

การศึกษาความเป็นไปได้ในการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้น A Study of Feasibility of Combined Hot Air Drying with Desiccant Wheel

ฐานิตย์ เมธียนนท์¹ ศิลาพันธ์ ประทุมทิพย์² สมนึก บุญพาไสว²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

โทร: 0-29883655 ต่อ 224 แฟกซ์: 0-29883655 ต่อ 241 E-mail: thanid_m@yahoo.com, thanid@mut.ac.th

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาเชิงการทดลองเพื่อศึกษาถึงแนวทางในการนำสารดูดความชื้นมาใช้ในการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน โดยเลือกซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้นซึ่งจะถูกบรรจุอยู่ในวงล้อซึ่งหมุนเคลื่อนที่ตลอดเวลา จากผลการทดลองอบแห้งกับผ้าผืนชุบน้ำพบว่าระบบสามารถทำงานได้ดีโดยมีค่า drying rate adsorption rate และ reeneration rate สอดคล้องกัน การนำอากาศที่ผ่านการ regeneration ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความชื้นค่อนข้างคงที่แล้วเวียนกลับมาใช้ใหม่ช่วยลดการใช้พลังงานลงได้มาก อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจาก regeneration section มีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจากการรั่วไหลของไอน้ำที่บริเวณวงล้อสารดูดความชื้น กระบวนการดูดซับความชื้นโดยซิลิกาเจลใน adsorption section จะคายพลังงานความร้อนกลับคืนให้อากาศอบแห้ง แต่ที่ยังคงมีการใช้พลังงานของขดลวดไฟฟ้าสำหรับห้องอบแห้งอยู่เนื่องจากความร้อนสูญเสียออกจากระบบ อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อทั้งอัตราการอบแห้งและการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ในการ regeneration นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการ regeneration ส่งผลโดยตรงต่อ SEC ของการ regeneration และสุดท้ายเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งที่ใช้มีความร้อนพบว่าสมรรถนะของระบบอบแห้งที่ใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้นในด้านของอัตราการอบแห้งจำเพาะและการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะมีแนวโน้มที่ดีกว่าอย่างชัดเจน

Abstract

The objective of this research is experimentally studying the feasibility of integrating desiccant dehumidifier to the conventional hot air dryer. The dehumidifier wheel that contained silica gel as selective desiccant continuously rotated during drying period to absorb moisture from the air used for drying wet wrapped cloths chosen as tested material. The experimental results showed that the system performed well that drying, adsorption and regeneration rates were matched each other. Recirculating the regeneration air, which its humidity ratio was nearly constant due

¹Corresponding author

to the influence of vapor leakage through the wheel, much helped in saving energy consumption. The existence of heat recovery was presented during adsorption process but the reason of consuming energy for drying due to a main problem of heat loss which counteracted a benefit of heat recovery. It was also found that the drying temperature affected to both of drying rate and SEC of regeneration. Both of the temperature and flowrate of regeneration air had the effect on SEC of regeneration. Finally, by comparing the performance of the existing system to that of heat pump drying it was found that the former had better trend in terms of drying rate and primary SEC than the latter.

1. บทนำ

การใช้อุณหภูมิต่ำในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรจะช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านของรสชาติและสีให้อยู่ในเกณฑ์ดี ในต่างประเทศได้มีการนำระบบบีบความร้อนมาใช้ในการอบแห้งอย่างแพร่หลายเพราะสามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้ที่อุณหภูมิในช่วง -20 ถึง 60 °C โดยมีงานวิจัยจำนวนมากที่แสดงให้เห็นถึงข้อดีในการใช้บีบความร้อนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร [1-6] ในประเทศไทยก็มีการนำระบบอบแห้งโดยบีบความร้อนมาใช้งานอยู่บ้าง [7-9] แต่ไม่แพร่หลายเหมือนในต่างประเทศทั้งที่คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งอยู่ในเกณฑ์ดีเป็นที่ยอมรับของตลาด สาเหตุเพราะว่าต้นทุนของระบบมีราคาแพงมากเมื่อเทียบกับระบบอบแห้งลมร้อนโดยทั่วไปที่ใช้แก๊สทุ้งต้มเป็นเชื้อเพลิง จากการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของ Madhiyanon และคณะ [7, 8] พบว่าต้นทุนของเครื่องอบแห้ง (บาทต่อกิโลกรัมเนื้อแห้ง) คิดเป็นประมาณ 50% ของต้นทุนทั้งหมด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดที่จะนำเอาสารดูดความชื้นมาทำหน้าที่แทนชุดเครื่องทำความเย็น (evaporator) ของระบบบีบความร้อนเพื่อลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง นอกจากนี้ความร้อนที่ใช้ไปในการระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์ภายในห้องอบแห้งก็จะได้อิทธิพลกลับมา (recovery) ระหว่างกระบวนการ adsorption ของสารดูดความชื้นซึ่งจะคล้ายคลึงกับปรากฏการณ์ของการได้อิทธิพลกลับมาของความร้อน (heat recovery) ที่

เครื่องทำระเหยโดยผ่านทางเครื่องควบแน่นของระบบอบแห้งโดยใช้บีบีความร้อน อย่างไรก็ตามสารดูดความชื้นสามารถดูดซับความชื้นได้มากกว่าน้ำหนักตัวเอง 10-110% ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดความชื้นและความชื้นที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม [10] ดังนั้นเพื่อให้สารดูดความชื้นสามารถทำงานได้อีกหลังจากดูดซับความชื้นออกจากอากาศแวดล้อมจึงต้องมีกระบวนการไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้นโดยใช้ความร้อนที่เรียกว่าการ regeneration ซึ่งส่วนมากจะใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งให้ความร้อนกับอากาศที่ใช้ในการ regeneration [11,12] จากคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีหลังการอบแห้งด้วยบีบีความร้อนซึ่งใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำและความสามารถในการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลซึ่งทำหน้าที่คล้ายเครื่องทำระเหยของบีบีความร้อนจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงแนวทางในการนำสารดูดความชื้นมาใช้ร่วมกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำโดยจะศึกษาถึงเงื่อนไขการทำงานของระบบที่สามารถทำให้การอบแห้งและการทำงานของสารดูดความชื้นเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ

2. วิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับวงจรสารดูดความชื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยจะมีวงจรอากาศแยกออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) วงจรอากาศสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งระบบปิด (closed system) หรือระบบเปิดบางส่วน (partially open system) 2) วงจรอากาศสำหรับไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้นที่เรียกว่าการ regeneration ซึ่งถูกออกแบบไว้ให้สามารถนำอากาศที่ผ่านการ regeneration แล้วเวียนกลับมาใช้ใหม่ และ 3) วงจรอากาศสำหรับการทำให้สารดูดความชื้นเย็นตัวลงก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการ adsorption (ดึงความชื้นออกจากอากาศที่ออกจากห้องอบแห้ง) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้น ระบบอบแห้งเป็นระบบปิดและไม่ใช้วงจรอากาศสำหรับทำให้สารดูดความชื้นเย็นตัวลง ห้องอบแห้งมีขนาด 0.35 m (W) x 0.40 m (L) x 0.30 m (H) บรรจุถาดซึ่งเป็นตะแกรงเจาะรูได้ 5 ใบ เพื่อให้สะดวกต่อการทดลอง แหล่งให้ความร้อนแก่อากาศอบแห้งและอากาศที่ใช้ในการ regeneration ใช้หลอดไฟฟ้านขนาด 1 kW และ 0.75 kW ตามลำดับ (ในทางปฏิบัติสามารถใช้ burner ที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิงได้) พัดลมสำหรับอบแห้งและ regeneration เป็นพัดลมแรงเหวี่ยงใบโค้งหน้า โดยแต่ละตัวมีขนาดมอเตอร์ 150 W

ในการทดลองทั้งหมดเลือกใช้ผ้าฝ้ายชุบน้ำเป็นวัสดุอบแห้ง ผ้าแต่ละผืนเมื่อนำมาชุบน้ำและม้วนแล้วจะมีขนาดประมาณ 20 mm (dia.) x 100 mm (L) โดยจะจัดวางเรียงกันอยู่บนถาด น้ำหนักเริ่มต้นของผ้าชุบน้ำในแต่ละการทดลองประมาณ 3 kg ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ กระเปาะแห้งและเปียก แสดงในรูปที่ 1 การวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิล type k ต่อเข้ากับ data logger ความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$ และบันทึกอุณหภูมิทุกๆ 20 นาที การควบคุมอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งและที่ใช้ในการ regeneration ใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$ การวัดความเร็วอากาศใช้ hot wire anemometer ความละเอียด $\pm 3\%$ ของค่าที่อ่านได้ ความเร็วของวงล้อสารดูดความชื้นถูกควบคุมด้วยเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (frequency

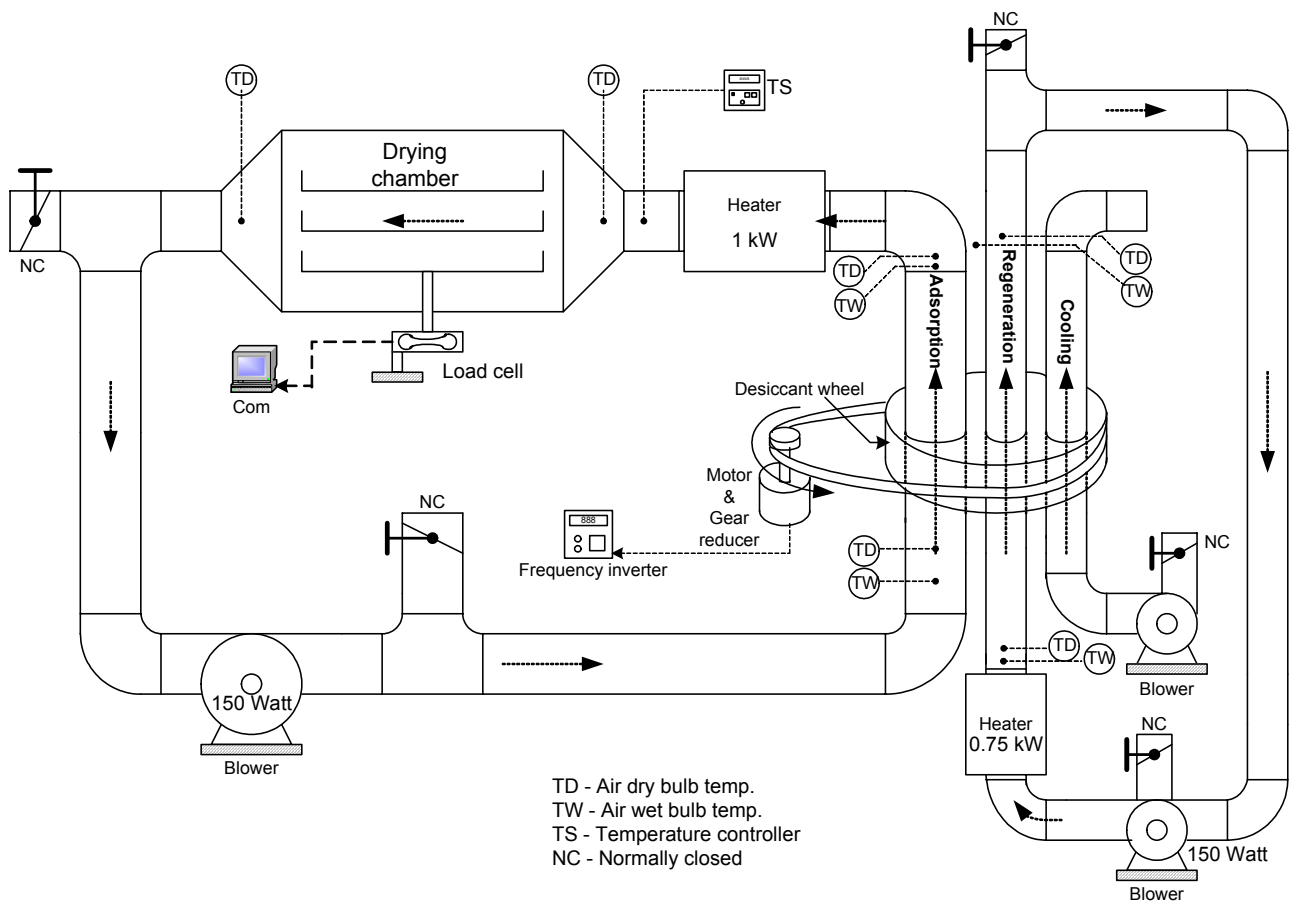
inverter) การบันทึกค่าน้ำหนักของผ้าชุบน้ำที่แต่ละเวลาใช้ load cell ต่อเข้ากับเครื่องแสดงผลน้ำหนักความละเอียด $\pm 1\text{ g}$ โดยต่อสัญญาณเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกผลทุกๆ 30 วินาที กำลังไฟฟ้าที่ใช้ของหลอดไฟสำหรับห้องอบแห้งและสำหรับการ regeneration จะอ่านจาก kW-h meter และบันทึกค่าทุกๆ 20 นาที ระยะเวลาอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง 5-10 ชม.

