บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อให้การทดสอบดำเนินไปอย่างถูกต้องและประสบผลสำเร็จ จำเป็นต้องทราบถึงวัตถุประสงค์ของการทดสอบ อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการทดสอบ รวมไปถึงวิธีการทดสอบ และวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้ สามารถจำแนกออกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

4.1 วัตถุประสงค์การทดสอบ

4.1.1 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่อไปนี้ที่มีต่อค่าความร้อนที่ส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน (Q_e) ค่าสัมประสิทธิเชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน (COP_{hp}) ค่าอัตราปริมาณน้ำกลั่นตัวจำเพาะที่ส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน (SMCR) ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) ค่าประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง (DE) ค่าประสิทธิผล (Eff) และค่าตัวเลขหน่วยการถ่ายเทความร้อน (NTU) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ก. อัตราส่วนอากาศที่ไม่ผ่านส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน (BAR)

ข. ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ

4.1.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ของการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบในระบบอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน

4.2 อุปกรณ์การทดสอบ

อุปกรณ์ของระบบอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบและวิจัย มีดังนี้

4.2.1 เครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนโดยใช้พัดลมหมุนเวียนอากาศ (Blower) ของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในปัจจุบันคือแบบ Axial Flow ที่ขับด้วยมอเตอร์ 1 HP, 1430 rpm มีปริมาณลมหมุนเวียน(จากการวัดจริง) 9.3 $m^3/min\text{-}m^3$ข้าวเปลือก ปั๊มความร้อนออกแบบโดยมีองค์ประกอบของเครื่องทำความเย็นสำหรับห้องเย็นที่มี ส่วนทำระเหย (Evaporator) ขนาด 4000 Btu/h ชุดส่วนควบแน่น (Condensing Unit) ซึ่งมีเครื่องอัดไอ (Compressor) 1.5 HP. และ Thermostatic Exp. Valve รุ่น FF-1

4.2.2 เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ ใช้คอยล์เป็นแบบท่อกลมและครีบชนิดคลื่นต่อเนื่อง (Circular tube-continuous wavy fin) ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะเป็นแบบ 42 ลูป โดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่นเชื่อมท่อต่อถึงกัน แต่ละส่วนมีขนาดพื้นที่ผิวหน้า 400 มม. × 360 มม. ประกอบด้วยท่อทองแดงชนิดผิวในเรียบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 10.0 มม. และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 9.3 มม. และครีบ

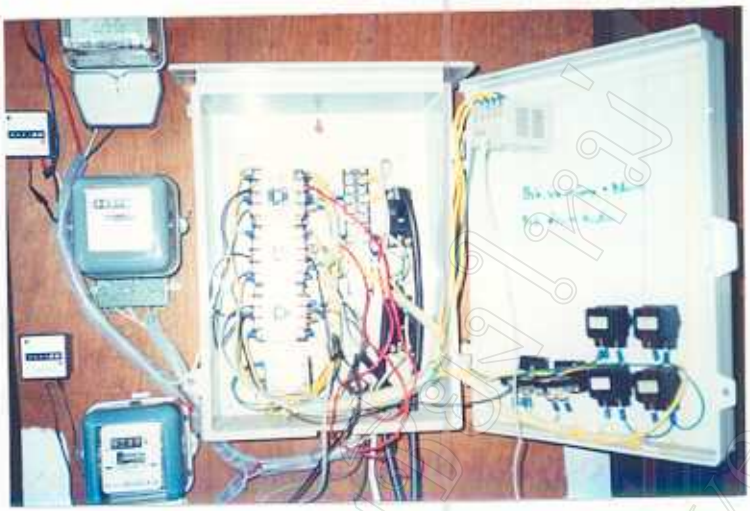
อลูมิเนียมมีจำนวนครีบ 12 ครีบต่อนิ้วและหนา 0.15 มม. การติดตั้งเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบจะวางขนานเข้าที่หน้าและหลังส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน ซึ่งเอียงทำมุมประมาณ 20° ทำให้ส่วนระเหยอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น ดังแสดงในรูป 3.5

