

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลอง เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบ สมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการอบแห้ง ของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนมี วิธีการควบคุมอุณหภูมิลมร้อน โดยวิธีระบายความร้อนส่วนเกินด้วยการทำบายพาสสารทำความเย็นไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก (Bypass working fluid heat pump dryer, BWF-HPD) กับ วิธีปรับความเร็วรอบมอเตอร์ขับเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน เพื่อแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำความเย็นให้เหมาะสมกับภาระทางความร้อน (Variable speed drive heat pump dryer, VSD-HPD) โดยแบ่งผลการวิเคราะห์เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. การเปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง อบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน โดยใช้กล้วยน้ำว้าแผ่นเป็นวัสดุทดสอบ
2. การเปรียบเทียบสมรรถนะของ เครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิลมร้อนแบบ BWF-HPD กับ VSD-HPD
3. ผลกระทบของสัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย ที่มีต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน

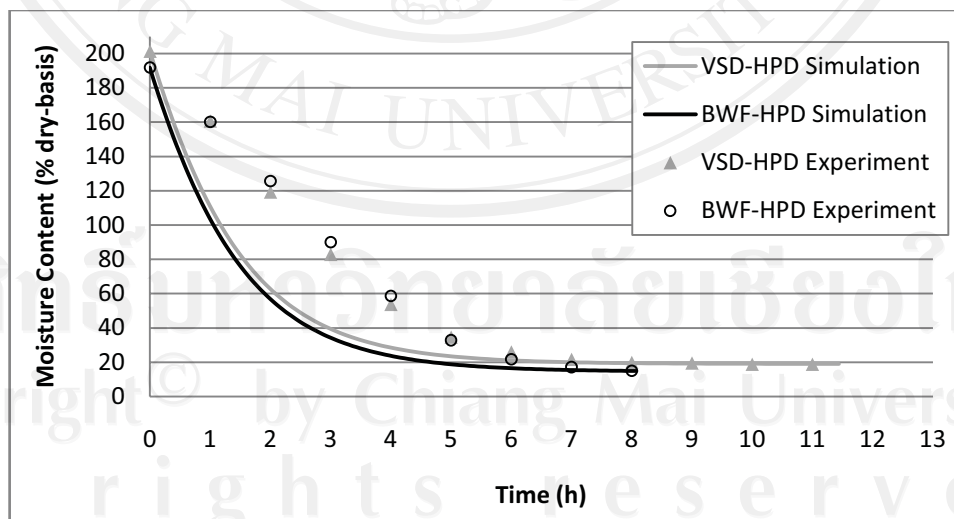
4.1 การเปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง อบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน โดยใช้กล้วยน้ำว้าแผ่นเป็นวัสดุทดสอบ

ในการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการ ทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าแผ่นจริง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมอุณหภูมิ 2 แบบ คือ วิธีที่ใช้การระบายความร้อนส่วนเกินในห้องอบแห้ง ด้วยการบายพาสสารทำความเย็น (Bypass Fluid Heat Pump Dryer, BWF-HPD) ไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก และวิธีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ในการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ขับเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน (Vary Speed Drive Heat Pump dryer, VSD-HPD) เพื่อแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำความเย็นให้เหมาะสมกับภาระทางความร้อน โดยการอบแห้งครั้งนี้ได้กำหนดให้มีพารามิเตอร์คงที่ได้แก่ อุณหภูมิในการอบแห้ง 60 °C, ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s, สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %, มวลของกล้วยน้ำว้าแผ่นก่อนอบ 33.59 kg ส่วนความชื้นสุดท้ายนั้นกำหนดไว้ที่ 16 % dry-basis แต่การทดลองซึ่งเก็บผลการทดลองทุกๆ 1 ชั่วโมง ทำให้

เกิดความคลาดเคลื่อนของความชื้นสุดท้ายภายในช่วงเวลานั้น ดังนั้นจึงอ้างอิง ความชื้นสุดท้ายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามความชื้นสุดท้าย ของผลการทดลอง โดยความชื้นสุดท้ายของวิธีการควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD และ BWF-HPD คือ 18.87 และ 15 % dry-basis ตามลำดับ

การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง แสดงข้อมูลไว้ในภาคผนวก ข-1 ถึงภาคผนวก ข-4 ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบดังนี้

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้น (Moisture content) จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า ปริมาณความชื้นจากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีค่าลดลงค่อนข้างเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปค่าความชื้นของกล้วยน้ำว้าแผ่นจะเริ่มลดลงช้าเรื่อยๆจนเกือบคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการลดลงของค่าความชื้นของกล้วยน้ำว้าแผ่นที่ได้จากการทดลอง อย่างไรก็ตามในช่วงต้นของการอบแห้งความชื้นของกล้วยน้ำว้าแผ่น จากแบบจำลอง คณิตศาสตร์ ลดลงเร็วกว่าปริมาณความชื้นจากการทดลอง เนื่องจาก ค่าคงที่ของการอบแห้ง (k) ของ จุฑารัตน์ บุญปัญญา (2553) ที่นำมาใช้ในการทำแบบจำลองขณะทดลองใช้กล้วยในปริมาณน้อย แต่การทดลองในงานวิจัยนี้ ใช้กล้วยมากถึง 33.59 kg มาอบแห้งแต่ละครั้ง ซึ่งการอบในปริมาณมากทำให้ความชื้นที่ออกจากกล้วยยังค้างอยู่ ภายในชั้นของวัสดุ อบแห้ง ทำให้การลดความชื้นของกล้วย จากการทดลอง ช้ากว่าแบบจำลองในช่วงแรก หลังจาก การเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบจำลอง และการทดลอง ก็เริ่มใกล้เคียงกัน

