



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง การอบแห้งสารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ
แช่แข็งสุญญากาศ

The drying of Bromelain from Pineapple Stem by Vacuum Freeze Drying
method

คณะผู้วิจัย

รศ.ดร.วสันต์ เจริญสุวรรณ



โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

กรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2559

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประเภทการวิจัย การวิจัยประยุกต์ (applied research) สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย ได้รับการสนับสนุนครุภัณฑ์และห้องปฏิบัติการจากสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และขอขอบคุณบริษัทเวลเทคไปโอเทคโนโลยี จำกัด ที่ได้สนับสนุนและให้ความร่วมมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

รศ.ดร.วสันต์ เขียรสุวรรณ
หัวหน้าโครงการวิจัย



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งสารสกัดโพรมิเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรดด้วยวิธีการอบแห้งแบบแช่แข็งจากเครื่องต้นแบบซึ่งใช้ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีวัตถุประสงค์หลักของการวิจัยอยู่ 2 ประการคือ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง (กำลังงานไฟฟ้า สัมประสิทธิ์สมรรถนะทางความร้อนและทางความเย็น) และการหาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อบแห้งทางเคมีและทางกายภาพ กระบวนการทดลองประกอบด้วย 2 กระบวนการคือ การแช่แข็งและการการอบแห้งแบบแช่แข็งผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะวัดค่าอุณหภูมิ ความดัน และกระแสไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่า กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ 1.8 kW สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นและความร้อนอยู่ที่ 3.44 และ 4.44 ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วสารสกัดโพรมิเลนที่ได้จากการทำแห้งจากเครื่องอบแห้งจากการทดลองนี้ให้ค่าคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการทดลองในระดับ pilot-scale จากบริษัทเวลเทคไบโอเทคโนโลยี การผสมผสานของกระบวนการทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพในการอบแห้ง



ABSTRACT

This research is to study of the drying of Bromelain from pineapple stem by the freeze dryer prototype which is used as vapor compressor refrigeration system with heat exchanger. The couple objective of this work, were to evaluation of performance of the freeze dryer (Power electric, Coefficient of performance of cooling and heating) and to determine characteristics of the freeze dried product of chemical and physical. The experimental process consists of two processes, freezing and freeze drying, which measure the temperature, pressure and current electric. The results were found that the power electric is 1.8 kW. Coefficient of performance of cooling and heating are 3.44 and 4.44, respectively. Moreover, this experimental dryer can produce the Bromelain which has the similar properties of the pilot-scale from Welltech Biotechnology Company. Combining two processes, the dryer can efficiently achieve the sensible result.



สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ Introduction	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	2
1.5 งบประมาณของโครงการวิจัย	3
1.6 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	
2.1.1 การอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ (Vacuum Freeze Drying)	5
2.1.2 สารสกัดโพรมิเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรด	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	12
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	13
3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	14
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การอบแห้งของสารสกัดโพรมิเลนน้ำคั้นเหง้าสับปะรด	16
4.2 การทดสอบคุณสมบัติของสารสกัดโพรมิเลนน้ำคั้นเหง้าสับปะรด	17
4.3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance) การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง	19
4.4 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (Electrical Power) จากการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง	20
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง	22
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการปรับปรุงในงานวิจัย	23
บรรณานุกรม (Bibliography)	24
ภาคผนวก (Appendix)	25
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองและคำนวณ	26
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณภาพ	50
ภาคผนวก ค. เอกสารตีพิมพ์เผยแพร่	53

สารบัญตาราง (List of Tables)

ตารางที่ 1.1	ระยะเวลาดำเนินงาน 12 เดือน (ตุลาคม 2558– กันยายน 2559)	2
ตารางที่ 1.2	รายละเอียดงบประมาณของโครงการการวิจัยจำแนกตามงบประมาณต่าง ๆ	3
ตารางที่ 4.1	แสดงผลการวัด Activity เปรียบเทียบการทำแห้งด้วยเครื่อง Lap scale เปรียบเทียบ Pilot scale	17
ตารางที่ 4.2	แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนเพรสเซอร์	21

สารบัญภาพ (List of Illustrations)

รูปที่ 1.1	สารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสัปะรดที่ทำให้แห้งด้วยวิธีอบแห้งแบบแช่แข็ง	2
รูปที่ 2.1	แผนผังสถานะของน้ำ	5
รูปที่ 2.2	การเปลี่ยนสถานะของของน้ำในกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง	6
รูปที่ 2.2	การเปลี่ยนสถานะของของน้ำในกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง	7
รูปที่ 2.4	การกระจายตัวของความชื้นที่ขั้นตอนต่างๆในการทำการอบแห้งแบบแช่แข็ง	9
รูปที่ 2.5	สารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสัปะรดที่ทำให้แห้งด้วยวิธี Tray Drying	10
รูปที่ 2.6	สารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสัปะรดที่ทำให้แห้งด้วยวิธี Spray Drying	11
รูปที่ 3.1	เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศเดิมที่ต้องการพัฒนา	12
รูปที่ 3.2	ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล	14
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการและการเตรียมการทดลอง	15
รูปที่ 4.1	แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้า สัปะรดทั้ง 6 ถาด ต่อเวลาในการทดลอง	16
รูปที่ 4.2	สารสกัดโบรมีเลนจากการอบแห้งโดยกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง	18
รูปที่ 4.3	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นสัมประสิทธิ์สมรรถการระบายความร้อน	19
รูปที่ 4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขับทางทฤษฎีของคอมเพรสเซอร์	20



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

สับปะรด (*Ananas comosus* L. Murr.) เป็นพืชล้มลุกชนิดหนึ่งที่มีต้นกำเนิดมาจากทวีปอเมริกาใต้ เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ หลังจากการเก็บเกี่ยวสับปะรดแล้ว ลำต้นหรือเหง้าสับปะรดจะเหลือทิ้งอยู่ในแปลงก่อนการปลูกครั้งใหม่เกษตรกรต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเตรียมดินหลายครั้งเพื่อกำจัดเหง้าเหล่านี้ ปัจจุบันได้มีการนำเหง้ามาผลิตเอนไซม์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น การทำเบียร์ อาหารกระป๋อง และยาต่างๆ เป็นต้น สับปะรดมีเอนไซม์ที่สามารถย่อยโปรตีนได้ทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ Stem Bromelain, Fruit Bromelain, Ananain และ Comasain ซึ่งเอนไซม์โบรมีเลนมีฤทธิ์ด้านการรวมตัวกันของเกล็ดเลือด ชักนำให้เกิดการหลั่งไซโทไคน์ที่ชักนำให้เซลล์เม็ดเลือดขาวกำจัดเซลล์มะเร็งได้ มีฤทธิ์ด้านการอักเสบ ลดความเจ็บปวดจากการอักเสบ ป้องกันการติดเชื้อ ลดการกระจายตัวของเซลล์มะเร็งในสัตว์ทดลอง นอกจากนี้ยังช่วยในระบบการย่อยอาหารและสมานแผลในกระเพาะอาหารอีกด้วย โดยคุณสมบัติเด่นของโบรมีเลน คือ สามารถย่อยโปรตีนให้มีโมเลกุลเล็กลงได้ จึงมีการนำไปใช้มากในอุตสาหกรรมผงหมักเนื้อ นอกจากนี้ ประเทศในโซนยุโรป และอเมริกา ยังนิยมนำไปทำอาหารเสริมและยาเพื่อช่วยในเรื่องการย่อยอาหาร รวมทั้งนำไปเป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางได้อีกด้วย กลุ่มลูกค้าเป้าหมายหลัก คืออุตสาหกรรมผงหมักเนื้อ และกลุ่มอุตสาหกรรมอาหารเสริม ซึ่งอุตสาหกรรมกลุ่มนี้มีแนวโน้มขยายตัวสูง มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องเพิ่มขึ้นทุกปี ดังนั้น การนำส่วนเหลือทิ้งจากลำต้นสับปะรดมาผลิตเอนไซม์โบรมีเลน เพื่อเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จึงถือว่าการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีจำนวนมากในประเทศไทย รวมทั้งช่วยลดปริมาณและค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเหลือทิ้ง และเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้วัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ดังกล่าวอย่างแพร่หลายในประเทศไทย และถือเป็นโอกาสทางธุรกิจ ก่อให้เกิดรายได้อย่างมหาศาล

ทางบริษัทเวลเทคไบโอเทคโนโลยี จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผลิตวัตถุดิบหรือสารออกฤทธิ์ที่ใช้ในเครื่องสำอาง อาหารเสริมและความงาม จึงได้ทำการวิจัยทำแห้งสารสกัดโบรมีเลนด้วยวิธี ออบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying) ในห้องวิจัยให้ผลที่ดีตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นบริษัทจึงมีความต้องการที่จะต่อยอดงานวิจัยโดยการผลิตสารสกัดโบรมีเลนปริมาณมากพอในเชิงพาณิชย์

ดังนั้นโครงการวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ (Vacuum Freeze Dryer) จากเครื่องเดิมที่นักวิจัยได้สร้างไว้แล้ว ให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการทำแห้งสารสกัดโบรมีเลนด้วยวิธี Freeze Drying ในระดับ pilot-scale ร่วมกับบริษัทเวลเทคไบโอเทคโนโลยี จำกัด



รูปที่ 1.1 สารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสัปะรดที่ทำให้แห้งด้วยวิธีอบแห้งแบบแช่แข็ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ (Vacuum Freeze Dryer) เพื่อใช้ในการทำแห้งสารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสัปะรด

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ: แบบถาด (Vacuum Freeze Dryer: Tray Method) ใช้ในการทดลอง
2. ทำแห้งสารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสัปะรด โดยวิธีอบแห้งแบบแช่แข็ง

1.4 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาดำเนินงาน 12 เดือน (ตุลาคม 2558– กันยายน 2559)

กิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน-ปี)												ผู้ทำการศึกษา/สถานที่ ทำการศึกษา
	10 - 58	11 - 58	12 - 58	01 - 59	02 - 59	03 - 59	04 - 59	05 - 59	06 - 59	07 - 59	08 - 59	09 - 59	
1.ออกแบบและพัฒนาการทำงาน ของเครื่องอบแห้ง													วสันต์ เจริญสุวรรณ และคณะ/ คณะวิศวะฯ มทร.
2.ทดสอบการทำงานของ เครื่องอบแห้ง													วสันต์ เจริญสุวรรณ และคณะ/ คณะวิศวะฯ มทร.
3. ทดสอบคุณภาพของน้ำ คั้นเหง้าสัปะรดที่อบแห้ง													บริษัทเวลเทคไบโอเทคโนโลยี จำกัด
4.สรุปผลและวิเคราะห์ผล การทดลอง													วสันต์ เจริญสุวรรณ และคณะ/ คณะวิศวะฯ มทร.
5.จัดทำรายงานสรุป โครงการ													วสันต์ เจริญสุวรรณ และคณะ/ คณะวิศวะฯ มทร.

1.5 งบประมาณของโครงการวิจัย

ตารางที่ 1.2 รายละเอียดงบประมาณของโครงการการวิจัยจำแนกตามงบประมาณต่าง ๆ

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
1. หมวดค่าตอบแทน	60,000
1.1 นักวิจัย	40,000
1.2 ผู้ช่วยวิจัย	20,000
2. หมวดค่าวัสดุ/สารเคมี	253,000
2.1 วัสดุทดลองสารสกัดโพรมิเลนจากน้ำคั้นเหง้าสัปะรด (ห้องปฏิบัติการของบริษัทเวลเทคไบโอเทคโนโลยีจำกัด)	20,000
2.2 เหล็กรูปพรรณและวัสดุข้างสิ้นเปลือง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ประเภทท่อ ฉาก กล่อง แผ่น เป็นต้น	133,000
2.3 วัสดุระบบทำความเย็นและค่าน้ำยาทำความเย็น เช่น ตัวควบแน่น วาล์วขยาย ความดัน เกจความดัน น้ำยาทำความเย็น R-404a เป็นต้น	80,000
2.4 ค่าฉนวนกันความร้อน เช่น แผ่น Polystyrene ความหนา 25 mm และ 50 mm เป็นต้น	20,000
3. หมวดค่าใช้สอย	70,000
3.1 ค่าใช้จ่ายในการเดินทางและน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น การเดินทางไปบริษัทเวลเทคไบโอเทคโนโลยีจำกัด เป็นต้น	7,000
3.2 ค่าใช้จ่ายการเผยแพร่งานวิจัย เช่น ค่าจัดทำเอกสาร รายงานความก้าวหน้า รายงานฉบับสมบูรณ์ เป็นต้น	3,000
3.3 ค่าใช้จ่ายการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (ห้องปฏิบัติการของบริษัทเวลเทคไบโอเทคโนโลยีจำกัด) เช่น การตรวจสอบทางเคมี สารโพรมิเลน เป็นต้น	20,000
3.4 ค่าใช้จ่ายในการจ่ายเหมาสร้างและประกอบพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ	40,000
4. ค่าสาธารณูปโภค	17,000
รวมเป็นงบประมาณทั้งสิ้น	400,000

1.6 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย

1. เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ
2. เครื่องมือและอุปกรณ์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ เช่น เครื่องมือวัดต่างๆ คอมพิวเตอร์ เป็นต้น
3. ห้องสมุดมหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม
4. ห้องปฏิบัติการวิจัยของบริษัทเวลเทคไบโอเทคโนโลยี จำกัด

