ต่างๆ

ชนิดของวัตถุดิบ	$G_{\max}$ Kg/hr	q KJ/hr
หมู 300 กรัม	73.4831	208,587.658
กุ้ง 300 กรัม	55.5616	157,741.327
ไก่ 300 กรัม	71.9507	204,245.013
กล้วย 300 กรัม	66.4608	188,639.012
ขนุน 300 กรัม	63.4829	180,227.001
สาหร่าย 300 กรัม	62.4233	177,220.997
แอปเปิ้ลเขียว 300 กรัม	60.3518	171,257.889
หมู 100 กรัม	23.3610	64,755.228
แอปเปิ้ลเขียว 100 กรัม	27.2038	77,216.082
หมู 50 กรัม	21.0526	59,787.279

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองการอบแห้งวัตถุดิบต่างๆโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ผลที่ได้จากการอบดังที่ได้กล่าวในบทที่ 4 นั้น จะเห็นได้ว่า เครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น สามารถที่จะอบแห้งวัตถุดิบต่างๆได้ โดยผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ได้จากการอบนั้น มีค่าความชื้นหลังการอบอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ตามทฤษฎี นั่นคือ อยู่ในช่วง 3 - 5 % ของน้ำหนักตัวของวัตถุดิบหลังทำการอบ และโครงสร้างที่เกิดขึ้นหลังทำการอบแห้งนั้น จะสังเกตได้ว่า เมื่อนำเนื้อสัตว์ในการอบแห้ง โครงสร้างโดยทั่วไปจะไม่มีเปลี่ยนแปลง มีเพียงสีของผลิตภัณฑ์นั้นที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สำหรับผลไม้ที่นำมาอบแห้งนั้น โครงสร้างจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย นั่นคือเนื้อผลิตภัณฑ์เกิดการยุบตัวลง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการ melt ขณะที่ทำการอบแห้ง ทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์นั้นเกิดการเสียรูปไป สาเหตุนั้น อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งนั้นสูงเกินไป ส่วนสีของผลไม้ที่เกิดจากการอบแห้งนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดย กลัวย และแอปเปิ้ล จะมีสีที่เข้มขึ้น แต่ขนุนนั้นมีสีที่ซีดลง

สำหรับสารดักจับไอน้ำที่ใช้ในการทดลองอันได้แก่ ซิลิกาเจล และ molecular sieves นั้น เมื่อนำซิลิกาเจลในการดักจับไอน้ำที่เกิดจากการอบแห้ง ซิลิกาเจลไม่สามารถดักจับไอน้ำได้เลย ทั้งนี้ทั้งนั้น เนื่องจากเมื่ออยู่ในสภาวะความดันต่ำจนเกือบสูญญากาศ ซิลิกาเจลมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของการจับไอน้ำ นั่นคือ เกิดการคายน้ำแทนการดักจับไอน้ำ อันจะเป็นผลให้ปั๊มสูญญากาศนั้นเกิดความเสียหาย จึงไม่สามารถที่จะนำมาใช้ในการดักจับไอน้ำ สำหรับ molecular sieves นั้น เมื่อนำมาทดลอง สามารถดักจับไอน้ำขณะที่ทำการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างไอน้ำที่ดักจับได้กับน้ำหนักของ molecular sieves ที่นำมาใช้ก่อนที่จะทำการอบนั้น molecular sieves สามารถที่จะดักจับไอน้ำได้ร้อยละ 8 - 12 % ของน้ำหนักแห้งของ molecular sieves เริ่มต้นก่อนทำการอบแห้ง นั้นแสดงให้เห็นถึง molecular sieves นั้น สามารถที่จะดักจับไอน้ำที่เกิดจากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

5.2 ปัญหาที่พบขณะดำเนินการวิจัย

ความดันของเครื่องอบแห้งเป็นปัญหาหลักที่เกิดขึ้น เนื่องจากเกิดการรั่วเข้าของอากาศตามข้อต่อของเครื่องอบแห้ง อีกทั้งส่วนของชุดดักจับไอน้ำที่ได้ออกแบบนั้น ทำให้เกิดความดันตกเป็นผลให้ความดันที่เกิดขึ้นนั้น ขณะที่ทำการเดินเครื่อง 3 นาทีแรก มีค่ามากกว่า 3 mbar ซึ่งมีผล

ต่อการอบแห้งวัตถุดิบ ทำให้โครงสร้างของวัตถุดิบนั้นเกิดความเสียหายได้ จึงได้มีการแก้ไขแบบของชุดดักจับไอน้ำ โดยได้มีการแก้ไขมาตลอดจนสามารถที่ทำความดันให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยความดันต่ำสุดที่ทำได้นั้นอยู่ที่ 0.355 mbar

5.3 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

ผลจากการวิจัยนั้น จะเห็นได้ว่าเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น สามารถที่จะนำไปใช้ในการอบแห้งวัตถุดิบต่างๆ โดยอาศัยสารดักจับไอน้ำในการดักจับไอน้ำที่เกิดขึ้นแทนการใช้คอนเดนเซอร์ในการจับไอน้ำ ซึ่งสารดักจับไอน้ำนั้นสามารถที่จะนำไปอบแล้วนำมาใช้ใหม่ได้ เป็นการลดการใช้พลัง อีกทั้งยังเป็นการช่วยในการลดสภาวะโลกร้อนทางอ้อมด้วยในอนาคตอาจจะมีการนำเอาเครื่องต้นแบบนี้ ไปพัฒนาเพื่อใช้ในเชิงอุตสาหกรรมการเกษตรจริงได้ หรือทำการปรับปรุงเพื่อใช้ในการวิจัยต่อไป ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยการพัฒนาขึ้น เพื่อให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น อาจทำได้โดยการเพิ่มขนาดของปั๊มสุญญากาศ เพื่อแก้ไขปัญหาลดลงของความดัน และการเพิ่มขนาดของชุดดักจับไอน้ำ เพื่อให้สามารถดักจับไอน้ำได้เพียงพอต่อการอบแห้งในการอบแห้ง

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- ¹กิตติพันธ์ สุนทราศรี และคณะ. (2543). เครื่องอบแห้งแบบระเหิด, วิทยานิพนธ์ (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ²ภัทราพร สุวรรณกิจบริหาร. (2540-2541). การศึกษาการทำแห้งผลไม้จาก Freezed Dryer, โครงการวิศวกรรมอาหาร สาขาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ³พิชัย อัสภูมิมงคล. (2546). การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบระเหิดน้ำ, โครงการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารตามนโยบายหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์จังหวัดนครนายก. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- ⁴รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มนิต. (2535). วิศวกรรมแปรรูปอาหาร : การถนอมอาหาร. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 121-137.
- ⁵วันเพ็ญ นิลสนธิ และคณะ. (2540). การทำแห้งในสภาพแช่แข็งเพื่อการถนอมอาหาร, งานวิจัยสำหรับหลักสูตรวิทยานิพนธ์ สาขาเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ⁶สมชาย โสภณรณฤทธิ์. (2532). การอบแห้ง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ⁷C.T.Kiiranoudis Z.B.Maroulis และ D.Marinou-Kouris, (1992) Drying Kinetics of Onion and Green Pepper, Drying Technology, Greece, p.995-1011
- ⁸Georg – Wilhelm Oetjen. (1999). Freeze-Drying, pp. 1-21, 58-119, 237-247.
- ⁹S. A. Goldblith; L. Rey; W. W. Rothmayr. (1975). Freeze Drying and Advanced Food Technology, pp. 177-196.
- ¹⁰<http://www.patentstorm.us/patents/5035065-description.html> สืบค้นเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2551
- ¹¹<http://www.patentstorm.us/patents/6470592-description.html> สืบค้นเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2551

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก	ตารางผลการทดลอง
ภาคผนวก ข	คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย
ภาคผนวก ค	แบบ Drawing ต่างๆของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ภาคผนวก ก
ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 14 ตารางแสดงผลการทดลองการอบเนื้อหมู น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ

เวลา(นาที)	ความดันภายในห้องอบ(mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate(°C)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์ จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 1(°C)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์ จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 2 (°C)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์ จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 3 (°C)
1	9.5	41	13	13	14
2	1.95	45	12	13	12
3	1.75	52	9	12	11
4	1.7	61	8	8	5
5	1.65	63	5	6	4
6	1.65	63	2.7	3	0.2
7	1.65	62	1.1	1.8	-0.7
8	1.6	61	-0.1	0.5	-2.2
9	1.6	60	-0.6	-0.7	-4
10	1.6	59	-1.7	-1.5	-4.8
11	1.6	58	-2.3	-2.4	-6.1
12	1.6	56	-3.2	-3.1	-6.7
13	1.55	55	-3.7	-3.8	-7.5
14	1.55	53	-4.4	-4.4	-8.1
15	1.55	52	-4.7	-4.7	-8.6
16	1.55	51	-5	-5	-8.7
17	1.55	50	-5.4	-5.5	-9.1
18	1.55	49	-5.7	-5.8	-9.2
19	1.55	48	-5.9	-6	-9.4
20	1.55	47	-6.2	-6.4	-9.6
21	1.55	47	-6.5	-6.6	-9.8
22	1.55	46	-6.7	-6.9	-9.8
23	1.55	45	-6.9	-7	-9.8
24	1.55	49	-7.1	-7.2	-9.9
25	1.55	50	-7.2	-7.4	-10
26	1.55	52	-7.4	-7.6	-10.1
27	1.55	52	-7.5	-7.7	-10.3
28	1.55	54	-7.7	-7.9	-10.5
29	1.55	53	-7.8	-8	-10.6
30	1.55	53	-7.9	-8.1	-10.7
35	1.5	51	-8.4	-8.6	-10.7
40	1.5	49	-8.7	-8.9	-11
45	1.5	51	-9.1	-9.3	-11.2
50	1.5	51	-9.3	-9.5	-11.5
55	1.5	48	-9.4	-9.6	-11.4
60	1.5	52	-9.3	-9.4	-12.5