4.2.3 เครื่องทำความร้อนแบบขดลวดความต้านทานไฟฟ้า ที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 6000 วัตต์ สามารถตัดและต่อการทำงานได้โดยใช้สวิตช์ควบคุมอุณหภูมิที่อยู่ในตู้ควบคุม เครื่องทำความร้อนนี้ติดตั้งภายในท่อลมที่ตำแหน่งก่อนจะเข้าตู้อบแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยจะทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งในกรณีที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ได้จากปั๊มความร้อนไม่ถึงอุณหภูมิอบแห้งที่ต้องการ

4.2.4 สวิตช์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) ยี่ห้อ omRon รุ่น E5CS-R1KJX ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งให้ได้ตามที่กำหนดไว้ สามารถปรับค่าอุณหภูมิได้ในช่วง 15 ถึง 60 °C มีความแม่นยำ ±1 °C ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนควบคุมซึ่งจะมีหน้าจอแสดงตัวเลขอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศอบแห้งในขณะนั้น หรือที่กำหนดไว้ และมีสวิตช์ควบคุมต่าง ๆ ซึ่งส่วนนี้จะติดตั้งบนตู้ควบคุม และส่วนหัววัดอุณหภูมิ ซึ่งส่วนนี้จะเป็นสายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Thermocouple type K) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในท่อลมที่ตำแหน่งก่อนจะเข้าตู้อบแห้ง

4.2.5 ตู้ควบคุม แสดงดังรูป 4.1 และ 4.2 มีหน้าที่ควบคุมและแสดงสถานะการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ คือ พัดลมหมุนเวียนอากาศ เครื่องทำความร้อน และปั๊มความร้อน และติดตั้งมิเตอร์ kWh ทำหน้าที่แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในปั๊มความร้อน และเครื่องทำความร้อน ของระบบเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน

รูป 4.1 แสดงตู้ควบคุม และ มิเตอร์ kWh



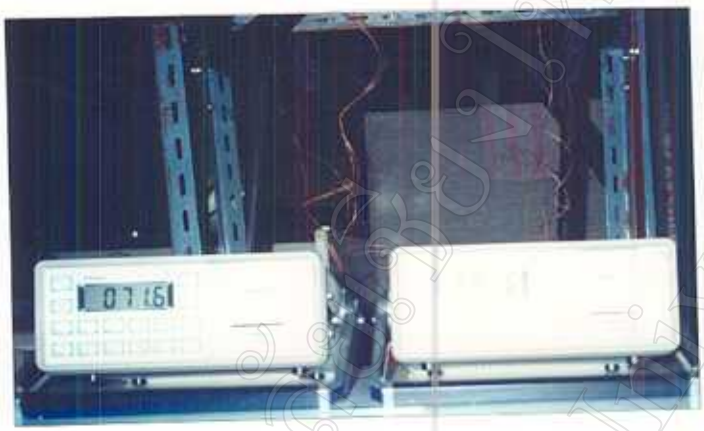
รูป 4.2 แสดงส่วนภายในตู้ควบคุม

4.2.6 เครื่องวัดและบันทึกข้อมูล 6 ช่องสัญญาณ แสดงในรูป 4.3 ยี่ห้อ TESTO รุ่น 454 มีความสามารถในการวัดข้อมูลหลายชนิดขึ้นกับหัววัดที่เลือกใช้ คือ อุณหภูมิ (-120 ถึง 1370 °C) ความชื้นสัมพัทธ์ (0 ถึง 100%RH) ความเร็วลม (0 ถึง 60 m/s) ความดันแตกต่าง (-100 ถึง 100 hPa) ความดันสัมบูรณ์ (0 ถึง 2000 hPa) เป็นต้น แต่สำหรับในการวิจัยครั้งนี้มีหัววัดที่ใช้ คือ

หัววัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ สามารถวัดได้ทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในหัววัดเดียวกัน มีช่วงความสามารถในการวัด –20 ถึง 70 °C และ 0 ถึง 100%RH ตามลำดับ มีความแม่นยำ ±0.4 °C และ ±2%RH ตามลำดับ

