



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูด

ความชื้นเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน: กรณีศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอก

Design and Performance Analysis of a Solid Desiccant Assisted

Hot-air Drying System for Energy Conservation:

A Case Study on Germinated Brown Rice Drying

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูด

ความชื้นเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน: กรณีศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอก

Design and Performance Analysis of a Solid Desiccant Assisted

Hot-air Drying System for Energy Conservation:

A Case Study on Germinated Brown Rice Drying

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	57
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	60
3.1 การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น.....	60
3.2 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น.....	75
3.3 การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบลดความชื้นในอากาศ.....	83
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	104
4.1 การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น.....	104
4.2 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น.....	113
4.3 การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบลดความชื้นในอากาศสำหรับการอบแห้ง.....	130
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	158
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	158
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	161
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย.....	162
6.1 สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้.....	162
เอกสารอ้างอิง.....	163
ภาคผนวก.....	171
ภาคผนวก ก ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข เอกสารผลผลิต.....	176
ภาคผนวก ค สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	194
ประวัตินักวิจัย.....	197



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของซิลิกาเจล.....	16
2.2 ข้อมูลทางกายภาพของซิลิกาเจล.....	17
2.3 ความสามารถในการดูดความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 30°C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ.....	17
2.4 ความหมายของสีที่แสดงบนเม็ดสีซิลิกาเจล.....	17
2.5 แสดงคุณสมบัติของตัวดูดซับความชื้น.....	20
2.6 แสดงการเปรียบเทียบผลของอัตราการไหล.....	22
3.1 เปรียบเทียบปริมาณซิลิกาเจลกับความหนาของซิลิกาเจลภายในเบด.....	62
3.2 สมการคำนวณปริมาณซิลิกาเจล จากการทดลองเบื้องต้น.....	69
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง.....	97
4.1 แสดงการเปิดปิดวาล์วเมื่อหอทที่ 1 อยู่ในกระบวนการดูดความชื้นและหอทที่ 2 อยู่ในกระบวนการคายความชื้น.....	105
4.2 แสดงการเปิดปิดวาล์ว เมื่อหอทที่ 1 อยู่ในกระบวนการคายความชื้นและหอทที่ 2 อยู่ในกระบวนการดูดความชื้น.....	105
4.3 ข้อมูลค่าอุณหภูมิของอากาศที่จุด A, B, C, D, E, F, G และ H ของระบบ.....	111
4.4 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบอบแห้ง.....	113
4.5 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบอบแห้ง.....	115
4.6 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลต่อหนึ่งหน่วยเวลา.....	115
4.7 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศเพื่อคายความชื้นของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบอบแห้ง.....	117
4.8 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลต่อหนึ่งหน่วยเวลา.....	117
4.9 ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้น.....	138
4.10 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศสวนดูดความชื้นและอุณหภูมิในหอบอบแห้งต่างๆ.....	140
4.11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นแบบชั้นบางที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งต่างๆ.....	147
4.12 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอก.....	148
4.13 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก.....	149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.14 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอก.....	150
4.15 การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติที่อัตราการอบแห้งสูงสุดแลเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ	151
4.16 ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกที่วิธีการอบแห้งต่าง ๆ.....	156
4.17 ความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกที่วิธีการอบแห้งต่าง ๆ.....	156
4.18 ค่าสีและความสว่างของข้าวกล้องงอกที่วิธีการอบแห้งต่างๆ.....	157



