

## รายงานผลงานเรื่องเต็มการทดลองที่สิ้นสุด

-----

1. แผนงานวิจัย : วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีและเครื่องจักรสำหรับแปรรูปพืชผักและสมุนไพร

2. โครงการวิจัย : วิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งผักและสมุนไพรที่มีการลดความดันอากาศ

กิจกรรม:

3. ชื่อการทดลอง (ภาษาไทย) วิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งผักและสมุนไพรที่มีการลดความดันอากาศ

ชื่อการทดลอง (ภาษาอังกฤษ) Research and Development of Vegetable and Herb Dryer with Reducing Air Pressure Condition

4. คณะผู้ดำเนินงาน

หัวหน้าการทดลอง : นายเวียง อากรซี สังกัด ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น

ผู้ร่วมงาน

นายกมลวัชร ทิมินกุล นายพินิจ จิรัศคกุล นายศักดิ์ชัย อาษาวัง นายธนภฤต โยธาฑูล

สังกัดศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น

นายอุทัย ธานี สังกัด สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม

5. บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งสุญญากาศ เพื่อใช้ในการอบแห้งผักและสมุนไพร ให้สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ โดยเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบ่งเป็น 3 ส่วนสำคัญด้วยกันคือ 1) ห้องอบแห้งทรงกระบอกกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 750 มิลลิเมตร ยาว 1200 มิลลิเมตร ด้านในมีชั้นตะแกรงสแตนเลสวางผลิตภัณฑ์ ขนาด 500 x 1000 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว) จำนวน 4 ถาด 2) ปัมสุญญากาศ แบบ water jet สร้างภาวะสุญญากาศที่ 730 มิลลิเมตรปรอท 3) ระบบให้ความร้อนใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 1000 วัตต์ จำนวน 4 แห่ง และใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้ง ทำการทดสอบอบแห้งผักและสมุนไพร ได้แก่ พริกชี้หนู มะเขือเทศ บวบขม มันฝรั่ง ไพล ใบมะกรูด ที่ภาวะสุญญากาศ 700 มิลลิเมตร อุณหภูมิอบแห้ง 45 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์การอบแห้งที่มีสีส่นเป็นธรรมชาติสำหรับผัก และคงสารสำคัญของผลิตภัณฑ์สมุนไพร

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งสุญญากาศ ผักและสมุนไพร ปัมสุญญากาศ

The purpose of this research was researched and developed of a vacuum dryer for drying vegetables and herbs. The low drying temperature was produced good product quality. The vacuum dryer was 3 parts together. 1) The round cylindrical drying chamber was diameter 750 mm, length 1200 mm. Inside of drying chamber there was 4 trays a stainless steel grille with 500 x 1000 mm (width x length). 2) Water jet vacuum pump at 730 mmHg. 3) The heating system uses 4 units of 1000 watt heater and uses a microcontroller to control the temperature in the drying room. The drying test of vegetables and herbs included chili, tomatoes, centella asiatica, curcuma longa, zingiber cassumunar, kaffir lime leaves. The vacuum dryer was operated at 700 mmHg and 45OC of the drying temperature. The dried product was natural color and maintained the important substance.

Keywords : vacuum dryer vegetable and herbs vacuum pump

## 6. คำนำ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีผลผลิตทางการเกษตรจำพวก พืชผัก สมุนไพร เครื่องเทศ เป็นจำนวนมากตลอดทั้งปีและเป็นรายได้หลักของเกษตรกรซึ่งเป็นคนส่วนใหญ่ในประเทศทำรายได้เขาประเทศต่อปีจำนวนมหาศาล แต่เนื่องจากผลผลิตที่ออกมาในในแต่ละฤดูกาล ทำให้มีข้อจำกัดสำหรับระยะเวลาในการจำหน่ายและการเก็บรักษาทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลผลิตและส่งผลให้ราคาตกต่ำลง จึงได้มีการศึกษาเพื่อยืดระยะเวลาการเก็บรักษาผลผลิต เช่น การแปรรูปผลผลิตเพื่อรอการจำหน่าย เพื่อลดการสูญเสีย และยังเป็น การเพิ่มราคาให้ผลผลิต การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรนั้น สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อน การใช้ความเย็น การใช้รังสี การหมัก การดอง และการอบแห้ง เป็นต้น ปัจจุบันผู้บริโภคมีบทบาทที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการแปรรูปต้องมีคุณภาพทางโภชนาการสูง ปลอดภัย และมีอายุการเก็บที่นาน กระบวนการทำแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่นิยมใช้ในการลดความชื้นของอาหารสด หรือแปรรูปอาหารเหลวให้เป็นอาหารผง เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา สะดวกในการจัดเก็บขนส่งเพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์อาหาร และเพิ่มความสะดวกในการนำมาใช้ในชีวิตประจำวันที่เร่งรีบของสังคมในปัจจุบัน

วิธีการระเหยน้ำออกจากอาหารที่อุณหภูมิต่ำ เช่น การใช้สุญญากาศร่วมในการทำแห้งจะทำให้อัตราการ ทำแห้งเพิ่มขึ้นและใช้เวลาสั้นลงช่วยในการรักษา กลิ่น รสชาติ ลักษณะทางกายภาพ เช่น สี รูปร่าง ให้คงอยู่ได้ดี ในการกระบวนการทำแห้งแบบนี้ประกอบด้วย ห้องสุญญากาศ แหล่งความร้อน เครื่องทำสุญญากาศผลิตภัณฑ์อาหารที่นิยมใช้ทำแห้งแบบสุญญากาศ เช่น ผักและผลไม้ เนื้อสัตว์ สมุนไพรเครื่องเทศและเห็ด ข้อเสียคือการติดตั้งปั๊มดูดอากาศเพื่อลดความดันในเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพที่ติดตั้งมีราคาแพง

จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาของโจทย์วิจัยที่มุ่งพัฒนาเครื่องมือในการลดความดันอากาศที่มีราคาถูก ประสิทธิภาพดี สามารถนำไปใช้กับเครื่องอบแห้งทั้งแบบชั้นวางและแบบถังหมุนในการอบแห้งพืชผักและสมุนไพรบางชนิดที่มีคุณค่าสูง

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อวิจัยและพัฒนาบ่มลดความดันอากาศแบบ water jet ใช้กับเครื่องอบแห้งแบบชั้นวางและแบบถังหมุน ในการอบแห้งพืชผักและสมุนไพรบางชนิด
- 2) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบลดแรงดันอากาศ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

ขอบเขตของโครงการวิจัย

ศึกษาข้อมูลหลักการทำงานและประโยชน์ของการอบแห้งแบบลดความดันจะช่วยให้ประสิทธิภาพการอบแห้งได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับสภาวะปกติซึ่งจะเป็นการรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ ทำการศึกษาข้อมูลบ่มสุญญากาศแบบ water jet ขนาดผู้ประกอบการ โดยการศึกษาเรียนรู้จากของต่างประเทศเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างและทดสอบประสิทธิภาพ ทำการออกแบบห้องอบแห้งแบบชั้นวางและแบบโรตารี เพื่อนำมาต่อพ่วงกับบ่มสุญญากาศ แบบ water jet ที่สร้างขึ้น ทำการออกแบบระบบให้ความร้อนในห้องอบแห้งโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ทำการทดสอบการอบแห้งผลิตภัณฑ์พืชผักและสมุนไพร ประเมินประสิทธิภาพและความเหมาะสมของเครื่องอบแห้งและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง

ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

#### 1. หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีการอบแห้ง

การอบแห้ง (drying) เป็นกระบวนการลดความชื้นหรือไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบที่ขึ้นภายใต้สภาวะควบคุม โดยใช้ความร้อนถ่ายเทไปยังวัตถุดิบที่มีความชื้นเพื่อกำจัดน้ำส่วนใหญ่ออกไปในวัตถุดิบนั้นออกด้วยการระเหย โดยในกระบวนการอบแห้งส่วนมากจะใช้อากาศเป็นสารตัวกลางในการระเหยน้ำที่เป็นของเหลวออกไป (วิไล, 2545) วัตถุประสงค์ของการอบแห้งคือการยืดอายุการเก็บอาหารโดยการทำให้อุณหภูมิวัตถุดิบนั้นมีปริมาณความชื้นลดลง ซึ่งการลดลงของความชื้นในวัตถุดิบขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัตถุดิบเป็นสำคัญ เช่น ผลไม้ที่มีปริมาณน้ำตาลสูงจะสามารถลดความชื้นลงเหลือประมาณ ร้อยละ 10 –15 ต่อน้ำหนักเปียก เนื่องจากจากมีปริมาณน้ำตาลมาก การระเหยน้ำจึงเป็นไปได้ยากกว่าวัตถุดิบที่มีปริมาณน้ำตาลน้อย ส่วนผักซึ่งมีปริมาณน้ำตาลน้อยจะสามารถลดความชื้นลงเหลือต่ำกว่าร้อยละ 10 ต่อน้ำหนักเปียก นอกจากนี้การอบแห้งยังเป็นการลดน้ำหนักและปริมาตรของวัตถุดิบช่วยให้สะดวกต่อการบรรจุ การเก็บรักษา และการขนส่ง (สิงหนาท, 2555)

### 1.1 ความชื้น (moisture content)

เป็นตัวบอกถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เพื่อบ่งชี้ว่าวัสดุนั้นชื้นหรือแห้ง ด้วยการเปรียบเทียบกับมวลวัสดุโดยแสดงค่าเป็นร้อยละความชื้น โดยสามารถแบ่งการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้ 2 รูปแบบคือ