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ: แบบถาด (Vacuum Freeze Dryer: Tray Method) ต้นแบบ เพื่อใช้ในการกระบวนการผลิตสารสกัดโบริมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรด
2. เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่มีกำลังการผลิตในระดับอุตสาหกรรม
3. เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัยในการอบแห้งพืชสมุนไพรต่างๆหรือผลผลิตทางการเกษตรที่มีมูลค่าของผลิตภัณฑ์สูงอื่น
4. บทความตีพิมพ์ในวารสาร/ประชุมวิชาการระดับชาติหรือระดับนานาชาติหรือจดอนุสิทธิบัตร



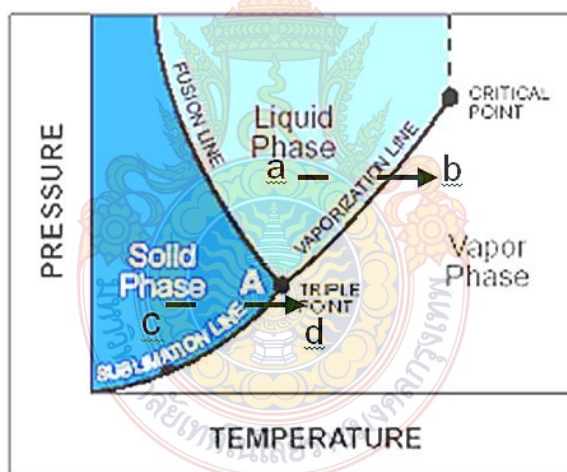
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

2.1.1 การอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ (Vacuum Freeze Drying)

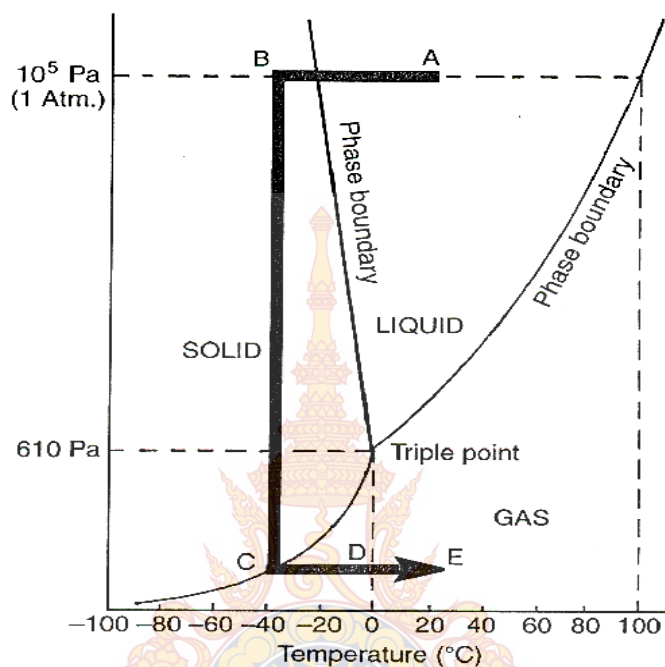
การอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ มีการค้นพบและทำมานานแล้ว ซึ่งเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม อาหารและยา การอบแห้งแบบแช่แข็งเป็นกระบวนการที่ดึงเอาน้ำหรือตัวทำละลายออกจากผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะเยือกแข็ง เนื่องจากการทำการอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying) จะกระทำภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่ต่ำ ทำให้ช่วยรักษาคคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ ลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะที่เสถียร น้ำหนักเบา และสามารถเก็บไว้นานโดยไม่ต้องแช่เย็น แต่วิธีนี้มีข้อเสียตรงที่อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีราคาที่สูง ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง (Aran S. Mujumdar, 1987)



รูปที่ 2.1 แผนผังสถานะของน้ำ

จากรูปที่ 2.1 แสดงแผนผังสถานะของน้ำ (Phase Diagram of Water) แกนแนวนอนคืออุณหภูมิ (Temperature) และแนวตั้งคือความดัน (Pressure) โดยที่จุด A คือ จุดทริปเปิ้ลพอยต์ (Triple Point) ซึ่งเป็นจุดที่น้ำสามารถแสดงสถานะได้ 3 สถานะ คือ สถานะของก๊าซ ของเหลวและของแข็ง การระเหย (Evaporation) เกิดขึ้นเมื่อน้ำที่ความดันสูงกว่าความดันจุดทริปเปิ้ลพอยต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (จาก a ไป b) น้ำก็จะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอแต่ถ้าความดันต่ำกว่าความดันที่จุดทริปเปิ้ลพอยต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (จาก c ไป d) น้ำซึ่งอยู่ในสถานะของแข็งจะเกิดการเปลี่ยนสถานะ

เป็นไอซึ่งเรียกว่าการระเหิด (Sublimation) จึงใช้หลักการนี้ในกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying Process) ผลิตภัณฑ์จะถูกแช่แข็งและทำการลดความดันให้มีความดันต่ำกว่าความดันที่จุดทรีปเปิ้ลพอยต์ หลังจากนั้นจะให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่แช่แข็งอย่างช้าๆ เพื่อให้ น้ำในผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะของแข็งค่อยๆระเหิดออกไปจนผลิตภัณฑ์แห้ง



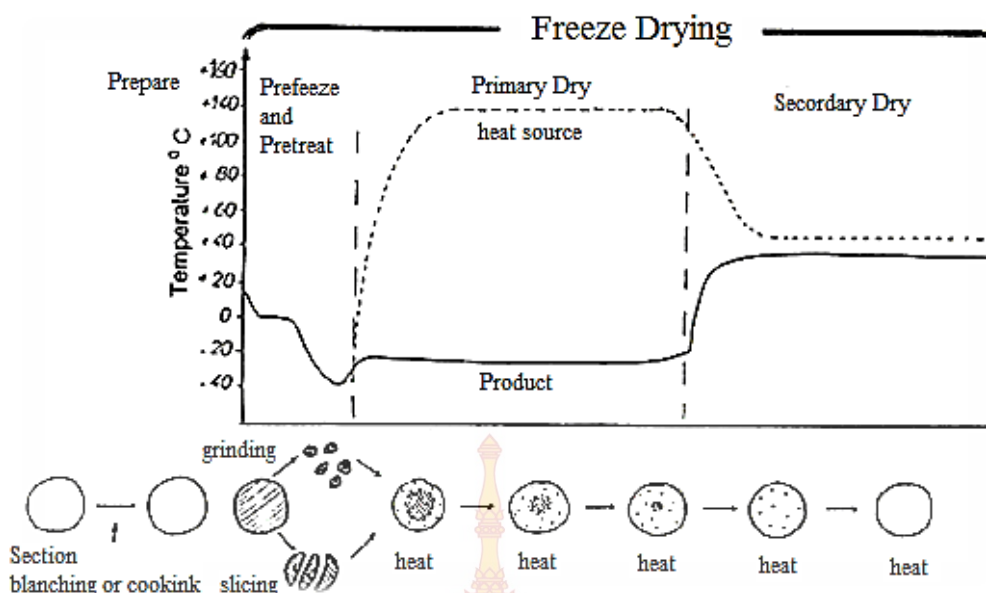
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนสถานะของของน้ำในกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง

กระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying Process)

กระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนการแช่แข็ง(Freezing) โดยน้ำในผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนสถานะจาก A ไป B
2. ขั้นตอนการอบแห้งขั้นที่ 1 (Primary Drying) โดยน้ำในผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนสถานะจาก B ไป D
3. ขั้นตอนการอบแห้งขั้นที่ 2 (Secondary Drying) โดยน้ำในผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนสถานะจาก D ไป E

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง เริ่มจากขั้นตอนการเตรียมผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนการอบแห้ง ขั้นตอนการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ตลอดจนการนำผลิตภัณฑ์มาบริโภค จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง

ขั้นตอนการแช่แข็ง (Freezing)

ก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะทำการอบแห้งนั้น ผลิตภัณฑ์จะต้องผ่านการแช่แข็งก่อนซึ่งวิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิสุดท้ายของวัตถุดิบที่แช่แข็งจะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ชนิดของการแช่แข็งแบ่งได้เป็น 2 แบบคือการแช่แข็งแบบอัตราเร็วสูง (Fast Freezing) ให้ผลคือลักษณะผลึกจะถูกสร้างขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลึกน้ำแข็งที่ได้จะมีขนาดเล็ก ซึ่งจะช่วยรักษาโครงสร้างให้มีความเสถียรและไม่เปลี่ยนแปลงมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าการแช่แข็งแบบอัตราเร็วต่ำ แต่ขั้นตอนในการอบแห้งจะทำได้โดยลำบากและการแช่แข็งด้วยอัตราเร็วต่ำ (Slow Freezing) ให้ผลคือลักษณะผลึกจะถูกสร้างตัวอย่างช้าๆผลึกที่ได้จะมีขนาดใหญ่และหยาบ ทำให้เนื้ออาหารได้รับความเสียหาย เกิดการสูญเสียคุณค่าทางอาหารที่เซลล์เมมเบรนและอาจเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณความชื้นสูงกว่าการแช่แข็งด้วยอัตราเร็วสูง แต่ขั้นตอนในการอบแห้งจะกระทำได้ง่ายการจำแนกชนิดของเครื่องแช่แข็ง (Freezer) จำแนกตามอัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็งได้เป็น (Kozo N., 1985)

1. เครื่องแช่แข็งแบบอัตราเร็วต่ำ (Slow Freezer) มีอัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็ง 0.2 cm/hr ตัวอย่างเครื่องแช่แข็งแบบนี้ ได้แก่ Still-air Freezer และ Cold Storage Freezer
2. เครื่องแช่แข็งแบบเร็ว (Quick Freezer) มีอัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็ง 0.5–3 cm/hr ตัวอย่างเครื่องแช่แข็งแบบนี้ได้แก่ Air Blast Freezer และ Plate Freezer
3. เครื่องแช่แข็งแบบเร็วมาก (Rapid Freezer) มีอัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็ง 5-10 cm/hr ตัวอย่างเครื่องแช่แข็งแบบนี้ได้แก่ เครื่องแช่แข็งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed Freezer)

4 เครื่องแช่แข็งแบบเร็วยิ่งยวด (Ultra-rapid Freezer) มีอัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็งที่ 10–100 cm/hr ตัวอย่างเครื่องแช่แข็งแบบนี้ได้แก่เครื่องแช่แข็งแบบไครโอจินิก (Cryogenic Freezer) วัตถุดิบที่จะนำมาทำการแช่แข็งจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่คือ ตัวทำละลาย (ส่วนที่เป็นน้ำ) และตัวถูกละลาย ระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็งวัตถุดิบถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดยูเทคติก (Eutectic) ซึ่งจุดยูเทคติกนี้เป็นจุดที่ตัวทำละลายและตัวถูกละลายทำให้แข็งกลายเป็นของแข็งทั้งหมด ที่จุดยูเทคติกตัวถูกละลายจะถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำโดยรอบๆ เมื่อตัวถูกทำละลายแขวนลอยเย็นตัวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายในผลิตภัณฑ์นั้น น้ำจะถูกแยกออกจากตัวถูกละลายและเปลี่ยนรูปร่างเป็นน้ำแข็ง ทำให้มีพื้นที่ผิวของตัวถูกละลายมากขึ้น ตัวถูกละลายเหล่านี้จะมีอุณหภูมิในการแข็งตัวที่ต่ำกว่าน้ำ ด้วยเหตุนี้ในบางครั้งผลิตภัณฑ์ที่ดูภายนอกดูเหมือนว่าแข็งตัวอย่างสมบูรณ์แล้ว แต่ในความเป็นจริงอาจจะยังไม่แข็งตัวโดยสมบูรณ์จนกว่าตัวถูกละลายแขวนลอยทั้งหมดจะแข็งตัว ดังนั้นอุณหภูมิยูเทคติกจึงเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ทั้งตัวทำละลายและตัวถูกละลายแข็งตัวอย่างสมบูรณ์

ในขั้นตอนการแช่แข็งนับเป็นสิ่งที่สำคัญมากที่จะต้องแช่แข็งผลิตภัณฑ์ให้ได้ที่อุณหภูมิที่จุดยูเทคติกหรือต่ำกว่าบางส่วนเล็กๆ ที่ยังไม่แข็งอาจจะไม่สามารถมองได้ด้วยตาเปล่า อย่างไรก็ตามที่สุญญากาศสูงๆ ส่วนเล็กๆเหล่านี้จะเกิดการหลอมตัวก่อให้เกิดฟองในผลิตภัณฑ์และภายใต้ความดันต่ำๆ ผลิตภัณฑ์จะเริ่มหลอมละลาย สิ่งเหล่านี้จะเป็นบ่งชี้ถึงความไม่เสถียรต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์

