การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

การออกแบบและทดสอบระบบการอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ: กรณีศึกษาการผลิตผงมะนาว

Design and Testing of Vacuum Freeze Drying System: Case Study on Lemon Powder Production

ไทรทอง ศรีโยธา[1], วสันต์ เธียรสุวรรณ[2] และ กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย[3]
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002
โทร 0-43202845 โทรสาร 0-43202849 E-mail: Saithong777@yahoo.com [1] , Theansuwan @yahoo.com [2] , kittri@kku.ac.th[3]
Saithong Sriyotha[1], Wasan Theansuwan[2] and Kittichai Trirattanasirichai[3]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
Khon Kaen, 40002, Thailand
Tel: 0-3202845 Fax: 0-43202849 E-mail: Saithong777@yahoo.com [1] , Theansuwan @yahoo.com [2], kittri@kku.ac.th[3]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศเพื่อการผลิตผงมะนาว การอบแห้งน้ำมะนาวด้วยวิธีนี้จะไม่ทำให้วิตามินและโครงสร้างของอาหารเกิดความเสียหาย และยังคงสภาพของสี กลิ่น และรสชาติของอาหารไว้ได้เป็นอย่างดี การออกแบบและการทดสอบระบบจะใช้สำหรับน้ำมะนาว 10 kg โดยบรรจุน้ำมะนาวใส่ถาดสแตนเลส 10 ถาด น้ำมะนาวในแต่ละถาดสูงประมาณ 1 cm ขั้นตอนของการผลิตผงมะนาวมี 3 ขั้นตอน เริ่มจากการแช่แข็งให้มีอุณหภูมิ -20°C จากนั้น ทำการอบแห้งขั้นตอนที่ 1 โดยการให้ความร้อนแก่ผลึกน้ำมะนาวเยือกแข็งให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 0°C ภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดันต่ำกว่า 4.58 torr ซึ่งจะทำให้ส่วนขององค์ประกอบที่เป็นน้ำแข็งเกิดการระเหิดกลายเป็นไอ และขั้นตอนสุดท้าย ทำการอบแห้งขั้นตอนที่ 2 โดยให้ความร้อนแก่ส่วนประกอบของมะนาวที่เหลือให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 28°C ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งจะทำให้ความชื้นส่วนที่เหลืออยู่เกิดการระเหยและถูกดูดออกไปโดยปั๊มสุญญากาศ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมะนาวแช่แข็งมีค่าประมาณ –20°C และหลังจากผ่านการอบแห้งขั้นตอนที่ 1 มะนาวจะเหลือองค์ประกอบส่วนที่เป็นน้ำอยู่ประมาณ 44.3 %

Abstract

This research was studied on the vacuum freeze drying - system for lemon powder. This technique is suited for lemon powder production in order to preserve the vitamin, food structure, colour, and taste. The design and testing of this system unit is applied for 10 kgs of lemon juice, there are 10 shelts of lemon juice with 1 cm thick were freezed under the temperature of -20°C and reheated until the temperature of lemmon cristal icreased to 0°C under vacuum pressure of 4.58 torr . The water will be transformed to be vapor and then reheated the product until the temperature increased to 28°C under vacuum condition, the rest of moisture will be evacuated by vacuum pump. The results showed that the average temperature of frozen lemon is about –20°C and the moisture content is about 44.3 % in primary drying process.

1. บทนำ

การอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ เป็นการทำให้ความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์มีปริมาณลดต่ำลง โดยการแช่ผลิตภัณฑ์นั้นในห้องเย็นจนอยู่ในสภาวะเยือกแข็ง แล้วทำให้อากาศโดยรอบของผลิตภัณฑ์มีสภาวะเป็นสุญญากาศ ซึ่งจะทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะเป็นเกล็ดน้ำแข็ง เกิดการระเหิดกลายเป็นไอแล้วเคลื่อนที่ออกไปกลั่นตัวที่อุปกรณ์ควบแน่นไอน้ำ มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีความชื้นลดต่ำลง การอบแห้งด้วยวิธีนี้มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ในการถนอมผลิตภัณฑ์ทางอาหารให้สามารถเก็บไว้ได้ในระยะเวลานานๆ โดยไม่ทำให้วิตามินและโครงสร้างของอาหารเกิดความเสียหาย และยังคงสภาพของสีกลิ่นและรสชาติของอาหารไว้ได้ดีอีกด้วย ซึ่งจะต่างจากการอบแห้งด้วยวิธีการใช้ความร้อน เนื่องจากความร้อนจะเป็นตัวทำให้โครงสร้างทางอาหารเปลี่ยน