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 กราฟแสดงความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการอบแห้ง.....	6
2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับเวลาในการอบแห้ง.....	7
2.3 ช่วงอัตราการทำแห้งเริ่มลดลง.....	8
2.4 ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง.....	8
2.5 ช่วงสิ้นสุดการทำแห้ง.....	8
2.6 เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งแบบแผนภูมิไซโครเมตริก.....	10
2.7 เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งแบบแผนภูมิไซโครเมตริก.....	11
2.8 เส้นอุณหภูมิจุดกลั่นตัวบนแผนภูมิไซโครเมตริก.....	11
2.9 เส้นแสดงอัตราส่วนความชื้นบนแผนภูมิไซโครเมตริก.....	12
2.10 เส้นความชื้นสัมพัทธ์บนแผนภูมิไซโครเมตริก.....	12
2.11 เส้นปริมาตรจำเพาะของอากาศบนแผนภูมิไซโครเมตริก.....	13
2.12 เส้นเอนทัลปีบนแผนภูมิไซโครเมตริก.....	14
2.13 ค่าสมบัติของอากาศบนแผนภูมิไซโครเมตริก.....	14
2.14 กระบวนการอบแห้งจาก A ไป B.....	15
2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของซิลิกาเจล และโมเลกุลาร์ซีฟ.....	18
2.16 อัตราการดูดน้ำของสารดูดความชื้นประเภทของแข็งชนิดต่างๆ.....	19
2.17 Equilibrium Capacity ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	20
2.18 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล.....	22
2.19 ลักษณะเบตบรรจุแบบแรก.....	23
2.20 ลักษณะเบตบรรจุแบบสอง.....	23
2.21 ผลของอุณหภูมิขาเข้าสู่สารดูดความชื้นต่อมวลน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล.....	25
2.22 ระบบอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา.....	27
2.23 ระบบลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นแข็ง.....	28
2.24 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนใช้ฮีตเตอร์.....	28
2.25 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนที่มีระบบนำความร้อนกลับมาใช้.....	29
2.26 ระบบอบแห้งร่วมกับสารดูดความชื้น.....	30
2.27 ระบบอบแห้งร่วมกับการควบแน่น.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.28 ระบบอบแห้งร่วมกับป้อนความร้อน.....	32
2.29 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบอบแห้งแบบต่างๆ.....	32
2.30 เครื่องอบแห้งเมล็ดธัญพืชพลังงานแสงอาทิตย์.....	32
2.31 แบบจำลองเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น.....	34
2.32 เครื่องอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้น.....	34
2.33 ระบบ Liquid Desiccant Dehumidification.....	35
2.34 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำด้วยเซรามิกแบบให้อากาศเข้าไหลวกกลับ และไหลตัดกันกับไอเสีย.....	37
2.35 เครื่องอุ่นอากาศแบบพาสซีฟแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับก๊าซ.....	38
2.36 เครื่องอุ่นอากาศแบบฮีทไปป์.....	38
2.37 การทำงานของฮีทไปป์.....	38
2.38 อีโคโนไมเซอร์ที่ติดตั้งกับหม้อต้มน้ำ.....	39
2.39 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ.....	40
2.40 การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังราบ.....	41
2.41 ลักษณะภาพด้านข้างของอุณหภูมิตั้งแต่.....	44
2.42 ค่าปรับแก้แบบ one-shell pass.....	45
2.43 ค่าปรับแก้แบบ two-shell passes.....	46
2.44 ค่าปรับแก้แบบ Single-pass cross-flow with both fluids unmixed.....	46
2.45 ค่าปรับแก้แบบ Single-pass cross flow with one mixed and the other unmixed.....	46
2.46 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำกับปริมาณความชื้นในสารดูดความชื้น.....	49
2.47 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำกับปริมาณความชื้นในสารดูดความชื้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารดูดความชื้น.....	49
2.48 วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น.....	50
2.49 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงสภาวะกระบวนการระเหยแบบตึกสำหรับแก๊สอุดมคติ.....	51
2.50 แผนภูมิไซโครเมตริกในกระบวนการลดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้นซึ่งเป็นไปตามกระบวนการระเหยแบบตึก.....	52
2.51 ภาพเปรียบเทียบระหว่างเมล็ดข้าวกล้องธรรมดากับเมล็ดข้าวกล้องงอก.....	55
2.52 ปริมาณสารกาบา (GABA) ของข้าวกล้องงอกจากขั้นตอนการผลิตช่วงต่าง ๆ.....	55
3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลองเบื้องต้นและชุดทดลองเบื้องต้นที่ใช้งาน.....	60
3.2 ส่วนประกอบหลักของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น.....	63
3.3 ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.4 ห้องอบแห้งขณะปิดฝา และห้องอบแห้งขณะเปิดฝา.....	64