3. ผลการทดลอง

จุดประสงค์ของการทดลองเพื่อศึกษาถึงแนวทางในการทำงานของระบบ และประเมินถึงสมรรถนะโดยทั่วไปของระบบอบแห้ง ได้แก่ อัตราการอบแห้ง การใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) และอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบอบแห้ง และสุดท้ายได้เปรียบเทียบสมรรถนะกับระบบอบแห้งที่ใช้บีบีความร้อน ข้อมูลเงื่อนไขการทำงานและสมรรถนะของระบบได้สรุปไว้ในตารางที่ 1

3.1 อัตราการอบแห้ง อัตราการคายความชื้นและการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลในวงล้อสารดูดความชื้น

อัตราการอบแห้งเป็นดัชนีตัวหนึ่งที่ใช้วัดสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ค่าเฉลี่ยของอัตราการอบแห้งของทุกการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และเพื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราการดูดซับความชื้นโดยซิลิกาเจลใน adsorption section และอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลใน regeneration section ข้อมูลดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 (a และ b) สำหรับการทดลองที่ 2/2 และ 4/1 โดยที่แนวโน้มของข้อมูลสำหรับการทดลองอื่นจะคล้ายคลึงกัน จากกราฟของข้อมูลในรูปที่ 2 พบว่าทั้งอัตราการอบแห้ง (drying rate) อัตราการดูดซับความชื้น (adsorption rate) และอัตราการไล่ความชื้น (regeneration rate) มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาการอบแห้ง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทดลองคือผ้าฝ้ายชุบน้ำซึ่งมีความเป็นรูพรุน (porosity) มาก ดังนั้นน้ำจากด้านในจึงแพร่มาที่ผิวได้ตลอดเวลาทำให้การอบแห้งอยู่ในช่วงการอบแห้งคงที่ (constant drying rate) ในการออกแบบระบบอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นได้ ออกแบบให้ adsorption rate regeneration rate และ drying rate มีค่าเท่ากัน แต่จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าจะมีความแตกต่างกันประมาณ 5-20% ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก 1) มีอากาศรั่วไหลเข้าและออกจากระบบทำให้ระบบไม่ได้เป็นระบบปิดที่แท้จริง (ยกเว้นการทดลองที่ 1/1 และ 1/2 ที่ตั้งใจจะนำอากาศภายนอกบางส่วนมาใช้ในการ regeneration) โดยจากการวัดอัตราการไหลของอากาศที่เข้าและออกจากรวงล้อสารดูดความชื้นพบว่ามีอากาศรั่วออกสู่ภายนอกประมาณ 15% สำหรับ adsorption section และประมาณ 20% สำหรับ regeneration section และ 2) อาจมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนในการวัดกระเปาะเปียก จากข้อมูลในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าโดยทั่วไประบบสามารถทำงานได้ดีแต่อาจมีบางเงื่อนไขที่ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบในด้านการใช้พลังงานเช่น การทดลองที่ 1 และ 2 ที่มีอัตราการไหลและอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการ regeneration สูงเกินไป

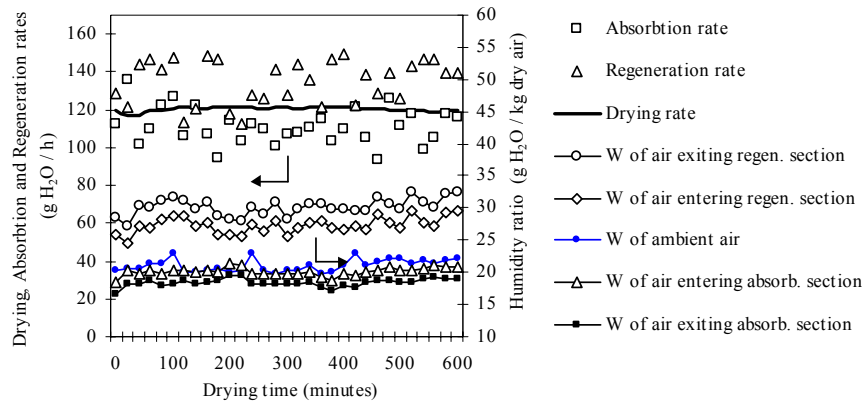


รูปที่ 1 Schematic diagram of hot air dryer integrating with desiccant wheel and temperature measurement position.

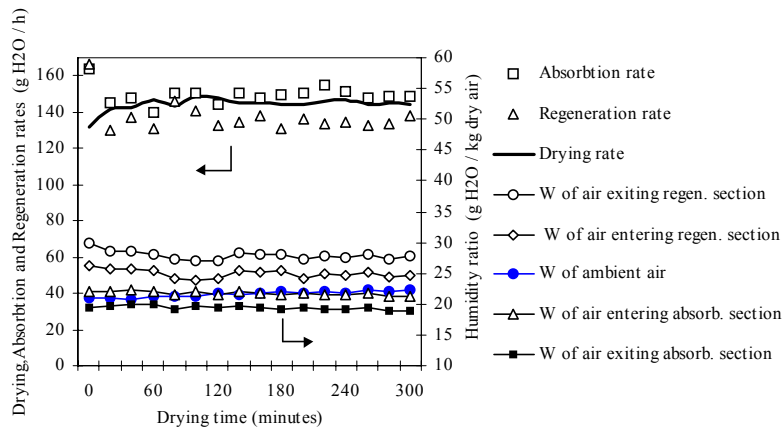
ตารางที่ 1 Summarization of operating conditions and experimental results of wrapped cloth drying.