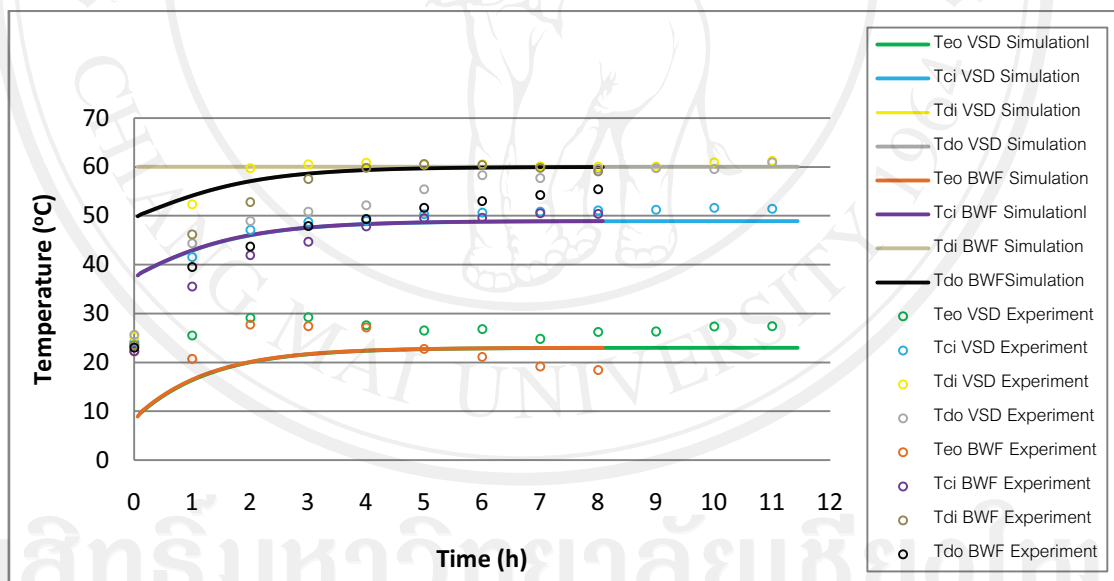


รูป 4.1 ความชื้นของกล้วยน้ำว้าแผ่นที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %

4.1.2 อุณหภูมิกระแสน้ำอากาศภายในห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

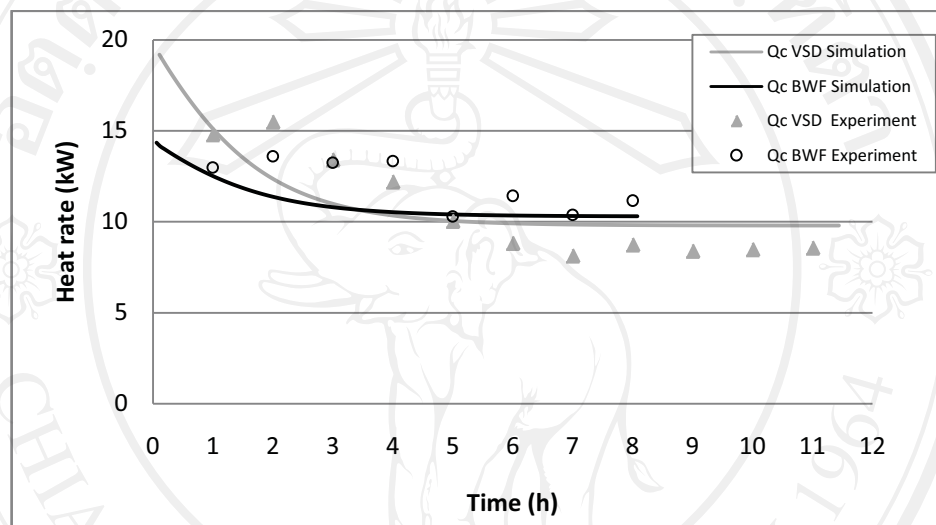
จากรูป 4.2 อุณหภูมิกระแสน้ำอากาศที่ได้จากแบบจำลอง และอุณหภูมิกระแสน้ำอากาศจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิอบแห้ง (T_{di}) ในแบบจำลองจะถูกกำหนดให้คงที่ที่ 60°C ตลอดการทดลอง ตามสมมติฐานของแบบจำลอง ส่วนอุณหภูมิอบแห้ง (T_{di}) จากการทดลองเริ่มต้นที่ 23°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิอากาศปกติ และเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่ 60°C ในช่วงเวลาที่ 2

ในส่วนของ อุณหภูมิที่ออกจากเครื่องทำระเหย (T_{eo}) อุณหภูมิที่เข้าเครื่องควบแน่น (T_{ci}) และ อุณหภูมิที่ออกจากห้องอบแห้ง (T_{do}) จากรูป 4.2 อุณหภูมิต่างๆเหล่านี้ มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ในช่วงเวลาที่ 3 เนื่องจาก ปริมาณความชื้น (Moisture content) ในช่วงแรกมีค่าสูงแล้วจึงลดต่ำลง ในรูปที่ 4.1 ปริมาณความชื้นนี้เป็นความชื้นที่ใช้ในการดึงความร้อนในอุปกรณ์ต่างๆในระบบ เมื่อปริมาณความชื้นสูง (ในช่วงแรก) จึงทำให้ อุณหภูมิต่างๆในระบบต่ำ แต่เมื่อปริมาณ ความชื้นลดลงจนคงที่ (ตั้งแต่ช่วงเวลาที่ 3 เป็นต้นไป) อุณหภูมิต่างๆในระบบจึงสูงขึ้นและคงที่จนกระทั่งเสร็จสิ้นกระบวนการอบ



รูป 4.2 อุณหภูมิกระแสน้ำอากาศของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ที่อุณหภูมิ 60°C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย 70 %

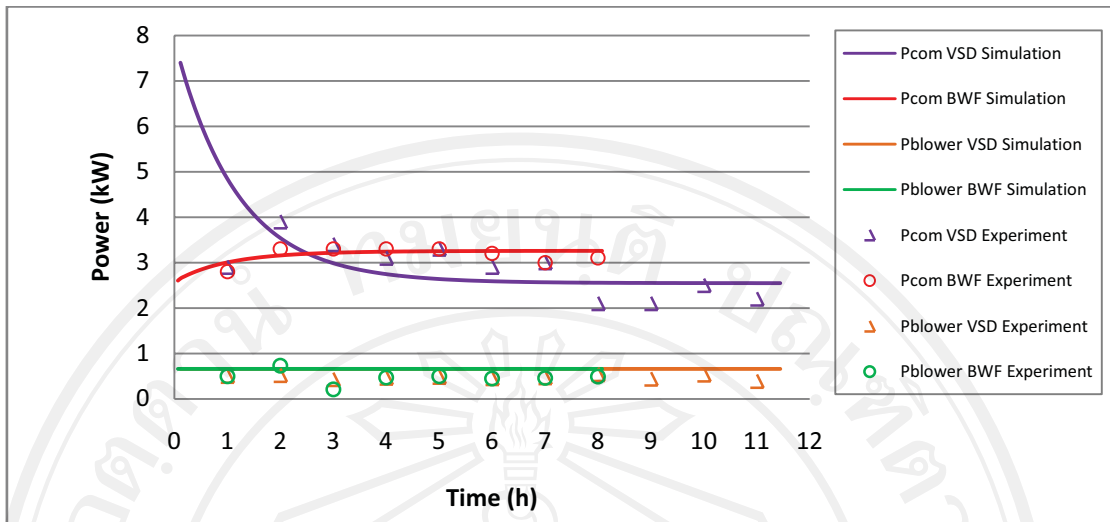
4.1.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น ในเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน แสดงดังรูปที่ 4.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น (Q_c) ทั้งในแบบจำลองคณิตศาสตร์ และผลการทดลอง แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (Q_c) ในช่วงแรกแบบจำลองมีค่า สูงกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิที่เครื่อง ควบแน่นมีค่าสูง เนื่องจากอุณหภูมิขาออกจากเครื่องควบแน่น (T_{co} หรือ T_{di}) จากรูป 4.2 ถูก กำหนดให้คงที่ที่อุณหภูมิอบแห้ง