เวลา(นาที)	ความดันภายใน ห้องอบ(mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
		heating	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
		plate(°C)	จาก เทอร์โมคัป ดปิลตัวที่ 1(°C)	จาก เทอร์โมคัป ดปิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดปิลตัวที่ 3 (°C)
65	1.55	53	-9.3	-9.6	-13.7
65	1.55	53	-9.3	-9.6	-13.7
70	1.5	55	-9.8	-10	-14.1
75	1.5	49	-9.8	-10	-13.7
80	1.5	52	-9.8	-10	-13.3
85	1.5	49	-10.1	-10.3	-13.2
90	1.5	55	-10.3	-10.4	-13.4
95	1.5	50	-10.3	-10.5	-13.5
100	1.5	56	-10.5	-10.7	-13.5
105	1.5	55	-10.8	-11	-14.3
110	1.5	57	-10.8	-11	-14.3
115	1.5	55	-10.8	-11.1	-14.5
120	1.5	58	-10.8	-11	-14.6
125	1.5	54	-10.6	-10.8	-14.4
130	1.5	63	-10.7	-10.9	-14.9
135	1.5	62	-11.1	-11.3	-16
140	1.5	61	-11.1	-11.4	-16.2
145	1.5	64	-11.3	-11.5	-16.5
150	1.5	60	-11.2	-11.4	-16.6
155	1.5	61	-11.4	-11.6	-16.9
160	1.5	68	-11.1	-11.5	-17
170	1.5	70	-11.5	-11.9	-18.2
180	1.5	63	-11.8	-12.2	-18.5
190	1.5	62	-12.1	-12.5	-18.1
200	1.5	61	-12.2	-12.7	-18.6
210	1.5	63	-12.2	-12.7	-18.3
220	1.5	63	-12.1	-12.8	-18.4
230	1.5	65	-11.8	-12.7	-18.3
240	1.5	63	-11.5	-12.6	-18.1
250	1.5	64	-11.3	-12.6	-17.9
260	1.5	61	-11.5	-12.8	-18.4
270	1.55	80	-10.8	-12.1	-18.5
280	1.5	74	-11.3	-13	-21.3
480	1.65	80	-4.6	-11.1	-18.2
510	1.65	85	-1.7	-10.3	-17
540	1.65	72	0	-10.1	-12.3
570	1.75	78	4.4	-6.9	-6.2
600	1.75	78	8.7	-4.3	0.7
630	1.75	68	10.4	-3.3	7.4
660	1.8	81	15.3	0.4	13.5
690	1.8	72	19.4	7.2	26.3

เวลา(นาที)	ความดันภายใน ห้องอบ(mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
		heating	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
		plate(°C)	จาก เทอร์โมคัป ดปิลตัวที่ 1(°C)	จาก เทอร์โมคัป ดปิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดปิลตัวที่ 3 (°C)
720	1.8	70	24.7	20.2	34.9
750	1.8	62	31.5	28.8	38.4
780	1.8	61	34.7	31.5	40.3
810	1.75	50	35.8	33.3	40.9
840	1.75	51	36.1	34.5	41.1

ตารางที่ 15 ตารางแสดงผลการทดลองการอบเนื้อไก่ น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ

เวลา(นาที)	ความดันภายในห้องอบ(mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์
		plate(°C)	จาก เทอร์โม	จาก เทอร์โม	จาก เทอร์โม
			คัปเปิลตัวที่ 1 (°C)	คัปเปิลตัวที่ 2 (°C)	คัปเปิลตัวที่ 3 (°C)
1	4.75	60	13.4	14.2	19
2	1.55	59	12.3	14.8	16.3
3	1.5	58	10.8	12.2	11.5
4	1.45	59	8.5	10.2	8.9
5	1.45	61	7	8.3	5.3
6	1.45	62	5.1	6.3	2.3
7	1.4	61	3.2	4.4	0.4
8	1.4	60	1.4	2.7	-2.5
9	1.35	59	-0.4	1	-4.4
10	1.35	58	-1.9	-0.7	-6.2
11	1.35	57	-2.9	-1.9	-7.2
12	1.35	59	-3.8	-3	-8.7
13	1.33	61	-5.1	-4	-9.7
14	1.33	62	-5.7	-4.9	-10.9
15	1.32	61	-6.8	-5.7	-11.6
16	1.31	61	-7.4	-6.6	-12.6
17	1.3	60	-8.2	-7.2	-13.1
18	1.3	59	-8.8	-8	-13.9
19	1.3	60	-9.4	-8.5	-14.4
20	1.3	61	-10	-9	-14.8
21	1.3	61	-10.3	-9.4	-15.3
22	1.3	63	-10.8	-9.8	-15.6
23	1.3	65	-11.1	-10.1	-16
24	1.3	66	-11.5	-10.5	-16.3
25	1.3	65	-11.8	-10.8	-16.6
26	1.3	64	-12.2	-11.2	-17
27	1.3	63	-12.5	-11.5	-17.2
28	1.3	62	-12.9	-11.7	-17.4
29	1.3	61	-13	-11.9	-17.5
30	1.3	61	-13.3	-12.1	-17.6
31	1.3	63	-13.4	-12.3	-17.5
32	1.3	65	-13.5	-12.5	-17.8
33	1.3	65	-13.6	-12.6	-17.9
34	1.3	68	-13.7	-12.7	-18
35	1.31	70	-13.8	-12.8	-18.2
36	1.31	71	-14	-12.9	-18.3

เวลา(นาที)	ความดันภายใน ห้องอบ(mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
		heating	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
		plate(°C)	จาก เทอร์โม คัมเบิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โม คัมเบิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โม คัมเบิลตัวที่ 3 (°C)
37	1.31	71	-14.1	-13	-18.5
38	1.31	73	-14.2	-13.1	-18.6
39	1.31	74	-14.3	-13.2	-18.8
40	1.31	73	-14.4	-13.3	-18.9
41	1.31	72	-14.5	-13.4	-19.1
42	1.31	71	-14.7	-13.5	-19.2
43	1.31	70	-14.7	-13.6	-19.3
44	1.31	72	-14.8	-13.7	-19.4
45	1.31	72	-14.9	-13.8	-19.4
46	1.31	72	-15	-13.8	-19.5
47	1.31	74	-15	-13.9	-19.6
48	1.33	76	-15.1	-13.9	-19.7
49	1.33	76	-15.2	-14	-19.9
50	1.33	75	-15.3	-14.1	-19.9
51	1.33	74	-15.4	-14.2	-20.1
52	1.33	73	-15.5	-14.3	-20.1
53	1.33	71	-15.6	-14.4	-20.2
54	1.33	71	-15.7	-14.5	-20.2
55	1.33	74	-15.7	-14.5	-20.2
56	1.35	74	-15.7	-14.5	-20.3
57	1.35	74	-15.7	-14.6	-20.3
58	1.35	73	-15.8	-14.7	-20.4
59	1.33	71	-15.8	-14.7	-20.3
60	1.33	70	-16	-14.9	-20.4
65	1.32	72	-16.3	-15.3	-20.5
70	1.32	74	-16.6	-15.5	-20.7
75	1.32	73	-16.8	-15.7	-20.9
80	1.3	69	-17	-15.9	-21.1
85	1.3	72	-17	-15.9	-20.9
90	1.31	75	-16.9	-15.9	-20.9
95	1.3	74	-16.8	-15.8	-20.6
100	1.31	76	-16.7	-15.7	-20.6
105	1.3	75	-16.6	-15.7	-20.4
110	1.3	76	-16.3	-15.5	-20.4
115	1.3	76	-16.2	-15.5	-20
120	1.29	77	-16.2	-15.7	-20
125	1.3	79	-16.2	-15.8	-20.4
130	1.3	77	-16.3	-16	-20.4
135	1.3	79	-16.4	-16.3	-20.8
140	1.31	84	-16.9	-16.8	-21.5