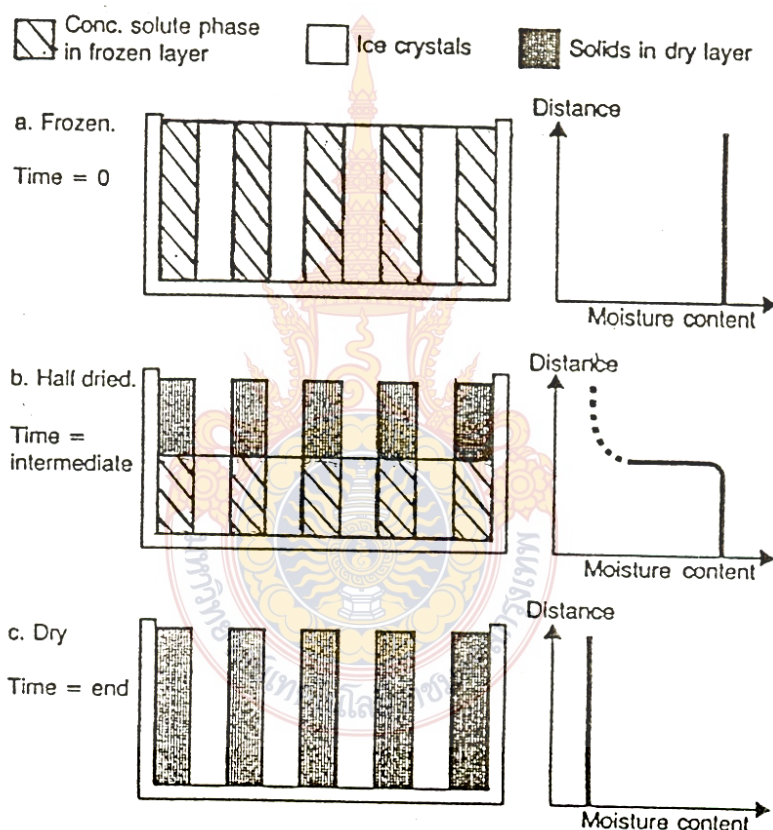
การอบแห้งขั้นที่ 1 (Primary Drying)

หลังจากการทำการแช่แข็งวัตถุดิบ วัตถุดิบจะถูกทำให้แห้งโดยน้ำแข็งจะถูกทำให้เปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นไอโดยการระเหิด การอบแห้งนี้จะถูกควบคุมด้วยพารามิเตอร์หลัก 2 ตัวคือ อุณหภูมิและความดัน ซึ่งมีผลต่อกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็งอัตราการระเหิดของผลึกน้ำแข็งจะขึ้นอยู่กับความดันไอของผลิตภัณฑ์นั้นๆ และความดันไอน้ำก็ขึ้นอุณหภูมิด้วยสิ่งสำคัญก็คือ การรักษาสมดุลระหว่างอุณหภูมิที่จะคงสถานะของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งอยู่ไม่ให้ละลายและอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดความดันไอของผลิตภัณฑ์มากที่สุด ความสมดุลนี้เป็นกุญแจสำคัญในการอบแห้งที่เหมาะสม ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะถูกแช่แข็งภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติกหรือเรียกว่า Glass Transition และอุณหภูมิจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นภายใต้อุณหภูมิจุดนี้ ซึ่งเป็นจุดแรกของการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1

กระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็งแบบใดๆ ก็ตามจะต้องมีการออกแบบให้มีการดึงโมเลกุลของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ ด้วยเหตุนี้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบการอบแห้งแบบแช่แข็งและอุปกรณ์อีกชนิดที่มีความสำคัญก็คือระบบควบแน่น (Condensing System) ซึ่งคอยเก็บความชื้นที่ถูกดึงออกจากผลิตภัณฑ์แช่แข็ง ขั้นตอนการทำงานก็คือ ปั๊มสุญญากาศจะดึงเอาก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ออกมา และในขณะเดียวกันอุปกรณ์ควบแน่นจะคอยควบแน่นก๊าซที่ออกมา ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของน้ำ

สิ่งที่สำคัญและต้องคำนึงถึงคือ ความดันไอของผลิตภัณฑ์ที่จะเป็นตัวช่วยส่งเสริมการระเหิดของผลึกน้ำแข็งจากผลิตภัณฑ์ที่ถูกแช่แข็งไปยังตัวอุปกรณ์ควบแน่นผลต่างของความดัน ระหว่างผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ควบแน่นจะเป็นตัวดึงเอาโมเลกุลของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิของอุปกรณ์ควบแน่นจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ในทางปฏิบัติการเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะมีผลต่อผลต่างของความดัน มากกว่าการลดอุณหภูมิของอุปกรณ์ควบแน่น (Aroma C.P., 2001)

หลังจากการอบแห้งขั้นตอนแรกสมบูรณ์แล้ว น้ำแข็งทั้งหมดจะระเหิดออกไป แต่ยังคงเหลือความชื้นที่ยังยึดติดแน่นกับตัวผลิตภัณฑ์ซึ่งเรียกว่า Bound Moisture ความชื้นที่ยังคงเหลืออยู่ภายในผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณ 15%



รูปที่ 2.4 การกระจายตัวของความชื้นที่ขั้นตอนต่างๆในการทำการอบแห้งแบบแช่แข็ง

การอบแห้งขั้นที่ 2 (Secondary Drying)

การอบแห้งในช่วงนี้จะค่อยๆให้ความร้อนแก่วัตถุดิบ ซึ่งจะช่วยลดความชื้นที่หลงเหลืออยู่ กระบวนการนี้เรียกว่าดีซอร์ปชัน (Desorption) การอบแห้งขั้นตอนที่ 2 โดยปกติจะกระทำที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องเล็กน้อย แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ด้วยนอกจากนี้แล้วสภาวะอื่นยังคงเหมือนกับการอบแห้งขั้นตอนที่ 1 คือ ความดันและอุณหภูมิของอุปกรณ์ควบแน่นเนื่องจากกระบวนการนี้

เป็นแบบดีซอร์ปทีฟ (Desorptive) ความดันสุญญากาศจะต้องต่ำเท่าที่จะทำได้และอุณหภูมิของอุปกรณ์ควบแน่นต้องเย็นที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ด้วยการกระจายตัวของความชื้นและลักษณะของพื้นผิวและชั้นที่ชั้นตอนต่าง ๆ (รูปที่ 2.4) เมื่อผลิตภัณฑ์ถูกแช่แข็ง ผลึกของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะสอดแทรกอยู่ระหว่างผลึกของตัวถูกละลายดังรูปที่ 2.4a เมื่อทำการอบแห้งน้ำจะถูกดึงออกจากบริเวณที่ผิวน้ำก่อนความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์จะค่อยๆ ลดลงดังรูปที่ 2.4b จนกระทั่งไม่มีผลึกน้ำแข็งเหลืออยู่ ผลิตภัณฑ์นั้นก็แห้งโดยสมบูรณ์ดังรูปที่ 2.4c

2.1.2 สารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรด

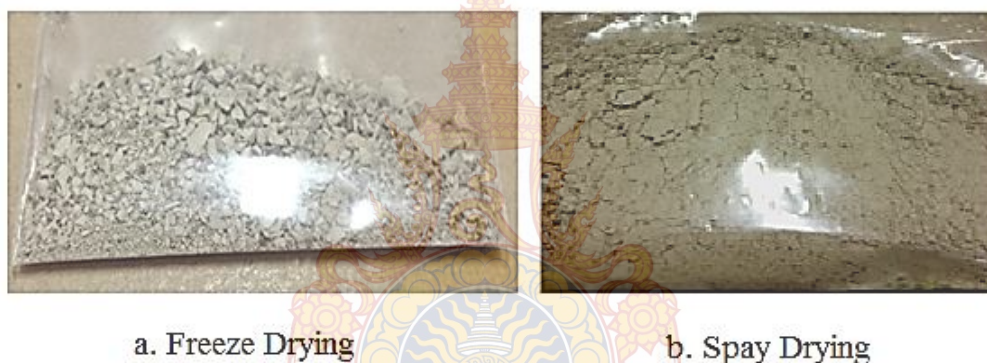
โบรมีเลนสามารถช่วยย่อยอาหารในผู้ป่วยที่ผ่าตัดตับอ่อน ผู้ป่วยที่ตับอ่อนไม่สามารถหลั่งเอนไซม์ย่อยอาหารได้ และผู้ป่วยที่ลำไส้เล็กไม่ทำงาน จากการศึกษาในผู้ป่วยจำนวน 12 ราย ที่ได้รับ Nutrizyme Core ซึ่งมีโบรมีเลน 50 mg ในรูปแบบเม็ดวันละ 2 ครั้ง นาน 3 เดือน เปรียบเทียบกับ Nutrizyme ที่ไม่มีส่วนผสมของโบรมีเลน พบว่า Nutrizyme Core สามารถเพิ่มการดูดซึมไขมันและลดน้ำหนักของอุจจาระได้ นอกจากนี้ยังเพิ่มการย่อยโปรตีนได้อีกด้วย เนื่องจากโบรมีเลนสามารถออกฤทธิ์ได้ในช่วง pH กว้าง จึงสามารถทำงานได้ดีทั้งในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก สามารถนำโบรมีเลนมาใช้ทดแทนเอนไซม์ pepsin และ trypsin ได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานการใช้โบรมีเลนรักษาแผลในกระเพาะอาหารในสัตว์ทดลอง ในการศึกษาทางคลินิก พบว่าหนูทดลองที่ได้รับโบรมีเลนโดยการกินทุกวันมีอุบัติการณ์และความรุนแรงของการเกิด Spontaneous Colitis ลดลง (Seligman B, 1962 and Knill-Jones RP, 1970)



รูปที่ 2.5 สารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรดที่ทำให้แห้งด้วยวิธี Tray Drying

จากการทดลองเตรียมสารสกัดโบรมิเลน โดยใช้น้ำคั้นจากเหง้าสับปะรด สามารถเตรียมสารสกัด (น้ำหนักเปียก) ได้ 0.58% w/v เมื่อแบ่งสารสกัดจำนวนหนึ่งไปทำให้แห้งด้วยวิธี tray dry ที่อุณหภูมิ 45°C พบว่า ได้สารสกัดที่มีน้ำหนักแห้ง คิดเป็น 48.8% ของน้ำหนักตะกอนเปียก แต่สารสกัดที่ได้มีสีดำเข้ม ดังรูปที่ 2.5

เมื่อนำสารสกัดไปทำให้แห้งด้วยวิธี Freeze Drying โดยการแช่สารสกัดที่อุณหภูมิ -20°C นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไปทำให้แห้ง พบว่า ได้สารสกัดสีขาว-เทา (รูปที่ 2.6a) มีน้ำหนักแห้ง คิดเป็น 44.2% ของน้ำหนักตะกอนเปียก และเมื่อทำการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธี Spray Drying ซึ่งมีการเติมสื่อ เช่น Lactose, Starch หรือ Dextrin เป็นต้น โดยควบคุม parameter คือ อุณหภูมิขาเข้า 120-150°C และอุณหภูมิขาออก 70-90°C ผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างที่ได้เป็นผงละเอียดสีน้ำตาลอ่อน (รูปที่ 2.6b) ซึ่งมีสีเข้มกว่าการทำแห้งด้วยวิธี Freeze Drying มีน้ำหนักแห้งคิดเป็น 47.7% ของน้ำหนักตะกอนเปียก



รูปที่ 2.6 สารสกัดโบรมิเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรดที่ทำให้แห้งด้วยวิธี Spray Drying

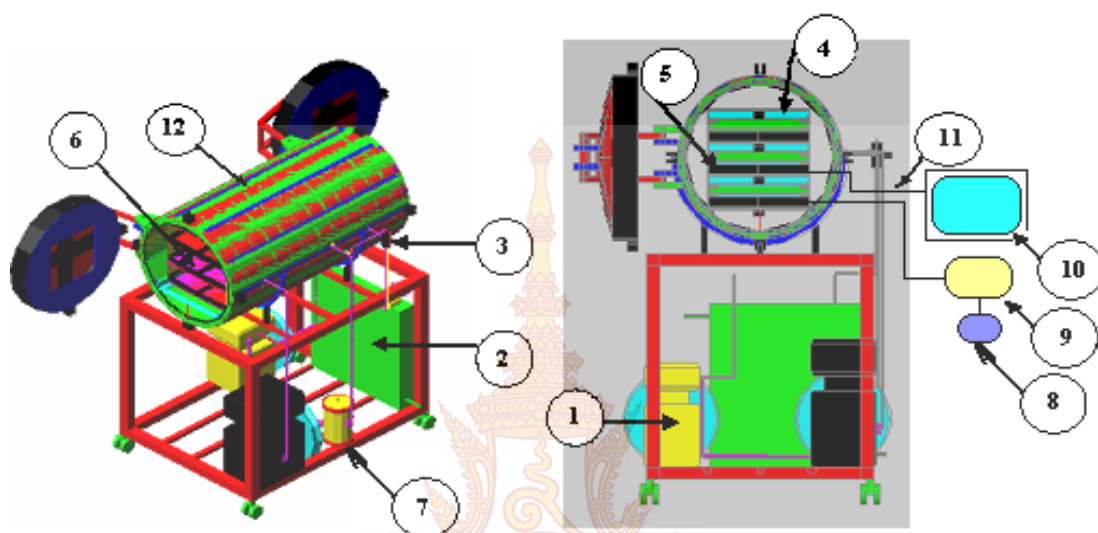
เมื่อนำสารสกัดโบรมิเลน 2 ตัวอย่าง ได้แก่ สารสกัดโบรมิเลนที่ทำแห้งด้วยวิธีการ freeze dry และ spray dry ไปทำการทดสอบกิจกรรมของเอนไซม์ (enzyme activity) พบว่า สารสกัดโบรมิเลนที่ทำแห้งด้วยวิธีการ freeze dry มีกิจกรรมของเอนไซม์สูงกว่าสารสกัดโบรมิเลนที่ทำแห้งด้วยวิธีการ spray dry ถึง 20% อาจมีสาเหตุจากการที่สารสกัดซึ่งเป็นสารกลุ่มโปรตีนถูกออกซิไดซ์ รวมทั้งได้รับความร้อนระหว่างการ spray dry ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานต่ำลง ดังนั้น วิธีการ freeze dry จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำแห้งของสารสกัดโบรมิเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนแผนการดำเนินงาน/ระเบียบวิธีวิจัย