3.5 สภาวะการเพิ่มอุณหภูมิบนแผนภูมิไซโครเมตริก.....	65
3.6 พัดลมดูดอากาศ.....	65
3.7 อุณหภูมิอากาศที่จุดต่าง ๆ ของอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	66
3.8 แสดงขนาดอุปกรณ์อุ่นอากาศด้านหน้า.....	67
3.9 การจัดเรียงท่อภายในอุปกรณ์อุ่นอากาศเป็นแบบแนวทแยง.....	68
3.10 ท่อด้านในของอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	68
3.11 อุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	68
3.12 หอดูดความชื้นแบบคอลัมน์คู่.....	70
3.13 ทิศทางการไหลของอากาศและจุดวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	71
3.14 ทิศทางการไหลของอากาศผ่านหอดูดความชื้นเพื่อหอดูดความชื้นออกจากอากาศ.....	72
3.15 ทิศทางการไหลของอากาศผ่านหอดูดความชื้นเพื่อกำจัดความชื้นออกจากซิลิกาเจล.....	73
3.16 ทิศทางการไหลของอากาศผ่านหอดูดความชื้นเพื่อลดความชื้นของอากาศ.....	74
3.17 ทิศทางการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์ทำอากาศร้อนและอบแห้ง.....	74
3.18 ทิศทางการไหลของอากาศร้อนผ่านอุปกรณ์อุ่นอากาศ และทิศทางการไหลของอากาศที่ใช้กำจัดความชื้นในหอดูดความชื้น.....	75
3.19 กราฟอัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ.....	76
3.20 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	78
3.21 ชุดทดสอบสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้น.....	79
3.22 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบดูดความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นส่วนดูดความชื้น.....	81
3.23 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบคายความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นส่วนคายความชื้น.....	82
3.24 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบคายความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	83
3.25 ขั้นตอนการเตรียมข้าวกล้องงอก.....	84
3.26 ข้าวกล้องงอกหลังการเพาะป่ม 24 ชั่วโมง.....	84
3.27 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้น.....	85
3.28 ระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยวงล้อดูดความชื้น.....	87
3.29 วงล้อดูดความชื้น.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.30 ระบบอบแห้งแบบลมร้อน.....	87
3.31 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้นในส่วนดูดความชื้น.....	87
3.32 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนด้วยระบบวงล้อดูดความชื้นในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น.....	88
3.33 แผนผังแสดงจุดในการวัดสมบัติอากาศของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้น.....	89
3.34 แผนภูมิไซโครเมตริกในกระบวนการลดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้นซึ่งเป็นไปตามกระบวนการอะเดียแบติก.....	90
3.35 แผนผังการทดลองอิทธิพลของอัตราการไหลและอุณหภูมิต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	91
3.36 แผนผังการทดลองการเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ.....	92
3.37 ข้าวกล้องงอกชั้นความหนา 1 เซนติเมตร เกลี่ยให้เรียบเสมอกัน.....	93
3.38 ข้าวกล้องงอกหลังผ่านการหุงด้วยวิธีการหุงสุกด้วยบีกเกอร์.....	97
3.39 ข้าวกล้องงอกบดละเอียด.....	98
3.40 เครื่องวัด Texture analyzer.....	99
3.41 เครื่องวัดสี Hunter lab.....	100
3.42 การวัดสีของเครื่องวัดสี Hunter lab.....	100
4.1 ส่วนประกอบหลักของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น.....	104
4.2 ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น.....	106
4.3 แสดงอุณหภูมิอากาศขาออกจากอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	106
4.4 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศการดูดความชื้น.....	107
4.5 แผนภูมิไซโครเมตริกปริมาณการดูดความชื้นของซิลิกาเจลในนาที่ที่ 15.....	107
4.6 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	108
4.7 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	108
4.8 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส.....	109
4.9 แผนภูมิไซโครเมตริกปริมาณการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสในนาที่ที่ 6.....	109
4.10 แผนภูมิไซโครเมตริกปริมาณการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสในนาที่ที่ 10.....	110
4.11 แผนภูมิไซโครเมตริกปริมาณการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสในนาที่ที่ 10.....	110
4.12 ส่วนประกอบหลักของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น.....	111
4.13 สภาวะอากาศที่ผ่านหอดูดความชื้นและผ่านอุปกรณ์ทำอากาศร้อนเป็น 120 องศาเซลเซียส.....	112