เวลา(นาที)	ความดันภายใน ห้องอบ(mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
		heating	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
		plate(°C)	จาก เทอร์โม คัมเบิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โม คัมเบิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โม คัมเบิลตัวที่ 3 (°C)
145	1.32	82	-17.9	-17.9	-22.3
150	1.32	81	-17.9	-17.9	-22
155	1.33	86	-18.1	-18.2	-22.4
160	1.33	80	-18.3	-18.5	-22.3
165	1.35	94	-17.6	-18.2	-21.9
170	1.35	102	-17.8	-18.5	-23.1
175	1.35	89	-18.5	-18.8	-23.6
180	1.35	82	-19.1	-19	-23
185	1.35	77	-19	-18.8	-22.1
190	1.33	71	-18.9	-18.5	-21
200	1.32	74	-18.5	-18.1	-19.9
205	1.31	79	-17.8	-17.5	-18.8
210	1.3	79	-17.4	-17	-18.4
215	1.3	77	-17.2	-16.6	-17.5
220	1.3	81	-16.5	-16	-16.9
225	1.29	77	-16.6	-15.7	-16.4
230	1.29	79	-16.3	-15.2	-15.8
235	1.29	80	-16	-14.8	-15.3
240	1.28	81	-15.7	-14.5	-14.9
250	1.3	74	-15.2	-13.3	-13.9
260	1.28	76	-14.4	-12.2	-12.7
270	1.32	98	-12.2	-10.5	-11.5
280	1.33	83	-12.8	-10.5	-12.2
290	1.31	73	-12.7	-9.7	-10.2
300	1.28	71	-11.7	-8.6	-8.4
310	1.27	74	-10.4	-7.3	-6.7
320	1.26	74	-9.1	-6.2	-5.1
330	1.24	64	-7.9	-4.8	-3.5
340	1.24	75	-6.7	-3.9	-2.1
350	1.24	73	-5.2	-2.6	-0.8
360	1.23	77	-3.5	-1.3	0.3
370	1.23	75	-2.3	-0.1	1.1
380	1.23	76	-0.5	1.4	2.7
390	1.22	76	1.6	3.3	4.4
400	1.2	71	3.5	4.8	5.7
410	1.19	70	4.9	6	6
420	1.18	74	7.2	7.7	7.1
430	1.15	69	9.6	9.4	10
440	1.13	69	11.5	10.8	11.5
450	1.11	69	13.3	12	12.7

เวลา(นาที)	ความดันภายใน ห้องอบ(mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
		heating	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
		plate(°C)	จาก เทอร์โม คัมเบิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โม คัมเบิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โม คัมเบิลตัวที่ 3 (°C)
460	1.06	65	14.2	12.8	13.8
470	1.07	68	16.6	14.2	15.2
480	1.06	68	18.3	15.3	16.7
490	1.04	68	19.5	16.1	17.9
500	1.04	71	21.7	17.5	19
510	1.01	66	22.3	17.9	19.5
520	0.99	62	23	18.8	20.9
530	0.98	63	24.6	20.2	22.8
540	0.95	58	25.6	21	24.1
550	0.94	59	27	22.1	25.6
560	0.93	58	27.9	23.2	27
570	0.92	53	28.4	23.8	27.7
600	0.88	54	30.3	25.9	29.9
630	0.85	52	31.2	27.4	31.4
660	0.83	54	31.7	28.7	32.2

ตารางที่ 16 ตารางแสดงผลการทดลองการอบเนื้อกุ้ง น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ

เวลา (นาที)	ความดันภายในห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตรภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 3 (°C)
2	2.55	54.6	13	25	14
3	1.65	55.7	11.4	23.6	11.9
4	1.55	56.1	10.3	22.6	9.4
5	1.5	55.9	8	21.6	7.6
6	1.5	55.1	5.4	20.5	5
7	1.5	55	3.6	19.1	1.8
8	1.5	55.5	1.3	17.8	0.1
9	1.5	55.4	0	16.7	-2
10	1.5	56.9	-1.9	15.5	-3.6
11	1.45	58.4	-3.2	14	-5.9
12	1.45	59.1	-4.5	13.1	-6.8
13	1.45	58.9	-5.6	11.8	-8.6
14	1.45	58.7	-7	10.6	-9.7
15	1.45	59.9	-7.6	9.7	-10.9
16	1.45	62.5	-8.6	8.7	-11.7
17	1.45	63.8	-9.4	7.6	-13.1
18	1.45	64.4	-10.1	6.7	-13.7
19	1.45	63.9	-10.7	6	-14.7
20	1.45	64.5	-11.2	5.1	-15.3
21	1.45	67.4	-11.8	4.3	-16.1
22	1.45	69	-12.2	3.8	-16.9
23	1.45	69	-12.6	2.8	-17.5
24	1.45	68.1	-13.1	2.3	-18.2
25	1.45	68.8	-13.4	1.7	-18.6
26	1.45	71.1	-13.6	1	-19.1
27	1.45	71.7	-14.1	0.3	-19.7
28	1.45	71	-14.4	-0.1	-20.2
29	1.45	71.4	-14.7	-0.8	-20.7
30	1.45	73	-14.9	-1.3	-21.1
31	1.45	73.5	-15.2	-2	-21.6
32	1.45	73	-15.5	-2.5	-22
33	1.45	74.3	-15.8	-2.9	-22.2
34	1.45	76.1	-16	-3.5	-22.8
35	1.45	76.2	-16.3	-4.2	-23.1
36	1.45	75.2	-16.6	-4.6	-23.6
37	1.45	77.1	-16.8	-5.1	-23.9
38	1.45	80.6	-17	-5.6	-24.4

เวลา (นาที)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 3 (°C)
39	1.45	81.8	-17.3	-6.3	-24.8
40	1.5	81.3	-17.6	-6.9	-25.4
41	1.5	79.6	-18	-7.6	-25.8
42	1.5	79.2	-18.2	-8	-26.2
43	1.5	78.7	-18.4	-8.4	-26.3
44	1.5	77.7	-18.7	-8.9	-26.5
45	1.5	76.2	-18.9	-9.3	-26.9
46	1.5	76.3	-19.1	-9.6	-27
47	1.5	76.6	-19.2	-9.9	-27.2
48	1.5	75.9	-19.4	-10.2	-27.4
49	1.5	75.2	-19.6	-10.4	-27.5
50	1.5	76	-19.6	-10.6	-27.5
51	1.5	76.2	-19.8	-10.8	-27.7
52	1.5	75.2	-19.9	-11.1	-27.7
53	1.5	75.1	-20	-11.3	-27.8
54	1.5	76	-20.1	-11.5	-27.9
55	1.5	76	-20.1	-11.6	-28
56	1.5	74.9	-20.2	-11.8	-28
57	1.5	75.2	-20.3	-12	-28.1
58	1.5	76	-20.4	-12.2	-28.2
59	1.5	75.6	-20.5	-12.3	-28.3
60	1.5	74.6	-20.6	-12.5	-28.4
70	1.5	76.3	-21.2	-13.2	-28.8
80	1.5	75.6	-20.4	-13.5	-28.9
90	1.5	76.3	-20.3	-13.8	-28.9
100	1.5	74.8	-20.5	-14.1	-29
110	1.5	75.2	-20.8	-14.5	-29.1
120	1.5	75.7	-21.6	-15.4	-29.7
130	1.5	75.3	-21.7	-15.6	-29.6
140	1.45	74.8	-22.8	-16.9	-30.5
150	1.45	75.6	-22.8	-17	-30.7
160	1.45	76	-22.4	-16.6	-30
170	1.45	75.1	-22.1	-16.4	-29.9
180	1.5	76	-21.9	-16.2	-29.5
190	1.5	74.9	-22.4	-16.8	-30.2
200	1.45	75.9	-22.9	-17.4	-30.3
210	1.45	74.7	-22.9	-17.4	-30.5
220	1.45	75.9	-22.8	-17.4	-30.1
230	1.45	75.6	-23	-17.7	-30.1
240	1.45	75.4	-23	-17.8	-29.9
255	1.45	75.5	-22.9	-18	-29.7

เวลา (นาที)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วี่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วี่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วี่ 3 (°C)
270	1.45	75.9	-23.3	-18.2	-29.6
285	1.45	75.1	-23.7	-18.5	-29.6
300	1.45	76	-23.1	-18	-29.3
315	1.45	76.2	-22.8	-17.6	-28.5
330	1.5	75.9	-22.7	-17.4	-28.3
345	1.5	75.1	-22.5	-17.4	-28.1
360	1.5	75.2	-23	-17.8	-28.1
390	1.45	75.1	-22.6	-17.8	-28.4
420	1.4	74.8	-21.8	-16.9	-27.4
450	1.4	75	-19.7	-14.6	-26.3
480	1.4	75.5	-18	-11.1	-24.9
510	1.4	75.7	-14.3	-2.6	-21
540	1.4	70.4	-9.7	9.9	-13.5
555	1.4	65.4	-5.7	15.5	-6
570	1.4	61.9	-2	19.7	2.5
585	1.4	62	1.2	23	8.7
600	1.4	62.4	4.4	25	13.4
615	1.4	62.5	7.4	26.3	16.4
630	1.4	62.3	10.5	26.9	18.3
645	1.4	62.5	14.4	27.3	20.1
660	1.32	63.1	19.1	27.6	22.3
675	1.32	68	27.2	27.7	25.4
690	1.4	62.2	32	28.3	27.5
720	1.35	62.5	34.5	28.8	31.2