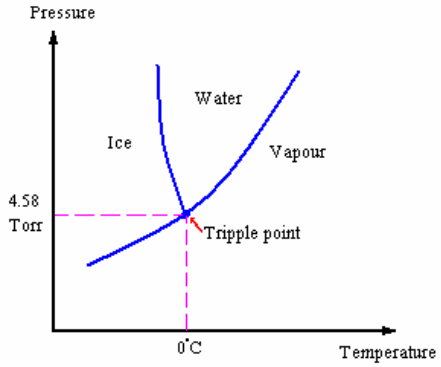
1 นักศึกษาปริญญาโท, 1 Graduate Student
2 นักศึกษาปริญญาเอก, 2 Graduate Student
3 รองศาสตราจารย์, 3 Associate Professor

แปลงไป จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้ศึกษาและออกแบบสร้างระบบการอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศมาใช้ในการแปรรูปน้ำมะนาวสด ซึ่งมะนาวมีคุณลักษณะเฉพาะคือมีรสเปรี้ยว วิตามินซีสูง และมีกลิ่นหอม โดยทำให้กลายเป็นผงมะนาว เพื่อให้สามารถเก็บไว้ใช้ในระยะเวลานานๆ ได้ตลอดทั้งปีและยังทำให้มีความสะดวกในการเก็บรักษาตลอดจนการนำไปใช้งาน ทั้งยังช่วยลดปัญหาของมะนาวล้นตลาดและราคามะนาวที่ตกต่ำลงได้ มะนาวจัดได้ว่าเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง ที่มีความต้องการในการบริโภคสูงตลอดทั้งปี จากสถิติในปี 2545 มีการใช้มะนาวในประเทศสูงถึง 104,738 ตัน และจากอัตราการเพิ่มขึ้นของพลเมืองและการขยายตัวทางเศรษฐกิจที่มีแนวโน้มค่อนข้างสูง รวมทั้งการขยายตัวทางภาคอุตสาหกรรมซึ่งมีการนำมะนาวมาใช้ในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น ใช้เป็นส่วนประกอบเพื่อเพิ่มรสชาติของอาหาร ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องดื่มประเภทต่างๆ รวมถึงการใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง ผงซักฟอกและผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีกมากมาย ทำให้มะนาวมีบทบาทสำคัญทางการค้ามากยิ่งขึ้น แม้การปลูกมะนาวสามารถปลูกได้ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย แต่ปริมาณผลผลิตของมะนาวก็ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับแต่ละช่วงฤดูกาล โดยพบว่าในประเทศไทยจะประสบปัญหาการขาดแคลนมะนาวในช่วงหน้าแล้งประมาณเดือนกุมภาพันธ์–เมษายน ทำให้มะนาวมีราคาแพงขึ้นจากปกติ 5–10 เท่า ในขณะที่ในฤดูฝนผลผลิตของมะนาวที่ออกสู่ตลาดจะมีปริมาณมากทำให้มะนาวมีราคาถูก ด้วยสาเหตุนี้การแปรรูปน้ำมะนาวให้เป็นผง จึงเป็นอีกหนทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ไขปัญหาการขาดแคลนมะนาวในช่วงหน้าแล้ง และช่วยพยุงราคามะนาวในช่วงที่มีผลผลิตออกสู่ตลาดในปริมาณมากได้ เป็นการแก้ปัญหาเศรษฐกิจของประเทศได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งการศึกษากรรมวิธีการผลิตผงมะนาวในประเทศไทยในปัจจุบันยังอาศัยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงมาก ดังนั้นศึกษาการออกแบบระบบการอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการแปรรูปน้ำมะนาวสดและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรชนิดอื่นๆเป็นอย่างยิ่ง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการของการอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ (Principles of Vacuum Freezed Drying)

ความสัมพันธ์ระหว่างของแข็ง ของเหลวและก๊าซของน้ำเกี่ยวข้องกับกระบวนการแปรรูปอาหารหลายชนิดเช่น การทำให้เข้มข้น การอบแห้ง การแช่แข็ง การอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้โดยใช้แผนภาพเฟสไดอะแกรมของน้ำ(phase diagram)



รูปที่ 1 เฟสไดอะแกรมของน้ำ

รูปที่ 1 แสดงให้เห็นความเป็นเนื้อเดียวกันและความแตกต่างทางกายภาพของระบบ ที่สามารถแยกระบบออกจากอีกระบบหนึ่งโดยเส้นแบ่งของทั้งสองสถานะของน้ำบริสุทธิ์ แผนภาพดังกล่าวแสดงความดันและอุณหภูมิของวัฏภาคของน้ำ เส้นแบ่งแต่ละเส้นแสดงอุณหภูมิและความดันที่ทำให้เกิดสถานะสมดุล จุดทริปเปิล (Triple point) เป็นจุดที่ทุกเส้นมาตัดกัน เป็นจุดที่แสดงว่าทั้งสามสถานะอยู่ในภาวะสมดุล

กระบวนการของการอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ ประกอบด้วย 3 กระบวนการคือ Prefreezing, Primary drying และ Secondary drying