Description	Particular
1. Compressor	3.5 kW of cooling capacity on -40°C evaporator unit and 40°C condenser unit, motor 2 hp, 3 phase (Open reciprocating)
2. Condenser	5.25 kW of heat rejection (air cooled)
3. Expansion valve	3.5 kW (Sporlan, Model CG-032) Thermostatic 3.5 kW, thermostatic charges available -18°C to -40°C
4. Evaporator	Cooling capacity 3.75 kW, Ø 15 mm of tubing (50×50 mm aligned parallel), 10 mm of the fin spacing, 10 m ² (heat transfer surface)
5. Cooling fan	1/3 hp, single phase, 1450 rpm
6. Tray	250×400×20 mm (SS-304)
7. Receiver tank	3.5 kW, Ø 10 mm of tubing
8. Flow meter	Testo GmbH and Co, Model testo 645
9. Inverter	T-VERTER 2N-Series-220*1.5 kW, Model N2-202-M
10. Data logger	Yokogawa, Model: DAQSTATION X200
11. Thermocouple	Type-S
12. Insulation	Polystyrene 50 mm of thickness

รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศเดิมที่ต้องการพัฒนา

1. ออกแบบและพัฒนาการทำงานของเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 3.1) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง โดยพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศจากเดิมดังนี้ (Wasan T., 2008)

1.1 ตัวทำความเย็น (Condenser: 2) จากเดิมระบายความร้อนด้วยอากาศ พัฒนาเป็นการระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยเพิ่มระบบทำน้ำเย็นขึ้นอีก 1 หน่วย

1.2 ถังเก็บน้ำยาทำเย็น (Receiver Tank: 7) ปรับปรุงให้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) โดยนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับตัวทำความเย็น ซึ่งยังมีผลทำให้ลดความเสียหายที่จะเกิดกับปั๊มอัดไอ (Compressor: 1) ด้วย

2. ทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ โดยทดสอบอบแห้งสารสกัดโบริมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรด โดยทดสอบอบแห้งที่ปริมาณ 3 4 และ 5 ลิตรของน้ำคั้นเหง้าสับปะรด ที่อุณหภูมิแช่แข็ง -15°C และ -20°C และอุณหภูมิสุดท้าย 35°C

3. ทดสอบคุณภาพของน้ำคั้นเหง้าสับปะรดที่อบแห้ง ทางเคมี คือ โบริมีเลน และทางกายภาพ คือ สี กลิ่น การละลายน้ำ เป็นต้น

4. สรุปผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5. จัดทำรายงานสรุปโครงการ

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. สารสกัดโบริมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรด

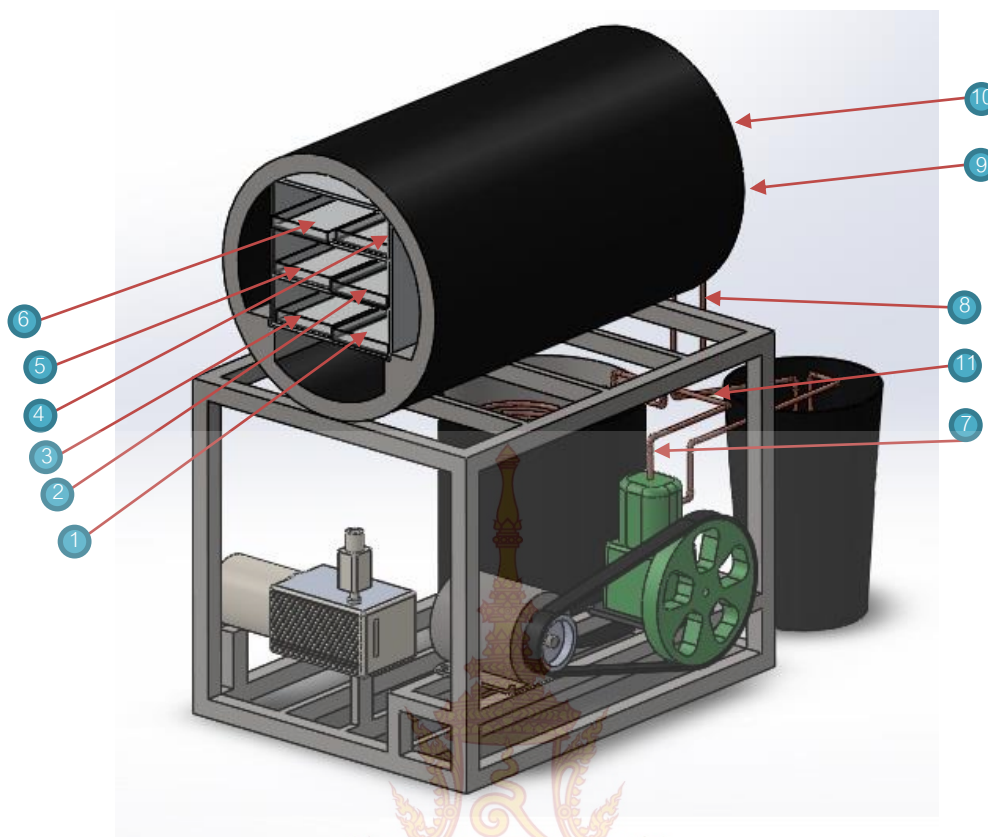
2. เทอร์โมคัปเปิ้ล ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับระบบทำความเย็น และภาชนะใส่โฟรโโบติก เพื่อหาค่าอุณหภูมิของตำแหน่งต่างๆ รูปที่ 3.2

ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล ณ จุดต่างๆ

- | | |
|---------------------------|---------------------|
| 1. ถาดใบที่ 1 | 2. ถาดใบที่ 2 |
| 3. ถาดใบที่ 3 | 4. ถาดใบที่ 4 |
| 5. ถาดใบที่ 5 | 6. ถาดใบที่ 6 |
| 7. ออกจาก Compressor | 8. ออกจาก Condenser |
| 9. ออกจาก Expansion Valve | 10. ที่ผิวคอลล์เย็น |
| 11. ออกจาก Evaporator | |

3. เครื่องอ่านและบันทึกค่าอุณหภูมิ (Data logger) รุ่น Yokogawa MV2000 เป็นเครื่อง

4. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล มีความละเอียด 10 g



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล

3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

การอบแห้งสารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสัปะรด ด้วยวิธีการอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ มีขั้นตอนและวิธีการทดลองดังต่อไปนี้

1. เปิดเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งเพื่อเตรียมพร้อมการทำงาน
2. การเตรียมสารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสัปะรดซึ่งน้ำหนักก่อนทำการอบแห้งแช่แข็งสุญญากาศ
3. ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ล เข้ากับเครื่องอ่านและบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) เพื่อเก็บค่าและวิเคราะห์ข้อมูลที่ช่วงเวลาต่างๆ
4. นำสารสกัดโบรมีเลนใส่ลงในภาตสแตนเลสทั้ง 6 ใบที่วางอยู่บนชั้นในตู้อบในปริมาณเท่ากันทุกภาต แล้วทำการปิดประตูตู้อบให้แน่นสนิท
5. เปิดเครื่องบันทึกอุณหภูมิ เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิของสารสกัดโบรมีเลนที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 1 min ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง
6. ควบคุมอุณหภูมิของสารสกัดโบรมีเลนจนกระทั่งอุณหภูมิสุดท้าย 40°C เสร็จสิ้นการทดลอง

7. บรรจุผงสารสกัดโพรมิเลนไสลลงในถุงพลาสติกใส จากนั้นนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ส่งทดสอบหาคุณสมบัติ เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลต่อไป
8. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง



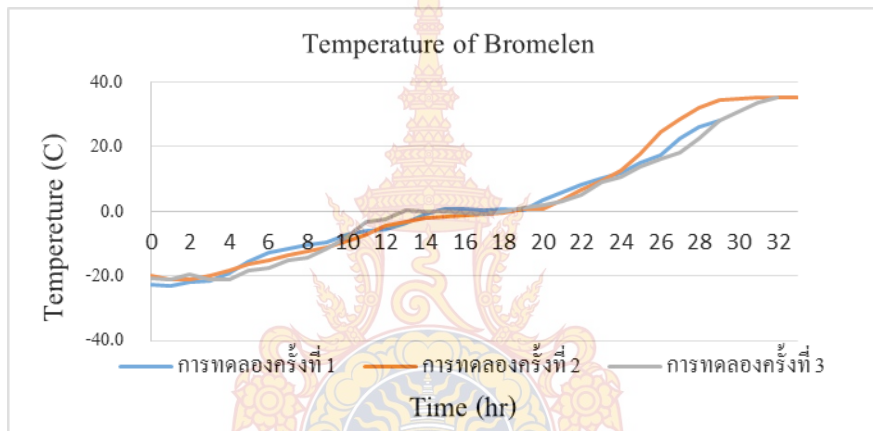
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการและการเตรียมการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการวิจัยได้นำสารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรด ทำการทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

4.1 การอบแห้งของสารสกัดโบรมีเลนน้ำคั้นเหง้าสับปะรด



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารสกัดโบรมีเลนจากน้ำคั้นเหง้าสับปะรดทั้ง 6 ถาด ต่อเวลาในการทดลอง

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลอุณหภูมิการอบแห้งแบบแช่แข็ง ของสารสกัดโบรมีเลนน้ำคั้นเหง้าสับปะรด ปริมาณ 900, 1962 และ 3381 g ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการทดลอง จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ -20°C เมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าใกล้ 0°C จากกราฟอุณหภูมิ 0°C จะคงที่เป็นระยะเวลา 5 hr เพื่อเปลี่ยนสถานะการอบแห้ง จากการให้ความเย็นก็เริ่มให้ความร้อนเพื่อจะดูดความชื้น และจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนเสร็จกระบวนการทดลอง

4.2 การทดสอบคุณสมบัติของสารสกัดโบรมีเลนน้ำคั้นเหง้าสับปะรด

การตรวจสอบการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme Activity) สามารถหาได้จากอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งโดยตรวจสอบจากปริมาณสารตั้งต้น (Substrate) ที่ลดลงหรือปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งค่าที่ได้จะสามารถใช้บอกปริมาณเอนไซม์ในหน่วยมาตรฐานสากล

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบกิจกรรมเอนไซม์ในรูปของ CDU (Casein Digestion Units) โดย CDU หมายถึงปริมาณของเอนไซม์ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายเคซีนให้ได้สารใหม่ ซึ่งอยู่ในอัตราเท่ากับไทโรซีน 1 mg/ml ในเวลา 1 min ในสถานะที่กำหนด

ผลการวัด Activity เปรียบเทียบการทำแห้งด้วยเครื่อง (Freeze by Welltech Biotechnology) เปรียบเทียบ (Freeze by Rmutk) ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัด Activity เปรียบเทียบการทำแห้งด้วยเครื่อง Lap scale เปรียบเทียบ Pilot scale

Test	Batch (cm)	Weight before trial (g)	Weight after treatment (g)	Freeze by Welltech Biotechnology (CDU/mg)	Freeze by Rmutk (CDU/mg)	Differences of Activity (Welltech-Rmutk)
1	1	900	**	568.80	538.58	5.31%
2	1	248	90.48	486.37	374.91	22.91%
	1.1	564	90.48	465.80	476.51	2.30%
	2	1150	266.10	475.85	457.25	3.91%
3	1	372	79.54	1,037.00	897.96	13.41%
	2	1,680	277.47	575.24	578.68	0.59%
	3	1,286	192.76	576.37	576.99	0.10%

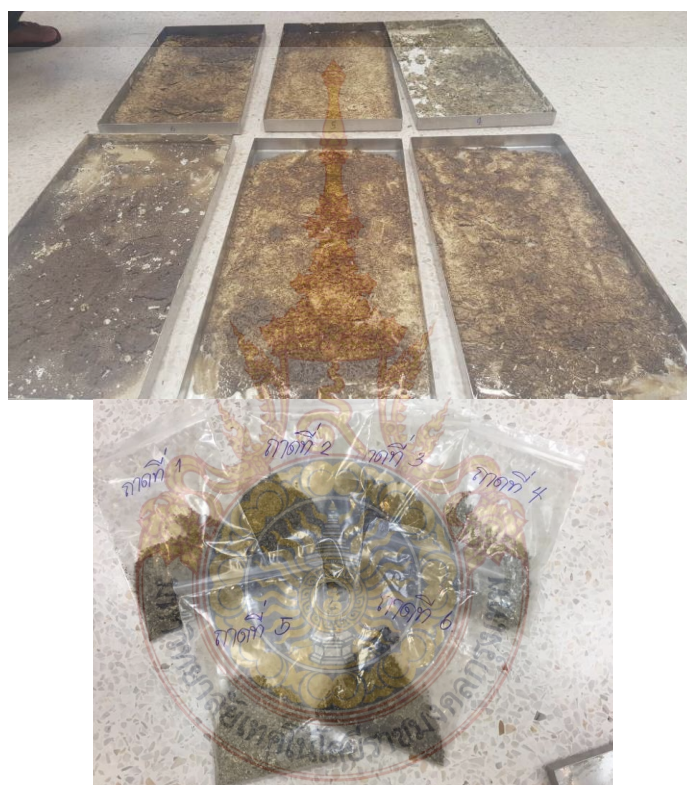
- Batch 1.1 cm ตกตะกอนซ้ำอีกรอบจาก Batch 1cmbhr