ตารางที่ 17 ตารางแสดงผลการทดลองการอบกล้วย น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ

เวลา (นาทีก)	ความดันภายในห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตรภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 3 (°C)
1	12	52.9	16.3	15.5	11.3
2	2.05	53.1	15.9	14.1	10.7
3	1.6	52.4	15.3	11	8.4
4	1.55	51.3	14.8	8.3	6
5	1.5	50.3	14.3	6.5	4.4
6	1.5	49.4	13.7	4.3	2.9
7	1.5	50.1	13.2	2.8	0.9
8	1.5	50.6	12.8	1.1	-0.7
9	1.5	50.2	12.2	-0.2	-1.6
10	1.5	49.8	11.7	-1.5	-3.2
11	1.5	50.3	11.2	-2.5	-4
12	1.5	50.6	10.9	-3.7	-5.1
13	1.5	50.1	10.4	-4.4	-6
14	1.5	50	9.9	-5.3	-7
15	1.5	50.5	9.5	-5.9	-7.4
16	1.5	50.5	9.2	-6.6	-8.3
17	1.5	49.9	8.7	-7.2	-8.8
18	1.5	50	8.5	-7.7	-9.3
19	1.5	50.4	8.2	-8.1	-9.7
20	1.5	50.2	7.9	-8.5	-10.2
21	1.45	49.8	7.7	-8.8	-10.4
22	1.45	53.4	7.4	-9.1	-10.8
23	1.45	58.4	7.2	-9.4	-11
24	1.45	61	6.6	-9.6	-11.6
25	1.45	61.8	6.3	-10	-12.1
26	1.45	60.9	5.7	-10.3	-12.5
27	1.45	60	5.4	-10.5	-12.9
28	1.45	59.4	4.9	-10.8	-13.2
29	1.45	60.9	4.7	-11	-13.4
30	1.45	62	4.2	-11.2	-13.6
31	1.5	61.8	4	-11.3	-13.9
32	1.5	62	3.6	-11.4	-14.1
33	1.5	62.4	3.3	-11.6	-14.3
34	1.5	63.4	2.9	-11.8	-14.5
35	1.5	63.4	2.6	-11.8	-14.6
36	1.5	63.5	2.3	-12	-14.9
37	1.5	64.9	2.1	-12.1	-15

เวลา (นาที)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 3 (°C)
38	1.5	65.6	1.7	-12.2	-15.2
39	1.5	65.6	1.4	-12.4	-15.4
40	1.5	67.2	1.1	-12.5	-15.5
41	1.5	67.7	0.8	-12.6	-15.8
42	1.5	67	0.4	-12.7	-15.9
43	1.5	66.4	0.1	-12.9	-16.2
44	1.5	66.7	-0.2	-13	-16.3
45	1.5	67.2	-0.6	-13.2	-16.5
46	1.5	67.3	-0.9	-13.3	-16.7
47	1.5	67.8	-1.2	-13.4	-16.7
48	1.5	68	-1.4	-13.5	-16.9
49	1.5	67.7	-1.7	-13.6	-17
50	1.5	68.4	-2	-13.7	-17.2
51	1.5	68.8	-2.3	-13.7	-17.2
52	1.5	68.5	-2.5	-13.8	-17.5
53	1.5	68.3	-2.8	-13.9	-17.5
54	1.5	68	-3	-14	-17.6
55	1.5	68.3	-3.2	-14.1	-17.7
56	1.5	68.3	-3.4	-14.2	-17.8
57	1.5	67.9	-3.6	-14.3	-17.9
58	1.5	68.2	-3.8	-14.3	-18
59	1.5	69.1	-4	-14.4	-18.1
60	1.5	68.9	-4.1	-14.5	-18.2
70	1.5	68.5	-5.1	-14.7	-18.5
80	1.5	67.9	-5.9	-15	-18.8
90	1.5	68.6	-6.3	-15.2	-19
100	1.45	68.2	-6.9	-15.6	-19.3
110	1.45	68.9	-7.5	-15.8	-19.5
120	1.45	67.9	-7.6	-15.7	-19.5
130	1.45	68.5	-7.7	-15.5	-19.4
140	1.45	68.3	-7.9	-15.3	-19.3
150	1.4	68.8	-8	-15.2	-19.3
160	1.45	68.3	-7.7	-15	-19.2
170	1.45	68.5	-7.4	-14.5	-19
180	1.45	68.8	-7.4	-14.3	-18.7
190	1.45	68.3	-7.4	-14.1	-18.7
200	1.45	67.8	-7.4	-13.8	-18.4
210	1.45	67.8	-7.2	-13.5	-18.3
220	1.45	69	-7	-13	-17.8
230	1.45	68	-6.8	-12.6	-17.5
240	1.45	65.5	-6.9	-12.3	-17.5

เวลา (นาทีก)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตรภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 3 (°C)
255	1.45	65.6	-6.2	-12	-16.8
270	1.4	65.5	-6.3	-11.9	-16.7
285	1.45	65.4	-6.7	-11.9	-16.6
300	1.45	65.2	-6.8	-11.4	-16
315	1.4	65.6	-6.9	-11	-15.6
330	1.4	65.5	-7.7	-11.1	-15.5
345	1.4	65.3	-8.1	-10.4	-15.2
360	1.4	65.2	-8.2	-9.9	-14.6
390	1.4	65.7	-9.7	-8.4	-12.7
420	1.4	65.2	-10	-6.7	-10.7
450	1.4	65.4	-11	-4.3	-6.4
480	1.4	65	-12	-1.3	-1
510	1.4	65.5	-11	5	6.8
540	1.4	60.3	-7.3	11.1	11.7
555	1.4	60.4	-6.6	12.7	12.9
570	1.4	60.1	-6	14.6	14.2
585	1.35	55.6	-2.9	17.3	16.6
600	1.35	55.6	0.6	20	19
615	1.35	55	3.1	22.5	21.5
630	1.35	54.9	5.4	25	23.7
645	1.35	55.1	7.4	27.2	26
660	1.35	55.2	9.4	29.3	28.1
675	1.35	65.2	10.9	34.4	32.6
690	1.35	55.3	11.9	35	34.4
705	1.35	56.2	12.8	35.4	35.5
720	1.35	55.8	13.5	35.7	36.3
735	1.35	56.1	14.1	35.9	36.9
750	1.32	55.3	14.5	36	37.3
765	1.32	55.4	15.2	36	37.3
780	1.31	56	15.8	36.1	37.2

ตารางที่ 18 ตารางแสดงผลการทดลองการอบเปิดเขียว น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบ
แช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ

เวลา (นาท)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป ดบิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลตัวที่ 3 (°C)
1	1.9	61	12.9	13.3	15
2	1.65	61.5	9.7	10.2	8.6
3	1.6	60	6.4	7	6.3
4	1.55	59.5	4.7	5	3.7
5	1.55	58	2.4	3.5	2.4
6	1.55	56.7	0.3	1.6	0.1
7	1.5	54.9	-1.5	0.4	-1
8	1.5	54.9	-2.8	-0.8	-2.6
9	1.5	56.6	-4.6	-2.1	-3.4
10	1.5	57.9	-5	-3	-4.7
11	1.5	58.5	-6.4	-4.2	-5.6
12	1.5	57.7	-7.7	-5.7	-6.9
13	1.45	56.5	-8.9	-6.7	-7.5
14	1.45	56.3	-9.3	-7.3	-7.9
15	1.45	57.9	-9.9	-7.8	-7.9
16	1.45	58.4	-10.3	-8.4	-8.4
17	1.45	58.2	-11	-8.9	-8.7
18	1.45	57.5	-11.4	-9.6	-9.2
19	1.45	57.6	-11.8	-10	-9.5
20	1.45	58.5	-12.2	-10.4	-9.8
21	1.45	58.6	-12.6	-10.8	-10
22	1.45	58.2	-12.8	-11.1	-10.3
23	1.45	59.3	-12.9	-11.2	-10.4
24	1.45	60.4	-13	-11.3	-10.4
25	1.45	61	-13.2	-11.4	-10.5
26	1.45	60.3	-13.4	-11.6	-10.6
27	1.45	61	-13.5	-11.6	-10.6
28	1.45	62.2	-13.6	-11.6	-10.7
29	1.45	62.5	-13.7	-11.7	-10.8
30	1.45	62	-13.8	-11.7	-10.9
31	1.45	61.5	-14	-11.8	-11
32	1.45	62.5	-14	-11.7	-10.9
33	1.45	64	-14.1	-11.6	-11
34	1.45	63.7	-14.2	-11.6	-11
35	1.45	63.5	-14.2	-11.6	-11.1
36	1.45	64.4	-14.2	-11.6	-11.1
37	1.45	65.8	-14.2	-11.5	-11.1