Prefreezing

ในช่วงนี้เป็นการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหาร ให้อยู่ในสภาวะเยือกแข็งอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ความชื้นเกิดการเปลี่ยนสภานะกลายไปเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก และเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดกับเซลล์ที่เป็นโครงสร้างของอาหาร ซึ่งจุดสำคัญของช่วงนี้คือ จะต้องให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าจุดยูแท็คติก (eutectic temperature) แล้วจึงจะทำการอบแห้งในขั้นตอนต่อไป ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละประเภทจะมีค่าแตกต่างกันออกไป

Primary drying

ในช่วงนี้เป็นการทำให้น้ำในน้ำะนาวเกิดการเยือกแข็ง และความดันไอของมีค่าต่ำกว่า 4.58 ทอร์ (610.5 ปาสคาล) เมื่ออาหารได้รับความร้อนน้ำแข็งจะระเหิดไปเป็นไอน้ำทันทีโดยไม่ผ่านการละลาย ไอน้ำจะถูกกำจัดออกจากอาหารอย่างต่อเนื่อง ด้วยการรักษาความดันในตู้ให้ต่ำกว่าความดันไอน้ำที่ผิวของน้ำแข็ง ไอน้ำจะถูกกำจัดออกไปโดยการใช้ปั๊มสุญญากาศและกลั่นตัวบนขดลวดทำความเย็น เมื่อกระบวนการนี้ดำเนินต่อไป ผิวหน้าของการระเหิดจะเคลื่อนที่เข้าไปในอาหาร และผลของการระเหิดในช่วงนี้จะทำให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณ 15% (น้ำหนักเปียก)

Secondary drying

การกำจัดน้ำในช่วงนี้ทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งอย่างช้าๆ จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องโดยยังรักษาความดันให้มีค่าต่ำ ไอน้ำจะเคลื่อนที่และถูกกำจัดออกไปจากอาหารโดยผ่านช่องน้ำแข็งที่ระเหิดไป การอบแห้งอาหารที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีความชื้นเหลือประมาณ 2% (น้ำหนักเปียก)

อัตราการอบแห้งขึ้นกับความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนของอาหารมากที่สุด และรองลงมาขึ้นกับความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำ (การถ่ายเทมวล) จากผิวหน้าของการระเหิด

ในทางทฤษฎีเราควรจะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแข็งให้อยู่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งเพียงเล็กน้อย อย่างไร ก็ตามที่อุณหภูมิวิกฤต ตัวถูกละลายซึ่งมีความเข้มข้นสูงในอาหารจะสามารถเคลื่อนที่ได้ภายใต้แรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของอาหาร ในสถานการณ์เช่นนี้โครงสร้างอาหารจะยุบลงทันทีโดยไม่สามารถย้อนกลับมาเหมือนเดิมได้และมีผลจำกัดอัตราการถ่ายเทไอน้ำและกระบวนการอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพ ในทางปฏิบัติจึงต้องมีการกำหนดปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมอัตราการถ่ายเทมวลเช่น อุณหภูมิสูงสุดของน้ำแข็ง อุณหภูมิต่ำสุดของคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิและความดันต่ำสุดของตู้อบ

2.2ส่วนประกอบหลักของระบบอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ

ระบบอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ ประกอบด้วยส่วนประ กอบหลักๆ ดังนี้

(1) ระบบทำความเย็น

(2) ระบบทำความร้อน

(3) ระบบทำสุญญากาศ

รูปที่ 2 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ

3.การหาขนาดอุปกรณ์ของระบบอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศ

3.1การหาขนาดของระบบทำความเย็น

จากความต้องการลดอุณหภูมิของน้ำมะนาวปริมาณ 10 kg จาก 28°C ให้เป็น -30°C ในเวลา 30 นาที ขนาดของอุปกรณ์การทำความเย็นจะคำนวณหาขนาดได้ดังนี้

จากสูตร $Q = \frac{(24\ hr)q_t \times 110\%}{RT}$

เมื่อ Q = ขนาดอุปกรณ์ทำความเย็น(kw, Tons)

q_t = ภาระการทำความเย็นทั้งหมด(kw, Tons)

RT = ชั่วโมงทำงานของ Compressor ใน 24 hr (กำหนดให้ = 24 hr)

ข้อมูลของห้องแช่แข็ง

- ปริมาตรห้อง = 0.7x0.6x0.4 = 0.168 m^3
- พ.ท.ผนังฉนวน = 2(0.7x0.4) + 2(0.6x0.4) + (0.7x0.6) + [(0.7x0.6) – (0.12x0.1)] = 1.868 m^2
- พ.ท.ประตูกระจก = 0.12x0.1 = 0.012 m^2
- polystyrene (cut cell) มีค่า k = 0.036 W/mK

glass (two plane) มีค่า C = 2.61 W/m^2K

- ฉนวนหนา 50 mm, k = 0.036 จะได้ค่า U = 0.556 W/m^2K

การหาค่า q_t

ภาระความร้อนรวมจะวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ของภาระความร้อนที่เกิดขึ้นจากส่วนต่างๆ ของห้องทำความเย็น ซึ่ง