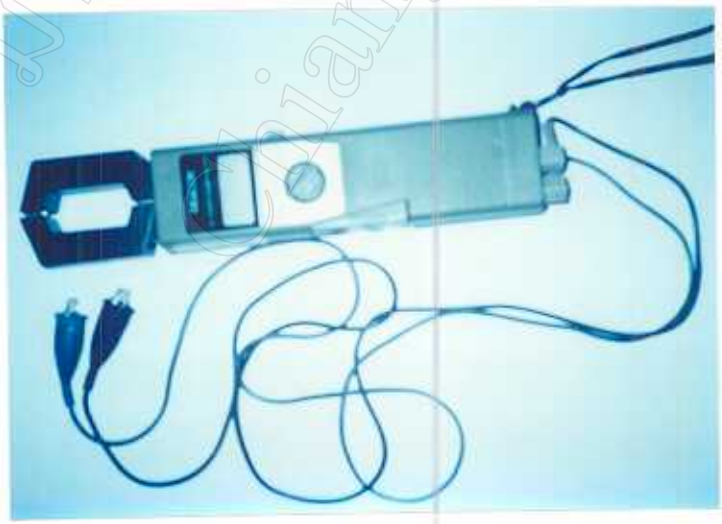
รูป 4.3 แสดงเครื่องวัดและบันทึกข้อมูล 6 ช่องสัญญาณ พร้อมหัววัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

4.2.7 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) 10 ช่องสัญญาณ แสดงในรูป 4.4 ยี่ห้อ COMARK รุ่น C8510 สำหรับใช้วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิกระเปาะเปียก สามารถแสดงผลได้ทั้งทางหน้าจอและการพิมพ์ ใช้ร่วมกับสายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Thermocouple type K) ที่มีช่วงความสามารถในการวัด –100 ถึง 1300 °C มีความแม่นยำ ±0.2%



รูป 4.4 แสดงเครื่องพิมพ์อุณหภูมิ 10 ช่องสัญญาณ

4.2.8 แคล้มป์มิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ยี่ห้อ DIGICON รุ่น MG-51 สำหรับวัดกำลังไฟฟ้ามีช่วงความสามารถในการวัด 20 ถึง 200 kW แรงดันไฟฟ้ามีช่วงความสามารถในการวัด 200 ถึง 600 Vrms และกระแสไฟฟ้ามีช่วงความสามารถในการวัด 20 ถึง 200 Arms โดยมีความแม่นยำ ±1% แสดงดังรูป 4.5



รูป 4.5 แสดงแคล้มป์มิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

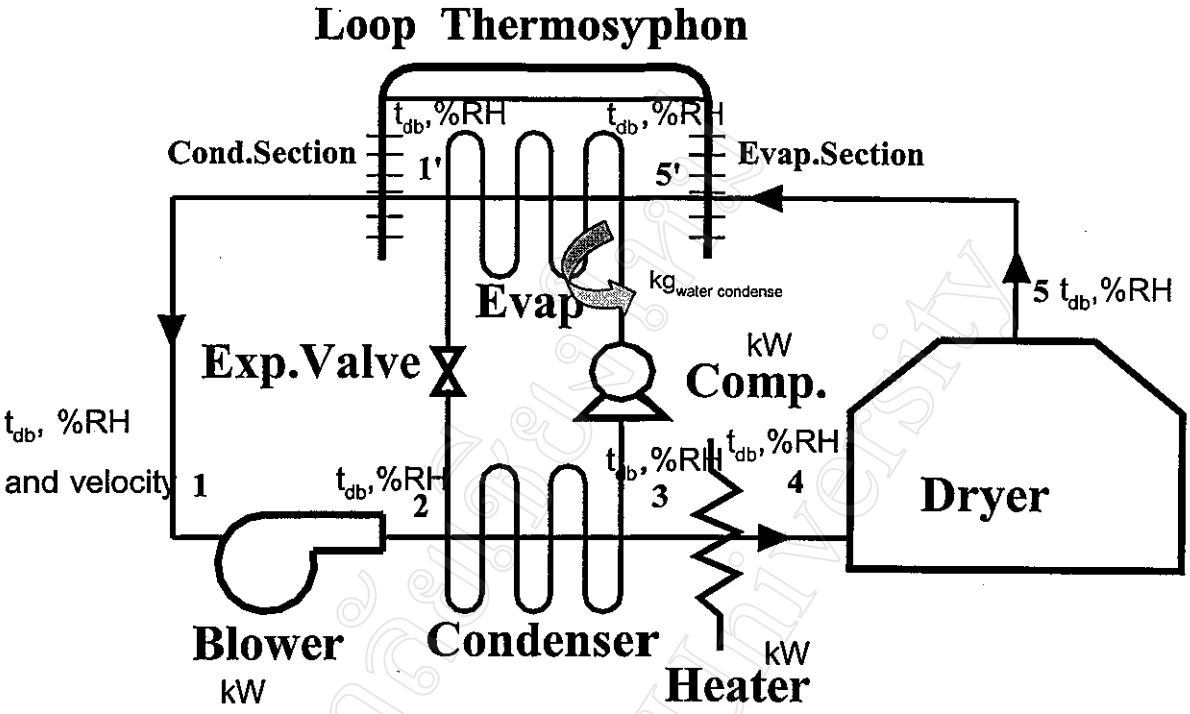
4.2.9 เครื่องวัดชั่วโมง (Hour meter) ยี่ห้อ NAIS รุ่น TH2385 ติดตั้งอยู่บนตู้ควบคุมใช้สำหรับวัดชั่วโมงการทำงาน (Operating hour) ของ พัดลมหมุนเวียนอากาศ เครื่องทำความร้อน และคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อน สามารถแสดงผลในการวัดชั่วโมงสูงสุดถึง 9999 ชั่วโมง