เวลา (นาที)	ความดันภายในห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 3 (°C)
38	1.45	65.9	-14.3	-11.6	-11.2
39	1.45	64.8	-14.4	-11.6	-11.2
40	1.45	64.7	-14.4	-11.7	-11.3
41	1.45	65.8	-14.3	-11.7	-11.3
42	1.45	65.9	-14.2	-11.6	-11.4
43	1.45	65.8	-14.1	-11.6	-11.3
44	1.45	67.5	-13.8	-11.5	-11.3
45	1.45	67.5	-13.8	-11.5	-11.3
46	1.45	66.5	-13.7	-11.6	-11.4
47	1.45	66.9	-13.7	-11.6	-11.4
48	1.45	67.3	-13.6	-11.5	-11.4
49	1.45	68	-13.6	-11.6	-11.5
50	1.45	67.1	-13.6	-11.7	-11.5
51	1.45	67.9	-13.6	-11.7	-11.6
52	1.45	68.6	-13.6	-11.7	-11.6
53	1.45	68.3	-13.6	-11.8	-11.7
54	1.45	67.5	-13.7	-11.9	-11.7
55	1.45	68.5	-13.6	-11.9	-11.7
56	1.45	69.3	-13.5	-11.8	-11.6
57	1.45	69.1	-13.5	-11.9	-11.6
58	1.45	68	-13.5	-11.8	-11.6
59	1.45	68.3	-13.4	-11.7	-11.5
60	1.45	69.2	-13.3	-11.7	-11.5
70	1.45	69.2	-13	-11.6	-11.4
80	1.45	68.1	-12.7	-11.5	-11.2
90	1.45	68.8	-12.3	-11.2	-10.6
100	1.45	68.2	-11.9	-10.9	-10
110	1.5	67.7	-11.5	-10.4	-9
120	1.5	68.9	-11.3	-10.2	-8.9
130	1.5	68.8	-10.7	-9.8	-8.3
140	1.4	68.7	-11.1	-10.2	-8.8
150	1.4	67.7	-10.9	-10.1	-8.5
160	1.4	68.6	-10.5	-9.7	-8.2
170	1.4	68.8	-10.4	-9.7	-8
180	1.4	68.9	-10.5	-9.8	-8
195	1.4	68.3	-10.4	-9.7	-7.7
210	1.4	68.4	-9.8	-9	-7.2
225	1.4	68.9	-9.5	-8.7	-6.6
240	1.45	70.3	-9.1	-8.3	-6.1
255	1.4	69.9	-8.4	-7.7	-5.1
270	1.4	71	-7.8	-7.3	-4.9

เวลา (นาทึ)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 3 (°C)
285	1.4	71.1	-7.3	-6.9	-4
300	1.4	71.2	-6.5	-6.4	-3.6
330	1.4	71.1	-4.8	-5.5	-1.4
360	1.4	69.9	-1.8	-3.4	1.2
390	1.4	71	-0.1	-0.8	5.5
420	1.4	70.7	3.7	4.4	11.3
450	1.4	70.6	5.9	6.9	12.1
480	1.4	69.8	9.9	9.4	13.5
510	1.35	70.4	15.6	12.4	15.4
540	1.35	70.8	24.6	18.7	17.9
555	1.35	66	28.1	21.8	19.2
570	1.35	65.5	30.7	24.8	20.5
585	1.33	65.9	33.2	28.3	23.1
600	1.32	64.9	35.9	32.5	26.5
615	1.31	60	36.3	35.5	29
630	1.31	60.4	36.6	37.2	31.2
645	1.3	59.8	36.8	38.4	32.8
660	1.3	60.2	37.1	39.4	33.8

ตารางที่ 19 ตารางแสดงผลการทดลองการอบสําหรัย น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้

เวลา (นาทื)	ความดันภายในห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลติภัณท์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลติภัณท์	ผลติภัณท์	ผลติภัณท์
			จาก เทอร์โมคัับ ดบิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัับ ดบิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัับ ดบิลตัวที่ 3 (°C)
2	2.25	40.4	34.8	29	29.5
3	1.7	40	30.2	25	27.1
4	1.6	39.4	27	20.8	22.6
5	1.55	38.9	22.1	17.3	20.2
6	1.5	40.3	19.1	13.7	16
7	1.4	44.7	14.4	9.7	12.7
8	1.4	45.7	11.4	6.3	6.6
9	1.35	46.1	9	4.3	6.7
10	1.32	46	6.9	2.2	3.4
11	1.3	45.3	5	0	2.1
12	1.28	44.6	3.4	-1.8	-0.3
13	1.26	44.7	1.7	-3.4	-1.7
14	1.26	46.6	0.8	-4.6	-3.4
15	1.25	48.2	-0.3	-5.8	-4.7
16	1.25	48.7	-1.5	-6.9	-5.7
17	1.25	48.4	-2.3	-8	-7.1
18	1.24	47.9	-3.1	-8.9	-7.9
19	1.24	46.9	-3.9	-9.7	-9.1
20	1.24	45.8	-4.6	-10.6	-9.8
21	1.23	45	-5.1	-11	-10.5
22	1.23	45.6	-5.6	-11.7	-11
23	1.23	48.3	-6	-12	-11.5
24	1.24	51.1	-6.6	-12.6	-12.1
25	1.24	52.3	-7	-13	-12.7
26	1.24	52.4	-7.4	-13.7	-13.2
27	1.24	51.8	-7.8	-14.1	-13.7
28	1.23	51.1	-8.2	-14.6	-14.1
29	1.23	50.1	-8.5	-14.9	-14.6
30	1.23	49.7	-8.7	-15.2	-14.8
31	1.2	51.7	-8.8	-15.5	-15
32	1.25	54.5	-9	-15.7	-15.3
33	1.25	55.5	-9.3	-16.1	-15.6
34	1.25	55.5	-9.6	-16.3	-16
35	1.25	54.8	-9.8	-16.7	-16.2
36	1.25	53.8	-10.2	-16.9	-16.6
37	1.25	55.4	-10.4	-17.1	-16.6
38	1.25	59.6	-10.5	-17.2	-16.9

เวลา (นาที)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 3 (°C)
39	1.28	63	-11.5	-17.6	-17.2
40	1.28	63.8	-11.2	-17.8	-17.5
41	1.28	63.5	-11.5	-18.2	-17.8
42	1.28	62.6	-11.8	-18.4	-18.1
43	1.28	61.5	-12.2	-18.7	-18.4
44	1.28	62.1	-12.4	-18.9	-18.7
45	1.29	65.1	-12.5	-19	-18.8
46	1.3	67.4	-12.9	-19.2	-19.2
47	1.3	67.5	-13.2	-19.7	-19.5
48	1.3	66.9	-13.5	-19.9	-19.7
49	1.3	65.1	-13.7	-20.1	-20.1
50	1.3	65.6	-14	-20.2	-20.2
51	1.31	68.9	-13.7	-20.5	-20.4
52	1.31	71.7	-14.5	-20.8	-20.7
53	1.32	72	-15	-21.2	-21.2
54	1.31	71.5	-15.2	-21.4	-21.4
55	1.32	70.1	-15.7	-21.8	-21.6
56	1.32	69.1	-16	-22.1	-22
57	1.32	70.5	-16.1	-22.2	-22.1
58	1.32	73	-16.4	-22.5	-22.3
59	1.32	74.3	-16.7	-22.6	-22.6
60	1.32	73.8	-17	-22.9	-22.9
70	1.35	80.2	-21	-26.4	-26.4
80	1.35	79.9	-22.6	-27.8	-27.8
90	1.35	82.5	-23.6	-28.7	-28.4
100	1.35	81.4	-24.3	-29.3	-29
110	1.35	83	-24.8	-29.8	-29.3
120	1.35	83	-25	-30.3	-29.3
130	1.35	79.9	-24.9	-30.3	-28.9
140	1.35	82.3	-24.6	-30.2	-28.2
150	1.35	80.5	-24.5	-30.1	-27.9
160	1.35	81.4	-24.4	-30.2	-27.3
170	1.33	82.5	-24.5	-30.4	-26.9
180	1.32	81.4	-24.1	-30	-26.3
195	1.32	82.7	-23.3	-29.5	-25.4
210	1.31	80	-23.2	-29.5	-24.8
225	1.31	81.1	-22.6	-29.1	-24.1
240	1.31	83.2	-21.8	-28.5	-23
255	1.3	79.9	-20.9	-27.5	-22.1
270	1.3	81.5	-20.3	-26.7	-20.9
285	1.27	80.2	-20.1	-26.4	-20.5

เวลา (นาทื)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 3 (°C)
300	1.28	82.5	-19.1	-25.4	-19.3
330	1.27	82.7	-17.2	-22.6	-17
360	1.27	82.4	-15.2	-19.9	-14.5
390	1.25	82.4	-12.7	-17	-11.8
420	1.23	82	-10.6	-13.5	-8.5
450	1.2	83.8	-6.7	-6.7	-3.1
480	1.16	80.8	-3.1	0.2	1.9
510	1.07	83	8.4	18.8	15.7
540	1.04	83.1	13.6	27.5	21.3
570	0.96	82.4	18.7	36	28.8
600	0.88	82.6	24.3	43.2	34.7
630	0.75	86.5	29.6	48.5	42
660	0.595	80.2	33.2	51.8	47.6
690	0.525	78.7	35.5	52.4	48.8
720	0.49	79.2	37.2	52.8	49.7