$q_t = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$

1. ภาระการทำความเย็นจากพื้น ผนัง เพดาน

$q = UATD = (0.556\ W/m^2K)(1.868\ m^2)[28-(-30)]\ K$

$= 60.24\ W$

ภาระการทำความเย็นจากประตูกระจก

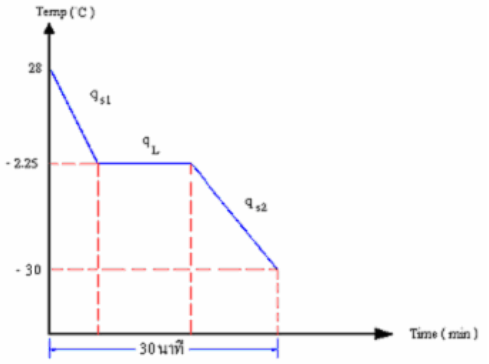
$q = CATD = (2.61W/m^2K)(0.012\ m^2)[28-(-30)]\ K$

$= 1.82\ W$

ดังนั้น $q_1 = (60.24) + (1.82) = 62.06\ W = 0.062\ kW$

2. ภาระการทำความเย็นจากการแช่แข็งผลิตภัณฑ์

$q_2 = (q_{s1} + q_L + q_{s2})$ / เวลาในการแช่แข็ง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์

โดยที่ $q_{s1} = mc_{p1}\Delta T_1$

$q_L = m(h_{if})$

$q_{s2} = mc_{p2}\Delta T_2$

เมื่อ m ของน้ำมะนาว = 10 kg

$\Delta T_1 = 28 – (-2.25) = 30.25\ K$

$\Delta T_2 = -2.25 – (-30) = 27.75\ K$

อุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็งของน้ำมะนาว = -2.25 °C

ค่า c_{p1} ของน้ำมะนาวที่อุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็ง = 3.81 kJ/kgK

ค่า c_{p2} ของน้ำมะนาวที่อุณหภูมิใต้จุดเยือกแข็ง = 2.1kJ/kgK

ค่า h_{if} ของน้ำมะนาว = 293 kJ/kg

ดังนั้น q_{s1} = (10 kg) (3.81 kJ/kgK)(30.25 K)

$q_{s1} = 1152.53\ kJ$

q_L = (10 kg) (293 kJ/kg)

$q_L = 2930\ kJ$

q_{s2} = (10 kg) (2.1 kJ/kgK)(27.75 K)

$q_{s2} = 582.75\ kJ$

ดังนั้น $q_2 = \frac{(1152.53 + 2930 + 582.75)\ kJ}{(30x60)s}$

$q_2 = 2.59\ kW$

3. ภาระการทำความเย็นจากถาดน้ำมะนาว

$q_3 = mc_p\Delta T$/ เวลาในการแช่แข็ง

ถาดน้ำมะนาวมีน้ำหนักทั้งหมดประมาณ 2 kg

ถาดน้ำมะนาวทำจาก Stainless steel ที่มี c_p = 0.42 kJ/kgK

ดังนั้น

$q_3 = \frac{(2\ kg)(0.42\ kJ/kgK)[28-(-30)]K}{(30 \times 60\ s)}$

$q_3 = 0.027\ kW$

4. ภาระการทำความเย็นจากมอเตอร์ไฟฟ้าของพัดลมในห้องแช่แข็ง

$$q_4 = \frac{(kW_{motor})(factor)(เวลาที่ใช้งาน)}{(24\ h)}$$

มอเตอร์ไฟฟ้าของพัดลมมีขนาด 0.25 kW (1/3hp)

ขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าของพัดลม 0.1 – 0.5 kW มีค่า factor = 1.67