#### 1.1.1 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก (% moisture content wet basis)

ความชื้นมาตรฐานเปียกสำหรับผลิตภัณฑ์ใดๆ คำนวณในรูปของสัดส่วนโดยน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์หารด้วยน้ำหนักทั้งหมดของผลิตภัณฑ์

$$M_{wb} (\%) = \frac{m_w - m_d}{m_w} \times 100 \quad (1)$$

#### 1.1.2 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง ((% moisture content dry basis)

ความชื้นมาตรฐานแห้งสำหรับผลิตภัณฑ์ใดๆ คำนวณในรูปของสัดส่วนโดยน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์หารด้วยน้ำหนักของมวลแห้ง

$$M_{db} (\%) = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่	$M_{wb}$	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก % (w.b.)
	$M_{db}$	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง % (d.b.)
	$m_w$	=	มวลเปียกของวัตถุ (kg)
	$m_d$	=	มวลแห้งของวัตถุ (kg)

ในทางการเกษตรนิยมใช้ความชื้นมาตรฐานเปียกในการกล่าวถึงความชื้น แต่ในการคำนวณมักจะนิยมใช้ เป็นความชื้นมาตรฐานแห้ง การหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานเปียก ( $M_{wb}$ ) และมาตรฐานแห้ง ( $M_{db}$ )

$$M_{wb} = \frac{M_{db}}{1 + M_{db}} \quad (3)$$

การหาความชื้นที่เวลาใดๆของผลิตผลเกษตรเริ่มจากการหามวลแห้งของของผลิตผลเกษตรนั้น โดยการนำตัวอย่างผลิตผลเกษตรอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าตัวอย่างที่อบจะมีน้ำหนักคงที่ (เสริม, 2547) และหาความชื้นที่เวลาใดๆโดยใช้สมการ

$$M_{wb}(t) = \frac{m_w(t) - m_d}{m_w(t)} \quad (4)$$

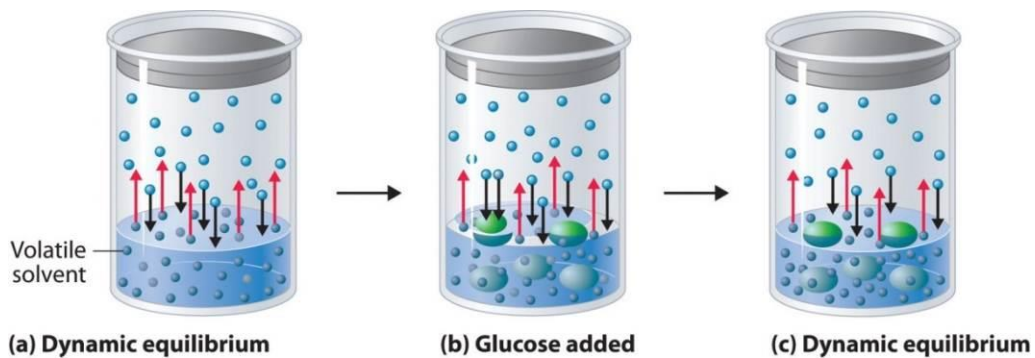
โดยที่  $M_{wb}(t)$  = ความชื้นมาตรฐานเปียกที่เวลาใดๆ % (w.b.)  
 $m_w(t)$  = มวลของผลิตภัณฑ์เวลาที่เวลา t (g)  
 $m_d$  = มวลแห้งของผลิตภัณฑ์ (g)

### 1.2 ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

ความชื้นสมดุลเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์การอบแห้งและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ เมื่อนำวัตถุไปวางไว้ในสภาวะคงที่ใด ๆ ที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ วัตถุอาจคายความชื้นให้กับอากาศหรือดูดซับความชื้นจากอากาศ (adsorption) ถ้าวางวัตถุไว้เป็นเวลานานจนกระทั่งความชื้นคงที่ค่าหนึ่งที่ไม่เปลี่ยนแปลง จุดนี้ความชื้นในวัสดุจะมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศและอุณหภูมิของวัสดุก็จะเท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่รอบๆ เรียกความชื้นที่จุดนี้ว่าความชื้นสมดุล

### 1.3 ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (equilibrium relative humidity)

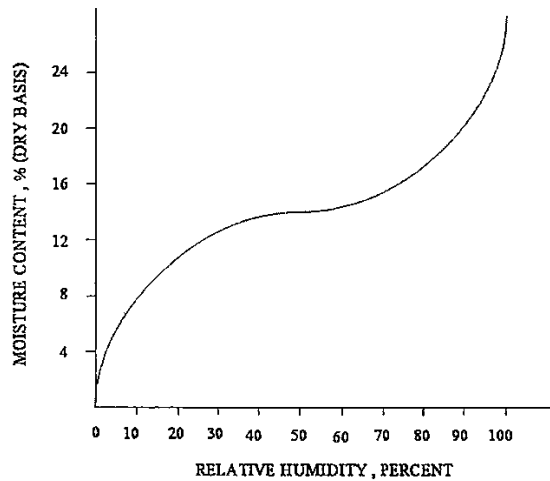
ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลหมายถึง ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ซึ่งวัดในระบบปิดในสภาวะสมดุล (equilibrium) เมื่อนำวัตถุมานใส่ในระบบปิดที่มีความชื้นในบรรยากาศคงที่ และปล่อยให้วัตถุถึงจุดที่ความชื้นของวัตถุไม่เปลี่ยนแปลง คือไม่มีการดูดคายน้ำหรือน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 1 ภาพ (a) – (c) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุล

ที่มา: Averill (2012)

ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรโดยทั่วไปความชื้นสมดุลจะขึ้นกับธรรมชาติของวัตถุนั้น อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ จะเรียกว่า sorption isotherm สามารถแสดงเป็นกราฟรูป sigmoid ภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กราฟแสดง sorption isotherm ของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรโดยทั่วไป  
ที่มา: เสริม (2547)

#### 1.4 การเกาะตัวของน้ำในวัตถุดิบ

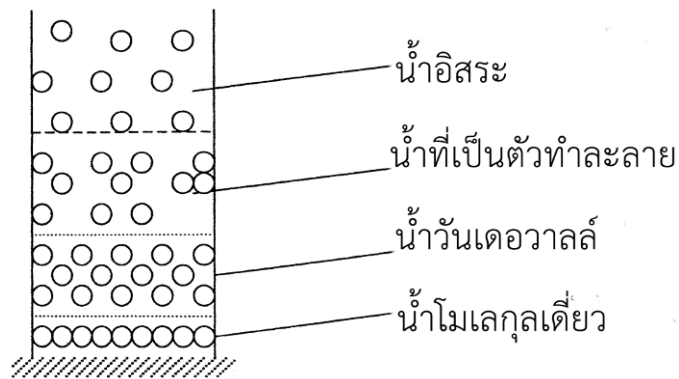
เสริม (2547) ได้แบ่งลักษณะการเกาะตัวของน้ำกับของแข็งในวัตถุดิบออกเป็น 4 ชนิด (ภาพที่ 3) คือ

1.4.1 น้ำอิสระ (free water) เป็นน้ำที่เกาะอยู่ที่ชั้นนอกสุดของผิวของแข็ง ใช้พลังงานในการแยกน้ำแบบอิสระออกจากวัตถุดิบน้อยที่สุด

1.4.2 น้ำที่เป็นตัวทำละลาย (solvent water) เป็นน้ำที่เกาะอยู่ที่ชั้นถัดจากผิวของแข็งเข้ามาทางด้านในวัตถุดิบ ใช้พลังงานในการแยกน้ำที่เป็นตัวทำละลายมากกว่าน้ำแบบอิสระ

1.4.3 น้ำที่เกาะตัวโดยแรงแวนเดอวาลส์ (water attached with Van de Waal force) เป็นน้ำที่เกาะอยู่ที่ชั้นถัดจากชั้นของน้ำที่เป็นตัวทำละลาย ใช้พลังงานในการแยกน้ำที่เกาะตัวโดยแรงแวนเดอวาลส์มากกว่าน้ำที่เป็นตัวทำละลาย

1.4.4 น้ำโมเลกุลเดี่ยว (mono-molecular water) เป็นน้ำที่อยู่ในบริเวณผิวสัมผัสของของแข็ง และต้องใช้พลังงานมากที่สุดที่สุดในการแยกน้ำโมเลกุลเดี่ยวออกจากวัตถุดิบ



ภาพที่ 3 แสดงลักษณะการเกาะตัวของน้ำกับของแข็งในวัตุชั้น

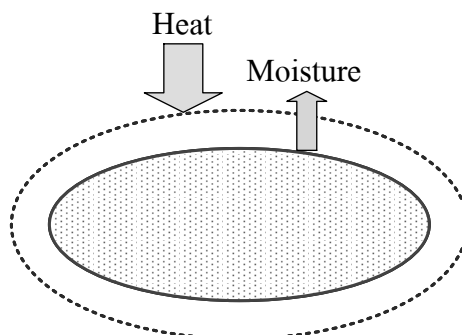
ที่มา: เสริม (2547)