Description	Test No.1		Test No.2		Test No.3	Test No.4		Test No.5	Test No.6		Test No.7	
	1/1	1/2	2/1	2/2		4/1	4/2		6/1	6/2	7/1	7/2
Average conditions												
Average temperature (°C)	32.5	36.3	-	30.4	33.2	31.0	34.8	31.1	31.5	28.8	32.9	30.4
Average relative humidity (%)	60.9	52.4	-	77.3	61.5	75.8	54.6	80.0	72.3	83.2	64.5	70.6
Condition of wrapped clothes												
Dimension (dia. (mm)x l (mm))	20x 100	20x 100	20x 100	20x 100	20x 100	20x 100	20x 100	20x 100	20x 100	20x 100	20x 100	20x 100
Average initial moisture content (%d.b.)	270	286	274	271	273	277	276	273	280	273	263	280
Initial weight (g)	2995	3126	3026	3009	3024	3059	3047	3032	3082	3020	2937	3080
Moisture removed (g)	622	586	578	1192	624	723	750	696	410	682	673	665
Drying conditions												
Average drying temperature (°C)	45.8	45.7	45.9	46.1	45.7	50.4	50.5	50.7	51.7	51.4	52.0	51.5
Average generation temperature (°C)	114. 5	114. 6	114. 1	119. 2	104.6	104. 2	104. 6	105. 4	121.0	120. 8	101. 2	101. 0
Silica-gel weight (kg)	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
Revolution of wheel (RPH)	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	1.90	1.90
Specific drying air flow rate (kg air/h-dry product)	76.4	84.9	81.4	77.5	79.5	77.4	78.6	77.0	76.6	77.4	78.9	76.9
Specific regen. air flow rate (kg air/h-dry product)	60.1	59.2	57.5	58.3	58.1	57.8	58.5	34.1	33.7	32.9	30.7	30.7
Fraction of recirculated regen. air (%)	70	70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Drying time (h)	5	5	5	10	5	5	5	5	3	5	5	5
Performance of dryer												
Drying rate (g H ₂ O/h)	124. 4	117. 2	115. 9	119. 2	124.8	144. 6	150. 0	139. 2	136.6	136. 4	134. 6	133. 0
Average SEC _{drying} (MJ/kg H ₂ O) ^(a)	2.43	2.33	3.86	3.93	2.65	6.02	4.61	6.52	6.32	7.07	6.21	6.39
Average SEC _{regen.} (MJ/kg H ₂ O)	19.6 2	19.9 0	15.3 2	15.1 6	13.73	9.66	9.36	7.66	9.66	9.55	7.22	7.20
Average SEC _{blower} (MJ/kg H ₂ O)	1.10	1.26	1.24	1.17	1.13	0.96	0.94	0.74	0.82	0.83	0.84	0.83
Total SEC (MJ/kg H ₂ O)	23.2	23.5	20.4	20.3	17.5	16.6	14.9	14.9	16.8	17.5	14.3	14.4

(a) In generally, energy of drying could not be consumed since it will be recovered by moisture absorbing of desiccant, see section (3.3) for more information.



(a) Test no. 2/2



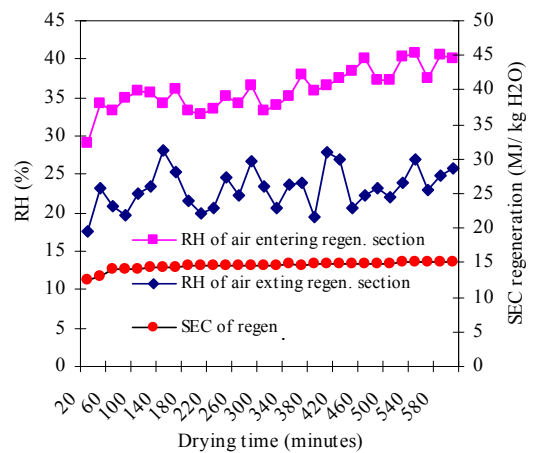
(b) Test no. 4/1

รูปที่ 2 Comparison between drying rate adsorption rate and regeneration rate (w = air humidity ratio).

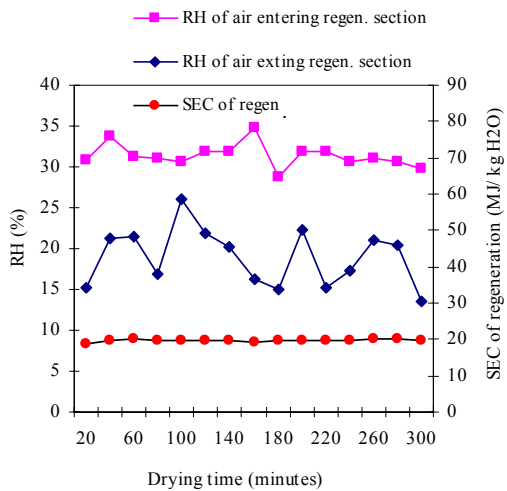
3.2 การนำอากาศที่ออกจาก regeneration section เวียนกลับมาใช้ใหม่

เพื่อต้องการประหยัดพลังงานในการไล่ความชื้นออกจากซิลิกาเจล จึงได้ปรับเปอร์เซ็นต์การนำอากาศที่ออกจาก regeneration section มาใช้ใหม่ ดังแสดงในตารางที่ 1 ของการทดลองที่ 1/1 และ 1/2 ซึ่งเดิมปรับให้มีค่าเท่ากับ 70% พบว่าการใช้พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ของการไล่ความชื้นออกจากซิลิกาเจล เท่ากับ 19.6-19.0 MJ/kg water evap. และด้วยเงื่อนไขการทำงานของระบบเช่นเดิม ได้มีการปรับให้มีการนำเอาอากาศที่ออกจาก regeneration section กลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด (=100%) พบว่าสามารถลด SEC ลงไปได้ประมาณ 24% โดย SEC เหลือประมาณ 15.2 MJ/kg water evap. ดังนั้นในการทดลองครั้งต่อไป ไปจึงได้นำเอาอากาศที่ออกจาก regeneration section กลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด แต่มีข้อสังเกตที่สำคัญอยู่ประการหนึ่งกล่าวคือถึงแม้จะมีการนำเอาอากาศที่ออกจาก regeneration section มาใช้ใหม่ทั้งหมด แต่ค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศ (w) และ %RH ที่เข้าและออกจาก regeneration section ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามเวลา สาเหตุเนื่องจากไอน้ำในอากาศที่ regeneration section มีความดันไอน้ำสูงกว่าความดันไอน้ำในสิ่งแวดล้อมภายนอกมาก (เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการ regeneration มีค่าสูง > 100 °C) ดังนั้นจึงทำให้ไอน้ำในอากาศภายใน regeneration section รั่วไหลออกมาสู่ภายนอกเพื่อรักษาสภาพสมดุลของความดันไอน้ำระหว่างความดันไอน้ำในอากาศของอากาศที่อยู่ภายในวงล้อสารดูดความชื้นกับความดัน