รูป 4.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น ของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศ ไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %

4.1.4 พลังงานในเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน พลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ (P_{com}) ในแบบจำลองคณิตศาสตร์และผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน เครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD มีค่า ค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง แต่เครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD ในช่วงแรกมีค่าสูงและลดลงตาม ภาระทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง แต่การที่ VSD-HPD ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สูงกว่า การทดลองในช่วง 2 ชั่วโมงแรกนั้น เป็นผลมาจากอุณหภูมิขาเข้าห้องอบแห้ง (T_{di}) ในแบบจำลอง ถูกกำหนดให้คงที่ที่ 60 °C ตามสมมุติฐานของแบบจำลอง ซึ่งแตกต่างจากอุณหภูมิขาเข้าห้อง อบแห้ง (T_{di}) ในการทดลองซึ่งเริ่มต้นที่อุณหภูมิอากาศปกติ ดังนั้นพลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ ของ แบบจำลองจึงสูงกว่าพลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอของการทดลอง

ส่วนพลังงานที่ให้แก่พัดลม (P_{blower}) ทั้งแบบจำลองและการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกัน และ คงที่ตลอดการทดลอง



รูป 4.4 พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %

4.1.5 ความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองอบแห้ง

ในแบบจำลองการอบแห้งเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งจะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ตามสมมติฐานของแบบจำลอง ในขณะที่ความเป็นจริงในการทดลอง อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง คืออุณหภูมิปรกติ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามการทำงานของปั๊มความร้อนดังนั้นในช่วงแรกข้อมูลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองจึงไม่ตรงกัน อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งนี้ ยังส่งผลต่อพลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอของแบบจำลองของเครื่องอบแห้งที่มีวิธีควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD อีกด้วยซึ่งได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อ 4.1.4

ตาราง 4.1 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน ที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบ ใช้เงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อ้างอิงตามเงื่อนไขเริ่มต้นของการทดลอง และได้แสดงเปอร์เซ็นต์แตกต่างระหว่างแบบจำลองแบบจำลองคณิตศาสตร์ กับผลการทดลองอบแห้งเปอร์เซ็นต์แตกต่างระหว่างแบบจำลองแบบจำลองคณิตศาสตร์ กับผลการทดลองอบแห้งในทุกค่า มีค่าไม่เกิน 22 % ยกเว้นค่า อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหยเฉลี่ย (Q_e) และอัตราการดึงน้ำออกเฉลี่ย (MER) เนื่องจาก

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหยเฉลี่ย (Q_e) จากตาราง 4.1 เปอร์เซ็นต์แตกต่างของ การเปรียบเทียบของเครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD มีค่าสูงถึง 74.5 % เนื่องจาก ในการทดลอง เครื่องควบแน่นตัวนอก จะระบายความร้อนทิ้งก็ต่อเมื่อ อุณหภูมิภายในห้องอบสูงเกิน

กว่าที่ได้ตั้งไว้ แต่ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ เครื่องควบแน่นตัวนอกจะทำงานตลอดเวลา อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่อง ควบแน่นรวม (อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่อง ควบแน่นตัวนอกและตัวใน) จึงสูงอยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย (Q_e) จากแบบจำลอง สูงกว่าการทดลอง

อัตราการดึงน้ำออกเฉลี่ย (MER) ในแบบจำลองคณิตศาสตร์สูงกว่าการทดลองเนื่องจากการทดลองนั้นมีความชื้นบางส่วนหายไประหว่างกระบวนการ เช่น จากการรั่วซึมของอากาศขึ้น เป็นต้น โดยแสดงตัวอย่างการคำนวณความชื้นที่หายไปนี้ในภาคผนวก ค

ตาราง 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ความเร็วรอบเริ่มต้นเครื่องอัดไอ 2000 rpm และสัดส่วนอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย 70%