### 1.5 การอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งผลิตผลเกษตรเริ่มจากความร้อนจะถ่ายเทโดยการพาความร้อนจากสิ่งแวดล้อมไปยังพื้นผิวของอนุภาคโดยการเป่าความร้อนผ่านผลิตผลเกษตรที่เป็นวัตุชั้น และจากนั้นความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังผลิตผลเกษตรทำให้ผลิตผลเกษตรนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนน้ำในกระบวนการที่มีการถ่ายเทความร้อนและมวลของน้ำจากผลิตผลเกษตรไปยังอากาศ (ภาพที่ 7) กระบวนการนี้จะหยุดลงก็ต่อเมื่อความดันไอน้ำที่ผิวผลิตผลเกษตรเท่ากับความดันไอน้ำในอากาศ (เสริม, 2547)

$$P_{sur} = P_v \quad (5)$$

โดยที่  $P_{sur}$  = ความดันของไอน้ำที่ผิววัตุ  
 $P_v$  = ความดันไอน้ำในอากาศ



ภาพที่ 4 การถ่ายเทความร้อนและมวลของน้ำจากผลิตผลเกษตรไปยังอากาศ

ที่มา: เสริม (2547)

ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งคือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการลดความชื้น โดยอัตราการแห้ง จะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง การใช้อุณหภูมิสูงจะได้อัตราการแห้งสูงกว่าใช้อุณหภูมิต่ำ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ถ้าอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะสามารถรับน้ำที่ถ่ายเทจากวัตุชั้นได้มากกว่าอากาศมี

ความชื้นสัมพัทธ์สูง และความเร็วของอากาศที่สัมผัสวัตถุ ถ้าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุมีค่าสูงความชื้นในวัตถุจะถ่ายเทออกสู่อากาศภายนอกได้ดีกว่าอากาศที่มีความเร็วต่ำหรืออยู่นิ่ง (เสริม, 2547)

พืชผักและสมุนไพรหลายชนิดจะมีสารที่มีประโยชน์ เช่น วิตามินต่าง เป็นต้น มักถูกทำลายหรือลดน้อยลงจากการโดนความร้อนจากการอบแห้ง ถ้าสามารถลดความดันบรรยากาศลง จะทำให้ค่าการระเหยน้ำออกได้ดีที่อุณหภูมิร้อนไม่สูงมากนักเนื่องจากเมื่อความดันลดลงค่าจุดเดือดของน้ำก็จะลดต่ำลงไปด้วย นอกจากคุณค่าทางอาหารแล้ว พืชผักบางชนิดยังต้องการสี รส รูปร่างที่สวยงามเพื่อให้ได้ราคาในการขาย ซึ่งอุณหภูมิร้อนที่ต่ำจะช่วยให้การคงสีและรูปร่างดี

งานวิจัยที่ใช้การทำแห้งแบบผสมผสานโดยส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการนำเทคนิคการอบแห้งชนิดอื่นมาทดแทนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน เช่น เครื่องอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนเป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้หลักการในการพาความร้อนจากอากาศที่มีทิศทางไหลแบบบังคับเพื่อถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นแต่การอบแห้งด้วยวิธีนี้มักส่งผลเสียต่อผลิตภัณฑ์อาหารในด้านเนื้อสัมผัส สี กลิ่น รส และคุณค่าทางโภชนาการบางอย่าง ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีการทำแห้งในปัจจุบันจึงมุ่งเน้นที่จะลดการเสื่อมเสียของอาหารจากปฏิกิริยาทางเคมี และเพิ่มความคงอยู่ของสารอาหารเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพมากขึ้นโดยเฉพาะกลุ่มอาหารที่ไวต่อความร้อน

ผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน หมายถึง อาหารที่เกิดการเสื่อมเสียคุณภาพได้ง่ายด้วยความร้อน เช่น ผัก ผลไม้ สมุนไพร อาหารที่มีสารหอมระเหย และผลิตภัณฑ์ยา เป็นต้น โดยสิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารประเภทนี้ ได้แก่ คุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์, ลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์, ความสามารถในการดูดน้ำกลับและการคืนตัว, ปริมาณสารหอมระเหย, คุณค่าทางโภชนาการ เช่น วิตามิน โปรตีน, แป้ง หรือ สารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพต่างๆ

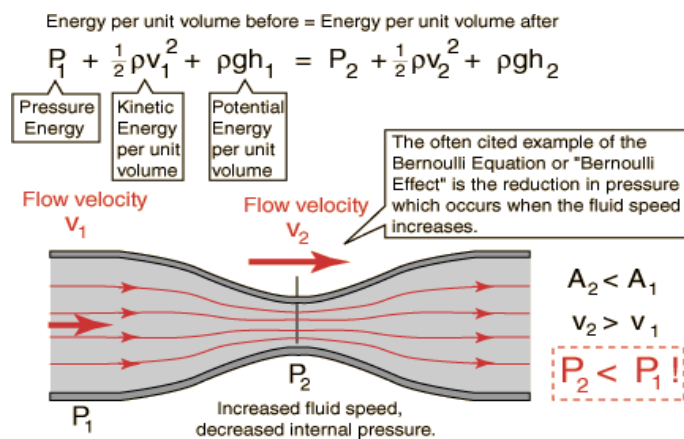
วิธีการทำแห้งที่เหมาะสมกับอาหารที่ไวต่อการเสื่อมเสียคุณภาพด้วยความร้อนต้องเป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิต่ำในการทำแห้ง ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีคุณภาพดีมีการทำลายโครงสร้างน้อยสามารถรักษา สารหอมระเหย สี และคุณค่าทางโภชนาการได้ใกล้เคียงผลิตภัณฑ์ก่อนทำแห้งได้มาก ซึ่งวิธีที่นิยมใช้คือ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แต่การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีข้อจำกัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินการค่อนข้างมากและต้องใช้เวลาในการทำแห้งนาน และมีผลต่อเนื้อสัมผัสของอาหารบางชนิดทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์แข็งและเหนียว หรือการทำแห้งโดยการใช้ระบบสุญญากาศเนื่องจากระบบสุญญากาศทำให้จุดเดือดของน้ำลดต่ำลงน้ำจึงระเหยออกไปได้ที่อุณหภูมิต่ำนอกจากนี้ในระบบสุญญากาศยังมีออกซิเจนในปริมาณต่ำจึงลดการเสื่อมเสียจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของเนื้อสัมผัสของอาหารบางประเภทและเวลาที่ใช้ในการทำแห้งนาน ดังนั้นการใช้เทคนิคการทำแห้งแบบผสมผสาน โดยการนำจุดเด่นของหลักการอบแห้งแต่ละวิธีมาประกอบกันสำหรับอบแห้งอาหารที่ไวต่อความร้อนจึงเป็นเรื่องที่ท้าทาย เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดมีองค์ประกอบและการเสื่อมเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสานที่เหมาะสมสำหรับอาหารแต่ละประเภท มีนักวิจัยหลายกลุ่มที่นำเทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสานมาทดลองศึกษากับกลุ่มอาหารที่ไวต่อความร้อนและประสบความสำเร็จในการรักษาคุณภาพของอาหาร เช่น อาหารที่มีไขมันสูง มีสารหอมระเหย



ที่สำคัญ หรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเทคโนโลยีการอบแห้งแบบผสมผสานที่ศึกษาได้แก่การใช้ปั๊มความร้อน ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อน (ถั่วแมคคาตาเมีย) การทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ (แครอท มะขามป้อม ใบโหระพา) และการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ(ใบโหระพา เห็ด ใบ สะระแหน่ แครอท) ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างเทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสานดังกล่าวและผลของการทำแห้ง ด้วยวิธีดังกล่าวต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน

การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อน การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อน (Heat Pump Dryer, HPD) ได้รับความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากสามารถนำเอาพลังงานมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศหลังการอบแห้ง เมื่อทำงานในระบบปิดอย่างสมบูรณ์ปั๊มความร้อนมีการสูญเสียปริมาณความร้อนจำเพาะต่ำที่สุด การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเหมาะสำหรับวัตถุดิบที่ไวต่อความร้อน ที่ต้องใช้อุณหภูมิต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีในด้าน สี กลิ่น และเนื้อสัมผัส เพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง และสภาพของอากาศภายนอกไม่มีผลต่อการอบแห้ง การใช้ปั๊มความร้อนมีข้อดี คือสามารถลดความชื้นใน บรรยากาศได้ต่ำกว่าการใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน ปั๊มความร้อนจะปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงอุณหภูมิการอบแห้งที่ต่ำอยู่ระหว่าง 25 - 70°C ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาในการอบแห้งเมื่อ เทียบกับการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน แต่การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเป็นการอบแห้งที่ใช้กระแสไฟฟ้าเป็นแหล่ง พลังงาน จึงอาจมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้นหากใช้ปั๊มความร้อนเพียงขั้นตอนเดียวในการอบแห้ง ดังนั้น การศึกษาการนำปั๊มความร้อนมา ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการอบแห้งและคุณภาพ ของผลิตภัณฑ์อาหารจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ Water Jet vacuum pump



ภาพที่ 5 แสดงหลักการเบอร์นูลลี (Bernoulli's principle)

หลักการของเบอร์นูลีจากรูปข้างบน ได้กล่าวไว้ว่า ในการไหลที่สภาวะคงตัวของของไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้โดยที่ไม่มีปริมาณพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น พลังงานเนื่องจากการไหลที่เกิดขึ้นของจุดที่ 1 จะเท่ากับจุดที่ 2

$$E_1 = E_2 \quad (6)$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (7)$$

จากรูปข้างบน เนื่องจากว่าพจน์ของ Potential Energy per unit Volume (พลังงานเนื่องจากเสตต่อหน่วยปริมาตร) นั้น มีค่าเท่ากันทั้งสองจุดดังนั้นสมการจึงเขียนใหม่ได้ดังนี้