**น้ำหนัก หลังการทดลอง ของการทดลองครั้งที่ 1 ไม่ได้ทำการชั่ง เนื่องจากในการทดลองได้กำหนดเวลาที่ต้องส่งสารสกัดที่อบเรียบร้อยแล้วให้ทางบริษัท เวลเทค ไบโอเทคโนโลยี จำกัด เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติ Activity ของสารสกัดโบรมีเลนน้ำคั้นเหง้าสับปะรด

***ข้อมูลบางส่วนไม่สามารถเปิดเผยได้เนื่องจากเป็นความลับของทางบริษัท เวลเทค ไบโอเทคโนโลยี จำกัด

จากข้อมูลเบื้องต้นผลการทดลองทางบริษัท เวลเทค ไบโอเทคโนโลยี จำกัด (Freeze by Welltech Biotechnology) เปรียบเทียบการทดลองอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze by Rmutk) พบว่าสามารถทำแห้ง Enzyme Bromelain ได้ Activity ไม่แตกต่างกันยกเว้นสารสกัด Batch 1 จากเหง้า โดยการทดลองทาง บริษัท เวลเทค ไบโอเทคโนโลยี จำกัด (Freeze by Welltech Biotechnology) ให้ผล

Activity ดีกว่าการทดลองอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze by Rmutk) ทั้งนี้ ผู้วิจัยตั้งข้อสังเกตดังนี้ เนื่องด้วยในการทำแห้งของแต่ละครั้งของ Lot การผลิต ผู้วิจัยจะทำการสกัด 3 Batch โดยผลิตวันละ Batch และเอาไปทำแห้งในวันที่ 3 ระหว่างนั้นสารสกัด Batch ที่ 1 และ 2 จะถูกแช่รอไว้ที่ -20°C อาจเป็นไปได้ว่าสารสกัด Batch ที่ 1 ซึ่งผลิตนานสุดไม่ทำแห้งทันทีทำให้มี Activity น้อยกว่าและเนื่องด้วยสารสกัดที่รอทำแห้งด้วยการทดลองอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze by Rmutk) มีปริมาณมากกว่าอัตราการเสื่อมสลายของสารสกัดสูงกว่าการทดลองทาง บริษัท เวลเทค ไบโอเทคโนโลยี จำกัด (Freeze by Welltech Biotechnology)



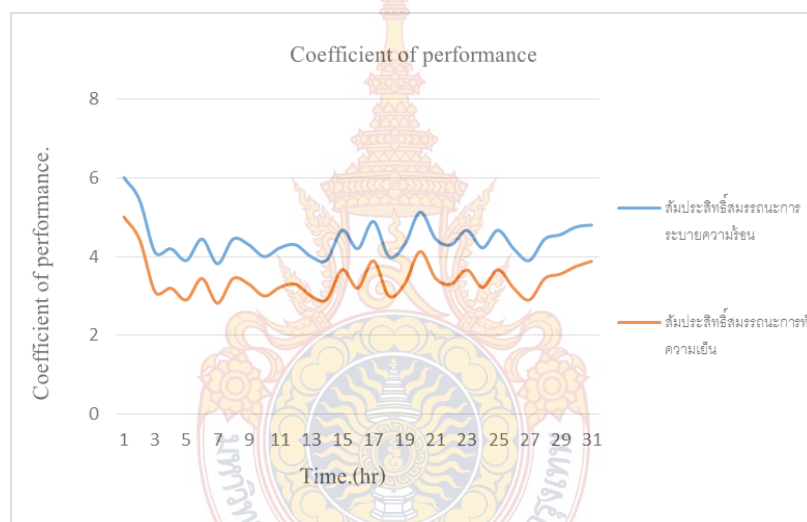
รูปที่ 4.2 สารสกัดโบรมีเลนจากการอบแห้งโดยกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง

ข้อสังเกตสำหรับสารสกัด Batch 2 ที่ผลิตวันที่ 27/04/16 ให้ผลค่า Activity ระหว่างทำแห้งด้วยการทดลองทางบริษัท เวลเทค ไบโอเทคโนโลยี จำกัด (Freeze by Welltech Biotechnology) และการทดลองอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze by Rmutk) พอๆ กัน ทั้งๆที่สารสกัดที่รอทำแห้งด้วย Freeze dry Labscale เข้า Freeze dry ช้ากว่า Pilot scale เนื่องด้วยเครื่องการทดลองการอบแห้งทางบริษัท เวลเทค ไบโอเทคโนโลยี จำกัด (Freeze by Welltech Biotechnology) เสียต้องรอเข้าการทำแห้ง (Freeze dry) ถึง 10 วันโดยผู้วิจัยตั้งข้อสังเกตว่าอาจจะเป็นเพราะว่าเก็บสารสกัดไว้ที่ -80°C จึงสามารถ

ช่วยรักษา Activity ของสารสกัดไว้ได้ตั้งนั้นเป็นไปไดักรณีทำแห้งที่ดีที่สุดคือเมื่อสกัดเสร็จแล้วควรเอาเข้าสู่กระบวนการทำแห้งทันทีหรือเก็บไว้ที่ -80°C หรือสามารถเก็บไว้ที่ -20°C ได้ไม่เกิน 2 วัน

อย่างไรก็ตามพบว่าเหง้าสับปะรดแต่ละฤดูกาลให้ผล Activity แตกต่างกันจากผลข้างต้น เหง้าสับปะรดช่วงเดือนเมษายนให้ Activity ต่ำกว่าเหง้าสับปะรดในช่วงเดือนมกราคม เปรียบเทียบระหว่างสารสกัดข้อ 1-4 ภายใต้วิธีสกัดเดียวกัน (การทดลองที่ 1) ทั้งนี้ผู้วิจัยทำการปรับวิธีการสกัดมาเป็นแบบการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 ซึ่งสามารถช่วยแก้ปัญหาเหง้า Activity น้อยในหน้าร้อนได้โดยพบว่าการสกัดแบบ การทดลองที่ 2 ให้ผล Activity ดีที่สุด

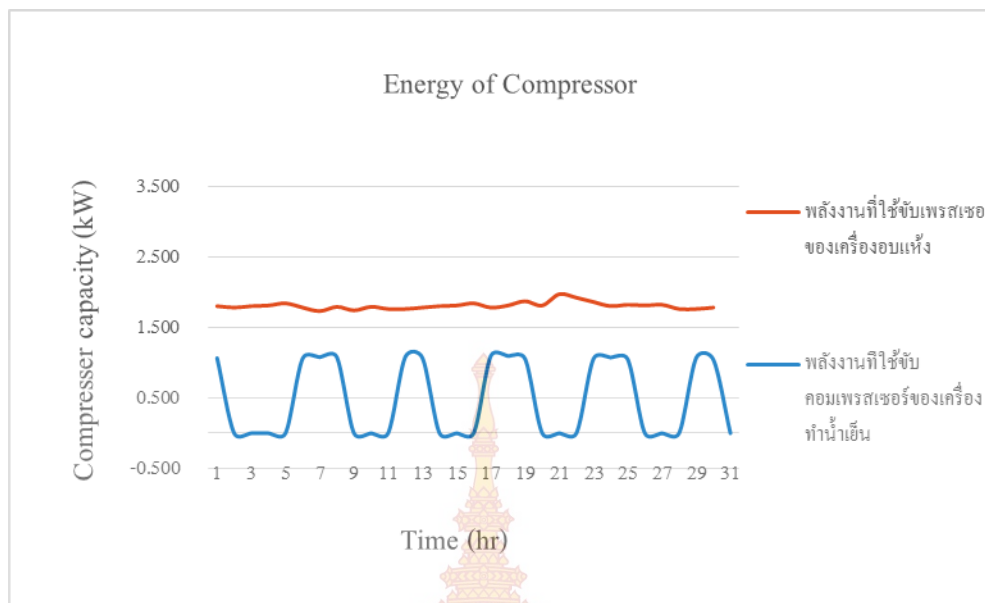
4.3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance) การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง



รูปที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นสัมประสิทธิ์สมรรถการระบายความร้อน

จากการทดลองการอบแห้งน้ำคั้นเหง้าสับปะรดด้วยวิธีอบแห้งแบบแช่แข็ง พบว่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น และสัมประสิทธิ์สมรรถนะการระบายความร้อนอยู่ในช่วง 3-6 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะจะแปรผันกับค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็น จากการทดลองการอบแห้งแบบแช่แข็งครั้งที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นเฉลี่ยอยู่ที่ 3.42 และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการระบายความร้อนเฉลี่ยคือ 4.42 และช่วงที่ประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นที่สูงที่สุดค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการระบายความร้อนคือ 4.12 และ 5.15 ตามลำดับ

4.4 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (Electrical Power) จากการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขับทางทฤษฎีของคอมเพรสเซอร์

จากรูปที่ 4.4 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนทางทฤษฎีของคอมเพรสเซอร์ต่อเวลาในกาทดลอง พบว่าการแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ป้อนในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ ในช่วงที่มีระบบการทำน้ำเย็นมาช่วยในการระบายความร้อน จะทำให้คอมเพรสเซอร์ใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง เพราะมีการช่วยให้สารทำความเย็นมีสภาพเป็นไอที่มากขึ้นก่อนกระบวนการอัดของคอมเพรสเซอร์ให้ค่าสัมประสิทธิ์ไม่คงที่และถ้าหยุดชุดการระบายความร้อนของชุดทำน้ำเย็น คอมเพรสเซอร์ก็จะเริ่มทำงานหนักขึ้น ก็จะใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยผลเฉลี่ยในการใช้พลังงานไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ อยู่ที่ 1.87 kw ซึ่งพลังงานไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ เนื่องจากถ้าค่ากำลังงานสุทธิต่ำ และในขณะเดียวกันได้ทำการเปิดเครื่องทำน้ำเย็นมาช่วยระบายความร้อนภายในถึงน้ำระบายความร้อนของคอนเดนเซอร์ จากกราฟผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็น อยู่ในช่วง 0-1 kw ซึ่งได้ทำการเดินเครื่องเมื่ออุณหภูมิของน้ำเกิน 25 °C เพื่อระบายความร้อนของน้ำในถังคอนเดนเซอร์ให้อยู่ในช่วง 20 °C ถึง 25 °C โดยค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์เครื่องทำน้ำเย็น อยู่ที่ 0.02 kw

ตารางที่ 4.2 แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์

No.	Average of Cooling efficiency (%)	Average of Energy of Compressor Freeze dry (kW)	Average of Energy of Compressor Cooling unit (kW)	Total of Energy of Compressor (kW)
1	87.95	55.96	14.96	70.92
2	87.95	55.96	16.12	72.08
3	77.02	57.26	17.63	74.89



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษากระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง โดยการนำสารสกัดน้ำคั้นเหง้าสับปะรดมาเป็นตัวแปรในการทดลอง ซึ่งสรุปผลจากการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การศึกษากระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง โดยใช้สารสกัดน้ำคั้นเหง้าสับปะรดในการทดลอง มีกระบวนการในการทดลอง 3 ขั้นตอน

กระบวนการที่ 1 การแช่แข็ง (Freezing) เป็นกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็งช่วงอุณหภูมิต่ำสุด -20°C เพื่อเปลี่ยนสถานะของเหลวเป็นของแข็ง ใช้เวลาประมาณ 10 hr

กระบวนการที่ 2 (Primary Drying) เป็นกระบวนการรักษาสมดุลของอุณหภูมิคงที่ 0°C ซึ่งเป็นกระบวนการคงสถานะของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ใช้เวลาประมาณ 4-5 hr

กระบวนการที่ 3 (Secondary Drying) เมื่อกระบวนการที่ 2 เสร็จสมบูรณ์ ได้ทำการให้ความร้อน (Heater) กับผลิตภัณฑ์ที่อยู่สภาวะของแข็ง ซึ่งจะทำให้เกิดการระเหิดออกไป โดยกระทำการเพิ่มอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง จาก 0 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิที่สูงที่สุดในระหว่าง $32-35^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาประมาณ 15 hr

5.1.2 ผลจากการตรวจสอบคุณสมบัติของสารสกัดน้ำคั้นเหง้าสับปะรด

ผลการทดลองทางบริษัท เวลเทค ไบโอเทคโนโลยี จำกัด (Freeze dry Lap scale) เปรียบเทียบการทดลองอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze dry Pilot scale) พบว่าสามารถทำแห้ง Enzyme Bromelain ได้ Activity ไม่แตกต่างกัน แต่พบว่าเหง้าสับปะรดในแต่ละฤดูกาลให้ผล Activity แตกต่างกัน ซึ่งจากผลข้างต้น เหง้าสับปะรดช่วงเดือนเมษายน ให้ Activity ต่ำกว่าเหง้าสับปะรดช่วงเดือนมกราคม

การทดลองครั้งที่ 3 มีค่า Activity สูงกว่าการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 เนื่องจาก การทดลองครั้งที่ 3 ใช้เวลาการสกัดวันละ Batch ซึ่งทำการสกัด 3 วันแล้วทำการทดลองอบแห้งทันที จึงทำให้ค่า Activity สูง ส่วนการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 มีค่า Activity ต่ำ เนื่องจากทำการสกัดแล้วทิ้งไว้นานจะเกินไป

ข้อสังเกตสำหรับการสกัดสารสกัดโบรมีเลน พบว่าเมื่อสกัดเรียบร้อยแล้วควรเอาเข้าสู่กระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็งทันที หรือเก็บไว้ในที่อุณหภูมิ -80°C แต่ถ้าเก็บไว้ -20°C สามารถเก็บไว้ได้ไม่เกิน 2 วัน