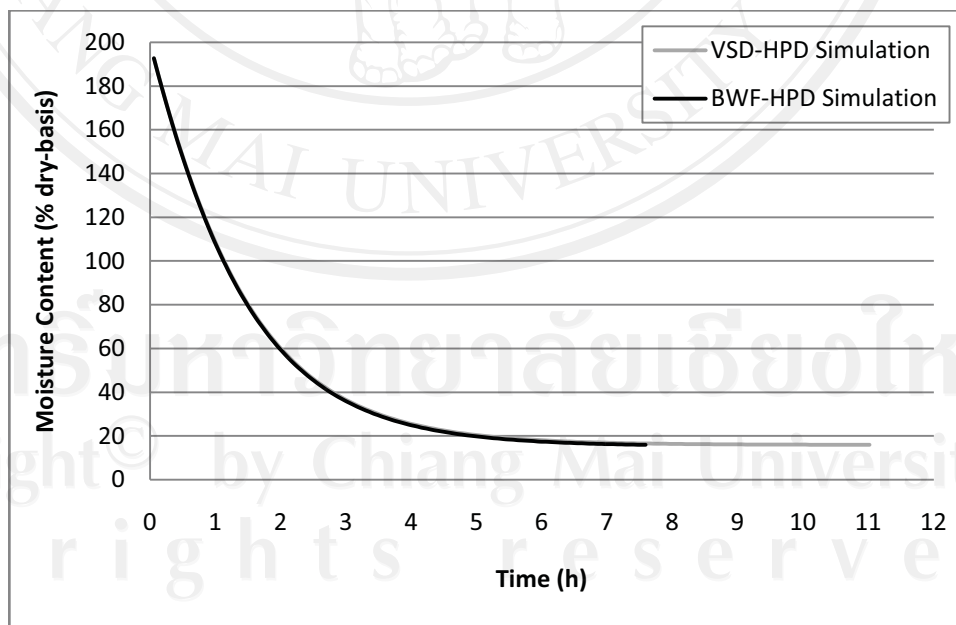
รายการ	VSD-HPD			BWF-HPD		
	Experiment	Simulation	% Difference	Experiment	Simulation	% Difference
ความชื้นเริ่มต้น (% dry-basis)	201	201	0	192	192	0
ความชื้นสุดท้าย (% dry-basis)	18.9	18.9	0	15.0	15.0	0
น้ำหนักเริ่มต้น (kg)	33.59	33.59	0	33.59	33.59	0
น้ำหนักหลังอบแห้ง (kg)	13.27	13.27	0	12.92	12.92	0
น้ำที่ออกจากวัสดุ (kg)	20.33	20.33	0	20.68	20.68	0
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นเฉลี่ย Q_c (kW)	10.7	11.0	3.5	12.1	11.0	8.5
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหยเฉลี่ย Q_e (kW)	8.6	9.1	5.9	8.1	14.2	74.5
กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ย $Power_{comp}$ (kW)	2.9	3.1	7.9	3.2	3.2	0.4
ความสิ้นเปลืองพลังงาน (kW-h)	36.6	42.8	16.9	29.1	30.9	6
เวลาอบแห้ง (h)	11.0	11.4	3.6	8.0	8.1	1.3
อัตราการอบแห้งเฉลี่ย DR (kg_{water}/h)	1.85	1.78	3.9	2.54	2.52	0.9
อัตราการดึงน้ำออกเฉลี่ย MER ($kg_{water\ cond}/h$)	1.08	1.78	64.7	1.25	2.52	101.8
อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย SMER ($kg_{water\ evap.}/kW-h$)	0.496	0.405	18.3	0.696	0.847	21.7
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเฉลี่ย COP	3.7	3.7	1.9	3.8	3.5	8.5
สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเฉลี่ย COP_{HPD}	3.2	3.0	6.6	3.3	2.9	12.9

หมายเหตุ % Difference = $100 \times \left(\frac{\text{Simulation}}{\text{Experiment}} - 1 \right)$

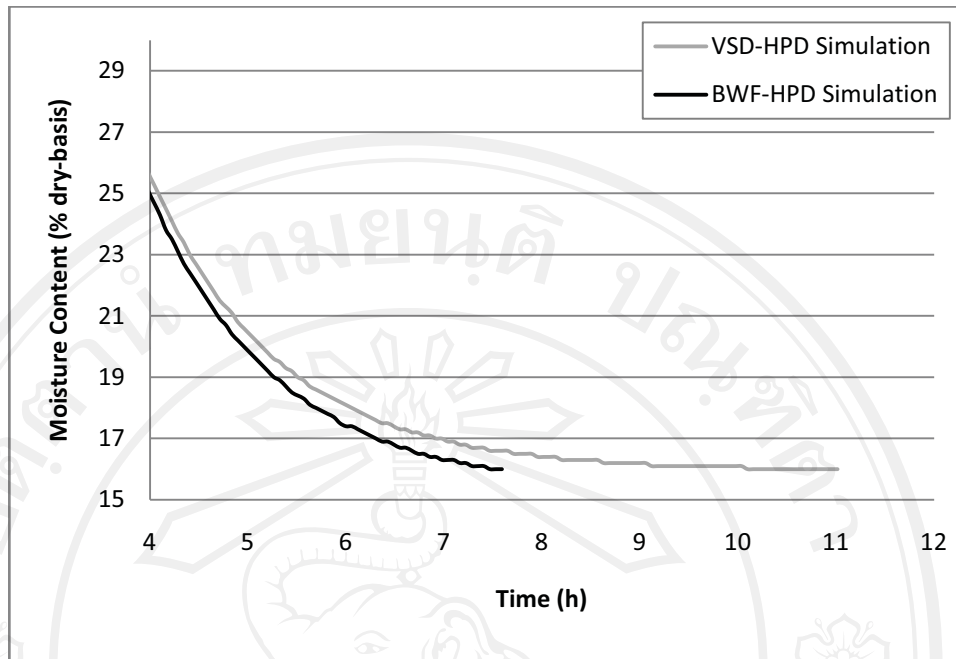
4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของ เครื่องอบแห้งแบบใช้ป้มความร้อนที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิ ลมร้อนแบบ BWF-HPD กับ VSD-HPD โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทดสอบเครื่องอบแห้งแบบใช้ป้มความร้อนที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิลมร้อนแบบ BWF-HPD กับ เครื่องอบแห้งแบบใช้ป้มความร้อนที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิลมร้อนแบบ VSD-HPD โดยใช้กล้วยน้ำว้าแผ่นเป็นวัสดุทดสอบจำนวน 33.59 kg โดยมีความชื้นเริ่มต้น 200 % dry-basis ความชื้นสุดท้าย 16 % dry-basis และสัดส่วนอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย 70% ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s อุณหภูมิลมร้อนเข้าอบแห้ง 60°C จากการทดลองได้ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.2.1 ความชื้นของกล้วยน้ำว้าในระหว่างการอบแห้ง จากรูป 4.5 ปริมาณความชื้น มีค่าลดลงค่อนข้างเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปค่าความชื้นของกล้วยน้ำว้าแผ่นจะเริ่มลดลงช้าเรื่อยๆจนเกือบคงที่ เครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD ใช้เวลาในการลดความชื้นจนกระทั่งความชื้นสุดท้าย 16 % dry-basis น้อยกว่า เครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD ซึ่งหากขยายสเกล ดังรูป 4.6 จะเห็นได้ชัดว่า เครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD สามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าเครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD ระยะเวลาในการลดความชื้นกล้วยน้ำว้าแผ่นที่แตกต่างกันระหว่างเครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD และ เครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD คือ 3.4 ชั่วโมง