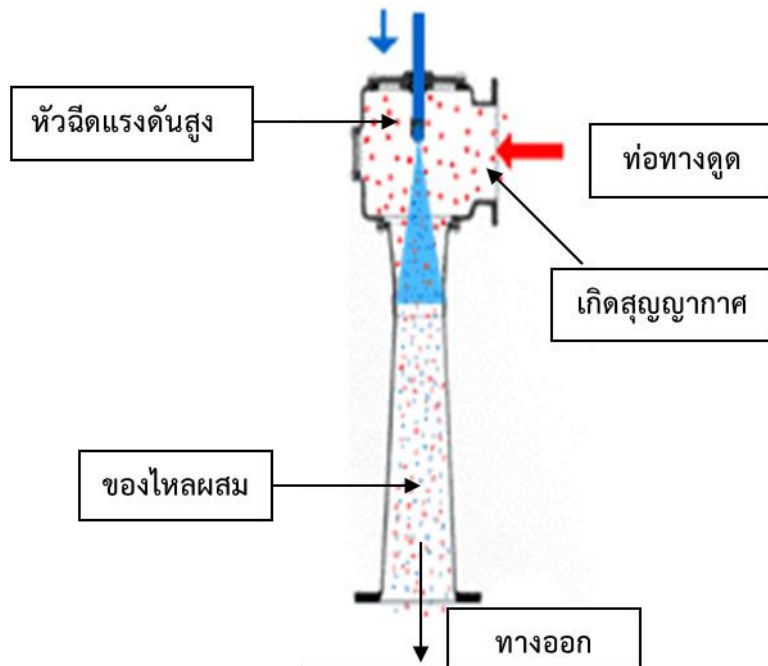
$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (8)$$

จะสังเกตได้ว่า Kinetic Energy per unit Volume ของจุดที่ 2 มากกว่าจุดที่ 1 เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของการไหลลดลง (บริเวณคอคอดของท่อ)  $A_2 < A_1$  ทำให้ความเร็วที่จุดที่ 2 เพิ่มมากขึ้น  $V_2 > V_1$  แต่ในขณะเดียวกันนั่นเอง ความแตกต่างของความดันที่จุดที่ 1 และจุดที่ 2  $P_1 > P_2$  ซึ่งความแตกต่างของความดันทั้งสองจุดนี้จึงทำให้เกิดแรงดูด Vacuum – suction เกิดขึ้น ดังนั้น Suction ที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{Suction} = P_1 - P_2 \quad (9)$$

หลักการทำงานของ Water Jet Vacuum

หลักการทำงานของ Water Jet Vacuum โดยเริ่มจากการสูบล้างของไหลแรงดันสูงให้วิ่งผ่าน หัว Nozzle Jet ด้วยความเร็วที่สูงมากพอที่จะสามารถสร้าง Vacuum ตรงทางดูดได้ เนื่องจากของไหลแรงดันสูงที่ถูกสูบล้างจากปั๊มเพื่อส่งผ่านไปยัง Nozzle Jet มี Pressure Energy ที่สูง และ Kinetic Energy ยังไม่มากนักเนื่องจากความเร็วในการไหลในช่วงที่ยังไม่ผ่านคอคอดยังมีความเร็วที่ไม่มากนักพอ แต่เมื่อของไหลได้ไหลผ่านบริเวณคอคอด ความเร็วในการไหลก็จะสูงมากยิ่งขึ้น และส่งผลให้ Kinetic Energy เพิ่มมากขึ้นตามความเร็วในการไหลด้วย แต่ในขณะเดียวกัน Pressure Energy ที่ผ่านคอคอดจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความดัน และเกิด Vacuum ตรงท่อทางดูด (Suction Tube) ซึ่งถ้ายิ่งความเร็วในการไหลบริเวณคอคอดมากเท่าไร การเกิด Vacuum – Suction ก็ยิ่งมากขึ้นรวมไปทั้งพื้นที่หน้าตัดของคอคอดยังมีขนาดเล็กก็สามารถทำให้เกิด Vacuum – Suction ได้มากเช่นกัน



ภาพที่ 6 แสดงการทำงาน Water Jet Vacuum

ที่มา <https://en.wikipedia.org/wiki/Injector>

หลักสำคัญของการสร้างสุญญากาศ (Vacuum) ของ Water Jet คือแรงดันกับความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านตัว Nozzle แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับกรอกแบบของหัวฉีด Nozzle และลักษณะการนำไปประยุกต์ใช้งาน

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของ Water Jet Vacuum Pump

### 1. อุณหภูมิ (Temperature)

สำหรับความหนาแน่นของน้ำ ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของน้ำมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งความหนาแน่นเกณฑ์มาตรฐานสากล คือ **ที่ความดันมาตรฐาน 1 บรรยากาศ น้ำจะมีความหนาแน่น 1000 kg/m<sup>3</sup> ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส** ซึ่งเป็นความหนาแน่นของน้ำที่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะทำงานส่งผลให้แรงดันของน้ำลดลงไปด้วย

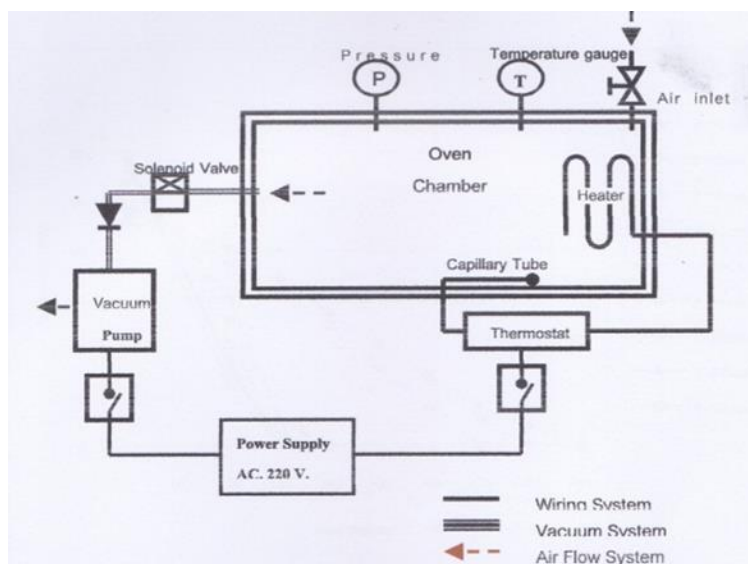
### 2. ความดันไอ (Vapour Pressure)

ความดันไอน้ำที่เกิดขึ้นบนผิวน้ำที่สัมผัสกับอากาศเป็นผลมาจากการระเหยของน้ำ อย่างต่อเนื่อง โดยการระเหยจะมากขึ้นเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ ถ้าอุณหภูมิสูงจะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการเคลื่อนที่ที่เป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อยลง น้ำจะระเหยกลายเป็นไอน้ำได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากโมเมนตัม เป็นผลให้ความเร็วของการเคลื่อนที่ของของไหลช้าลง

### 3. โพรงสุญญากาศ (Cavitation)

ถ้ามีการเกิดโพรงสุญญากาศในโครงสร้าง หรืออุปกรณ์ในการทำงาน จะเกิดการไหลที่มีฟองอากาศปนเข้ามาทำให้น้ำไหลไม่เต็มพื้นที่หน้าตัด เกิดเสียงดัง และกัดกร่อนใบพัดและผนังของเครื่องสูบน้ำ หรือผนังท่อที่ลดขนาดลงมาก ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

จากหลักการทำงานของระบบการอบแห้งแบบลดแรงดันจะมีส่วนประกอบสำคัญๆแบ่งได้ดังนี้ 1. ห้องอบแห้ง (Oven Chamber) 2. แหล่งความร้อน(Heater) 3. ปั๊มลดแรงดัน(Vacuum Pump) ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ระบบวงจรการอบแห้งแบบลดแรงดัน

ที่มา <http://www.phtnet.org/download/FullPaper/pdf/2ndSeminarKKU/af050.pdf>

กรอบแนวคิดในการทำวิจัย เนื่องจากพืชผักและสมุนไพรเป็นพืชที่มีคุณค่าทางอาหาร และทางยารักษาโรค มาก เช่น วิตามินต่างๆ รวมทั้งความน่าสนใจในเรื่อง กลิ่น สี รูปลักษณะ ที่จะมีผลต่อราคาในการจำหน่าย ซึ่งการทำแห้งด้วยอุณหภูมิสูง มากกว่า 60-70 องศาเซลเซียส อาจไปทำลายให้คุณค่าต่างๆที่กล่าวมาแล้วให้ลดลง ทางแก้ทางหนึ่งที่เป็นไปได้คือการทำแห้งในห้องที่ลดบรรยากาศลงซึ่งจะมีผลต่อจุดเดือดของน้ำให้ลดลงด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำได้ผลดีตามไปด้วยส่วนจะมีจุดทำงานอยู่ตรงไหนอย่างไรขึ้นอยู่กับผลสรุปจากการทดลอง และเนื่องจากปั๊มที่จะมาลดความดันบรรยากาศลงเป็นหัวใจสำคัญและมีราคาแพง จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาสร้างให้มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพ ซึ่งปั๊มที่จะนำมาพัฒนาคือ ปั๊มชนิด water jet นอกจากนี้วิธีการให้ความร้อนและการจัดการอากาศขึ้นในห้องอบแห้งก็เป็นวิธีการที่สำคัญที่ต้องศึกษาทดลองให้ได้ประสิทธิภาพดี และเมื่องานวิจัยนี้สำเร็จก็จะได้เครื่องอบแห้งแบบลดความดันบรรยากาศต้นแบบที่มีการพัฒนา ปั๊มลดความดันอากาศแบบ water jet และสรุปผลการทดสอบอบแห้งพืชผักและสมุนไพร เช่น เห็ดชนิดต่างๆ ขิง พริกแห้งอินทรีย์ เครื่องเทศบางชนิด เป็นต้น พร้อมความสัมพันธ์ของความดันอากาศกับอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่จะนำไปใช้ในการอบแห้งได้อย่างเหมาะสม