4.14 สภาวะอากาศที่ผ่านอุปกรณ์อุ่นอากาศและอากาศหลังกำจัดความชื้นออกจากซิลิกาเจล.....	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.15 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสมบัติของอากาศนิ่งจากการจำลองการดูดความชื้นของ วงล้อดูดความชื้น.....	114
4.16 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสมบัติของอากาศไหลจากการจำลองการคายความชื้นของ ล้อดูดความชื้น.....	115
4.17 วงล้อดูดความชื้น.....	118
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหล ของอากาศต่าง ๆ เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ.....	119
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการคายความชื้นที่อัตราการไหล ของอากาศต่าง ๆ เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ.....	120
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล.....	121
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารดูดความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหล ของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล.....	121
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล.....	122
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล.....	123
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น ที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$	124
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคายความชื้นของวงล้อ ดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 50°C	125
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคายความชื้นของวงล้อ ดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 60°C	126
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในระบบวงล้อ ดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 90°C	127
4.28 แผนภาพแสดงการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบ วงล้อดูดความชื้น.....	128
4.29 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ ระบบวงล้อดูดความชื้น.....	129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.30	แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสภาวะอากาศในระหว่างกระบวนการดูดความชื้น
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการดูดความชื้นของ วงลวดดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$
4.32	แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสภาวะอากาศในระหว่างกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้น.....132
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคืนสภาพสารดูดความชื้น ของวงลวดดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 60°C133
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในระบบวงลวดดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 90°C134
4.35	แผนผังแสดงสมบัติอากาศในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงลวดดูดความชื้น.....135
4.36	ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับ วงลวดดูดความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศสวนดูดความชื้น.....138
4.37	ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงลวด ความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....138
4.38	เสนอโครงการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงลวดดูดความชื้นที่ อุณหภูมิต่าง ๆ.....139
4.39	เสนอโครงการอัตราการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงลวด ดูดความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....140
4.40	ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในสวนดูดความชื้นของวงลวดดูดความชื้นใน กระบวนการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงลวดดูดความชื้น กับเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....142
4.41	การเปรียบเทียบเส้นโค้งอบแห้งระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลจากการอบแห้งที่ได้ จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลอง Midilli et al.....146
4.42	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลจากการอบแห้ง ที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลอง Midilli et al.....147
4.43	การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับ ระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....152
4.44	การเปรียบเทียบค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งที่ พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....152