5.1.3 ผลการทดลองการอบแห้งแบบแช่แข็ง

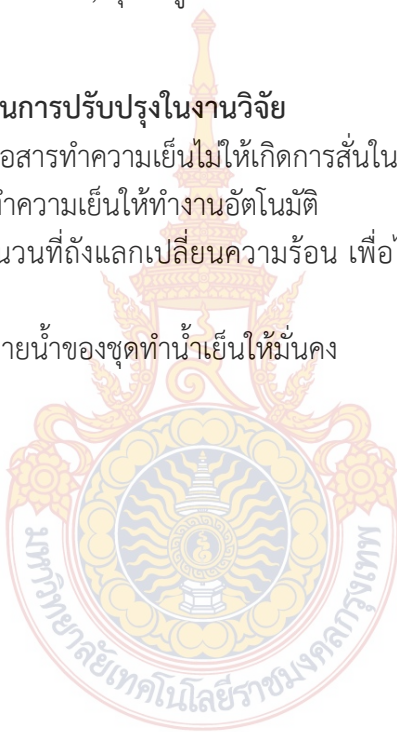
จากการทดลองของเครื่องอบแห้งทั้ง 3 การทดลอง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4.12, 3.42 และ 3.44 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการระบายความร้อนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 5.15, 4.22 และ 4.44 ตามลำดับ ค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นของเครื่องอบ

แห้งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 90.64, 88.93 และ 88.93 % ตามลำดับ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ของเครื่องอบแห้งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.87, 1.81 และ 1.84 kW ตามลำดับ และพบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์เครื่องทำน้ำเย็นเฉลี่ยสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากันทั้งสามครั้งคือ 0.02 kW

จากการทดลองทั้ง 3 การทดลองพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นสูงที่สุด เฉลี่ยคือ 88.12 % ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นที่มีค่าสูง ระบบการทำความเย็นจะลดลง กล่าวคือ การทำความเย็นจะลดลง เป็นผลดีเนื่องจากการอนุรักษ์พลังงาน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดี ซึ่งค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ ประการได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ, อุณหภูมิของอีวาโปเรเตอร์, อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์ และ กำลังขับของคอมเพรสเซอร์

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการปรับปรุงในงานวิจัย

- 5.2.1 ควรแก้ไขระบบท่อสารทำความเย็นไม่ให้เกิดการสั่นในขณะเดินเครื่อง
- 5.2.2 ควรปรับปรุงชุดทำความเย็นให้ทำงานอัตโนมัติ
- 5.2.3 ควรมีการหุ้มฉนวนที่ถังแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความเย็นให้กับสิ่งแวดล้อม
- 5.2.4 ควรติดตั้งท่อระบายน้ำของชุดทำน้ำเย็นให้มั่นคง



บรรณานุกรม (Bibliography)

1. Aran S. Mujumdar, Freeze drying In: Hand Book of Industrial Drying Canada, 1987: 296-326.
2. Aroma C.P., Refrigeration and Air Conditioning, Second edition, McGraw Hill, New York, 2001.
3. Knill-Jones RP, Pearce H, Batten J and Williams R. Comparative trial of Nutrizyme in chronic pancreatic insufficiency. Br. Med. J. 1970; 4: 21-24.
4. Kozo N., Hitoshi K.i and Toshimasa Y., Effect of freezing conditions on freeze drying rate of concentrated liquid foods, Food Engineering and Process Applications 1985; Vol.1: 445-450.
5. Wasan T., Kittichai T., and Kiatfa T., Continuous Production of Lime Juice by Vacuum Freeze Drying, American Journal of Applied Sciences 2008; 5(8): 959-962.
6. Wasan T. and Kittichai T., Air Blast Freezing of Lime Juice: Effect of Processing Parameter, American Journal of Engineering and Applied Sciences 2008; 1(1): 34-40.
7. Wasan T., Kittrichai T. and Kaitfa T. A study of Vacuum Freeze Drying: Case Study on Lime Powder Production, Technology and Innovation for Sustainable Development Conference 2006.
8. Seligman B. Bromelain an anti-inflammatory agent. Angiology. 1962; 13: 508-510.
9. วสันต์ เจริญสุวรรณ 2550, การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ, วารสารเทคนิค ปีที่ 24 ฉบับที่ 277 เดือนกรกฎาคม 2550, หน้า 119 - 123.

ภาคผนวก (Appendix)

ภาคผนวก ก.
ผลกาทดลองและคำนวณ

การทดลองครั้งที่ 1

ตาราง ก.1.1 ความดันและพลังงานไฟฟ้า

เวลา (hr.)	ความดันแก๊ส (PSI)				กระแสไฟฟ้าเครื่องอบแห้ง		กระแสไฟฟ้าเครื่องทำน้ำเย็น	
	P1	P2	P3	P4	แอมป์	โวลต์	แอมป์	โวลต์
0	0.2	160	180	0	3.52	380	6.05	220
1	0.3	175	195	0.1	3.5	380	0	220
2	8	179	197	0.8	3.93	380	0	220
3	8	165	180	0.2	3.58	380	0	220
4	16	160	175	13	3.47	380	0	220
5	16	165	180	14	3.44	380	6.02	220
6	16	165	184	14	3.44	385	0	220
7	16	170	185	14	3.47	380	0	220
8	16	145	160	0.2	3.4	380	0	220
9	16	149	160	5	3.3	380	0	220
10	16	150	167	3	3.33	380	0	220
11	16	156	172	3	3.27	380	6.14	220
12	16	160	180	5	3.39	380	0	220
13	16	160	175	10	3.36	380	0	220
14	16	155	170	5	3.38	380	0	220
15	16	160	175	10	3.38	380	0	220
16	16	165	180	10	3.41	380	6.23	220
17	16	165	182	10	3.43	380	0	220
18	16	170	185	10	3.48	380	0	220
19	16	155	175	10	3.47	380	0	220
20	16	162	176	0	3.38	380	0	220
21	16	165	180	0	3.41	380	6.00	220
22	16	145	160	0	3.37	380	0	220
23	16	150	165	0	3.42	380	0	220

ตาราง ก.1.1 (ต่อ) ความดันและพลังงานไฟฟ้า

เวลา (hr.)	ความดันเกจ (PSI)				กระแสไฟฟ้าเครื่องอบแห้ง		กระแสไฟฟ้าเครื่องทำน้ำเย็น	
	P1	P2	P3	P4	แอมป์	โวลต์	แอมป์	โวลต์
24	16	155	170	0	3.34	380	0	220
25	16	160	180	0	3.39	380	0	220
26	16	170	180	0	3.43	380	0	220
27	16	152	167	2	3.53	380	6.07	220
28	16	155	170	2	3.35	380	0	220
29	16	160	175	2	3.36	380	0	220
30	16	165	180	2	3.45	380	0	220
31	16	167	180	2	3.49	380	0	220
32	16	175	180	2	3.33	380	0	220
33	16	150	165	4	3.43	380	0	220

ตาราง ก.1.2 อุณหภูมิ

เวลา (hr.)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
0	19.0	83.9	66.9
1	23.0	82.2	63.1
2	16.7	82.9	68.9
3	28.5	64.3	38.0
4	31.0	57.2	31.5
5	30.6	62.7	33.7
6	30.7	64.5	34.4

ตาราง ก.1.2 (ต่อ) อุณหภูมิ

เวลา (hr.)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
7	30.6	60.8	33.5
8	26.3	66.8	40.1
9	28.2	66.8	36.8
10	30.3	69.1	37.7
11	30.8	72.2	41.4
12	31.3	73.6	41.3
13	28.6	70.4	40.5
14	28.7	69.0	39.2
15	29.1	68.1	38.2
16	29.4	68.3	38.4
17	29.3	69.3	39.3
18	32.5	64.3	37.0
19	30.1	73.4	41.5
20	30.5	74.3	41.4
21	32.7	68.2	39.8
22	29.6	72.4	41.0
23	29.6	74.5	42.3
24	29.8	73.3	42.8
25	29.8	74.9	42.4
26	32.6	60.4	36.9
27	29.6	68.0	40.6
28	28.7	69.2	40.2

ตาราง ก.1.2 (ต่อ) อุณหภูมิ

เวลา (hr.)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
29	28.6	66.0	38.2
30	28.2	67.9	39.0
31	23.0	66.8	37.7
32	27.3	69.0	40.3
33	28.7	69.6	40.8

ตาราง ก.1.3 ค่าที่อ่านจากกราฟ P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	h1 (kJ/kg)	h2 (kJ/kg)	h3=h4 (kJ/kg)	$\dot{W}$ (kW)	$\dot{m}$ (kg/s)
0	345	380	235	1.923	0.055
1	395	440	235	1.912	0.042
2	390	435	230	2.147	0.048
3	400	430	235	1.956	0.065
4	405	420	235	1.896	0.126
5	405	430	235	1.879	0.075
6	405	430	235	1.879	0.075
7	425	415	235	1.896	0.190
8	400	435	235	1.857	0.053
9	395	425	235	1.803	0.060
10	400	425	230	1.819	0.073
11	405	430	235	1.786	0.071
12	403	430	235	1.852	0.069
13	395	430	230	1.835	0.052
14	395	430	230	1.846	0.053

ตาราง ก.1.3 (ต่อ) ค่าที่อ่านจากกราฟ P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	h ₁ (kJ/kg)	h ₂ (kJ/kg)	h ₃ =h ₄ (kJ/kg)	$\dot{W}$ (kW)	$\dot{m}$ (kg/s)
15	400	435	235	1.846	0.053
16	400	435	235	1.863	0.053
17	400	435	235	1.874	0.054
18	405	430	235	1.901	0.076
19	400	430	235	1.896	0.063
20	405	430	235	1.846	0.074
22	400	430	235	1.841	0.061
23	400	430	230	1.868	0.062
24	400	425	235	1.874	0.075
25	400	430	235	1.852	0.062
26	400	420	235	1.874	0.094
27	400	430	230	1.928	0.064
28	395	430	230	1.830	0.052
29	400	430	235	1.835	0.061
30	400	435	230	1.885	0.054
31	400	430	230	1.906	0.064
32	400	435	230	1.819	0.052
33	400	435	230	1.874	0.054

ตาราง ก.1.4 ค่าการคำนวณจาก P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	$\dot{Q}_C$ (kW)	$\dot{Q}_E$ (kW)	COP _H	COP _R
0	7.966	6.043	4.142857	3.143
1	8.710	6.798	4.555556	3.556

ตาราง ก.1.4 (ต่อ) ค่าการคำนวณจาก P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	$\dot{Q}_C$ (kW)	$\dot{Q}_E$ (kW)	COP_H	COP_R
2	9.780	7.633	4.555556	3.556
3	12.712	10.756	6.5	5.500
4	23.379	21.483	12.33333	11.333
5	14.658	12.778	7.8	6.800
6	14.658	12.778	7.8	6.800
7	34.120	36.016	18	19.000
8	10.613	8.756	5.714286	4.714
9	11.417	9.614	6.333333	5.333
10	14.189	12.370	7.8	6.800
11	13.933	12.147	7.8	6.800
12	13.375	11.523	7.222222	6.222
13	10.488	8.653	5.714286	4.714
14	10.551	8.704	5.714286	4.714
15	10.551	8.704	5.714286	4.714
16	10.645	8.782	5.714286	4.714
17	10.707	8.833	5.714286	4.714
18	14.828	12.927	7.8	6.800
19	12.321	10.426	6.5	5.500
20	14.402	12.556	7.8	6.800
21	14.530	12.667	7.8	6.800
22	11.966	10.125	6.5	5.500
23	12.455	10.587	6.666667	5.667
24	14.240	12.367	7.6	6.600
25	12.037	10.185	6.5	5.500
26	17.332	15.458	9.25	8.250

ตาราง ก.1.4 (ต่อ) ค่าการคำนวณจาก P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	$\dot{Q}_C$ (kW)	$\dot{Q}_E$ (kW)	COP_H	COP_R
27	12.856	10.927	6.666667	5.667
28	10.457	8.627	5.714286	4.714
29	11.931	10.095	6.5	5.500
30	11.039	9.154	5.857143	4.857
31	12.710	10.803	6.666667	5.667
32	10.655	8.836	5.857143	4.857
33	10.975	9.101	5.857143	4.857

การทดลองครั้งที่ 2

ตาราง ก.2.1 ความดันและพลังงานไฟฟ้า

เวลา (hr.)	ความดันเกจ (PSI)				กระแสไฟฟ้าเครื่องอบแห้ง		กระแสไฟฟ้าเครื่องทำน้ำเย็น	
	P1	P2	P3	P4	แอมป์	โวลต์	แอมป์	โวลต์
0	4	200	195	4	3.77	380	6.2	220
1	3	195	200	5	3.47	380	0	220
2	5	170	170	10	3.26	380	0	220
3	18	165	167	15	3.14	380	0	220
4	18	165	168	15	3.19	380	0	220
5	18	165	168	18	3.12	380	6.05	220
6	15	150	155	17	3.17	380	0	220
7	16	155	155	17	3.29	380	0	220
8	18	155	157	20	3.19	380	0	220
9	18	163	165	20	3.23	380	0	220
10	18	166	170	20	3.24	380	6.22	220
11	18	170	172	20	3.24	380	0	220