ไอน้ำของอากาศแวดล้อมภายนอก จึงทำให้อัตราส่วนความชื้น (w) และ %RH ของอากาศที่เข้าออก regeneration section มีค่าค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3



(a) 100% recirculated regeneration airflow.



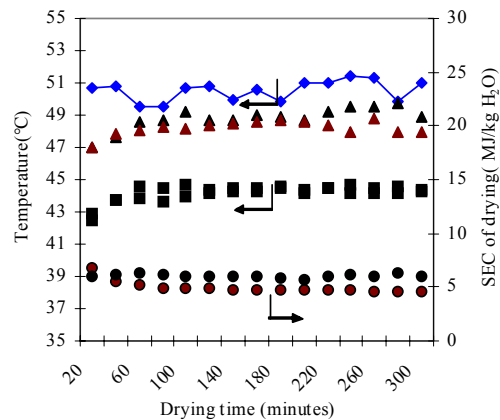
(b) 70% recirculated regeneration airflow.

รูปที่ 3 The variation of RH with time and the effect of fraction of recirculated regeneration airflow (%) on SEC of regeneration.

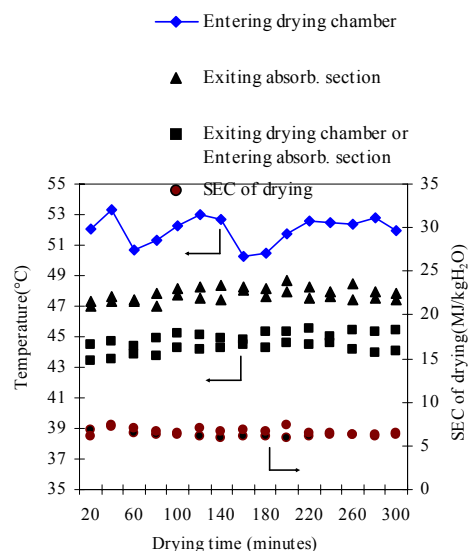
3.3 การได้กลับคืนของพลังงานความร้อนระหว่างกระบวนการดูดซับความชื้นและสาเหตุที่มีการใช้พลังงานในห้องอบแห้งมาก

ในทางทฤษฎีแล้วอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งเมื่อผ่านสารดูดความชื้น ความชื้นในอากาศจะแพร่ไปยังพื้นผิวของสารดูดความชื้น เนื่องจากผลของเกรเดียนท์ของความดันไอในอากาศกับที่ผิววัสดุ หลังจากนั้นความชื้นที่ผิววัสดุจะควบแน่นและแพร่ไปสู่ capillaries ซึ่งอยู่ภายในวัสดุ ในระหว่างการควบแน่นไอน้ำจะคายความร้อนแฝงออกมาโดยความร้อนนี้จะถูกถ่ายเทให้กับอากาศและสารดูดความชื้นทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อออกจากสารดูดความชื้น [13-15] ดังนั้นถ้าปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดซับไว้ได้มีปริมาณเท่ากับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุระหว่างการอบแห้งแล้วก็จะประหยัดพลังงานความร้อนที่ต้องให้แก่อากาศได้ ข้อมูลที่ยืนยันถึงสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้นแสดงในรูปที่ 4 (a และ b) สำหรับบางการทดลองโดยที่การทดลองอื่นๆ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ข้อมูลในรูปที่ 4 (a และ b) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศเมื่อออกจาก adsorption section โดยพบว่าอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งจะมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากต้องให้ความร้อนแก่วัสดุในการระเหยน้ำซึ่งโดยเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งจะลดต่ำลงประมาณ 4-6 °C ขึ้นกับเงื่อนไขในการอบแห้ง จากรูปที่ 4a และ b เช่นกันจะพบว่าอากาศเมื่อผ่านเข้าไปในเบดของซิลิกาเจลในส่วนของการ adsorption จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 3-4 °C และมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 47-48 °C ในขณะที่อุณหภูมิในการอบแห้งตั้งไว้ที่ 45 และ 50 °C ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งอุณหภูมิอากาศที่ออกจาก adsorption unit และอุณหภูมิอบแห้งที่ตั้งไว้มีค่าใกล้เคียงกันหรือบางครั้งอุณหภูมิอากาศที่ออกจาก adsorption unit สูงกว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ตั้งไว้ด้วยซ้ำ ดังนั้นจึงไม่น่าที่จะมีการใช้พลังงานในส่วนของการอบแห้งหรือถ้าใช้ก็น่าจะอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม

จากข้อมูลในตารางที่ 1 กลับพบว่าในทุกการทดลองจะมีการใช้พลังงานในการอบแห้งมากพอสมควร โดยค่า SEC ในการอบแห้งจะอยู่ในช่วง 4-6 MJ/kg water evap. จากประเด็นนี้จึงได้มีการตรวจสอบความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ทางออกของ adsorption section กับอุณหภูมิอากาศตรงทางเข้าห้องอบ (โดยปิด heater ไม่ให้ทำงาน) โดยพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งกล่าวมีค่าประมาณ 6 °C โดยมีสาเหตุมาจากความร้อนสูญเสียผ่านผนังของระบบท่อซึ่งมีพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนมากพอสมควร ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณการสูญเสียความร้อนผ่านผนังโดยพบว่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียประมาณ 3.3 MJ/kg H₂O คิดเป็นประมาณ 50% ของความร้อนที่ใช้กับห้องอบแห้ง ดังนั้นตัวเลขการใช้พลังงานในการอบแห้งในตารางที่ 1 และ 2 จึงยังไม่สะท้อนค่าการใช้พลังงานในการอบแห้งอย่างแท้จริง