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ได้มีงานวิจัยที่นำระบบการปรับลดความดันอากาศมาใช้หลายงานวิจัยด้วยกัน ดังเช่น *ชนิตา และคณะ* ,2552 ได้ศึกษาการผลิตน้ำผึ้งจากน้ำผึ้งดอกทานตะวันโดยการอบแห้งแบบสุญญากาศและแบบแช่เยือกแข็ง

(Production of Honey Powder from Sunflower Honey by Vacuum and Freeze Drying Techniques)

มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะการผลิตและปริมาณมอลโทเด็กซ์ทรินที่เหมาะสมในการทำแห้งน้ำผึ้งดอกทานตะวัน โดยเติมมอลโทเด็กซ์ทริน (DE 11) ในอัตราส่วน 30, 40, 50% ของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำผึ้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแบบสุญญากาศคือ 60, 70, 80°C สภาวะการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งคือ อุณหภูมิ -43°C ภายใต้ความดัน <math>133 \times 10^{-3}</math> mbar ระยะเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกทิวิตี และค่ามุกองของน้ำผึ้งงมีค่าลดลง ส่วนความสามารถในการละลาย อุณหภูมิกลาสทรานซิชั่นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ปริมาณมอลโทเด็กซ์ทรินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมมีค่าเพิ่มขึ้น และค่ามุกองมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) การเพิ่มปริมาณมอลโทเด็กซ์ทรินสำหรับการทำแห้งน้ำผึ้งแบบแช่เยือกแข็งส่งผลให้ ปริมาณความชื้น ค่ามุกองมีค่าลดลง และค่าความหนาแน่นรวมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำผึ้งผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศและแบบแช่เยือกแข็งพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำผึ้งคือการอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80°C ระดับมอลโทเด็กซ์ทริน 50% ทำให้มีปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ความสามารถในการไหล (ค่ามุกอง) ความสามารถในการละลาย ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นของอนุภาค และอุณหภูมิกลาสทรานซิชั่นเท่ากับ  $0.62 \pm 0.04\%$ ,  $0.174 \pm 0.01$ ,  $27.33 \pm 0.82$  องศา,  $99.60 \pm 0.18\%$ ,  $0.7652 \pm 0.03$  g/ml,  $1.81 \pm 0.03$  g/ml และ  $56.35 \pm 0.13^\circ\text{C}$  ตามลำดับ, *วรเชษฐ์ และคณะ*, 2555

นำเสนอการศึกษาศรรณะของอีเจ็คเตอร์ไอน้ำที่ประยุกต์ใช้ในการอบแห้งสุญญากาศ เพื่อศึกษาตัวแปรสภาวะเงื่อนไขการทำงานที่มีอิทธิพลต่อสรรณะของอีเจ็คเตอร์ จากชุดทดลองที่สร้างขึ้น ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความดันปฐมภูมิ อัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้ง ความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์และอุณหภูมิ ภายในห้องอบแห้ง เภณทในการศึกษาศรรณะของอีเจ็คเตอร์ไอน้ำที่ใช้ในการอบแห้งระบบสุญญากาศ ได้แก่ ค่าความดันสุญญากาศ ( $R_s$ ) อัตราสวนการเหนี่ยวนำ ( $R_m$ ) และอัตราสวนความดันยก (PLR) จากผลการศึกษา พบว่า (1) เมื่อความดันปฐมภูมิ เพิ่มขึ้นจาก 1- 6 bar (ความดันเกจ) ความดันสุญญากาศภายในห้องอบแห้งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ ค่าความดันสุญญากาศในห้องอบแห้งมีค่าสูงสุดเท่ากับ -0.79 bar (ความดันเกจ) ที่ ความดันปฐมภูมิ เท่ากับ 5 bar (2) เมื่ออัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2,500 L/min จะทำให้ความดันสุญญากาศมีแนวโน้มลดลงซึ่งมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 6-12 เมื่อเทียบกับการที่ไม่ปล่อยอากาศไหลผ่านห้องอบแห้ง (3) เมื่อความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 0-0.6 bar (ความดันเกจ) ความดันสัมบูรณ์ภายในห้องอบแห้งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อัตราสวนความดันยกจะมีแนวโน้มลดลง และ (4) เมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีค่าสูงขึ้น โดยทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 50 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับค่าอัตราสวนการเหนี่ยวนำจะมี ค่าสูงขึ้นด้วยโดยที่ อุณหภูมิ ภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส มี ค่าอัตราสวนการเหนี่ยวนำสูงที่สุด ประมาณ 0.24 ที่ ความดันปฐมภูมิเท่ากับ 4 bar ค่าสำคัญ: อีเจ็คเตอร์ไอน้ำอบแห้งสุญญากาศ, อ้าไฟค์กั๊ด และคณะ 2553 ได้ศึกษาการอบแห้งขิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขิง โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียสซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาคืออัตราส่วนความชื้นอัตราการอบแห้งและ ค ว า ม

สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่าเมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงนอกจากนั้นยังพบว่าสมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุดโดยให้ค่าR2มากที่สุดและRMSEน้อยที่สุด, *ชาลีตา, 2555* การทำแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปและถนอมอาหารที่สำคัญโดยลดความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหาร และค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity, aw) เพื่อยับยั้งต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลให้อาหารเสื่อมเสีย แต่การทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหารนั้นมักพบปัญหาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและองค์ประกอบที่สำคัญของอาหาร เช่น การหดตัว การสูญเสียสารหอมระเหย สี และคุณค่าทางโภชนาการ การทำแห้งแบบผสมผสาน (Hybrid drying) เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่นำมาแก้ไขข้อบกพร่องของการทำแห้งแบบขั้นตอนเดียวเช่น การใช้การทำแห้งแบบหลายขั้นตอน ซึ่งอาจจะใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ การเปลี่ยนอุณหภูมิของการทำแห้งในแต่ละขั้นตอน การเปลี่ยนความดัน หรือการนำวิธีการทำแห้งแบบต่างๆ มาใช้ร่วมกัน เพื่อผสมผสานข้อดีของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้นในเอกสารนี้จะกล่าวถึงลักษณะของกระบวนการทำแห้งแบบผสมผสานตัวอย่าง และผลของวิธีการทำแห้งแบบผสมผสานต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อนที่มีการนำมาใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมอาหารเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการศึกษาวิจัยการอบแห้งกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน, *ลักกมณ, 2555* ศึกษาการอบแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ซึ่งหลักการของการอบแห้งของไอน้ำยวดยิ่งนี้ก็คือการใช้ไอน้ำ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำที่ความดันใดๆ มาใช้ในการอบแห้ง เพราะค่าว่า ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ตามนิยามของมันคือ ไอน้ำอะไรก็แล้วแต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือด ซึ่งไม่สนใจว่าจุดเดือดเท่าไร ถ้าสมมติว่าสามารถลดความดันที่ให้น้ำเดือดได้ที่ 40°C ถ้าอบแห้งที่ 50-60°C นั่นก็คือเป็น ไอน้ำร้อนยวดยิ่งแล้ว เมื่อต้องการที่จะอบในความร้อนระดับไหน ก็แค่ปรับความดันให้สัมพันธ์กันเท่านั้น ซึ่งจากความรู้พื้นฐานที่เรียนมาตั้งแต่เด็กๆ นั่นก็คือ การทำให้ไอน้ำจุดเดือดลดลงก็ต้องลดความดันลง เช่น เวลาขึ้นไปอยู่บนเขาจะสามารถต้มน้ำเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง แต่เมื่อเหมาไม่ได้ขึ้นไปอยู่บนเขา แนวทางก็คือ ต้องทำให้ความดันลดต่ำลงนั่นเอง นั่นก็คือหลักการของงานวิจัยนี้, *Suvarnakuta และคณะ, 2005* ศึกษาการทำแห้งแครอทด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยลมร้อน พบว่าการทำแห้งแครอทด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำจะมีการสูญเสีย  $\beta$ -carotene น้อยกว่าการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยลมร้อนตามลำดับ เนื่องจากในระบบการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำนั้นปราศจากออกซิเจนจึงป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่า ในขณะที่การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศแม้ว่าจะทำการดูดอากาศออกแล้ว แต่ยังมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในระบบจึงทำให้ยังคงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้บ้าง ส่วนการทำแห้งด้วยลมร้อนนั้นมีออกซิเจนอยู่มากในระบบจึงมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากกว่าวิธีอื่นๆ ปริมาณ  $\beta$ -carotene จึงมีค่าต่ำการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำเหมาะสมกับอาหารที่ไวต่อความร้อนที่ต้องการรักษาคุณภาพด้านสี เนื้อสัมผัส คุณค่าทางโภชนาการ สารหอมระเหย และที่สำคัญการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำให้ลักษณะความเป็นรูปทรงของอาหารที่ทำให้ขึ้นอาหารลดการหดตัวและมีการคืนตัวกลับที่ดี

จากงานวิจัยที่กล่าวมาสรุปได้ว่าการลดความดันอากาศมีผลต่อการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่ยังไม่มีการวิจัยในเรื่องของค่าแรงดันอากาศที่ลดลงสัมพันธ์กับอุณหภูมิจุดเดือดน้ำที่จะส่งผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ และยังขาดงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปถึงการพัฒนาตัวปั๊มในการลดความดันอากาศลงที่มีราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพ

## 7. วิธีดำเนินการ

### อุปกรณ์

1. เครื่องวัดบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นอากาศ

Data Logger รุ่น AP-17000, Sila Co., Ltd, Bangkok, Thailand ซึ่งใช้ร่วมกับหัววัดอุณหภูมิและความชื้น SHT11

2. เครื่องชั่งดิจิตอล พิกัดโหลด 5 kg
3. ตู้อบหาความชื้น
4. เครื่องวัดความเร็วรอบ
5. นาฬิกาจับเวลา
6. เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า
7. เทอร์โมมิเตอร์
8. เครื่องอบแห้งลดแรงดัน(สุญญากาศ) แบบชั้นวาง
9. วัสดุเกษตรสำหรับการทดสอบอบแห้ง ได้แก่ พืชผักและสมุนไพรต่างๆ

### วิธีการดำเนินการ

1. ทำการศึกษาข้อมูล ตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทำการคำนวณออกแบบสร้างเครื่องต้นแบบพร้อมทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้น โดยเครื่องต้นแบบประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ
  - 2.1 ออกแบบสร้าง ปั๊มลดความดันอากาศ แบบ water jet
  - 2.2 ห้องอบแห้งออกแบบเป็นแบบชั้นวาง (Tray dryer)
  - 2.3 ออกแบบติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าให้ความร้อนในห้องอบแห้งกระจายรอบๆ ชั้นวางผลิตภัณฑ์

2.4 ทดสอบระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งลดความดันอากาศ โดยทำการทดสอบการดูดอากาศของปั๊ม water jet หาค่าความดันบรรยากาศที่ลดลงกับอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ ซึ่งความดันสูญญากาศที่สัมบูรณ์จะอยู่ที่ 760 มิลลิเมตรปรอท

### 3. ทดสอบประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้งลดแรงดันอากาศแบบชั้นวางที่สร้างขึ้น

โดยนำพืชผักและสมุนไพรบางชนิด ได้แก่ ขมิ้นชัน, พริก, ใบบัวบก, มะเขือเทศ, ใบมะกรูด, ผักคะนัง เป็นต้น ทั้งนี้เป็นการทดสอบเพื่อดูประสิทธิภาพการอบแห้ง และมีบางพืชที่นำไปวิเคราะห์หาสารสำคัญ ได้แก่ ขมิ้นชันเพื่อหาค่าสาร curcuminoid โดยส่งไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐาน และทำการทดสอบเก็บผลิตภัณฑ์เพื่อศึกษาเรื่องของการเสื่อมคุณภาพ อบแห้งพริกเพื่อส่งไปให้โครงการวิจัยสกัดหาสารแคปไซซินโดยเครื่องสกัดแบบคาร์บอนไดออกไซด์แรงดันสูง

### 4. ทำการวิเคราะห์ สรุปผลการวิจัย ทำเอกสารเผยแพร่

#### เวลาและสถานที่

ช่วงเวลาในการดำเนินการทดลอง ตุลาคม 2559 – กันยายน 2561

สถานที่ทำการทดลอง/ดำเนินการ

- ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร
- สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร
- กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี
- สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร

## 8. ผลการทดลองและวิจารณ์

การสร้างเครื่องอบแห้งแบบลดแรงดันอากาศ แบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ระบบปั๊มลดแรงดัน และห้องอบแห้งแบบชั้นวางพร้อมระบบความร้อน

### 1) ระบบปั๊มลดแรงดัน

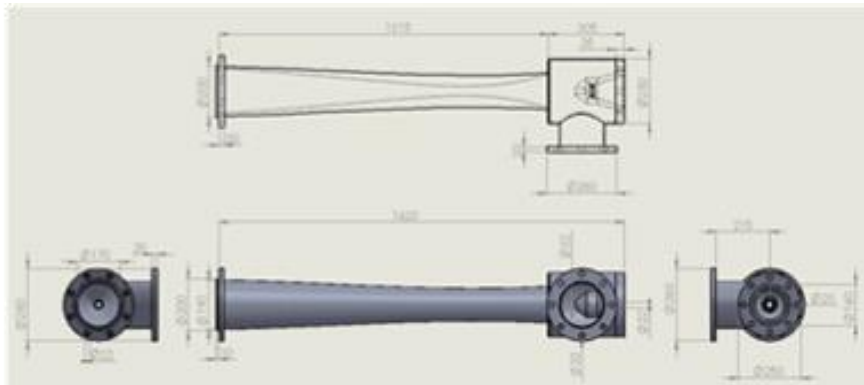
ทำการศึกษาข้อมูลการทำงาน และส่วนประกอบ ขนาดชิ้นส่วน ของระบบปั๊มลดแรงดันแบบ water jet ที่มีจากต่างประเทศ ดังภาพที่ 8



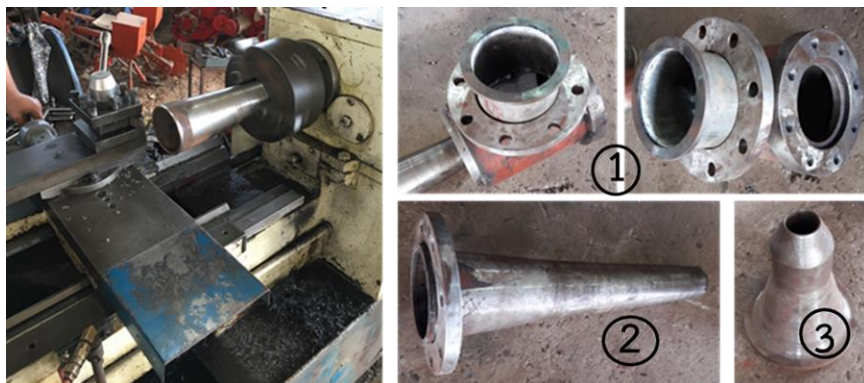


ภาพที่ 8 นำปั๊มลดแรงดันแบบ water jet มาศึกษาวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางในการสร้าง

ทำการแกะและวาดแบบปั๊มลดแรงดันแบบ water jet ดังภาพที่ 9 เพื่อทำการสร้าง โดยทำการสร้างส่วนของ water jet ทั้ง 3 ส่วน คือ 1.ชุดหน้าแปลนท่อพ่นน้ำเข้าและหน้าแปลนต่อพ่วงห้องอบแห้ง 2.ส่วนท่อลดและขยายออกพร้อมหน้าแปลน 3.ชุดหัวพ่นน้ำ (Jet nozzle) ดังภาพที่ 10 จากนั้นนำมาประกอบเป็นชุดปั๊ม และมีขนาดเท่ากับของต่างประเทศ ดังภาพที่ 11 โดยมีความสามารถใช้งานได้กับห้องอบแห้ง ขนาด 1-1.5 ลบ.ม. หรือน้ำหนักอาหารสด ก้อนอบแห้ง ไม่ต่ำกว่า 30 กก./ครั้ง สามารถสร้างแรงดันต่ำกว่าบรรยากาศไม่น้อยกว่า 700 ภายในเวลาไม่เกิน 5 นาที โดยความเร็วของน้ำผ่านหัวพ่น ประมาณ 25 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 9 เขียนแบบปั๊มลดแรงดันแบบ water jet เพื่อใช้ในการสร้างต้นแบบ



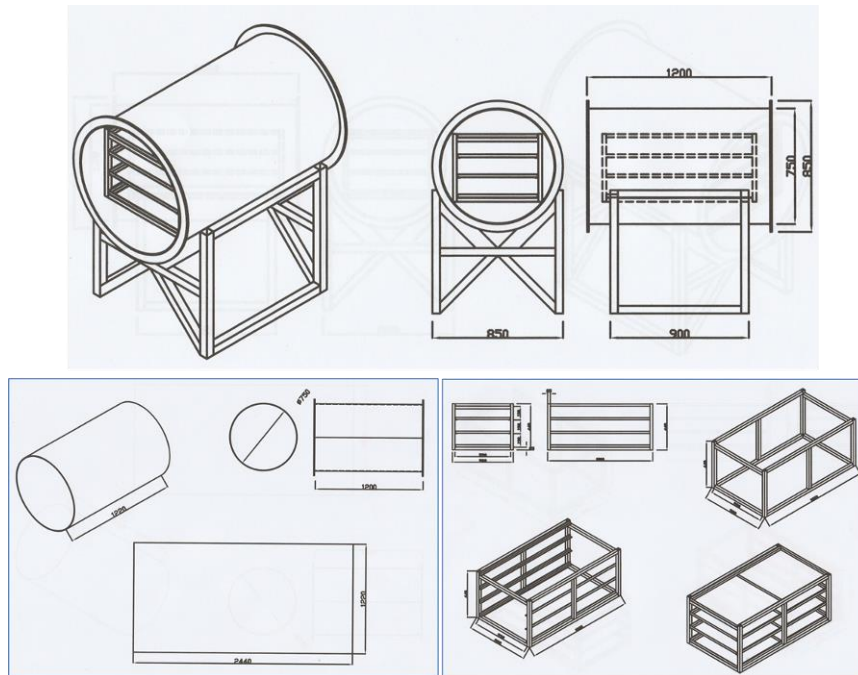
ภาพที่ 10 สร้างส่วนประกอบของหัวพ่นน้ำแรงดันสูง water jet ทั้ง 3 ส่วน