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.45 เส้นโค้งการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ.....	153
4.46 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ.....	154



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน: กรณีศึกษาการอบแห้งข้าวกล้อง

แหล่งเงิน เงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2559

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 570,000

บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1

ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2558 ถึง 30 กันยายน พ.ศ. 2559

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ 1) เพื่อออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น 2) เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับชุดสารดูดความชื้นชนิดกัลลิวออกไซด์ดูดความชื้น กับชนิดคอลลิมน์ และ 3) เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง และอิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นมีส่วนประกอบหลักคือ 1) ห้องอบแห้ง 2) อุปกรณ์สร้างอากาศร้อน 3) อุปกรณ์อุ่นอากาศจากความร้อนทิ้งของห้องอบแห้ง 4) พัดลมดูดอากาศ 5) ชุดสารดูดความชื้นชนิดกัลลิวออกไซด์ดูดความชื้น หรือชุดสารดูดความชื้นชนิดคอลลิมน์ หลักการทำงานของระบบคือ อากาศที่มีอุณหภูมิห้องไหลเข้าสู่ชุดสารดูดความชื้น และอุปกรณ์สร้างอากาศร้อนเพื่อใช้ในห้องอบแห้ง ในขณะเดียวกันความชื้นที่อยู่ในเม็ดสารดูดความชื้นถูกกำจัดด้วยอากาศร้อนที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนกับความร้อนทิ้งของระบบอบแห้งด้วยอุปกรณ์อุ่นอากาศ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชุดสารดูดความชื้นชนิดกัลลิวออกไซด์ดูดความชื้น และชนิดคอลลิมน์สามารถลดความชื้นของอากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ อุปกรณ์อุ่นอากาศจากความร้อนทิ้งมีประสิทธิภาพสูงสุดเป็น 78.6% สามารถอุ่นอากาศและใช้ลดความชื้นในสารดูดความชื้นได้ อัตราการไหลของอากาศ (0.04-0.08 m³/s) และอุณหภูมิอบแห้ง (80-120 °C) มีอิทธิพลต่อลักษณะการอบแห้งข้าวกล้องงอกพลังงานที่ใช้ทั้งหมด และคุณภาพของตัวอย่างอบแห้ง โดยที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ทั้งหมดลดลง ปริมาณสารกาบ้าและคุณภาพของตัวอย่างอบแห้งอยู่ในระดับเป็นที่ดี

คำสำคัญ : การอบแห้ง, สารดูดความชื้น, การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่, ข้าวกล้องงอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Design and performance analysis of a solid desiccant assisted hot-air drying system for energy conservation: A case study on germinated brown rice drying

Researcher:

1. Asst. Prof. Dr.Ekkapong Cheevitsopon

Faculty: Engineering, KMITL

Department: Food Engineering

2. Asst. Prof. Dr.Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen

Faculty: Engineering, KMITL

Department: Agricultural engineering

ABSTRACT

The objectives of this research were 1) to design and fabricate a hot air drying system with desiccant bed, 2) to compare performance between desiccant wheel and desiccant column used in the hot air drying system, and 3) to develop drying models and investigate effect of drying methods on quality of germinated brown rice. The hot air drying system with desiccant bed mainly consisted of 1) drying chamber, 2) heaters, 3) air preheater, 4) blowers, and 5) desiccant wheel or desiccant column. To operate the system, ambient air was firstly allowed to flow through the desiccant bed and then blower. Concomitantly, moisture in the desiccant bed was removed by hot air generated by heat exchange between ambient air and outlet air from the drying process using the air preheater (heat recovery). The results show that both the desiccant wheel or desiccant column were effective in air dehumidification significantly. The maximum efficiency of the air preheater was 78.6%, presenting that the preheater was able to increase temperature of air for removing moisture in the desiccant bed subsequently. When using this system for drying of germinated brown rice, it was found that air flow rate (0.04-0.08 m³/s) and drying temperature (80-120 °C) had effects on drying characteristics, total energy consumption, and quality of the dried product. Higher air flow rate and drying temperature resulted in greater drying rate, shorter drying time, and lower total energy consumption. GABA content and quality of dried germinated brown rice were considered good.