(a) Test no. 4/1 and 4/2 (set value of drying temp. = 50 °C)

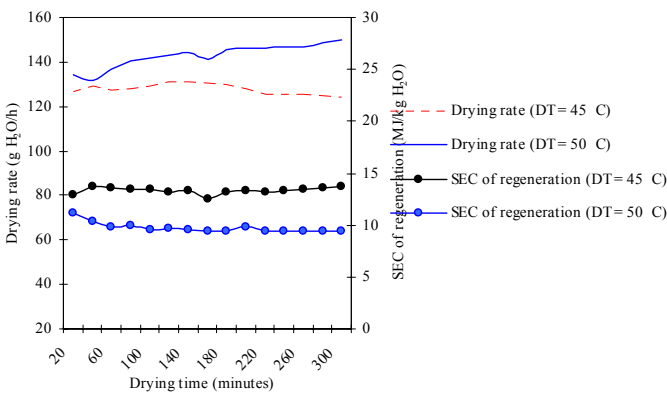


(b) Test no. 7/1 and 7/2 (set value of drying temp. = 50 °C)

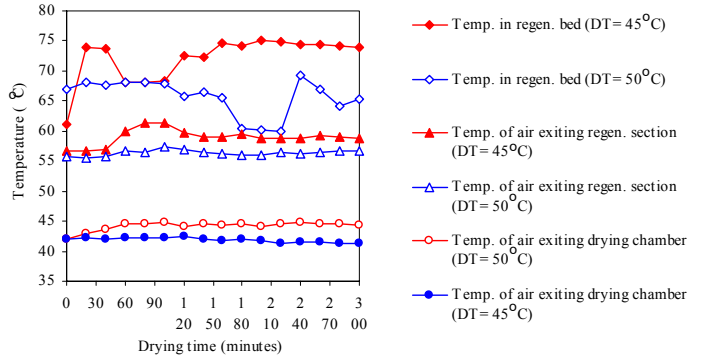
รูปที่ 4 The presentation of heat recovery during adsorption process and the existence of SEC of drying due to heat loss effect.

3.4 ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ในการ regeneration

เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งเฉลี่ย 45 °C (การทดลองที่ 3) และ 50 °C (การทดลองที่ 4/1 และ 4/2) ดังแสดงในตารางที่ 1 และเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นจึงได้นำข้อมูลจากการทดลองมาพลอตกราฟดังแสดงในรูปที่ 5 (a) ซึ่งพบว่าอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 50 °C จะสูงกว่าที่อุณหภูมิ 45 °C อยู่ประมาณ 20% และในขณะเดียวกันการใช้อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ยที่ 50 °C จะส่งผลดีต่อการใช้พลังงานในการ regeneration ซึ่งดูได้จากค่า SEC ในการ regeneration (ตารางที่ 1) ซึ่งจะน้อยลงประมาณ 30% (จากเดิมที่ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 45 °C ค่า SEC ของการ regeneration มีค่าประมาณ 13.7 MJ/kg water evap. ลดลงเหลือประมาณ 9.5 MJ/kg water evap. เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C) ซึ่งคาดว่าจะมาจากสาเหตุ 2 ประการ คือ 1) อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น และ 2) การใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้อากาศที่ออกจากห้องอบแห้งก่อนจะเข้าสู่ adsorption section ในวงล้อสารดูดความชื้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย และเมื่ออากาศไหลเข้าสู่เบตของซิลิกาเจลใน adsorption section ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิของซิลิกาเจล (ซึ่งค่อนข้างสูงเพราะเพิ่งผ่านการ regeneration มา) จะมีค่าน้อยในกรณีอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งมีอุณหภูมิสูงทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับซิลิกาเจลลดลง ดังนั้นอุณหภูมิของซิลิกาเจล เมื่อเคลื่อนตัวเข้าสู่ generation section จะยังคงมีอุณหภูมิที่สูงอยู่และเท่ากับเป็นการลดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเบตของซิลิกาเจลใน generation section กับอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการ regeneration ผลก็คือปริมาณการถ่ายเทความร้อน (ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิผิวของซิลิกาเจลโดยตรง) ระหว่างอากาศกับซิลิกาเจลลดลงทำให้อากาศภายในเบตของซิลิกาเจลและอากาศที่ออกจากเบตมีอุณหภูมิที่ไม่ตกลงไปมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำกว่า โดยพิจารณาได้จากเส้นกราฟของอุณหภูมิในรูป 5 (b) ดังนั้นการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจึงใช้พลังงานในส่วนของการ regeneration น้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า



(a) The effect of drying temp. on drying rate and SEC of regeneration.



(b) The effects of drying temp. on temperature within the system.

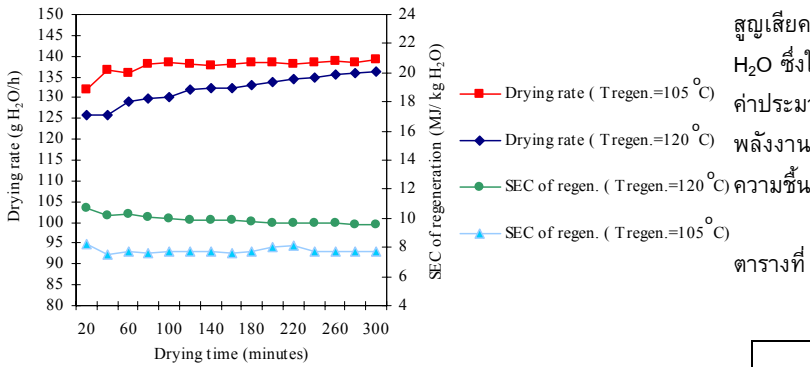
รูปที่ 5 The effects of drying temperatures on moisture reduction SEC of regeneration and temperature within the system (DT = average drying temperature).