ดังนั้น

$$q_4 = \frac{(0.25\ kW)(1.67)(30\ min)}{(24 \times 30\ min)}$$

$q_4 = 0.0087$ kW

ดังนั้นภาระความร้อนรวมของระบบเท่ากับ

$q_t = 0.062 + 2.59 + 0.027 + 0.0087$

$q_t = 2.69$ kW

และขนาดของอุปกรณ์ทำความเย็นจะมีค่าเท่ากับ

$$Q = \frac{(24\ hr)(2.69\ kW)(110\%)}{(24\ hr)}$$

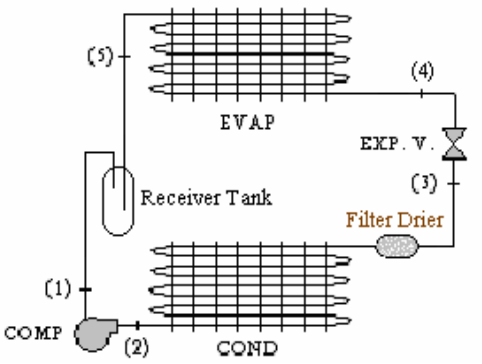
$Q = 2.96$ kW = 0.84 Ton

ดังนั้น เลือกขนาดของ Evaporator ยี่ห้อ GUEBA รุ่น SGL 91

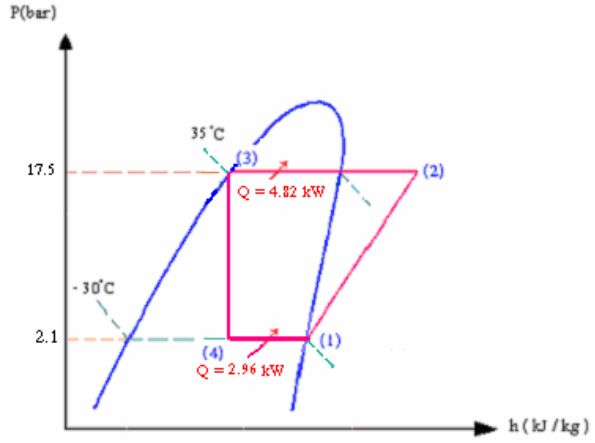
ซึ่งสามารถทำความเย็นได้ 3.37 kW

เลือกขนาดอุปกรณ์ของระบบทำความเย็น

สารทำความเย็นที่เลือกใช้เลือกใช้ในระบบนี้คือ R-404 a



รูปที่ 4 ส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ในระบบทำความเย็น



รูปที่ 5. P-h diagram

สารทำความเย็น R-404a จะมีคุณสมบัติดังนี้

$P_1 = 2.1$ bar $P_2 = 17.5$ bar

$h_1 = 350$ kJ/kg $h_2 = 395$ kJ/kg

$h_3 = h_4 = 253$ kJ/kg

หาค่าอัตราการไหลของสาร R–404a ที่ Cooling load = 2.96 kW)

$_4Q_1 = \dot{m}(h_1 - h_4)$

$\dot{m} = (2.96\ kJ/s)/(350–253)\ kJ/kg$

$\dot{m} = 0.0305\ kg/s = 1.83\ kg/min$

หาค่ากำลังงานที่ใช้ขับ Compressor

$_1W_2 = \dot{m}(h_2 - h_1)$

$= (0.0305\ kg/s)(395–350)\ kJ/kg$

$_1W_2 = 1.37$ kW = 1.84 hp

หาค่าความร้อนที่ระบายออกจาก Condenser

$_2Q_3 = \dot{m}(h_2 - h_3)$

$= (0.034\ kg/s)(395–253)\ kJ/kg$

$_2Q_3 = 4.82$ kW = 1.37 Ton

ดังนั้น รายละเอียดของอุปกรณ์ที่บริษัทมีจำหน่ายที่จะนำมาใช้กับระบบทำความเย็นมีดังนี้

-Evaporator เลือกยี่ห้อ GUEBA รุ่น SGL 91 ซึ่งสามารถทำความเย็นได้ 3.37 kW สามารถทำอุณหภูมิที่ผิว Evaporator ได้ -40°C ครีบแต่ละแผ่นมีระยะห่าง 12 mm.

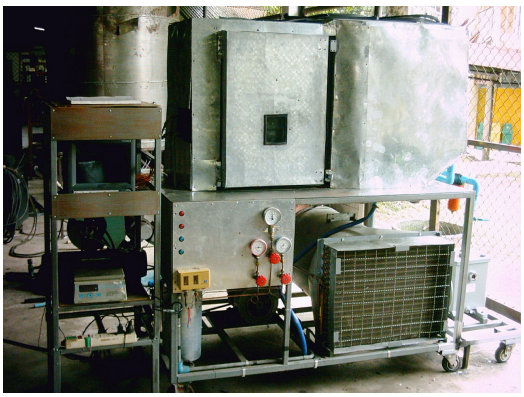
-Compressor เลือกยี่ห้อ BITZER เบอร์ 5 Y(W) ซึ่งมีภาระการทำความเย็น 3.42 kW ที่มีอุณหภูมิสาร R-404a ที่ Condenser 35 °C และอุณหภูมิที่ผิวที่ Evaporator -40°C และขนาดมอเตอร์ที่ใช้ขับเลือกมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 2 hp

-Condenser เลือกยี่ห้อ KULTHORN รุ่น 50797 ซึ่งสามารถระบายความร้อนออกจากระบบได้ 1.5 Ton