ตาราง ก.2.1 (ต่อ) ความดันและพลังงานไฟฟ้า

เวลา (hr.)	ความดันเกจ (PSI)				กระแสไฟฟ้าเครื่องอบแห้ง		กระแสไฟฟ้าเครื่องทำ น้ำเย็น	
	P1	P2	P3	P4	แอมป์	โวลต์	แอมป์	โวลต์
12	18	150	155	20	3.26	380	0	220
13	18	155	155	22	3.3	380	0	220
14	18	160	165	22	3.32	380	0	220
15	18	165	167	22	3.38	380	6.13	220
16	18	155	155	22	3.26	380	0	220
17	18	145	149	22	3.32	380	0	220
18	10	150	152	10	3.44	380	0	220
19	14	155	160	16	3.32	380	0	220
20	14	165	165	15	3.62	380	0	220
21	15	150	155	18	3.52	380	5.99	220
22	18	155	155	18	3.42	380	0	220
23	18	155	158	19	3.3	380	0	220
24	18	165	167	19	3.34	380	0	220
25	18	170	180	20	3.32	380	0	220
26	18	160	162	20	3.34	380	0	220
27	18	170	177	20	3.24	380	6.07	220
28	18	166	168	22	3.24	380	0	220
29	18	170	170	22	3.26	380	0	220
30	18	165	170	22	3.26	380	0	220

ตาราง ก.2.2 อุณหภูมิ

เวลา (hr.)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
0	11.9	78.6	4.5
1	20.5	81.8	6.4
2	27.9	61.2	27.1
3	31.2	55.0	27.9
4	30.4	59.0	27.3
5	33.3	49.2	29.8
6	29.1	62.4	25.2
7	29.1	62.3	28.1
8	29.6	62.2	9.0
9	29.7	63.0	27.6
10	29.8	63.6	24.5
11	33.1	59.8	8.5
12	28.5	63.2	29.1
13	29.7	61.1	15.9
14	29.7	65.3	7.5
15	29.8	65.7	6.0
16	31.6	61.6	6.8
17	27.1	63.6	5.3
18	24.7	63.2	22.1
19	24.8	71.3	13.3
20	27.2	69.6	9.3
21	19.6	78.1	19.8
22	25.2	70.6	30.0
23	27.1	66.2	4.9
24	27.5	69.9	25.6

ตาราง ก.2.2 (ต่อ) อุณหภูมิ

เวลา (hr.)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
25	27.9	70.2	8.5
26	28.3	70.5	25.9
27	28.3	67.2	5.2
28	26.9	71.9	4.8
29	28.1	65.8	8.1
30	28.3	68.0	8.6

ตาราง ก.2.3 ค่าที่อ่านจากกราฟ P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	h1 (kJ/kg)	h2 (kJ/kg)	h3=h4 (kJ/kg)	$\dot{W}$ (kW)	$\dot{m}$ (kg/s)
0	395	425	245	1.800	0.060
1	395	430	240	1.780	0.051
2	390	440	235	1.800	0.036
3	395	445	235	1.810	0.036
4	380	430	235	1.840	0.037
5	395	440	240	1.780	0.040
6	385	440	230	1.730	0.0031
7	385	430	230	1.790	0.040
8	395	445	230	1.740	0.035
9	385	435	235	1.790	0.036
10	380	425	235	1.760	0.039
11	395	445	230	1.760	0.035
12	360	430	230	1.780	0.036

ตาราง ก.2.3 (ต่อ) ค่าที่อ่านจากกราฟ P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	h1 (kJ/kg)	h2 (kJ/kg)	h3=h4 (kJ/kg)	$\dot{W}$ (kW)	$\dot{m}$ (kg/s)
13	390	445	230	1.800	0.033
14	400	445	235	1.810	0.040
15	395	445	235	1.840	0.037
16	400	445	225	1.780	0.040
17	390	445	225	1.810	0.033
18	395	445	230	1.870	0.037
19	395	435	230	1.810	0.045
20	390	435	235	1.970	0.044
21	395	445	230	1.920	0.038
22	395	440	230	1.860	0.041
23	380	425	235	1.800	0.040
24	400	445	235	1.820	0.040
25	395	445	235	1.810	0.036
26	395	445	235	1.810	0.036
27	385	435	240	1.820	0.036
28	395	440	235	1.760	0.039
29	385	425	235	1.780	0.045
30	405	425	235	1.780	0.089

ตาราง ก.2.4 ค่าการคำนวณจาก P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	$\dot{Q}_C$ (kW)	$\dot{Q}_E$ (kW)	COP_H	COP_R
0	10.800	9.000	6	5.000
1	9.663	7.883	5.428571	4.429
2	7.380	5.580	4.1	3.100
3	7.602	5.792	4.2	3.200
4	7.176	5.336	3.9	2.900
5	7.911	6.131	4.444444	3.444
6	6.605	4.875	3.818182	2.818
7	7.956	6.166	4.444444	3.444
8	7.482	5.742	4.3	3.300
9	7.160	5.370	4	3.000
10	7.431	5.671	4.222222	3.222
11	7.568	5.808	4.3	3.300
12	7.120	5.340	4	3.000
13	7.036	5.236	3.909091	2.909
14	8.447	6.637	4.666667	3.667
15	7.728	5.888	4.2	3.200
16	8.702	6.922	4.888889	3.889
17	7.240	5.430	4	3.000
18	8.041	6.171	4.3	3.300
19	9.276	7.466	5.125	4.125
20	8.756	6.786	4.444444	3.444
21	8.256	6.336	4.3	3.300
22	8.680	6.820	4.666667	3.667
23	7.600	5.800	4.222222	3.222
24	8.493	6.673	4.666667	3.667

ตาราง ก.2.4 (ต่อ) ค่าการคำนวณจาก P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	$\dot{Q}_C$ (kW)	$\dot{Q}_E$ (kW)	COP_H	COP_R
25	7.602	5.792	4.2	3.200
26	7.098	5.278	3.9	2.900
27	7.822	6.062	4.444444	3.444
28	8.018	6.258	4.555556	3.556
29	8.455	6.675	4.75	3.750
30	16.910	15.130	4.8	3.880

การทดลองครั้งที่ 3

ตาราง ก.3.1 ความดันและพลังงานไฟฟ้า

เวลา (hr.)	ความดันเกจ (PSI)				กระแสไฟฟ้าเครื่องอบแห้ง		กระแสไฟฟ้าเครื่องทำน้ำเย็น	
	P1	P2	P3	P4	แอมป์	โวลต์	แอมป์	โวลต์
0	14	195	215	22	3.91	380	6.16	220
1	14	165	185	22	3.9	380	0	220
2	1	165	185	3	3.4	380	6.32	220
3	4	165	185	2	3.43	380	0	220
4	18	145	160	12	3.16	380	0	220
5	14	150	165	12	3.24	380	0	220
6	14	155	170	12	3.85	380	0	220
7	14	160	175	12	3.26	380	0	220
8	14	160	180	12	3.29	380	0	220

ตาราง ก.3.1 (ต่อ) ความดันและพลังงานไฟฟ้า

เวลา (hr.)	ความดันเกจ (PSI)				กระแสไฟฟ้าเครื่องอบแห้ง		กระแสไฟฟ้าเครื่องทำน้ำเย็น	
	P1	P2	P3	P4	แอมป์	โวลต์	แอมป์	โวลต์
9	14	165	185	12	3.32	380	0	220
10	14	155	170	12	3.34	380	6.25	220
11	14	155	170	12	3.23	380	0	220
12	14	160	180	12	3.38	380	0	220
13	1	150	170	10	3.35	380	0	220
14	14	165	175	10	3.31	380	0	220
15	18	160	175	10	3.29	380	0	220
16	14	155	170	8	3.45	380	0	220
17	14	160	175	6	3.35	380	6.16	220
18	16	160	175	8	3.28	380	0	220
19	14	150	165	4	3.2	380	0	220
20	12	155	170	2	3.38	380	0	220
21	12	165	180	2	3.47	380	0	220
22	10	155	175	2	3.44	380	0	220
23	10	165	180	2	3.45	380	6.34	220
24	10	170	180	2	3.22	380	0	220
25	10	160	175	2	3.41	380	0	220
26	18	150	165	12	3.38	380	0	220
27	12	160	175	4	3.2	380	6.31	220
28	12	160	180	2	3.32	380	0	220
29	12	165	175	2	3.31	380	0	220
30	12	160	175	2	3.3	380	0	220

ตาราง ก.3.2 อุณหภูมิ

เวลา (hr.)	T1 (° C)	T2 (° C)	T3 (° C)
0	20.4	70.7	62.6
1	17.8	81.8	67.8
2	22.7	82.8	64.7
3	28.0	63.0	39.3
4	28.4	63.9	36.0
5	28.6	67.9	38.4
6	29.3	67.1	37.6
7	29.3	67.4	37.5
8	29.5	66.2	37.3
9	27.9	68.6	38.4
10	29.0	66.5	37.4
11	28.6	67.5	37.9
12	28.0	68.1	40.3
13	29.5	70.0	40.6
14	31.7	64.7	38.2
15	28.8	72.6	42.0
16	29.9	70.9	41.1
17	32.0	65.1	37.4
18	26.9	73.2	44.2
19	26.0	76.3	48.6
20	25.2	76.9	53.0
21	23.8	79.8	55.9
22	24.7	78.4	54.6
23	28.2	75.1	50.3
24	24.7	77.2	54.0

ตาราง ก.3.2 (ต่อ) อุณหภูมิ

เวลา (hr.)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
25	26.1	64.5	45.6
26	27.2	65.3	46.3
27	27.5	78.9	53.5
28	27.1	78.9	53.9
29	27.1	77.8	54.0
30	27.1	77.8	54.0

ตาราง ก.3.3 ค่าที่อ่านจากกราฟ P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	h1 (kJ/kg)	h2 (kJ/kg)	h3=h4 (kJ/kg)	$\dot{W}$ (kW)	$\dot{m}$ (kg/s)
0	380	440	230	2.135927	0.035599
1	385	440	225	2.130464	0.038736
2	400	440	210	1.857328	0.046433
3	390	440	210	1.873716	0.037474
4	400	435	210	1.726222	0.049321
5	390	440	240	1.769924	0.035398
6	395	435	210	2.10315	0.052579
7	390	430	210	1.780849	0.044521
8	385	430	225	1.797238	0.039939
9	390	430	215	1.813626	0.045341
10	385	430	230	1.824551	0.040546
11	390	430	210	1.764461	0.044112
12	390	430	210	1.846402	0.04616
13	395	435	210	1.830014	0.04575

ตาราง ก.3.3 (ต่อ) ค่าที่อ่านจากกราฟ P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	h1 (kJ/kg)	h2 (kJ/kg)	h3=h4 (kJ/kg)	$\dot{W}$ (kW)	$\dot{m}$ (kg/s)
14	380	425	240	1.808163	0.040181
15	400	435	210	1.797238	0.05135
16	385	430	240	1.884641	0.041881
17	385	425	230	1.830014	0.04575
18	385	435	230	1.791775	0.035835
19	400	435	210	1.748073	0.049945
20	395	435	230	1.846402	0.04616
21	390	440	240	1.895567	0.037911
22	390	440	210	1.879178	0.037584
23	390	435	230	1.884641	0.041881
24	390	435	220	1.758998	0.039089
25	390	425	210	1.86279	0.053223
27	390	430	215	1.748073	0.043702
28	400	435	210	1.813626	0.051818
29	390	435	230	1.808163	0.040181
30	390	435	230	1.8027	0.04006

ตาราง ก.3.4 ค่าการคำนวณจาก P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	$\dot{Q}_C$ (kW)	$\dot{Q}_E$ (kW)	COP_H	COP_R
0	7.475743	5.339817	3.5	2.5
1	8.328177	6.197713	3.909091	2.909091
2	10.67963	8.822306	5.75	4.75
3	8.619092	6.745377	4.6	3.6

ตาราง ก.3.4 (ต่อ) ค่าการคำนวณจาก P-h ของสาร R-404A

เวลา (hr.)	$\dot{Q}_C$ (kW)	$\dot{Q}_E$ (kW)	COP_H	COP_R
4	11.09714	9.37092	6.428571	5.428571
5	7.079695	5.309772	4	3
6	11.83022	9.72707	5.625	4.625
7	9.794671	8.013822	5.5	4.5
8	8.187415	6.390178	4.555556	3.555556
9	9.748238	7.934612	5.375	4.375
10	8.109116	6.284565	4.444444	3.444444
11	9.704536	7.940075	5.5	4.5
12	10.15521	8.308809	5.5	4.5
13	10.29383	8.463814	5.625	4.625
14	7.433559	5.625396	4.111111	3.111111
15	11.55367	9.756432	6.428571	5.428571
16	7.957374	6.072733	4.222222	3.222222
17	8.921318	7.091304	4.875	3.875
18	7.475743	5.339817	3.5	3.1
19	7.346277	5.554502	4.1	5.428571
20	11.23761	9.489539	6.428571	4.125
21	9.462811	7.616409	5.125	3
23	8.644221	6.765042	4.6	3.555556
24	8.585588	6.700946	4.555556	3.777778
25	8.404104	6.645105	4.777778	5.142857
26	11.44285	9.580064	6.142857	3.111111
27	7.590764	5.744362	4.111111	4.375
28	9.395892	7.647819	5.375	5.428571
29	11.65902	9.845397	6.428571	3.555556

30	8.237187	6.429024	4.555556	3.555556
----	----------	----------	----------	----------