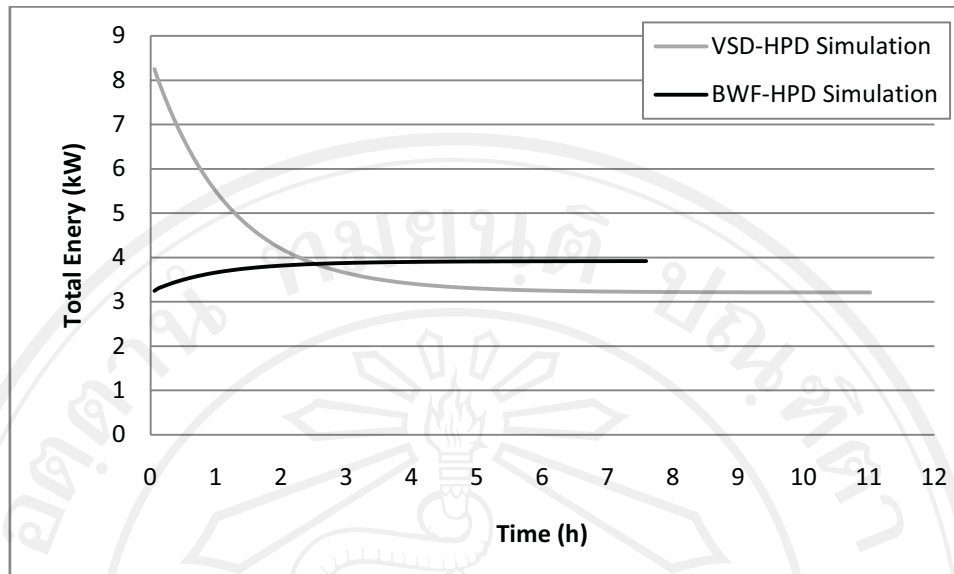


รูป 4.5 ความชื้นของกล้วยน้ำว้าแผ่นที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย 70 %



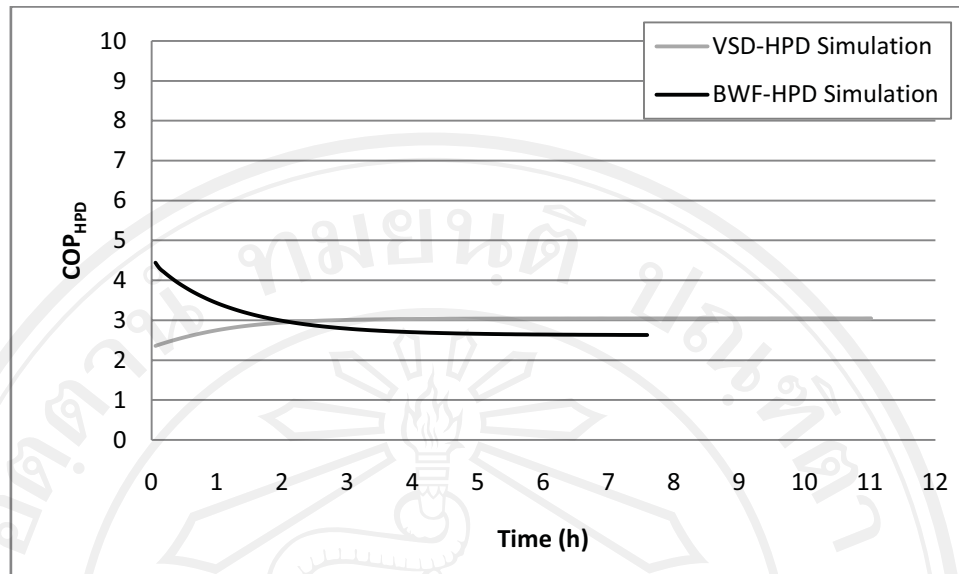
รูป 4.6 ความชื้นของกล้วยน้ำว้าแผ่น ขยายสเกล ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60°C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย 70 %

4.2.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของเครื่องอบแห้ง ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน หากย้อนไปดูตามรูป 4.4 พลังงานจะถูกนำไปใช้ในสองส่วนได้แก่ พัดลมที่ใช้ในการหมุนเวียนอากาศภายในห้องอบแห้ง และมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเครื่องอัดไอเพื่อหมุนเวียนสารทำงาน โดยพลังงานส่วนใหญ่ถูกใช้ไปกับมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเครื่องอัดไอ ส่วนพลังงานที่จ่ายให้กับพัดลมนั้นมีค่าคงที่ ดังนั้นความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของเครื่องอบแห้ง ซึ่งเป็นผลรวมของพลังงานทั้งสองนี้ พลังงานที่ใช้ในการขับมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเครื่องอัดไอก็จะมี อิทธิพลสูงที่สุดกับความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของเครื่องอบแห้ง จากรูปที่ 4.7 พบว่า เครื่องอบแห้ง BWF-HPD ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีการปรับลดความเร็วรอบของเครื่องอัดไอมิ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าแทบจะคงที่ในทุกๆ ชั่วโมง ในขณะที่ เครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า มีค่าสูงในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งตามความเร็วรอบเริ่มต้นที่เครื่องอัดไอทำงาน หลังจากนั้นจึงปรับลดการใช้พลังงานลงตามภาระทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าหลังจากชั่วโมงที่ 3 เป็นต้นไป เครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD มีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าเครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD



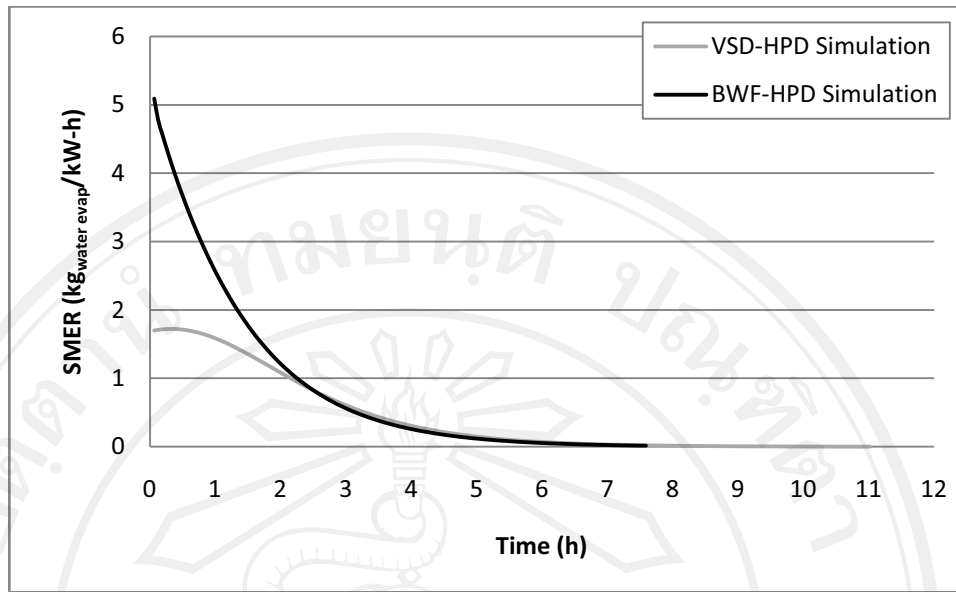
รูปที่ 4.7 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย 70 %