3.5 ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการ regeneration ต่ออัตราการอบแห้งและการใช้พลังงานในการ regeneration และความสามารถในการรับความชื้นของอากาศที่ผ่านการ generation

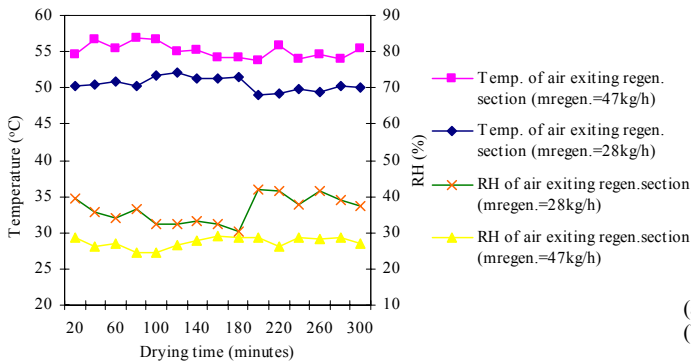
จากข้อมูลในตารางที่ 1 เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองของการทดลองที่ 5 กับการทดลองที่ 6/1 และ 6/2 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิ regeneration จาก 105 °C เป็น 120 °C ไม่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง แต่มีผลต่อการใช้พลังงานทำให้ค่า SEC สำหรับการ regeneration เพิ่มขึ้นประมาณ 25% จากเดิมที่ใช้เท่ากับ 7.6 เป็น 9.6 MJ/kg water evap. และเมื่อนำข้อมูลมาพลอตเทียบกับเวลาจะได้เส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 6 และจากผลการทดลองที่ 7/1 และ 7/2 ในตารางที่ 1 จะพบว่าการใช้อุณหภูมิในการ regeneration เท่ากับ 100 °C โดยลดความเร็วรอบของวงล้อให้เหลือเท่ากับ 1.9 รอบ/ชม. เพื่อระยะเวลาการ regeneration ระบบก็สามารถทำงานได้ดี

สำหรับผลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการ regeneration สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการทดลองที่ 4/1 และ 4/2 กับการทดลองที่ 5 ซึ่งพบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ลดลงประมาณ 40% (จาก 47 kg/h ลดลงเหลือ 27 kg/h) จะสามารถลดการใช้พลังงานในการ regeneration ลงได้ประมาณ 20% (จาก SEC เท่ากับ 9.5 MJ/kg water evap. ลดลงเหลือประมาณ 7.7 MJ/kg water evap.) โดยที่ไม่กระทบต่ออัตราการอบแห้ง เมื่อนำข้อมูลอุณหภูมิและ %RH ของอากาศขาออก regeneration section ในการทดลองที่ 4/1 และ 5 มาพลอตกราฟดังแสดงในรูปที่ 7 จะพบว่าเมื่อใช้อัตราการไหลของอากาศในการ regeneration ต่ำจะเกิดผลอยู่สองประการคือ 1) อุณหภูมิหลังการ regeneration จะตกลงมากกว่ากรณีเมื่อใช้อัตราการไหลอากาศสูง และ 2) ค่า %RH ของอากาศเมื่อออกจาก regeneration section จะมากกว่าในกรณีใช้อัตราการไหลสูง อย่างไรก็ตามในการทดลองดังกล่าวเมื่อใช้อัตราการไหลประมาณ 27 kg/h ค่า %RH เฉลี่ยจะมีค่าประมาณ 36% ที่อุณหภูมิประมาณ 50 °C ซึ่งค่า RH ดังกล่าว

ยังคงอยู่ในระดับที่สามารถรับความชื้นจากซิลิกาเจลได้ (RH<100%) จากผลการทดลองดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงแนวทางในการเลือกใช้อัตราการไหลของอากาศในการ regeneration ที่เหมาะสมที่ไม่สิ้นเปลืองพลังงานในการ regeneration มากเกินไปและยังคงสามารถไล่ความชื้นออกจากซิลิกาเจลได้



รูปที่ 6 The effects of regeneration temperatures on drying rate and SEC of regeneration (test no. 5, $T_{regen} = 105^{\circ}C$; test no. 6, $T_{regen} = 120^{\circ}C$).



รูปที่ 7 The ability of moisture adsorption of air after regeneration process (test no. 5 and 6/2).

3.6 เปรียบเทียบสมรรถนะกับเครื่องอบแห้งแบบปั๊ม

ความร้อน

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อน [7-9] ได้นำมาเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งในงานวิจัยนี้โดยผลการทดลองจากเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนได้เลือกเฉพาะการอบแห้งในช่วง 1st stage drying ซึ่งอัตราการอบแห้งเฉลี่ยต่างจากอัตราการอบแห้งสูงสุดประมาณ 15% ดังนั้นจึงสามารถนำมาเปรียบเทียบได้กับระบบอบแห้งในปัจจุบันซึ่งการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ข้อมูลการเปรียบเทียบได้นำเสนอในตารางที่ 2 โดยจะเห็นว่าค่าอัตราการอบแห้งจำเพาะ (specific drying rate) ของระบบอบแห้งลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นจะมีค่ามากกว่าค่าสูงสุดที่ระบบอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนทำได้ประมาณ 2 เท่าที่เงื่อนไขการทดลองใกล้เคียงกัน และเนื่องจากค่าการใช้พลังงานของห้องอบแห้งสำหรับเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับสารดูด

ความชื้นที่ใช้อยู่ในงานวิจัยนี้ยังไม่สะท้อนการใช้พลังงานในการอบแห้งอย่างแท้จริงเนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมทำให้การใช้พลังงานที่ห้องอบแห้งมีค่าเกินไปจากที่ควรจะเป็นอย่างมากดังได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 3.3 ในตารางที่ 2 จะพบว่าค่าการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (specific primary energy consumption, SEC_{prim}) ของระบบอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นในกรณีนี้ที่ทำการสูญเสียความร้อนผ่านผนังแล้ว SEC_{prim} จะมีค่าประมาณ 11.2 MJ/kg H_2O ซึ่งใกล้เคียงกับของระบบอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนที่ SEC_{prim} มีค่าประมาณ 11.5-12.5 MJ/kg H_2O แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของระบบอบแห้งลมร้อนร่วมกับสารดูด

ตารางที่ 2 Comparison the performance of drying system between heat pump drying and combined hot air drying with desiccant wheel.