ตารางที่ 20 ตารางแสดงผลการทดลองการอบขนุน น้ำหนัก 300 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดักจับไอน้ำ

เวลา (นาท)	ความดันภายในห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตรภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 3 (°C)
1	16	52	15.3	16.1	16.6
2	2	52.5	12.8	13.7	12.3
3	1.65	52.5	8.8	10.9	9.6
4	1.65	51.9	6.7	8.3	5.7
5	1.6	51.1	4.1	6.2	3.9
6	1.6	50.4	2.5	4	0.9
7	1.55	50.7	0.4	2	-0.9
8	1.55	50.4	-0.8	0.2	-3.2
9	1.55	50.1	-2.4	-1.2	-4.2
10	1.5	50.5	-3.4	-2.6	-6.2
11	1.5	52	-4.5	-3.9	-7.2
12	1.5	53.3	-5.3	-4.8	-8.7
13	1.5	53.7	-5.9	-5.9	-9.4
14	1.5	53.4	-6.6	-6.7	-10.6
15	1.5	54.3	-7.1	-7.6	-11.2
16	1.5	55.4	-7.7	-8.2	-12.2
17	1.5	55.3	-8.1	-8.8	-12.7
18	1.5	54.7	-8.6	-9.3	-13.5
19	1.5	56.2	-8.9	-9.6	-13.9
20	1.5	58.6	-9.2	-10	-14.6
21	1.5	59.5	-9.5	-10.4	-15
22	1.5	59.3	-9.8	-10.8	-15.7
23	1.5	60.2	-10	-11.2	-16.1
24	1.5	61.4	-10.2	-11.5	-16.6
25	1.5	61.6	-10.4	-11.9	-16.9
26	1.5	61.1	-10.6	-12.2	-17.5
27	1.5	63	-10.6	-12.4	-17.7
28	1.5	66.4	-10.7	-12.6	-18.2
29	1.5	68	-10.8	-12.9	-18.6
30	1.5	67.9	-10.9	-13.2	-19.1
35	1.5	65.8	-11.5	-14.4	-20.8
40	1.5	68.5	-11.2	-15	-21.8
45	1.5	70.1	-11.1	-15.5	-23
50	1.5	71	-11.3	-15.8	-23.8
55	1.5	74.4	-11.6	-16.2	-24.8
60	1.5	75.4	-11.8	-16.8	-25.7
70	1.5	75.7	-12.3	-17.8	-27

เวลา (นาที)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 3 (°C)
80	1.5	74.7	-12.6	-18.3	-27.4
90	1.5	75	-12.5	-18.5	-27.7
100	1.5	74.8	-12	-18.2	-27.5
110	1.5	75.2	-11.5	-17.9	-25.3
120	1.5	76.5	-10.9	-17.6	-25
130	1.5	75	-10.5	-17.2	-27
140	1.5	78.4	-10	-16.8	-26.8
150	1.55	76.2	-9.9	-16.7	-26.3
160	1.5	79.7	-9.6	-16.6	-26.4
170	1.5	75.2	-10.1	-17.5	-27.1
180	1.5	75.9	-9.8	-16.9	-25.9
190	1.45	75	-9.6	-16.6	-25.4
200	1.45	76	-9.1	-16	-24.9
210	1.45	75.3	-8.4	-15.3	-24.1
220	1.45	75.1	-8.2	-15	-23.6
230	1.45	75.5	-8.1	-14.6	-23.4
240	1.45	76.1	-7.4	-13.9	-22.4
255	1.45	75.9	-6.4	-12.5	-21.3
270	1.45	74.8	-5.3	-11.1	-20
285	1.45	75.2	-4.3	-9.7	-19.2
300	1.45	74.8	-2.8	-7.8	-17.9
315	1.45	75.2	-1.4	-5.4	-16
330	1.45	75.7	0.4	-4	-14.3
345	1.45	74.7	2.3	-2.2	-12.3
360	1.4	70.7	7.8	3	-8
390	1.35	65	19.3	13.4	4.8
420	1.33	59.9	29.5	25.8	20.5
450	1.35	55.4	36.4	34.5	29.7
480	1.4	50.3	40.3	38.1	34.9

ตารางที่ 21 ตารางแสดงผลการทดลองการอบเนื้อหมู น้ำหนัก 100 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้โมเลกุลลาซีฟเป็นสารดักจับไอน้ำ

เวลา (นาท)	ความดันภายในห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตรภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 3 (°C)
1	8	36.7	17.8	12.8	15.3
2	2	38	13.6	10.8	13.9
3	1.6	40.1	10	7	9
4	1.5	41.2	6	4.6	5.3
5	1.5	41.5	3.2	2.5	3.6
6	1.45	42.4	2.1	1.5	1.5
7	1.4	46.9	0.1	0.2	0.1
8	1.4	49.4	-1.3	-1.1	-1.9
9	1.4	50.3	-2.8	-2	-2.9
10	1.4	50.3	-3.9	-3	-4.5
11	1.4	51.4	-5	-3.8	-5.4
12	1.4	53.8	-5.7	-4.3	-6.4
13	1.4	56.7	-6.7	-4.9	-7.2
14	1.4	58.1	-7.3	-5.5	-8.2
15	1.4	58.1	-8.2	-6	-8.9
16	1.4	59.4	-8.7	-6.4	-9.7
17	1.4	64.8	-9.2	-6.5	-10.2
18	1.4	68	-9.7	-6.8	-11
19	1.4	69.3	-10.2	-6.9	-11.5
20	1.4	69.9	-11	-7.3	-12.5
21	1.4	69.1	-1.4	-7.7	-13.2
22	1.4	68	-11.8	-7.9	-13.8
23	1.4	68.5	-12	-7.9	-14.2
24	1.4	72.7	-12.3	-7.9	-14.6
25	1.4	76.6	-12.6	-7.8	-15.2
26	1.4	78	-13	-7.7	-15.7
27	1.4	78	-13.3	-7.8	-16.4
28	1.4	77	-13.7	-7.7	-16.9
29	1.4	75.7	-13.9	-7.6	-17.4
30	1.4	77.5	-13.9	-7.3	-17.6
35	1.4	79.2	-15.5	-6.9	-20.5
40	1.4	84	-15.9	-6.5	-21.4
45	1.4	82.4	-16.5	-5.8	-22.5
50	1.5	79.5	-16.7	-4.6	-23.2
55	1.5	79.7	-16.7	-2.9	-23.2
60	1.5	80.9	-16.2	-1.2	-22.6
70	1.5	80.5	-14.9	1.9	-22.1

เวลา (นาที)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 3 (°C)
80	1.5	79.6	-12.6	5.9	-20.9
100	1.5	82.2	-5.7	16.6	-16.9
110	1.5	79.9	-2.2	20.8	-12.6
120	1.5	79.9	-0.6	22.3	-11.2
130	1.5	81.9	5.5	27.2	-4
140	1.5	77.1	21.2	35.2	16
150	1.5	76.7	25.6	38.5	23.7
160	1.5	77.2	29.1	41.3	27.4
170	1.5	76	33.7	45.9	32.8
180	1.4	72	37.7	47.2	37
195	1.33	69.6	45.2	48.9	43.7
210	1.26	65.7	47.4	49.4	45.3
225	1.21	60.4	47.2	48.9	45.3
240	1.14	60.2	47.5	48.7	45.7
255	1.1	62	47.6	48.7	46.3
270	1.07	59.8	47.4	48.5	46.1
285	1.04	61.4	47.5	48.5	46.4
300	0.99	61.5	47.3	48.1	46.1
330	0.92	59.9	46.7	47.9	46.3
360	0.84	62.2	47.5	49	47.2

ตารางที่ 22 ตารางแสดงผลการทดลองการอบเปิดเขียว น้ำหนัก 100 กรัมด้วยเครื่องอบแห้งแบบ
แช่เยือกแข็งโดยใช้ไมโครเวฟเป็นสารดักจับไอน้ำ