4.2.10 เครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดความร้อน (Hot Wire) ยี่ห้อ TSI รุ่น 8384-M-GB. มีช่วงการวัด 0 ถึง 50 m / s หรือ 0 ถึง 9999 ft /min สามารถวัดได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 200 °F หรือ -17.8 ถึง 93.3 °C และมีความแม่นยำ ±3% ของค่าที่อ่านได้ หรือ ±3 ft /min, ±0.015 m / s แสดงดังรูป 4.6

ซึ่งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่กล่าวมา จะใช้วัดข้อมูลตามจุดต่าง ๆ ดังแสดงในแผนผังการวัดของระบบทั้งหมด ดังรูป 4.7

รูป 4.6 แสดงเครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดความร้อน

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University



รูป 4.7 แสดงแผนผังการวัดของระบบทั้งหมด

4.3 วิธีดำเนินการวิจัย

มีขั้นตอนการศึกษาวิจัยดังนี้

4.3.1 ศึกษาหาสภาวะ และเงื่อนไขของระบบเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน เช่น อุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วของอากาศ ปริมาณการไหลเวียนของอากาศภายในระบบเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน

4.3.2 ออกแบบระบบเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน

4.3.3 ศึกษาและคำนวณหาวัสดุที่ใช้เป็นภาชนะบรรจุ ลักษณะรูปร่างและขนาดของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ ชนิดและปริมาณการเติมของสารทำงาน ลักษณะการจัดวางและจำนวนลูปของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบที่ใช้ รวมถึงช่วงอุณหภูมิทำงาน ค่าความต้านทานทางความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในทางทฤษฎี

4.3.4 เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยการคำนวณหาคุณลักษณะทางความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับช่วยในการคำนวณหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศในทางไซโคเมตริก

4.3.5 ทำการสร้างระบบเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน อุปกรณ์ควบคุมหรือตู้ควบคุม เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ และติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดทั้งหมด

4.3.6 ก่อนทำการทดสอบและเก็บข้อมูลจริง ได้มีการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน โดยมีการจำลองภาระงานด้วยการเพิ่มน้ำในถังอบ (ชุบกระสอบป่าน) ปริมาณ 6,000 cm^3 และทำการอบที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะการปล่อยอากาศทิ้ง (Bypass)