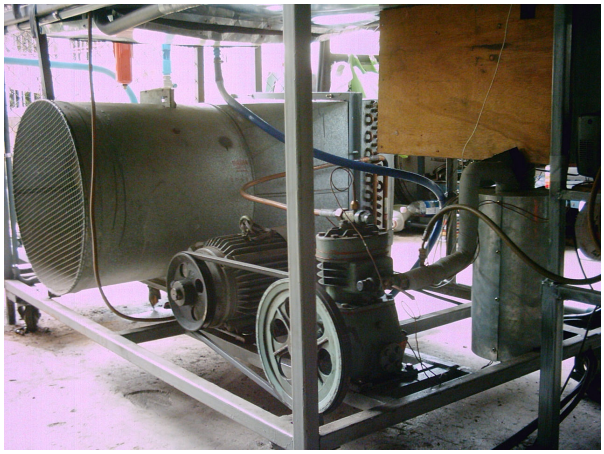
-Expansion valve เลือกยี่ห้อ SPORLAN รุ่น FS-1 ซึ่งใช้กับระบบที่มีภาระทำความเย็น 1 Ton ทำงานที่อุณหภูมิผิวของ Evaporator ในช่วง -20 °C ถึง -40 °C

-Receiver Tank เลือกยี่ห้อ KULTHORN รุ่น1046-2 ซึ่งใช้กับระบบที่มีภาระทำความเย็น 1 Ton

-Filter Drier เลือกยี่ห้อ SPORLAN รุ่น CG-053 ซึ่งใช้กับระบบที่มีภาระทำความเย็น 1 Ton



รูปที่ 6 เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 7 อุปกรณ์ของระบบทำความเย็นของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง-สุญญากาศ

3.2การหาขนาดของระบบทำความร้อน

- ช่วง Primary dry

ถ้าต้องการให้น้ำมะนาวมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1°C ต่อ 30 นาที ดังนั้น เพิ่มอุณหภูมิจาก -30 °C เป็น 0 °C ใช้เวลา 15 ชั่วโมง

น้ำแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำโดยการระเหิด โดยมีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ 2950 kJ/kg และในช่วงนี้ตามหลักการทางทฤษฎีจะมีความชื้นเหลือ 15% ดังนั้น จากน้ำมะนาว 10 kg จะมีน้ำระเหิดไปประมาณ 7.65 kg ∴ ความร้อนที่ต้องการใช้ในช่วงนี้หาได้จากสูตร

$$Q = mh_{if}/\Delta t$$

$$Q = \frac{7.65kg(2{,}950kJ/kg}{(15 \times 60 \times 60)s} = 0.416 \ kW/^{\circ}C$$

∴ อุณหภูมิเพิ่มทั้งหมด = 30°C ใช้ Q = 12.49 kW

- ช่วง Secondary dry

ถ้าต้องการให้ผงมะนาวมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5°C ต่อนาที ดังนั้น เพิ่มอุณหภูมิจาก 0°C เป็น 28°C ใช้เวลา 18.7 นาที

ความชื้นเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำโดยการระเหย โดยมีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ 293 kJ/kg และในช่วงนี้ตามหลักการทางทฤษฎีจะมีความชื้นเหลือ 2% ดังนั้น ความชื้นจากผงมะนาวจะระเหยไปประมาณ 1.16 kg ∴ ความร้อนที่ต้องการใช้ในช่วงนี้ หาได้จากสมการ

$$Q = mh_{if}/\Delta t$$

$$= \frac{(1.16 \ kg)(293 \ kJ/kg)}{(18.7x60)s}$$

$$= 0.3 \ kW$$

∴ อุณหภูมิเพิ่มทั้งหมด = 28°C ใช้ Q = 8.47 kW

ช่วงที่ต้องการใช้พลังงานความร้อนสูงที่สุดคือ ช่วง Primary dry คือ 12.5 kW ดังนั้น จะทำการสร้าง Hot plate สำหรับวางถาดน้ำมะนาวจำนวน 5 แผ่นๆ ละ 2.5 kW ซึ่ง Hot plate 1 แผ่น จะใช้กับถาดน้ำมะนาวจำนวน 2 ถาด

3.3การหาขนาดของระบบทำสุญญากาศ

การหาขนาดของเครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum pump) ได้มีการอ้างอิงจากเครื่องอบแห้งของบริษัท Labcono ที่มีขนาดการอบแห้งผลิตภัณฑ์ 8 ลิตร ซึ่งใช้ Vacuum pump ขนาด 195 ลิตรต่อนาที และเครื่องที่มีขนาดการอบแห้งผลิตภัณฑ์ 12 ลิตร ใช้ Vacuum pump ขนาด 195 ลิตรต่อนาที ซึ่งเครื่องอบแห้งที่ทำการออกแบบสร้างขึ้นนี้จะมีขนาดการอบแห้งน้ำมะนาว 10 ลิตร

ดังนั้น จึงเลือกขนาดของ Vacuum pamp ยี่ห้อ OP รุ่น CV-3N ซึ่งมีความสามารถในการดูดอากาศในอัตรา 350 ลิตรต่อนาที มี Ultimate Pressure 8 $x10^{-3}$ Torr