Keywords: Drying, desiccant, waste heat recovery, germinated brown rice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน เงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ ซีวีตโสภณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ และลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับหลักการถ่ายเทความร้อนและมวล วิธีการให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ซึ่งวิธีการอบแห้งแบบพาความร้อนเป็นที่นิยมใช้งานกันทั่วไปในระดับอุตสาหกรรม โดยมีตัวกลางในการอบแห้งคือ อากาศร้อน และมีแหล่งพลังงานความร้อนให้กับเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ได้แก่ พลังงานไฟฟ้า การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง พลังงานจากไอน้ำ และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น (สั๊กมณ, 2555; Mujumdar, 2006)

เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากในการอบแห้งผัก ผลไม้ และสมุนไพร เพราะมีราคาและค่าบำรุงรักษาเครื่องค่อนข้างต่ำ เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบถาด เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธด์เบด เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ เครื่องอบแห้งแบบตู้ และเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เป็นต้น เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนมีส่วนประกอบหลัก คือ 1) แหล่งกำเนิดความร้อน 2) พัดลม 3) ห้องอบแห้ง และ 4) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและความเร็วของอากาศ โดยมีหลักการทำงานดังนี้ แหล่งกำเนิดความร้อนจะแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอากาศเป็นอากาศที่มีความร้อนสูง อากาศร้อนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเข้าสู่ห้องอบแห้งและสัมผัสกับผลิตภัณฑ์เพื่อให้เกิดการอบแห้ง และลดปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ สุดท้ายอากาศร้อนที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะเคลื่อนที่ออกจากห้องอบแห้ง ตามลำดับ (Cheevitsopon and Noomhorm, 2011) ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์เนื่องจากสมบัติของอากาศ คือ อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และความเร็วของอากาศ (สมชาติ, 2540) สำหรับการอบแห้งผัก ผลไม้ สมุนไพร หรืออาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และมีสารอาหารที่สำคัญ ซึ่งไวต่อการเสียสภาพเนื่องจากความร้อน จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งไม่สูงเกินไป เพื่อลดอิทธิพลของอุณหภูมิต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น สี การหดตัว ความสามารถในการคืนสภาพ โครงสร้าง และโดยเฉพาะสารอาหารที่สำคัญ จึงส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น (Mujumdar, 2006)

ปัจจุบันนี้มีการศึกษาและประยุกต์ใช้เม็ดสารดูดความชื้นร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อน (Atuonwu et al., 2011) เพื่อลดความชื้นเริ่มต้นของอากาศก่อนเข้าสู่ระบบอบแห้ง ซึ่งช่วยลดระยะเวลาของการอบแห้ง (Madhiyanon et al., 2007) ลดอุณหภูมิอบแห้ง และลดการใช้พลังงานของระบบได้ประมาณ 15-80 % (Ming and Colleagues, 1994; Antonellis et al., 2012) สารดูดความชื้นที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) และ แอคติเวทเต็ด อะลูมินา (Activated alumina) โดยที่สารดูดความชื้นจะสามารถดูดความชื้นหรือคายความชื้นเมื่อมีความแตกต่างกันของค่าความดันไอระหว่างอากาศขึ้นกับผิวสัมผัสของสารดูดความชื้น โดยในกรณีที่ค่าความดันไอรของสารดูดความชื้นน้อยกว่าค่าความดันไอรของอากาศขึ้นจะเป็นกระบวนการดูดความชื้นและในทางกลับกัน ในกรณีที่ค่าความดันไอรของสารดูดความชื้นมากกว่าค่าความดันไอร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอากาศชื้นจะเป็นกระบวนการคายความชื้น เครื่องลดความชื้นในอากาศที่นิยมใช้กันเป็นชนิดกงล้อดูดความชื้น (Desiccant wheel) ซึ่งมีต้นกำลังเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า และมีการใช้ความร้อนจาก Electric heater หรือ Steam heater เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศเพื่อใช้กำจัดความชื้นออกจากสารดูดความชื้น แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในส่วนของการกำจัดความชื้นออกจากเม็ดสารดูดความชื้น เพื่อให้สามารถนำเม็ดสารดูดความชื้นกลับมาใช้ใหม่ได้อีก (Madhiyanon et al., 2007) ซึ่งเป็นปัญหาของการประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นในกระบวนการอบแห้ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดเพื่อให้เกิดการอนุรักษ์พลังงานในระบบอบแห้ง โดยการนำความร้อนที่คุณภาพต่ำ (Low-grade waste heat) จากระบบอบแห้งกลับมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกเพื่อใช้กำจัดความชื้นออกจากเม็ดสารดูดความชื้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นกับกระบวนการอบแห้งมีความเหมาะสมมาก และช่วยลดพลังงานในการอบแห้งลงอย่างชัดเจน วัตถุประสงค์หลักการวิจัยนี้ คือ การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น และเปรียบเทียบสมรรถนะของชุดลดความชื้นชนิดกงล้อดูดความชื้น กับชนิดคอลัมน์ (Column) ซึ่งชุดลดความชื้นชนิดคอลัมน์ประกอบด้วย เม็ดสารดูดความชื้นจำนวน 2 คอลัมน์ โดยแต่ละคอลัมน์จะสลับกันทำงานและควบคุมด้วยวาล์วไฟฟ้าตามเวลาที่ตั้งไว้ ในขณะที่คอลัมน์ใดคอลัมน์หนึ่งดูดซับความชื้นในอากาศไว้ อีกคอลัมน์หนึ่งจะถูกกำจัดความชื้นออกไป ความชื้นที่อยู่ในเม็ดสารดูดความชื้นทั้งชนิดกงล้อดูดความชื้นและชนิดคอลัมน์จะถูกกำจัดด้วยอากาศร้อนที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนกับความร้อนทิ้งของระบบอบแห้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นโดยใช้ความร้อนทิ้งจากระบบอบแห้งแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศและกำจัดความชื้นออกจากสารดูดความชื้น