แสดงวิธีการการคำนวณการหาค่าของระบบการทำความเย็น

กรณีการหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ ใช้สมการนี้

$$\dot{W} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \quad \text{kW}$$

$$\dot{W} = V \times I \times \cos \phi \quad \text{kW}$$

กรณีการหาอัตราการไหลเชิงมวล ใช้สมการนี้

$$\dot{m} = \dot{W} / (h_2 - h_1) \quad \text{kW}$$

กรณีการหาพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทออกจากคอนเดนเซอร์ ใช้สมการนี้

$$Q_c = \dot{m} (h_2 - h_3) \quad \text{kW}$$

กรณีการหาค่าพลังงานที่ผลิตได้ในอีวาโปรเรเตอร์ ใช้สมการนี้

$$Q_E = \dot{m} (h_4 - h_1) \quad \text{kW}$$

กรณีการหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบ ใช้สมการนี้

$$\text{COP}_R = \dot{Q}_E / \dot{W}$$

กรณีการหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระบบทำความเย็น ใช้สมการนี้

$$\text{COP}_H = \dot{Q}_C / \dot{W}$$

เมื่อ	$\dot{W}$	คือ กำลังขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์	W,kW
	$\dot{Q}_C$	คือ ความสามารถในการทำความร้อน	W,kW
	$\dot{Q}_E$	คือ ความสามารถในการทำความเย็น	W,kW
	V	คือ ความต่างศักย์ของพลังงานไฟฟ้า	Volt
	I	คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้	(A)
	COSØ	คือ Power Factor	
	$\dot{m}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวล	(kg/s)
	h_1	คือ เอนทัลปีจำเพาะก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์	(kJ/kg)
	h_2	คือ เอนทัลปีจำเพาะที่ออกจากคอมเพรสเซอร์	(kJ/kg)
	h_3	คือ เอนทัลปีจำเพาะก่อนเข้าอีแวปอเรชัน	(kJ/kg)
	h_4	คือ เอนทัลปีจำเพาะที่ออกจากอีแวปอเรชัน	(kJ/kg)
	COP_R	คือ สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น	
	COP_H	คือ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการระบายความร้อน	

กรณีการหาประสิทธิภาพการทำความเย็น ใช้สมการนี้

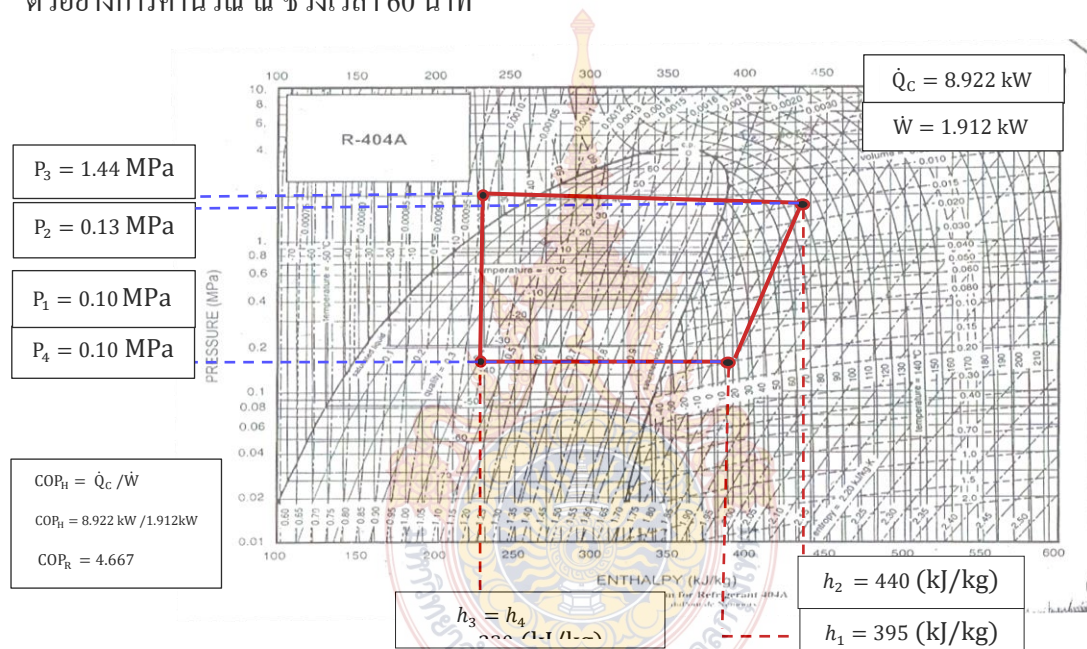
$$\dot{Q}_C = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

เมื่อ	$\text{COP}_{\text{cycle}} = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{W}_{\text{net}}}$	
	$\dot{Q}_o = \dot{m}(h_1 - h_4)$	kW
เมื่อ	$\text{COP}_{\text{canot}} = \frac{T_o + 273}{T_k - T_o}$	

T_o คือ อุณหภูมิที่อีวาโปเรเตอร์

T_k คือ อุณหภูมิที่คอมเพรสเซอร์

ตัวอย่างการคำนวณ ณ ช่วงเวลา 60 นาที



ภาพที่ ก.1 แผนภาพ P-h diagram ที่ได้ทำการเขียนจากค่าการทดลอง

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าแผนภาพความดัน อุณหภูมิและเอนทัลปี ของ R404a

	T(°C)	P(kPa)	h(kJ/sec)	COP _H	สถานะ
1	22	0.10	395	4.667	ไออิ่มตัว
2	83	0.13	440		ไอร้อนยิ่งยวด
3	63	1.44	230		ของเหลวอิ่มตัว
4	-38	0.10	230		ของผสมอิ่มตัว

*T4 หาค่าได้โดยทำการเขียนกราฟที่จุด 1, 2 และ 3 แล้วทำการเขียนเส้นในแนวตั้งจากจุด 3 ไปตัดกับเส้นความดันคงที่ของอีวาโปรเรเตอร์

กรณีหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์

$$\dot{W} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi$$

แทนค่าจากตาราง จะได้

$$\dot{W} = \sqrt{3} \times 380 \times 3.5 \times 0.83$$

$$\dot{W} = 1.84 \text{ kW}$$

กรณีหาอัตราการไหลของระบบ

$$\dot{m} = \dot{W} / (h_2 - h_1)$$

แทนค่าจากสมการ จะได้

$$\dot{m} = 1.84 \text{ kW} / (440 - 395) \text{ (kJ/kg)}$$

$$\dot{m} = 0.04 \text{ (kg/s)}$$

กรณีหาอัตราการระบายความร้อนของระบบ

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

แทนค่าจากสมการ จะได้

$$\dot{Q}_c = 0.04 \text{ (kg/s)} (440 - 230) \text{ (kJ/kg)}$$

$$\dot{Q}_c = 8.4 \text{ kW}$$

กรณีหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการระบายความร้อน

$$\text{COP}_R = \dot{Q}_E / \dot{W}$$

แทนค่าในสมการ จะได้

$$\text{COP}_H = 1.89 \text{ kW} / 1.92 \text{ kW}$$

$$\text{COP}_H = 4.5$$

กรณีหาอัตราการทำความเย็นของระบบ ใช้สมการ

$$\dot{Q}_E = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

แทนค่าจากสมการ จะได้

$$\dot{Q}_E = 0.04 \text{ (kg/s)} (395 - 230) \text{ (kJ/kg)}$$

$$\dot{Q}_E = 6.6 \text{ kW}$$

กรณีหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น

$$\text{COP}_R = \dot{Q}_E / \dot{W}$$

แทนค่าในสมการ จะได้

$$\text{COP}_R = 6.6 \text{ kW} / 1.84 \text{ kW}$$

$$\text{COP}_R = 3.5$$

กรณีหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของคาร์โนต์

$$\text{COP}_{\text{carnot}} = \frac{T_o + 273}{T_k - T_o}$$

แทนค่าในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} \text{COP}_{\text{carnot}} &= \frac{-23.5 - 273}{22.7 - (-23.5)} \\ &= 5.404 \end{aligned}$$

กรณีหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะของวัฏจักรการทำความเย็น

$$\text{COP}_{\text{cycle}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

แทนค่าในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} \text{COP}_{\text{cycle}} &= \frac{390 - 235}{435 - 390} \\ &= 3.44 \end{aligned}$$

กรณีหาประสิทธิภาพการทำความเย็น

$$\eta_E = \frac{\text{COP}_{\text{cycle}}}{\text{COP}_{\text{carnot}}}$$

แทนค่าในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} \eta_E &= \frac{3.44}{5.404} \\ &= 63.7 \% \end{aligned}$$

การหากิจกรรมของเอนไซม์โบรมีเลน (Bromelain activity)

การตรวจสอบการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme activity) สามารถหาจากอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งโดยตรวจสอบจากปริมาณของสารตั้งต้น (Substrate) ที่ลดลงหรือปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งค่าที่ได้จะสามารถใช้บอกปริมาณเอนไซม์ในหน่วยมาตรฐานสากล

ในการศึกษานี้ ได้ทำการทดสอบกิจกรรมเอนไซม์ในรูปของ CDU (Casein digestion units) โดย CDU หมายถึงปริมาณของเอนไซม์ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายเคซีนให้ได้สารใหม่ซึ่งอยู่ในอัตราเท่ากับไทโรซีน 1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ในเวลา 1 นาที ในสภาวะที่กำหนด

ผลการวัด Activity เปรียบเทียบการทำแห้งด้วยเครื่อง Lab scale เปรียบเทียบ Pilot scale ดังต่อไปนี้

ตัวอย่าง	วิธีการสกัด	ผลิตวันที่	Lab scale Freeze dry (CDU/mg)	Pilot scale Freeze dry (CDU/mg)
1) สารสกัด Bromelain	A	21/01/16	568.80	538.58
2) สารสกัด Batch 1		26/04/16	486.37	374.91
3) สารสกัด Batch 1.1		29/04/16	465.80	476.51
4) สารสกัด Batch 2		27/04/16	475.85	457.25
5) สารสกัด Batch 1	B	09/05/16	1,037.26	897.96
6) สารสกัด Batch 2	C	10/05/16	575.24	578.68
7) สารสกัด Batch 3		11/05/16	576.37	575.99

*Batch 1.1 ตกตะกอนซ้ำอีกรอบจาก Batch ที่ 1

** สารสกัดรายการที่ 18/01/16 สารสกัดรายการที่ 2-4 ใช้เหง้าที่รับเข้าวันที่ 23/04/16

*** สารสกัดรายการที่ 5-6 ใช้เหง้าที่รับเข้าวันที่ 7/05/16

จากข้อมูลเบื้องต้นผลการ Freeze dry Lab scale เปรียบเทียบ Freeze dry Pilot scale พบว่าสามารถทำแห้ง Enzyme Bromelain ได้ Activity ไม่แตกต่างกันยกเว้นสารสกัด Batch 1 จากเหง้าทั้ง 2 Lot โดย Freeze dry Lab scale ให้ผล Activity ดีกว่า Freeze dry Pilot scale ทั้งนี้ผู้วิจัยตั้งข้อสังเกตดังนี้ เนื่องด้วยในการทำแห้งของแต่ละครั้งของ Lot การผลิต ผู้วิจัยจะทำการสกัด 3 Batch โดยผลิตวันละ Batch และเอาไปทำแห้งในวันที่ 3 ระหว่างนั้นสารสกัด Batch ที่ 1 และ 2 จะถูกแช่รอไว้ที่ -20 องศา อาจเป็นไปได้ว่าสารสกัด Batch ที่ 1 ซึ่งผลิตนานสุดไม่ทำแห้งทันทีทำให้มี Activity น้อยกว่าและเนื่องด้วยสารสกัดที่รอทำแห้งด้วย Freeze dry Pilot scale มีปริมาณมากกว่าอัตราการเสื่อมสลายของสารสกัดอาจมีสูงกว่า Freeze dry Lab scale

WT2016-001/ Date 04 June 2016/ External Document

Welltech Biotechnology Company Limited

2090/30, Chan Rd., Chongnonsee, Yannawa, Bangkok, Thailand 10120

Tel. (+66)-2286-2214, (+66)-2286-2215

E-mail : info@welltechbio.com Website : www.welltechbio.com

Innovative Sciences of
Nature

ข้อสังเกตสำหรับสารสกัด Batch 2 ที่ผลิตวันที่ 27/04/16 ให้ผลค่า Activity ระหว่างทำแห้งด้วย Freeze dry Lab scale และ Freeze dry Pilot scale พอๆ กัน ทั้งๆที่สารสกัดที่รอทำแห้งด้วย Freeze dry Lab scale เข้า Freeze dry ช้ากว่า Pilot scale เนื่องด้วยเครื่อง Freeze dry Lab scale เสียต้องรอเข้า Freeze dry ถึง 10 วัน โดยผู้วิจัยตั้งข้อสังเกตว่าอาจจะเป็นเพราะว่าเก็บสารสกัดไว้ที่ -80 องศา จึงสามารถช่วยรักษา Activity ของสารสกัดไว้ได้ ดังนั้นเป็นไปได้กรณีทำแห้งที่ดีที่สุดคือเมื่อสกัดเสร็จแล้วควรเอาเข้าสู่กระบวนการทำแห้งทันทีหรือสามารถเก็บไว้ที่ -80 องศา หรือถ้าเก็บไว้ที่ -20 องศา สามารถเก็บได้ไม่เกิน 2 วัน

อย่างไรก็ตามพบว่าเหง้าสับปะรดแต่ละฤดูกาลให้ผล Activity แตกต่างกันจากผลข้างต้นเหง้าสับปะรดช่วงเดือนเมษายนให้ Activity ต่ำกว่าเหง้าสับปะรดช่วงเดือนมกราคม เปรียบเทียบระหว่างสารสกัดข้อ 1-4 ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน (สกัดแบบ A) ทั้งนี้ผู้วิจัยทำการปรับวิธีการสกัดมาเป็นแบบ B และ C ซึ่งสามารถช่วยแก้ปัญหาเหง้า Activity น้อยในหน้าร้อนได้ โดยพบว่าการสกัดแบบ B ให้ผล Activity ดีที่สุด