คือ ระบบปิด ระบบเปิดอากาศทิ้ง 25% และระบบเปิดอากาศทิ้ง 50% และทำการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือก 500 kg. โดยการปรับความชื้น ในระบบปิด ทำการทดสอบอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 3 ค่าคือ 50 °C, 55 °C และ 60 °C ตามลำดับ จะได้ผลคือ พบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สามารถใช้งานได้ดีสำหรับเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนนี้ คือที่ 55 °C และความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ต่ำ

4.3.7 ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลก่อนติดตั้งเทอร์โมไซฟอน และหลังติดตั้งเทอร์โมไซฟอนแบบ 42 ลูป โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.3.7.1 ปรับความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกให้ได้ประมาณ 11%-14% wb. โดยการเพิ่มน้ำในจำนวนที่คำนวณได้แล้วทิ้งไว้ 1 คืนเพื่อให้ข้าวเปลือกดูดซับน้ำเข้าไป หลังจากทิ้งไว้ 1 คืนแล้วก่อนเดินเครื่องจะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก 10 ตัวอย่างจากข้าวเปลือกทั้งหมดในถังอบ เพื่อนำไปหาความชื้นมาตรฐานเปียกโดยการอบที่ 100 °C ในตู้อบ (Hot Air Oven) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ดังแสดงตัวอย่างความชื้นมาตรฐานเปียกในภาคผนวก ก.4

4.3.7.2 ปรับอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สวิตซ์ควบคุมอุณหภูมิในตู้ควบคุม ไว้ที่ 55 °C

4.3.7.3 เดินเครื่องระบบเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน คือ พัดลมหมุนเวียนอากาศ เครื่องทำความร้อน และคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อน

4.3.7.4 เริ่มทำการทดสอบโดยในการทดสอบแต่ละครั้งใช้เวลา 7 ชม. โดยมีรายละเอียดของการวัดในแต่ละจุด (แสดงประกอบในรูป 4.7) ดังนี้

4.3.7.4.1 จดบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าเริ่มต้น (ค่าก่อนเดินเครื่อง) ที่ kWh มิเตอร์ หลังจากเดินเครื่องไปแล้วจะจดบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าในทุก ๆ 30 นาทีไปจนสิ้นสุดการทดสอบในแต่ละครั้ง เพื่อหาการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ ของแต่ละอุปกรณ์

4.3.7.4.2 วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ที่แต่ละจุดในระบบทุก 30 นาทีในช่วงเริ่มต้นและช่วงท้ายของการทดสอบ ส่วนในช่วงกลางของการทดสอบจะวัดทุก 1 ชั่วโมง

4.3.7.4.3 วัดปริมาณน้ำกลั่นตัวจากส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนทุก ๆ 30 นาทีไปจนสิ้นสุดการทดสอบในแต่ละครั้ง เพื่อหาค่า SMCR เฉลี่ยที่เวลาใด ๆ

4.3.7.4.4 วัดค่าความเร็วลมของอากาศหมุนเวียนในระบบ ที่ท่อลมตำแหน่งก่อนเข้าส่วนควบแน่นของปั๊มความร้อนในกรณีที่เป็นการทดสอบไม่มีการ Bypass อากาศไม่ผ่านส่วนทำระเหยและที่ท่อลมตำแหน่งก่อนเข้าส่วนควบแน่นและตำแหน่ง Bypass อากาศไม่ผ่านส่วนทำระเหยในกรณีที่เป็นการทดสอบที่มีการ Bypass อากาศ โดยการทดสอบในแต่ละครั้งจะวัดประมาณ 3 ครั้งในช่วงกลาง ๆ ของการทดสอบเพื่อหาอัตราการเชิงมวลเฉลี่ยของอากาศอบแห้งในระบบของการทดสอบแต่ละครั้ง

4.3.7.4.5 สังเกตสภาวะการทำงาน (ปิด/เปิด) ของปั๊มความร้อน และเครื่องทำความร้อนตลอดช่วงเวลาการทดลอง

4.3.7.4.6 หลังจากเดินเครื่องอบแห้ง 7 ชั่วโมงแล้วก็จะสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกอีก 10 ตัวอย่างเพื่อนำไปหาความชื้นมาตรฐานเปียกของข้าวเปลือกหลังอบ โดยใช้วิธีเดียวกับการหาความชื้นเริ่มต้นคืออบใน Hot Air Oven ที่ 100 °C 72 ชั่วโมงเหมือนกัน

โดยจะทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไข 2 อย่าง คือ ก่อนติดตั้งเทอร์โมไซฟอน และหลังติดตั้งเทอร์โมไซฟอนแบบ 42 ลูป ในแต่ละเงื่อนไขจะมีการแปรค่าอัตราส่วนอากาศไม่ผ่านส่วนทำระเหย (BAR) 3 ค่า และทำซ้ำ 3 ซ้ำ ในแต่ละเงื่อนไข

4.3.8 คำนวณและวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะต่าง ๆ ของระบบคือ ปริมาณความร้อนจากส่วนควบแน่น (Q_c) ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ (COP) ค่าอัตราการกลั่นตัวของน้ำที่ส่วนทำระเหยจำเพาะ (SMCR) ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) และค่าประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง (DE)

4.3.9 คำนวณและวิเคราะห์หาคุณลักษณะทางความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ คืออัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในทางทฤษฎี อัตราการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จริง ค่าประสิทธิผลของเทอร์โมไซฟอนแบบ 42 ลูป และค่าตัวเลขหน่วยการถ่ายเทความร้อน

4.3.10 คำนวณ และวิเคราะห์การประหยัดพลังงาน จากการใช้เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบในระบบเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน และทำการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

4.3.11 ทำการวิเคราะห์ สรุปผลการทดสอบ และเขียนวิทยานิพนธ์

4.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

ขั้นตอนในการคำนวณ และวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบในการวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

4.4.1 คำนวณหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศในทางไซโคเมตริก จากอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่วัดได้ในแต่ละจุด

4.4.2 คำนวณหา $\Delta T_{precool}$ และ ΔT_{reheat} ของอากาศจากการใช้เทอร์โมไซฟอน

4.4.3 คำนวณหาความเร็ว อัตราการไหลเชิงปริมาตร ความหนาแน่น และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศหมุนเวียนในระบบ

4.4.4 คำนวณหาเอนทาลปีจำเพาะของอากาศที่จุดเข้าและออกของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นของปั๊มความร้อน ที่จุดเข้าและออกตู้อบแห้ง และที่จุดเข้าและออกเทอร์โมไซฟอน

4.4.5 คำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มความร้อน เครื่องทำความร้อน ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมของระบบ และจำนวนชั่วโมงการทำงานของเครื่องทำความร้อนด้วย

4.4.6 คำนวณหาปริมาณความร้อนจากส่วนควบแน่นของปั๊มความร้อน

4.4.7 คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริงที่คอยล์ส่วนระเหย และที่คอยล์ส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ และค่าความต้านทานความร้อน (Z)

4.4.8 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ(COP) ของปั๊มความร้อน

4.4.9 คำนวณหาค่าอัตราการกลั่นตัวของน้ำที่ส่วนทำระเหยจำเพาะ

4.4.10 คำนวณหาค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ

4.4.11 คำนวณหาค่าประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง

4.4.12 คำนวณหาค่าประสิทธิผลของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ และค่าตัวเลขหน่วยการถ่ายเทความร้อน

4.4.13 ทำการวิเคราะห์แบบเปรียบเทียบผลการคำนวณจากข้อ 4.4.5 ในเชิงการประหยัดพลังงานภายใต้เงื่อนไขการทดสอบ 6 อย่างคือ ก่อนติดตั้งเทอร์โมไซฟอนใน 3% Bypass และหลังติดตั้งเทอร์โมไซฟอนใน 3% Bypass

4.4.14 ทำการวิเคราะห์แบบเปรียบเทียบผลการคำนวณจาก ข้อ 4.4.6 และ 4.4.8 ÷ 4.4.11 ในเชิงค่าสมรรถนะต่าง ๆ ของระบบเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน

4.4.15 ทำการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ จากผลการวิเคราะห์ในข้อ 4.4.13

4.4.16 ทำการวิเคราะห์ผลการคำนวณจากข้อ 4.3.7 และ 4.3.12 ในเชิงคุณลักษณะทางความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบ 42 ลูป

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University