เวลา (นาท)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตรภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์	ผลิตรภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป ดบิลต์วที่ 3 (°C)
1	2.2	51	19.8	19.7	14.4
2	1.6	51	14.5	17.2	11.5
3	1.5	50.6	10.9	14.5	7
4	1.45	49.9	5.8	11.8	4.2
5	1.4	49.7	2.9	9.5	1.2
6	1.35	51.2	-0.6	7.4	-0.5
7	1.3	51.5	-3.2	5.7	-3.3
8	1.3	51.7	-5.5	3.5	-5.6
9	1.28	51.1	-7	2.7	-6.1
10	1.28	50.6	-8.2	1.4	-7.6
11	1.27	51.6	-9.5	0.6	-8.4
12	1.28	56.2	-10.1	-0.3	-9
13	1.28	60.8	-11.3	-1.1	-9.7
14	1.28	62.7	-12.2	-2.4	-10.4
15	1.28	63	-13.5	-3.4	-11.1
16	1.28	62.4	14	-4.3	-11.6
17	1.28	61.3	-14.7	-4.9	-11.9
18	1.29	60.6	-15.2	-5.5	-12.3
19	1.3	61.8	-15.5	-6.1	-12.4
20	1.3	64.8	-15.8	-6.7	-12.4
21	1.31	67.8	-16.4	-7.3	-12.6
22	1.31	68.6	-16.8	-8	-12.8
23	1.31	68.1	-17.3	-8.6	-13
24	1.31	67	-17.6	-9.3	-13.2
25	1.32	67.6	-17.8	-9.7	-13.1
26	1.33	72.3	-18.1	-10.4	-13.1
27	1.35	74.5	-18.4	-10.9	-13
28	1.35	75.2	-18.6	-11.4	-13.2
29	1.35	74.8	-19	-12	-13.3
30	1.35	73.6	-19.2	-12.5	-13.3
35	1.4	75.7	-20.3	-15.5	-13
40	1.4	78.5	-20.1	-16.3	-12.5
45	1.4	76.2	-19.5	-17.2	-11.6
50	1.4	74.8	-18.9	-17.8	-10.8
55	1.45	75.9	-17.5	-18.1	-8.8
60	1.45	77	-16.3	-17.7	-6.7
70	1.45	77.2	-13.6	-16.2	-3.2

เวลา (นาทึ)	ความดันภายใน ห้องอบ (mbar)	อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์			
		อุณหภูมิ heating plate (°C)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
			ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์
			จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 1 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 2 (°C)	จาก เทอร์โมคัป คปิลตัวที่ 3 (°C)
80	1.45	76.8	-10.1	-15.1	-0.2
90	1.45	76.2	-7.1	-13.6	3.1
100	1.45	76.2	-3.7	-11.6	6.4
110	1.45	77.4	-0.3	-9.4	10.6
120	1.45	77.8	2	-7.8	13
130	1.45	75	4.6	-5.7	16.2
140	1.45	76.2	8.7	-2.6	22.1
150	1.45	77.6	12.7	0.2	27.3
160	1.45	77	14.3	1.6	30
170	1.45	76.6	16	2.9	32.2
180	1.45	74.5	18.6	5.2	35.5
195	1.4	77.3	22.7	10.1	39.7
210	1.4	75.4	26.5	17.1	44.1
225	1.35	70.7	31.9	28.8	50.1
240	1.4	66.5	38.2	39.2	50.7
255	1.35	65.5	44.3	42.8	50.9
270	1.35	64.6	44.6	43	50.9
285	1.3	64.7	44.6	42.6	50.7
300	1.28	66.6	45.2	43	51.1
330	1.12	66.7	45.2	41.8	51
360	1.02	66.7	47.5	42.2	53.1
390	0.9	64.9	47.9	41.3	54.2
420	0.76	66.6	49.1	41.2	52.2

ภาคผนวก ข
คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

A	พื้นที่ของการระเหิด (ft^2)
b	สภาพการซึมของชั้นที่แห้งแล้ว ($lb/ft \cdot hr \cdot Torr$)
C_{eq}	ความเข้มข้นของไอน้ำที่อิ่มตัว
D	ความแตกต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก กับความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่ภายใน กล่องที่กำหนด
F	ค่าสูงสุดของช่วงของความชื้นสัมพัทธ์ที่ยอมรับได้ที่อยู่ในกล่อง
G_{max}	อัตราการระเหยสูงสุด (lb/hr)
h_c	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพา ($W/m^2 \cdot K$)
h_r	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสี ($W/m^2 \cdot K$)
h_s	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผิวทั้งหมด ($W/m^2 \cdot K$)
K_1	ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับการนำน้ำหนักโมเลกุลของการระเหิดของสาร
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุบรรจุ ($W/m \cdot K$)
k_d	สภาพการนำทางความร้อนของชั้นที่แห้งแล้ว ($BTU/ft \cdot hr \cdot ^\circ F$)
L	ความร้อนแฝงของการนำความร้อนของอาหารแช่แข็ง (kJ/Kg)
L_p	ความหนาของผลิตภัณฑ์ (ft)
M_H	ความจุความชื้นของซิลิกาเจลภายในช่วงของความชื้นสัมพัทธ์
m	โมลาลิตี (molality) หรือค่าคงที่จุดเยือกแข็งของโมแลล (ต่อ 1000 กรัม solvent)
m_f	ความชื้นสุดท้าย
m_0	ความชื้นเริ่มต้น
N	จำนวนของอากาศที่เกิดการหมุนเวียนต่อวัน
p_i	ความดันไอของน้ำแข็ง ($Torr$)
p_s	ความดันย่อยของน้ำที่พื้นผิวของชั้นที่แห้งแล้ว ($Torr$)
Q	กิโลกรัมของซิลิกาเจลที่ต้องการ
R_g	ค่าคงที่ของก๊าซของความร้อนแฝงของการหลอมเหลว
T_a	อุณหภูมิของตัวทำความเย็น ($^{\circ}C$)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

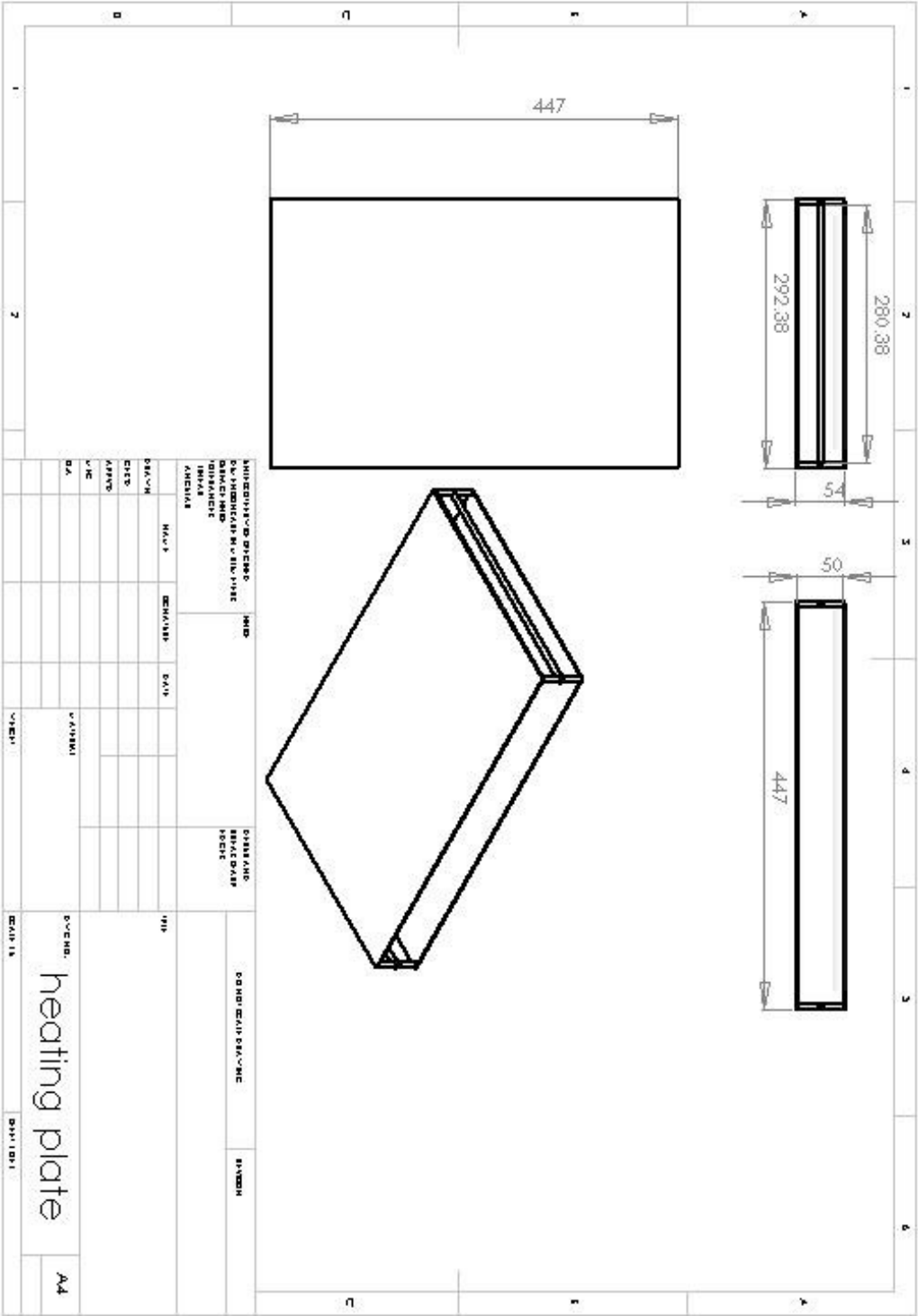
ความหมาย

T_A	จุดเยือกแข็งของสารละลาย (K)
T_{AO}	จุดเยือกแข็งของของเหลวบริสุทธิ์ A (K)
T_F	จุดเยือกแข็งเริ่มต้นของอาหาร และเป็นอุณหภูมิที่ยังไม่แข็งตัว ($^{\circ}C$)
T_i	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของน้ำแข็ง ($^{\circ}R$)
T_s	อุณหภูมิที่ผิวของอาหาร ($^{\circ}C$)
t	เวลา (hr)
t_d	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)
V	ปริมาตรของกล่องในหน่วยลูกบาศก์เมตร (m^3)
W	น้ำหนักของน้ำในแผ่น
X_A	สัดส่วนของโมลของน้ำในสารละลาย
x	ความหนาของวัสดุที่บรรจุ (m)
x_d	ความหนาของชั้นที่แห้งแล้ว (ft)
λ'	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว ($J/mole$)
ρ	ความหนาแน่นของอาหาร (kg/m^3)
ρ_d	ความหนาแน่นรวมของของแข็งในชั้นที่แห้งแล้ว (lb/ft^3)