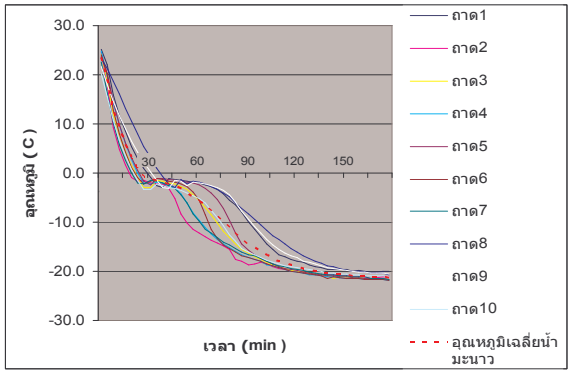
4. การทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้ง

การทดสอบเครื่องอบแห้งในช่วงแรก ระบบทำความเย็นที่ใช้มีภาระการทำความเย็นต่ำกว่าที่ได้ออกแบบไว้ เนื่องจากผู้วิจัยได้ใช้ Compressor ซึ่งมีอยู่แล้วที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลมาติดตั้งเข้าไปในระบบลองดูก่อน โดย Compressor มีภาระการทำความเย็น 1.1 kW ที่อุณหภูมิ Condenser 35°C และมีอุณหภูมิที่ผิวที่ Evaporator -40°C และใช้สารทำความเย็น R-22 แทน R-404a

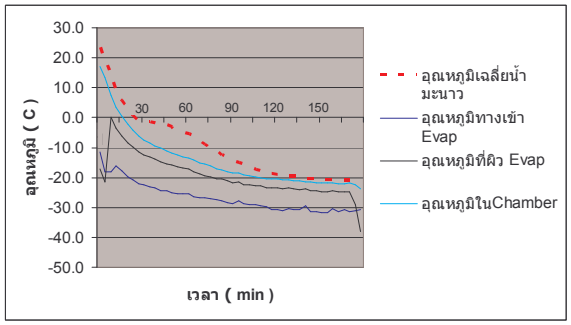
น้ำมะนาวที่นำมาใช้ในการทดสอบการแช่แข็งมีน้ำหนัก 3 kg (≈3ลิตร) บรรจุใส่ถาดสแตนเลส 10 ถาด แต่ละถาดมีความหนาของน้ำมะนาว ≈ 3 mm.

5. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้ง

การทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งในช่วง Prefreezing ได้ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมะนาว อุณหภูมิของ Evaporator และอุณหภูมิใน Chamber ดังแสดงในกราฟในรูปที่ 8 และรูปที่ 9

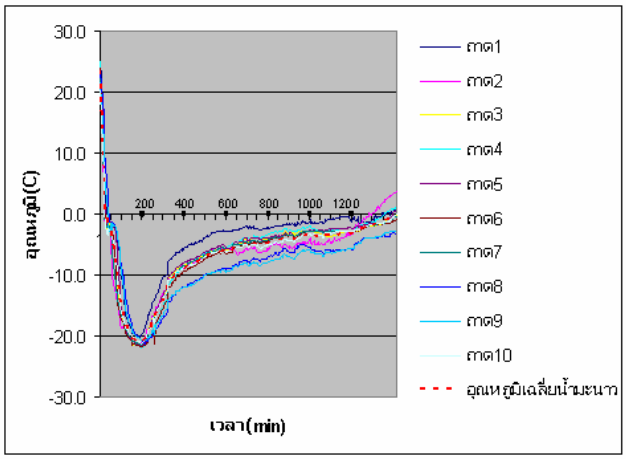


รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมะนาว

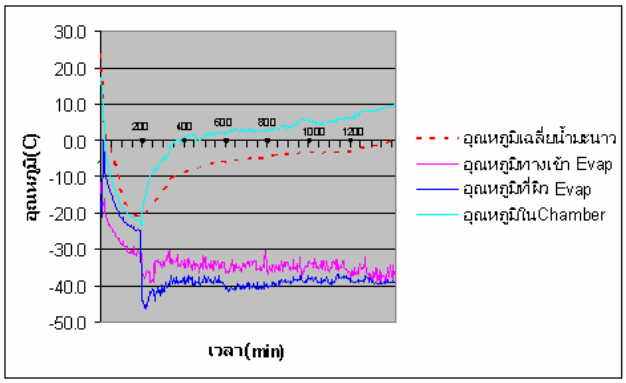


รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมะนาว อุณหภูมิ Evaporator และ อุณหภูมิใน Chamber

การทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้ง จากช่วง Prefreezing ถึงช่วง Primary drying ได้ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมะนาว อุณหภูมิของ Evaporator และอุณหภูมิใน Chamber ดังแสดงในกราฟในรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมะนาว



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมะนาว อุณหภูมิ Evaporator และ อุณหภูมิใน Chamber

หลังจากผ่านการทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งในช่วง Primary drying แล้ว ปรากฏว่าน้ำมะนาวที่อยู่ในถาดมีสภาพเป็นของของเหลวที่มีลักษณะเหนียวข้นและเมื่อนำน้ำมะนาวทั้ง 10 ถาด มาชั่งน้ำหนัก ค่าที่ได้คือ 1.63 kg

6. สรุปผลการทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้ง

จากรูปที่ 8 สามารถสรุปได้ว่าในการทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งในช่วง Prefreezing อุณหภูมิของน้ำมะนาวในแต่ละถาดจะมีแนวโน้มของอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 25°C ไปเป็น -20°C ใช้เวลาทั้งหมด 188 นาที (3 ชั่วโมง 8 นาที) และจากรูปที่ 9 สรุปได้ว่า เมื่อสิ้นสุดขั้นตอน Prefreezing แล้วทำการปิดพัดลมใน Chamber จะทำให้อุณหภูมิที่ผิว Evaporator ลดลงอย่างรวดเร็ว คือ มีการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิ -29.2°C ไปเป็น -40°C โดยใช้เวลา 8 นาที จะเห็นได้ว่าระบบทำความเย็นของเครื่องอบแห้งสามารถลดอุณหภูมิของน้ำมะนาว และทำอุณหภูมิที่ผิว Evaporator ได้ตามที่กำหนด แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นช้ากว่าที่ออกแบบเอาไว้เป็นอย่างมาก เนื่องจาก Compressor ที่นำมาลองติดตั้งมีขนาดการทำความเย็นน้อยกว่าที่ออกแบบไว้ และสารทำความเย็น R-22 ที่นำมาทดสอบระบบ มีประสิทธิภาพด้อยกว่าสาร R-404a ซึ่งสาเหตุที่นำสาร R-22 มาใช้ทดสอบก่อนเพราะในช่วงแรกของการติดตั้งระบบจะต้องมีการปรับปรุงและทดสอบบ่อยครั้ง จึงทำให้เกิดการสิ้นเปลืองสารทำความเย็น ดังนั้นการนำสาร R-22 มาทดสอบระบบก่อนจะทำให้ประหยัด กว่าการใช้สาร R-404a ประมาณ 8 เท่า

จากรูปที่ 10 สามารถสรุปได้ว่าในการทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งในช่วง Primary drying อุณหภูมิของน้ำมะนาวโดยเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก -20°C ไปเป็น 0°C ใช้เวลาทั้งหมด 1,172 นาที (19 ชั่วโมง 32 นาที) และจากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของผิว Evaporator ตลอดช่วง Primary drying มีค่าประมาณ -39.5°C ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการในช่วง Primary drying แล้วน้ำหนักน้ำมะนาวทั้ง 10 ถาด มีการเปลี่ยนแปลงจาก 3 kg เป็น 1.63 kg นั่นคือ มีส่วนประกอบที่เป็นน้ำเหลืออยู่ประมาณ 44.3 % ซึ่งไม่เป็นไปตามหลักการที่กล่าวไว้ในขั้นต้นคือควรเหลือความชื้นอยู่ประมาณ 15 % โดยสาเหตุที่ความชื้นถูกดึงออกไปได้น้อยเกินไป เกิดจากค่าสุญญากาศในระบบยังมีค่าไม่ต่ำพอซึ่งทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งในช่วง Secondary drying ได้ต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

[1] www.labcono.com ,“ Principles of Vacuum Freeze Drying ”

[2] www.unesco.org , “ Vacuum Freeze Drying ”

[3] Christopher G.J. Baker , “Indrustrial Drying of Food” ,1997 , 1st edition , pp. 134 -155

[4] Adrain Bejan , “Convection Heat Transfer” ,1995 , 2nd edition , pp. 585-610

[5] สุชาดา ไชยสวัสดิ์ , “การศึกษาคุณภาพของน้ำมะนาวในสภาวะของการเก็บและการแปรรูป เพื่อหาแนวทางในการผลิตน้ำมะนาวในเชิงพาณิชย์”,สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[6] สุนทรี วราอุบล , “การทำแห้งน้ำมะนาวแบบเยือกแข็ง”,จุฬาลงกรณ์-มหาวิทยาลัย, 2537, หน้า 32-36

[7] วรวุฒิ ทรัพย์เจริญดีอาภา,วรพันธ์ เตชะวรวัฒน์ และอติชาติ ไชย-ศุภรากุล , “ การผลิตมะนาวผงด้วยวิธีอบแห้งแบบแช่แข็ง ” , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537, หน้า 23 -25

[8] วิลัย รังสาดทอง , “เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร” , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ , พิมพ์ครั้งที่ 2 , 2545 , หน้า 400-409

[9] ทวีศักดิ์ ด้วงทอง , “การปลูกมะนาว” , กรมส่งเสริมการเกษตร , กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

[10] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ , “การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท”,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,พิมพ์ครั้งที่7, 2540, หน้า 251-266

[11] บุญสร้าง ดิเรกสถาพร,“การทำความเย็น”, มหาวิทยาลัยขอนแก่น , 2542, หน้า 54 -109