4.2.3 สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน (COP_{HPD}) โดยมากการวัดสมรรถนะของปั๊มความร้อนนั้นวัดจาก อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น (Q_c) ต่อพลังงานที่ใช้ ซึ่งก็คือพลังงานที่ขับเครื่องอัดไอ หรือค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (COP) แต่ในเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน พลังงานที่ใช้ไม่ได้มีเฉพาะพลังงานที่ขับเครื่องอัดไอ แต่ยังมีพลังงานที่จ่ายให้กับพัดลมที่ใช้หมุนเวียนอากาศภายในระบบอบแห้ง ดังนั้นการวัด สมรรถนะ ของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนจึงเป็น อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น (Q_c) ต่อพลังงานที่ขับเครื่องอัดไอ และพลังงานที่จ่ายให้กับพัดลมซึ่งก็คือค่า สมรรถนะ เครื่องอบแห้ง ปั๊มความร้อน (COP_{HPD}) ปั๊มความร้อน รูปที่ 4.8 สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน (COP_{HPD}) ปั๊มความร้อนแบบ BWF-HPD และ VSD-HPD โดย อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น (Q_c) ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน แบบ BWF-HPD มีการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปกับการระบายความร้อนทิ้งที่ควบแน่นตัวนอก (External condenser) ทำให้ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 3 ที่ระบบเริ่มมีเสถียรภาพแล้ว แต่เครื่องอบแห้ง แบบ BWF-HPD มีการใช้พลังงานสูงกว่า เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน แบบ VSD-HPD จึงทำให้ เครื่องอบแห้ง ปั๊มความร้อน แบบ VSD-HPD มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่สูงกว่า



รูปที่ 4.8 สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย 70 %

4.2.4 อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER) จากรูปที่ 4.9 อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER) ของทั้งเครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD และ เครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD มีค่าสูงในช่วงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากในช่วงนี้บริเวณผิวของกล้วยจะมีปริมาณความชื้นอยู่มากทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลระหว่างอากาศและกล้วยได้ดี และเมื่อระยะเวลาการอบแห้งผ่านไปช่วงหนึ่งพบว่าอัตราการดึงน้ำออกเริ่มลดลง เนื่องจากว่าปริมาณความชื้นที่บริเวณผิวของกล้วยมีน้อยลง ทำให้การถ่ายเทมวลความชื้นจากภายในวัสดุเป็นไปได้อย่างขึ้น เครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD มีอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ สูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD ในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD ในช่วงแรกมีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า ต่ำกว่า VSD-HPD หลังจากนั้น เครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD และ เครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD ก็มีค่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (SMER) ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.9 ค่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย ของเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %

4.2.5 สมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน แสดงดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.1 เป็นการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD และ BWF-HPD อบแห้ง กล้วยน้ำว่าเผ่น ทดสอบการทำงานในระบบปิดสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้นที่ใช้ทดสอบ 2,000 rpm ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s ผลการทดสอบแสดงรายละเอียดดังนี้

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นเฉลี่ย (Q_c) วิธีการควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD และ BWF-HPD นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหยเฉลี่ย (Q_e) วิธีการควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD และ BWF-HPD แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหยเฉลี่ย (Q_e) ที่ควบคุมอุณหภูมิแบบ BWF-HPD มีค่าสูงเป็นผลมาจากการ ควบคุมอุณหภูมิแบบ BWF-HPD นั้นเป็นการ บายพาสสารทำความเย็นไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอกเพื่อระบายความร้อน ไม่มีการปรับลด อัตราการไหลของสารทำงานดังเช่นระบบที่ควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD ดังนั้นเครื่องทำระเหยจึงมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อัตราการดึงน้ำออกเฉลี่ย (MER) ของระบบที่ควบคุมอุณหภูมิแบบ BWF-HPD มีสูงกว่า ทำให้ย่นระยะเวลาในการอบแห้งได้ถึง 3 ชั่วโมง ถึงแม้ว่า ระบบที่ ควบคุมอุณหภูมิแบบ BWF-HPD

จะใช้กำลังงานเฉลี่ยสูงกว่า ระบบที่ ควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD ก็ตาม แต่ด้วยระยะเวลาการอบแห้งที่สั้นกว่าจึงทำให้ ระบบที่ ควบคุมอุณหภูมิแบบ BWF-HPD มีความสิ้นเปลืองพลังงาน น้อยกว่า ระบบที่ควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD

ตาราง 4.2 แสดงผลการทดสอบและสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ความเร็วรอบเริ่มต้นเครื่องอัดไอ 2000 rpm และสัดส่วนอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย 70%

รายการ	Simulation	
	VSD-HPD	BWF-HPD
ความชื้นเริ่มต้น (% dry-basis)	200	200
ความชื้นสุดท้าย (% dry-basis)	16	16
น้ำหนักเริ่มต้น (kg)	33.59	33.59
น้ำหนักหลังอบแห้ง (kg)	11.14	11.14
น้ำที่ออกจากวัสดุ (kg)	22.45	22.45
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นเฉลี่ย Q_c (kW)	11.1	11.1
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหยเฉลี่ย Q_e (kW)	9.1	14.1
กำลังงานที่ให้แก่อุปกรณ์อัดไอเฉลี่ย $Power_{comp}$ (kW)	3.1	3.2
ความสิ้นเปลืองพลังงาน (kW-h)	41.4	28.9
เวลาอบแห้ง (h)	11.0	7.6
อัตราการอบแห้งเฉลี่ย DR (kg_{water}/h)	1.87	2.72
อัตราการดึงน้ำออกเฉลี่ย MER ($kg_{water\ con}/h$)	1.87	2.72
อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย $SMER$ ($kg_{water\ evap.}/kW-h$)	0.424	0.915
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเฉลี่ย COP	3.7	3.4
สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเฉลี่ย COP_{HPD}	3.0	2.9

4.3 ผลกระทบของ สัดส่วนอากาศเข้าเครื่องทำระเหย ที่มีต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน

การวิเคราะห์ผลกระทบของ สัดส่วนอากาศเข้าเครื่องทำระเหย (BP) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD และ BWF-HPD กำหนดเงื่อนไข อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s อบแห้งกล้วยน้ำว้าแผ่น จนมีความชื้นสุดท้าย 16%

dry-basis สามารถคำนวณ สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย ได้ตั้งแต่ 60-75 % dry-basis ได้ผลดังตาราง 4.3