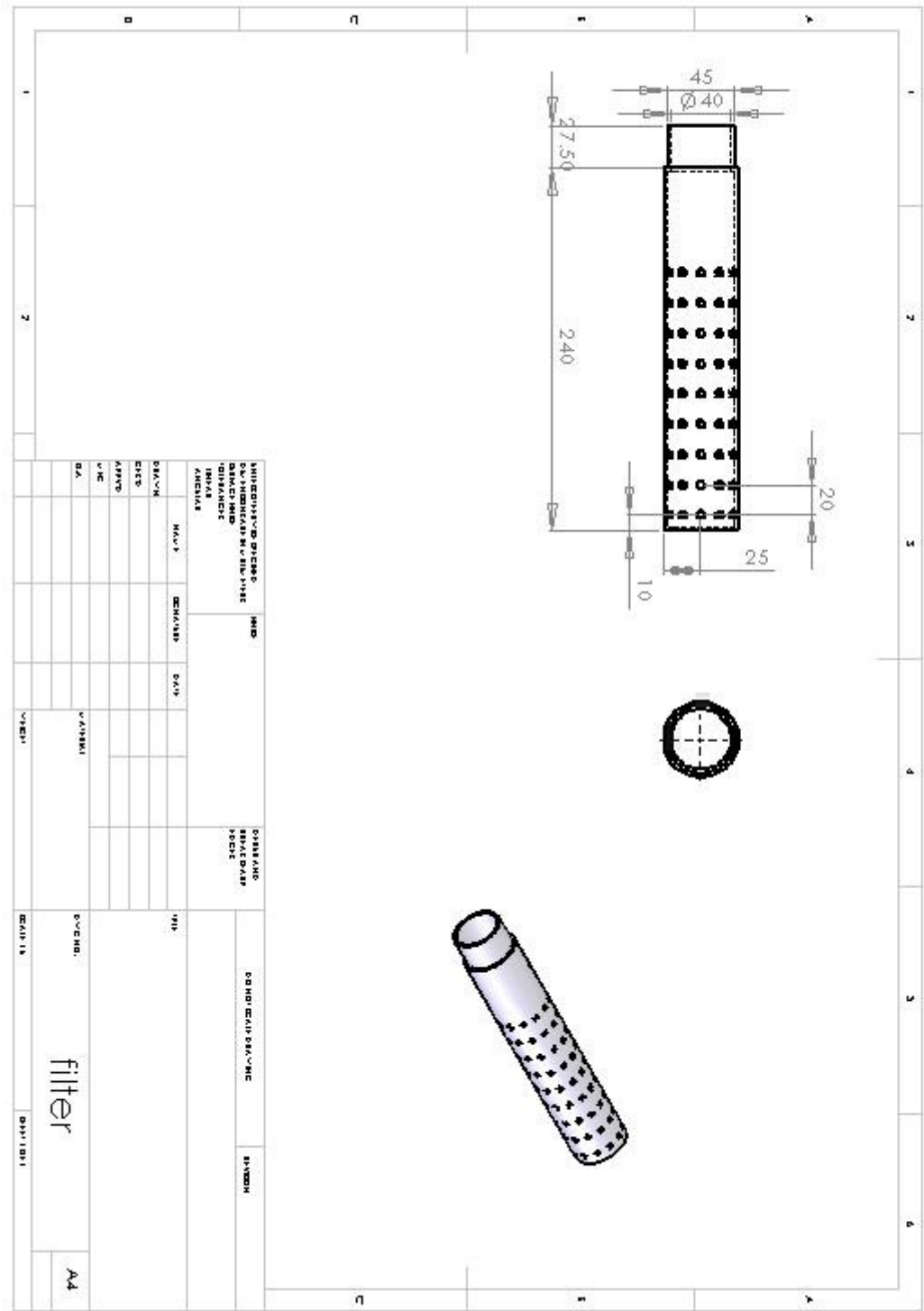
ภาคผนวก ค

แบบ Drawing ต่างๆของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

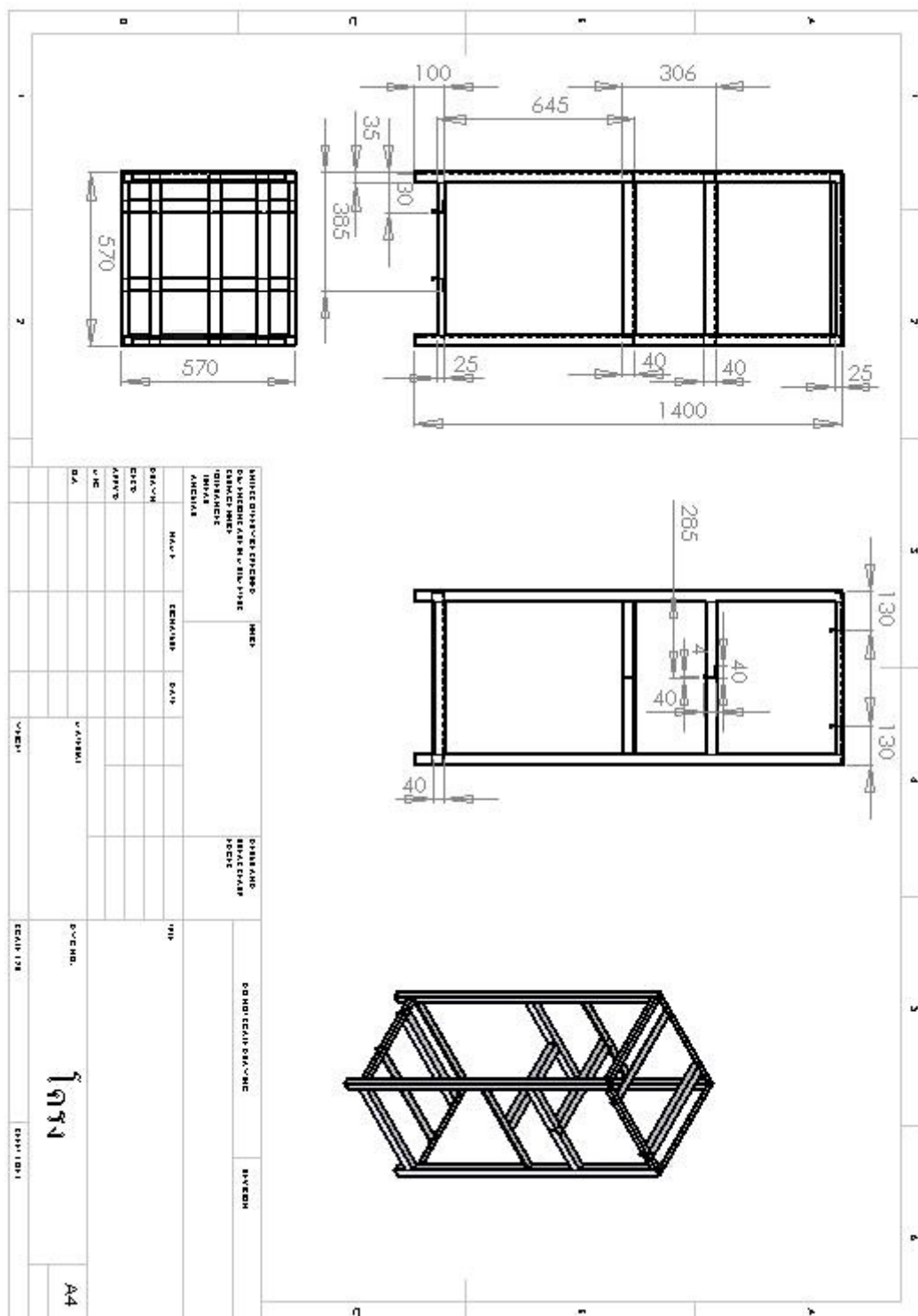
Drawing แผ่นให้ความร้อนของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง



Drawing แกนในของชุดดักจับไอของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง



Drawing โครงยึดของเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายโอริโนโค เยื่อง
วันเดือนปีเกิด	27 ตุลาคม พ.ศ. 2521
สถานที่เกิด	ฮ่องกง
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	111/251 ถ. พัทยาใต้ ต. หนองปรือ อ. บางละมุง จ. ชลบุรี 20260
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2538	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสุรวิทยาคาร
พ.ศ. 2541	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสุรวิทยาคาร
พ.ศ. 2546	อุดมศึกษา (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2551	บัณฑิตศึกษา (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