Description	Heat pump [7-9]	Combined hot air-desiccant wheel
Initial moisture content (%d.b.)	90-287	275
Drying temperature ($^{\circ}C$)	51-53	51
Specific air flow rate (kg air/h-kg dry product)	32-76	80 ^(a)
Specific drying rate (kg H_2O /h-dry product)	0.03-0.08	0.17
Specific primary energy consumption of heat pump (MJ/kg H_2O)	11.5-12.5 ^(b)	-
Specific primary energy consumption of hot air desiccant wheel ^(b, c) (MJ/kg H_2O)	-	14.5 ^(d) and 11.2 ^(e)

- (a) Both of drying and regeneration air flow rates were included
- (b) Specific primary energy consumption based on conversion factor of 2.6
- (c) Specific primary energy consumption calculated from data in Table 1 which assuming that the exiting electrical heaters were replaced by a conventional gas fuel burner with combustion efficiency of 96%.
- (d) Both drying and regeneration energy were included.
- (e) subtracted heat loss (approx. 3.3 MJ/kg H_2O) from (d).

4. สรุป

1) การทำงานของวงล้อสารดูดความชื้นในแต่ละส่วนคือ adsorption และ regeneration sections ทำงานสัมพันธ์กันทำให้ drying rate adsorption rate และ regeneration มีค่าใกล้เคียงกันโดยแตกต่างกันประมาณ 5-20% ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากมีอากาศรั่วไหลเข้าและออกจากระบบและความคลาดเคลื่อนในการวัดกระเปาะเปียก

2) การนำอากาศที่ออกจาก regeneration section ซึ่งยังมีอุณหภูมิสูงและ %RH ต่ำเวียนกลับมาใช้ใหม่จะช่วยลด SEC ของการ regeneration ลงได้มาก และการที่ค่า %RH และอัตราส่วนความชื้นที่ออกจาก regeneration section มีค่าค่อนข้างคงที่

3) พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำภายในห้องอบจะได้อีกกลับมา (heat recovery) บางส่วนเนื่องจากกระบวนการดูดซับความชื้นของ

ซิลิกาเจล แต่ที่การใช้พลังงานในการอบแห้งยังอยู่ในเกณฑ์สูงสาเหตุหลักมาจากการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ

4) การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและในขณะเดียวกันพลังงานจำเพาะในการ regeneration ก็ลดลงอย่างเห็นได้ชัด

5) การเพิ่มอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการ regeneration ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งไม่มากนักแต่จะทำให้พลังงานที่ใช้ในการ regeneration เพิ่มขึ้น การใช้อุณหภูมิในการ regeneration เท่ากับ 100 °C ที่ความเร็วรอบวงล้อ 1.9 รอบ/ชม. ระบบสามารถทำงานได้ดี การลดอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการ regeneration จะช่วยลด SEC ของการ regeneration ลงได้ประมาณ 20%

6) เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกับระบบอบแห้งโดยใช้มีความร้อนพบว่าระบบปัจจุบันจะได้อัตราการอบแห้งจำเพาะสูงกว่าประมาณ 200% ในขณะที่การใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะมีค่าใกล้เคียง

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.J. Rossi, Neves L.C. and Kieckbush T.G. "Thermodynamic and Energetic Evaluation of a Heat Pump Applied to the Drying Vegetables", *Drying Technology*, 1992, Vol. 10, pp.1475-1484
- [2] S. Clements, Jia X. and Jolly P. "Experimental Verification of a Heat Pump Assisted Continuous Dryer Simulation Model", *Energy Research*, Vol. 17, pp.19-29
- [3] I. Stroment and Kramer K. "New Application of Heat Pumps in Drying Processes", *Drying Technology*, 1992, Vol. 12, pp.889-901
- [4] S. Prasertsan and Saen-saby P. "Heat Pump Drying of Agricultural Materials", *Drying Technology*, 1992, Vol. 16, pp.235-250
- [5] G.S. Young, Birchall S. and Mason R.L. "Heat Pump Drying of Food Products-Prediction of Performance and Energy Efficiency", *In Proc. Fourth ASEAN Conf on Energy Technology*, Bangkok, Thailand, August 28-29, 1995, pp.240-247
- [6] K.J. Chua, Chou S.K. Ho J.C. and Hawlader M.N.A. "Heat Pump Drying: Recent Developments and Future Trends", *Drying Technology*, 2002, Vol. 20, pp.1579-1610
- [7] T. Madhiyanon, Soponronnarit S. and Swasdisevi T. "Industrial – Scale Heat Pump Drying", *Kasetsart Journal (Nat. Sci.)*, 1999, Vol. 33, pp.461-473
- [8] T. Madhiyanon, Soponronnarit S. and Swasdisevi T. "Industrial Scale Heat Pump Fruit Drying", *In Proceeding of the first Asian-Australian drying conference (ACD'99)*, Bali, Indonesia, October 24-27,1999, pp.609-617
- [9] W. Tia, Soponronnarit S. and Kaewassadorn W. "", *In Proceeding of the first regional confrence on Eenergy technology towards a clean environment*, Chiangmai, Thailand, December 1-2, 2000, pp.

[10] D.G. Waugaman, Kini A. and Kettleborough C.F. "A review of Desiccant Cooling Systems", *Journal of Energy Resources Technology*, 1993, Vol. 115, pp.1-8

[11] Y. Saito, "Regeneration Characteristics of Absorbent in the Integrated Desiccant/Collector", *Journal of Solar Energy Engineering*, 1993, Vol. 115, pp.169-175

[12] S. Techajunta and Exell R.H.B. "Experiments in Solar Simulation on Solid Desiccant Regeneration and Air Dehumidification for Air Conditioning in Tropical Humid Climate", *Renewable Energy*, 1999, Vol. 17, pp.549-568

[13] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineering, *ASHRAE Handbook: Fundamentals*, 2001, pp. 22.1-22.6

[14] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineering, *ASHRAE Handbook: Systems and Equipment*, 2000, pp. 22.1-22.11

[15] S. Neti and Wolfe E.I. "Measurements of Effectiveness in a Silica Gel Rotary Exchanger", *Applied Thermal Engineering*, 2000, Vol. 20, pp.309-322