ภาพที่ 11 ประกอบเป็นชุดหัวพ่นน้ำแรงดันสูง และมีขนาดเท่ากับของต่างประเทศ

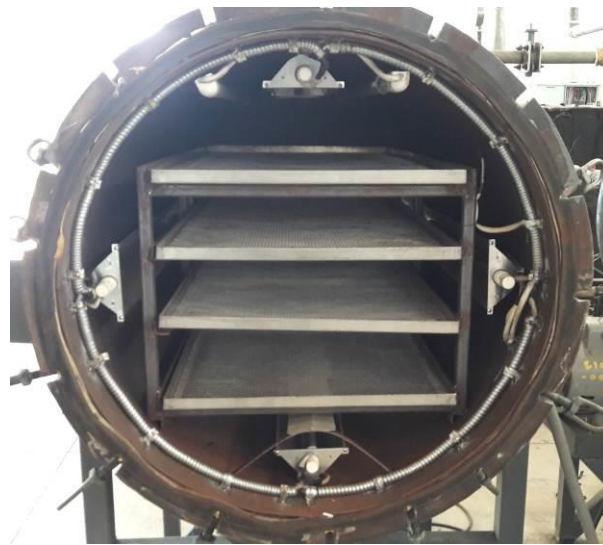
## 2) ห้องอบแห้งแบบชั้นวางพร้อมระบบให้ความร้อน

ทำการออกแบบและสร้างห้องอบแห้งและระบบให้ความร้อน เพื่อนำมาต่อฟางเข้าป้อนลดแรงดันอากาศแบบ water jet ที่สร้างขึ้น โดยออกแบบเครื่องอบแห้งลดแรงดันอากาศแบบชั้นวาง ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การออกแบบห้องอบแห้งลดแรงดันอากาศแบบชั้นวาง และการวางฮีตเตอร์ความร้อน

การสร้างห้องอบแห้งแบบชั้นวาง จะม้วนผนังห้องอบแห้งด้วยเหล็กแผ่น ขนาด กว้าง x ยาว x หนา 2440 x 1220 x 6 มิลลิเมตร โดยมีวงเส้นรองวงเต็มแผ่นตามยาว 2440 มิลลิเมตร ได้เป็นทรงกระบอกกลม ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 760 มิลลิเมตร ยาว 1220 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร ในส่วนของชั้นวางจะมีขนาดโครงสร้าง ชั้น กว้าง x ยาว x สูง 580 x 1000 x 440 มิลลิเมตร รองรับถาดตะแกรงสแตนเลส ขนาด กว้าง x ยาว x หนา 500 x 1000 x 20 มิลลิเมตร จำนวน 4 ถาด ระบบให้ความร้อนในห้องอบแห้งได้ทำการติดตั้งแท่งฮีตเตอร์ขนาด 1000 วัตต์ จำนวน 4 ชุด ในตำแหน่ง ด้านบน ด้านข้าง และด้านล่าง ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การปรับปรุงระบบสายไฟฟ้าและเซนเซอร์ของห้องอบแบบชั้นวางให้เรียบร้อย

#### ทำการทดสอบเบื้องต้นระบบเครื่องอบแห้งแบบลดแรงดันอากาศ

ทำการติดตั้งระบบอบแห้งแบบลดแรงดัน โดยมีการต่อพ่วงปั๊มลดแรงดันอากาศแบบ water jet ที่สร้างขึ้น เข้ากับตู้อบแบบชั้นวาง โดยมีวาล์วในการควบคุมการปิดเปิดท่อดูดอากาศของแต่ละเครื่องอบแห้ง และจากการทดสอบประสิทธิภาพของปั๊ม water jet ที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ดีเท่ากับของต่างประเทศ สามารถลดแรงดันได้มากกว่า 720 มิลลิเมตรปรอท ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การประกอบปั๊มลดแรงดันอากาศแบบ water jet กับห้องอบแห้งแบบชั้นวาง

จากการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบลดความดันอากาศโดยวัดค่าของอุณหภูมิในห้องอบแห้งพบว่า เมื่อไม่มีผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้งค่าความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบแห้งมีค่าเกือบจะเป็นศูนย์ ดังภาพที่ 15 และเมื่อใส่ผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้งซึ่งในการทดลองนี้ใช้ผักบุงเป็นผักสำหรับการทดสอบจะพบว่าขณะทำการอบแห้งค่าความชื้นในห้องอบแห้งมีค่าค่อนข้างสูงและค่อยๆ ลดลงเมื่อความชื้นในผลิตภัณฑ์ลดลง จากความสัมพันธ์นี้จึงเป็นไปได้ว่าค่าความชื้นของอากาศในห้องอบแห้งสามารถทำนายค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เหลือในผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง



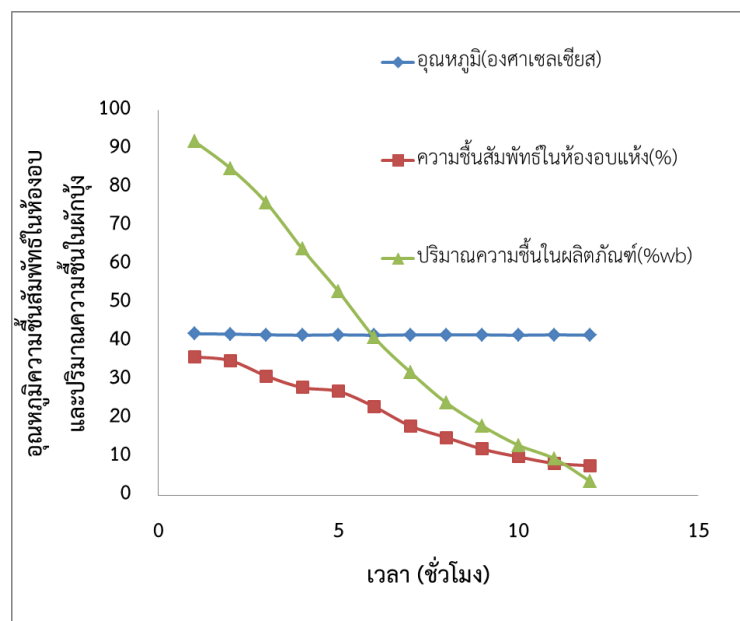
ภาพที่ 15 ความชื้นอากาศในห้องอบแห้งที่ไม่มีผลิตภัณฑ์ เข้าใกล้ศูนย์



ภาพที่ 16 ทดสอบอบแห้งผักบุ้งเพื่อหาความสัมพันธ์ของความชื้นในห้องอบแห้งกับความชื้นในผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 17 ค่าความชื้นในห้องอบแห้งผักบุ้งที่ผ่านการอบมา 10 ชั่วโมง



ภาพที่ 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นอากาศในห้องอบแห้งกับความชื้นในผักบุ้งที่อบแห้ง

จากกราฟภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ของความชื้นในห้องอบแห้งผักบุง กับความชื้นในผักบุงพบว่า ที่ความชื้นอากาศในห้องอบ(RH) มีค่า 20% 15% 10% ค่าความชื้นของผักบุงเป็น 35% 25% และ 13% ตามลำดับ ดังภาพที่ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณของผักบุงที่อบแห้งด้วย จึงต้องมีการทดลองอีกหลายซ้ำเพื่อพิสูจน์ความเป็นไปได้ของพืชแต่ละชนิดและปริมาณที่อบแห้งแต่ละครั้ง

เมื่อทดสอบระบบเครื่องอบแห้งแบบลดแรงดันอากาศสำเร็จแล้วจึงได้ทำการทดสอบการอบแห้งผลิตภัณฑ์พืชผักสมุนไพรเพื่อเก็บข้อมูลต่างๆ แต่ในขณะที่ทำการทดสอบเกิดปัญหาไฟฟ้าดับกะทันหัน บั้มสุญญากาศหยุดทำงาน ทำให้ภาวะสุญญากาศในห้องอบแห้งดูน้ำกลับเข้าห้องอบ จึงจำเป็นต้องแก้ไขปรับปรุงระบบป้องกันเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับกะทันหันโดยการใส่วาล์วกันน้ำย้อนกลับ ซึ่งก็สามารถป้องกันได้เป็นอย่างดีซึ่งนี้ได้ทำการทดสอบปีระบบไฟฟ้าให้บั้มสุญญากาศหยุดกะทันหันน้ำไม่สามารถย้อนกลับเข้าห้องอบแห้งได้ ดังภาพที่ 19



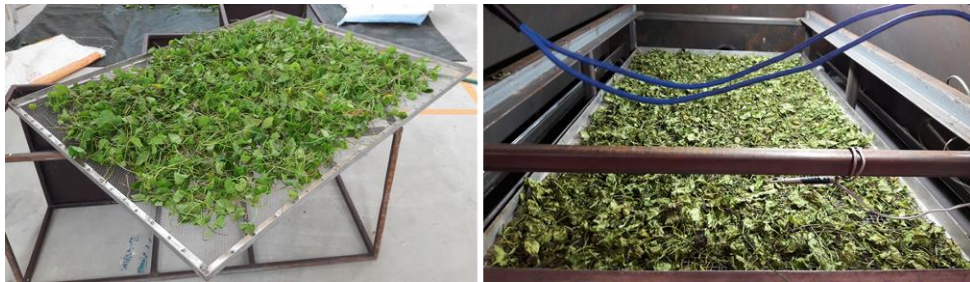
ภาพที่ 19 การติดตั้งวาล์วกันน้ำไหลย้อนกลับเข้าเครื่องอบแห้ง

#### ทำการทดสอบอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลดแรงดันอากาศ

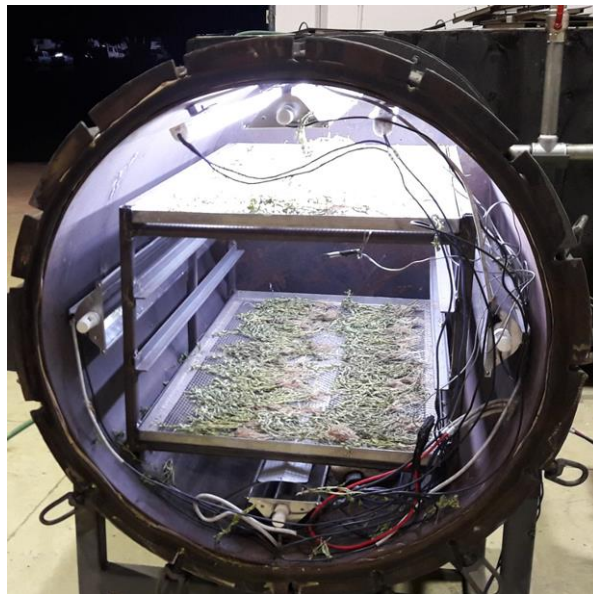
เป็นการทดสอบเพื่อดูประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบ ได้แก่ การสร้างภาวะลดแรงดันอากาศ (สุญญากาศ) ประสิทธิภาพการอบแห้ง(การลดความชื้นของผลิตภัณฑ์) โดยใช้พืชในการทดสอบ ได้แก่ ใบบัวบก ผักชะแยง ใบมะกรูด พริก มะเขือเทศ ดังภาพที่ 20 -24



ภาพที่ 20 การทดสอบอบแห้งพืชผักและสมุนไพรบางชนิด



ภาพที่ 21 การอบแห้งใบบัวบก



ภาพที่ 22 การอบแห้งผักชะแยง



ภาพที่ 23 การอบแห้งใบมะกรูด



ภาพที่ 24 การอบแห้งพริกและมะเขือเทศ

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลดแรงดันอากาศแบบชั้นวาง

พืช	ความชื้นเริ่มต้น % w.b.	ความดันลดลง มม.ปรอท	อุณหภูมิที่ใช้ องศาเซลเซียส	เวลาในการอบ ชั่วโมง	ความชื้นหลังอบ % w.b.
ใบบัวบก	85	700	45	3.5	2.5
ผักขะแยง	80	700	45	5	3
ใบมะกรูด	79	700	45	3.5	3
พริก	75	700	45	10	6
มะเขือเทศ	76	700	45	15	5

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบอบแห้งพืชผักและสมุนไพรตามภาพที่ 15-18 ปรากฏค่าตามตารางเพื่อได้เป็นแนวทางในการสรุปความเหมาะสมในการที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่อไป และได้ทดสอบการนำผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งไปทดสอบบรรจุในถุงซีลสุญญากาศเพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 25





ภาพที่ 25 การบรรจุผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งในถุงซีลสุญญากาศ

### ทำการทดสอบการอบแห้งขมิ้นชัน

ทำการทดสอบอบแห้งขมิ้นชัน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบลดแรงดันและเก็บตัวอย่างไปหาสารสำคัญ โดยขมิ้นชัน จะมีสาร curcuminoid โดยเปรียบเทียบกับการตากแดด ดังภาพที่ ในการอบด้วยเครื่องลดแรงดันอากาศที่ 700 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เวลา 10 ชั่วโมง ดังภาพที่ 26 ขมิ้นชัน ความชื้นเริ่มต้น 71% มาตรฐานเปียก ลดลงเหลือ 13% มาตรฐานเปียก ซึ่งการหาความชื้นจะใช้ตู้อบลมร้อนในการหาความชื้น และทำการเก็บผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งเพื่อเก็บไว้หาสารสำคัญของขมิ้นชัน



ภาพที่ 26 ทดสอบการอบแห้งขมิ้นชัน



ภาพที่ 27 ขมิ้นชั้นตากแดด



ภาพที่ 28 เก็บตัวอย่างขมิ้นชั้นหลังการอบแห้งมาใส่ถุงพรอยด์สูญญากาศ

ตารางที่ 2 แสดงผลการหาสารสำคัญในขมิ้นชั้นที่ทำให้แห้งในลักษณะต่างๆ

ตัวอย่างที่	Curcumin (%)	Demetoxy curcumin (%)	Bisdemetoxy curcumin (%)	Total curcuminoid (%)
ตากแดด	12.16	7.85	8.36	28.37
อบแห้งที่อุณหภูมิ 45 °C	14.44	7.87	8.40	30.71
อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C	12.01	6.39	7.52	25.92

จากตารางที่ 2 แสดงค่าสาระสำคัญที่เหลือจากการทำแห้ง 3 แบบด้วยกันคือ การตากแดด การอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สารกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ประกอบด้วยสารหลัก 3 ตัว คือ เคอร์คูมิน (curcumin; 75-81%), ดีเมทอกซีเคอร์คูมิน (demethoxycurcumin; 15-19%) และ บิสดีเมทอกซีเคอร์คูมิน (bisdemethoxycurcumin; 2.2-6.6%) (Jayaprakasha et al., 2005) ปริมาณเคอร์คูมินอยด์ที่พบในเหง้าขมิ้นชันแตกต่างกันในแต่ละแหล่งปลูก วัตถุดิบขมิ้นชันที่ดีควรมีเคอร์คูมินอยด์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5

## 9. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ได้ศึกษาข้อมูลหลักการทำงานและประโยชน์ของการอบแห้งแบบลดความดันจะช่วยให้ประสิทธิภาพการอบแห้งได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับสภาวะปกติซึ่งจะเป็นการรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ และหัวใจของระบบการอบแห้งแบบลดแรงดันก็คือปั๊มลดแรงดันจนเข้าใกล้สภาวะสุญญากาศ จึงได้ทำการศึกษาข้อมูลปั๊มสุญญากาศแบบ water jet ขนาดผู้ประกอบการ และทำการเรียนรู้จากของต่างประเทศเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างและทดสอบประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับที่จะสร้างเอง ออกแบบห้องอบแบบชั้นวาง เพื่อนำมาต่อพ่วงกับปั๊มสุญญากาศ แบบ water jet ที่สร้างขึ้น ทำการออกแบบระบบให้ความร้อนในห้องอบแห้งโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ทำการศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อได้ข้อมูลความสัมพันธ์ของการลดความดันอากาศกับจุดเดือดของน้ำซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดถึงอัตราการระเหยระหว่างการอบแห้ง ของอุณหภูมิ แรงดันอากาศ และอัตราหรือเวลาในการระเหย น้ำจากวัสดุอบแห้ง ทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์พืชผักและสมุนไพร ประเมินแนวโน้มประสิทธิภาพและความเหมาะสมของเครื่องอบแห้ง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง และทดสอบการบรรจุผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งในถุงซีลสุญญากาศ ทดสอบการทำนายความชื้นของผลิตภัณฑ์โดยดูจากความชื้นของอากาศในห้องอบแห้ง

## 10. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

กลุ่มเกษตรกร โรงงานเอกชนขนาดเล็กและขนาดกลาง จะได้ต้นแบบเครื่องอบแห้งแบบลดความดันอากาศสำหรับการอบแห้งพืชผักและสมุนไพรที่มีประสิทธิภาพ

## 11. คำขอบคุณ (ถ้ามี)

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีทั้งนี้เพราะได้รับการสนับสนุนจากหลายฝ่ายด้วยกัน ได้แก่ ผู้ให้ทุนวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เจ้าหน้าที่ของ กรมวิชาการเกษตร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในงานเอกสารและการเงิน และหน่วยงานที่ช่วยสนับสนุนการสร้างและทดสอบโรงเรือนต้นแบบ ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม สถาบันวิจัยพืชสวน สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร นอกจากนี้ยังมีผู้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนในด้านต่างๆ แต่มิได้เอ่ยนามไว้ ซึ่งล้วนแต่มีส่วนส่งเสริมให้โครงการวิจัยนี้ดำเนินงานจนเป็นผลสำเร็จ ซึ่งคณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

## 12. เอกสารอ้างอิง

- ชนิตา ศิริรัตน์ และ พิไลรัก อินธิปัญญา. 2552. การผลิตน้ำผึ้งผงจากน้ำผึ้งดอกทานตะวันโดยการอบแห้งแบบสุญญากาศและแบบแช่เยือกแข็ง. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี.
- ชาลีตา บรมพิชัยชาติกุล. 2555. เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน : การนำมาใช้เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน. ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรเชษฐ แสงสีดา ธนรัฐ ศรีวีระกุล ชญานนท แสงมณี และ กุลเชษฐ เพียรทอง. 2555. การศึกษาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ไอน้ำที่ใช้ในการอบแห้งสุญญากาศ (Performance study of a steam ejector in vacuum drying application). KRU ENGINEERING JOURNAL. July-September 2012; 39(3): 291- 299 p.
- สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. ท้อป, กรุงเทพฯ.
- อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และ ศักชัย จงจำ. 2553. การอบแห้งขิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 15 (2553) 2. หน้า 76-86..
- นิธยา รัตนาปนนท์. 2549. เคมีอาหาร. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- วีไล รังสาดทอง. 2545. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- สิงหนาท พวงจันทร์แดง. 2555. เทคโนโลยีการทำแห้งอาหาร. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- เสริม จันทร์ฉาย. 2547. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานรังสีอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- B. A. Averill. 2012. **Principles of General Chemistry**. Andy Schmitz, Michigan.
- Suvarnakuta, S., Davahastin, S., and Mujumdar, A.S, 2005, "Drying Kinetics and  $\beta$ -carotene Degradation in Carrot Undergoing Different Drying Processes", Journal of Food Science, Vol.70, No.8, pp.520-526

## 13. ภาคผนวก

-