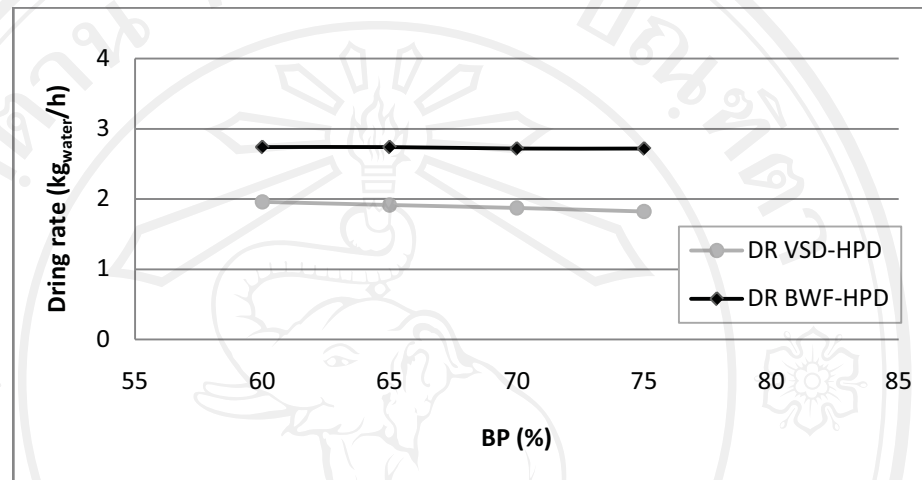
ตาราง 4.3 ข้อมูลคำนวณแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ ของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 60% 65% 70% และ 75%

รายการ	VSD-HPD				BWF-HPD			
	BP	BP	BP	BP	BP	BP	BP	BP
	60%	65%	70%	75%	60%	65%	70%	75%
ความชื้นเริ่มต้น (% dry-basis)	200	200	200	200	200	200	200	200
ความชื้นสุดท้าย (% dry-basis)	16	16	16	16	16	16	16	16
น้ำหนักเริ่มต้น (kg)	33.59	33.59	33.59	33.59	33.59	33.59	33.59	33.59
น้ำหนักหลังอบแห้ง (kg)	11.14	11.14	11.14	11.14	11.14	11.14	11.14	11.14
น้ำที่ออกจากวัสดุ (kg)	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45	22.45
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นเฉลี่ย Q_c (kW)	13.9	12.5	11.1	9.6	14.0	12.6	11.1	9.6
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหยเฉลี่ย Q_e (kW)	11.4	10.3	9.1	7.9	14.3	14.2	14.1	13.8
กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ย $Power_{comp}$ (kW)	3.8	3.5	3.1	2.8	3.2	3.2	3.2	3.1
ความสิ้นเปลืองพลังงาน (kW-h)	47.2	44.3	41.4	38.7	29.1	28.9	28.9	28.6
เวลาอบแห้ง (h)	10.5	10.8	11.0	11.3	7.5	7.5	7.5	7.5
อัตราการอบแห้งเฉลี่ย DR (kg_{water}/h)	1.96	1.91	1.87	1.82	2.74	2.74	2.72	2.72
อัตราการดึงน้ำออกเฉลี่ย MER ($kg_{water con}/h$)	1.96	1.91	1.87	1.82	2.74	2.74	2.72	2.72
อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย $SMER$ ($kg_{water evap.}/kW-h$)	0.393	0.408	0.424	0.435	0.882	0.897	0.915	0.972
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเฉลี่ย COP	3.7	3.7	3.7	3.7	4.4	3.9	3.5	3.1
สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเฉลี่ย COP_{HPD}	3.1	3.1	3.0	2.9	3.6	3.3	2.9	2.6

4.3.1 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (Drying rate, DR)

สมรรถนะการอบแห้งสามารถพิจารณาจาก อัตราการอบแห้ง (DR) อัตราการอบแห้งที่สูงส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง จากตาราง 4.3 ที่ระบบอบแห้งแบบ BWF-HPD BP 60 % อัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงที่สุดคือ $2.74 kg_{water}/h$ และที่ระบบอบแห้งแบบ VSD-HPD BP 75 % อัตราการอบแห้งต่ำสุดคือ $1.82 kg_{water}/h$ การที่ สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย (BP) เพิ่มขึ้น ทำให้ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย (Q_e) ลดลง การดึงความชื้นออกจากระบบอบแห้ง

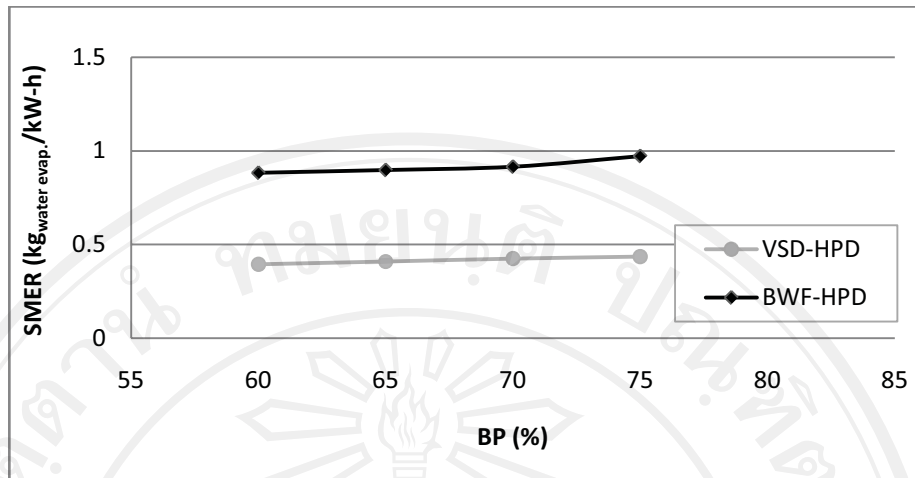
จึงต่ำลง ดังนั้น อัตราการอบแห้ง (DR) ที่ BP น้อยๆ จึงมี DR สูง และจากตาราง 4.3 จะเห็นได้ว่าการควบคุมอุณหภูมิแบบ BWF-HPD ที่ทุก BP มี อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย (Q_e) สูงกว่า การควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD ทุก BP ทำให้ อัตราการอบแห้ง (DR) ของ การควบคุมอุณหภูมิแบบ BWF-HPD สูงกว่า การควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD



รูปที่ 4.10 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s สัดส่วนอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย 60 – 75 %

4.3.2 อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย (Specific moisture extraction rate, SMER)

จากรูป 4.11 อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย (SMER) เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนอากาศเข้าเครื่องทำระเหย (BP) เนื่องจากการที่ สัดส่วนอากาศเข้าเครื่องทำระเหย (BP) ทำให้พลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอ (P_{comp}) ลดลง เนื่องจากปริมาณอากาศชื้น ที่ผ่านเข้าสู่เครื่องทำระเหยมีน้อยลงจากการถูกส่งเข้าเครื่องทำระเหย ผลทำให้ อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย (SMER) ต่ำตามสัดส่วนอากาศเข้าเครื่องทำระเหย (BP) เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง เครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD กับ VSD-HPD เครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD มีอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ เฉลี่ย (SMER) สูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD เนื่องจากเครื่องอบแห้ง แบบ BWF-HPD ในช่วงแรกมีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่า VSD-HPD หลังจากนั้น เครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD และ เครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD ก็มีค่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (SMER) ใกล้เคียงกัน ดังรูป 4.9

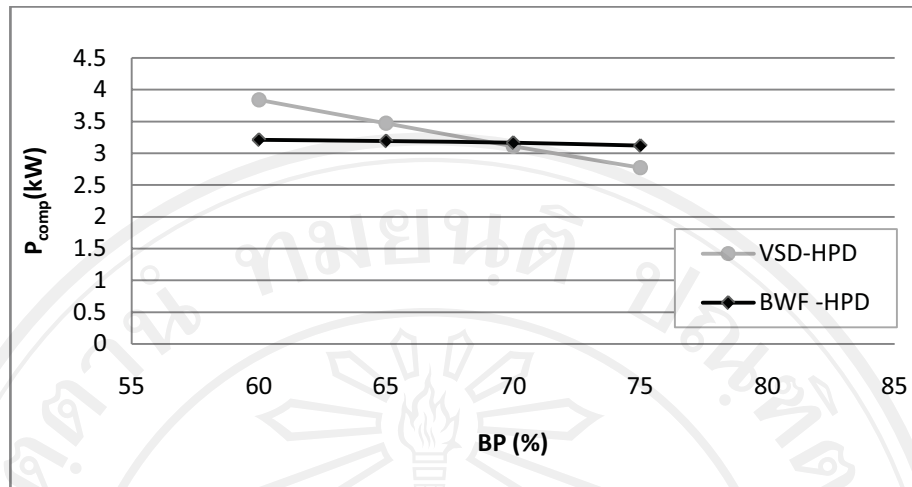


รูปที่ 4.11 อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย ของเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 60 – 75 %

4.3.3 กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ย

จากรูป 4.12 กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ย ของเครื่องอบแห้ง BWF-HPD ในทุกๆ สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย (BP) มีค่าค่อนข้างคงที่โดยในแต่ละช่วง BP คือ 60-65 %, 65- 70 % และ 70-75 % มีการเปลี่ยนแปลงของ กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ย 0.6 %, 0.8 % และ 1.4 % ตามลำดับ ส่วน กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ย ของเครื่องอบแห้ง VSD-HPD มีค่าลดลงในแต่ละช่วง BP คือ 60-65 %, 65-70 % และ 70-75 % คือ 9.6 %, 10.4 % และ 10.8 % ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของ กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอนี้เป็นผลมาจาก เครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD มีอัตราการไหลของสารทำงานคงที่โดยระบายความร้อนส่วนเกินทิ้งที่เครื่องควบแน่นตัวนอก ดังนั้น กำลังงานที่เครื่องอัดไอ จึงแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ เครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD มีอัตราการไหลของสารทำงานเปลี่ยนแปลงตามภาระทางความร้อน ในทุกๆ เวลาของการอบแห้งตามรูป 4.4 จึงทำให้ กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ยลดลง

¹ การเปลี่ยนแปลง = $100 - \left(100 \times \frac{\text{Power comp new}}{\text{Power comp old}} \right)$

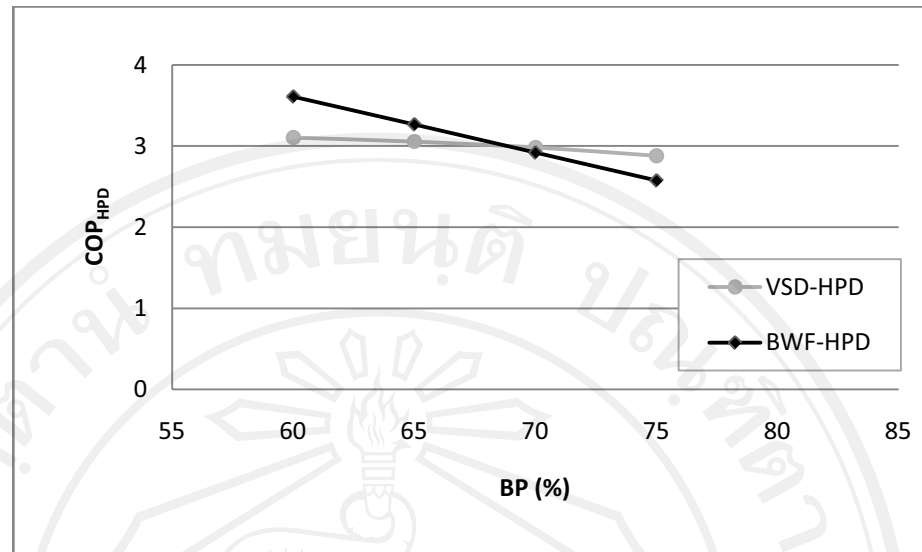


รูปที่ 4.12 กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ย ของเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 60 – 75 %

4.3.4 สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความเฉลี่ย (COP_{HPD})

จากรูป 4.13 สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความเฉลี่ย (COP_{HPD}) มีค่าน้อยลงเมื่อ สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย (BP) เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย (Q_c) ลดลงดังที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้

เครื่องอบแห้งทั้งสองแบบมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (Q_c) ใกล้เคียงกันในทุกๆ BP แต่ กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอ เฉลี่ยกลับต่างกันซึ่งได้อธิบายไว้ใน หัวข้อ 4.3.3 ดังนั้น กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ยจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญหลัก ต่อ สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความเฉลี่ย (COP_{HPD})



รูปที่ 4.13 สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความ เหนือ ของเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 60 – 75 %