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับชุดสารดูดความชื้นชนิดกงล้อดูดความชื้น กับชนิดคอลัมน์

1.2.3 เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง และอิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการศึกษาการอบแห้ง คือ ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (KDML 105) ทำให้เกิดการงอกโดยใช้วิธีการแช่น้ำร่วมกับการบ่มเป็นระยะเวลารวม 24 ชั่วโมง

1.3.2 การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับเม็ดสารดูดความชื้นชนิดกงล้อ และชนิดคอลัมน์ และการนำความร้อนทิ้งกลับมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศเพื่อนำอากาศร้อนไปกำจัดความชื้นออกจากเม็ดสารดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับเม็ดสารดูดความชื้นชนิดกึ่งลือ และชนิดคอลลัมน์ และการใช้พลังงาน

1.3.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหลังการอบแห้ง โดยเฉพาะสารแกมมาอะมิโนบิวทิริกแอซิด หรือสารกาบ้า (γ -aminobutyric acid, GABA)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ด้านวิชาการ

แบบแปลนและเครื่องต้นแบบสำหรับการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นชนิดกึ่งลือดูดความชื้น และชนิดคอลลัมน์ เพื่อเกิดการพัฒนาต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมการอบแห้งอาหาร และโดยเฉพาะการอบแห้ง ผัก ผลไม้ และสมุนไพร ที่มีสารอาหารสำคัญ การเผยแพร่ผลงานวิชาการในการประชุมระดับนานาชาติอย่างน้อย 1 เรื่อง หรือระดับชาติอย่างน้อย 1 เรื่อง และตีพิมพ์ในวารสารอย่างน้อย 1 เรื่อง

1.4.2 ด้านนโยบาย

เป็นการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานตามนโยบายของกระทรวงพลังงานที่ต้องการลดระดับการใช้พลังงานต่อผลผลิตลงร้อยละ 30 ภายในปี พ.ศ. 2579

1.4.3 ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์

เป็นแนวทางการพัฒนาให้เกิดการประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรมอาหารอบแห้ง ลดต้นทุนในกระบวนการผลิต และสร้างร่วมมือกันระหว่างนักวิจัยและโรงงานอุตสาหกรรม

1.4.4 ด้านสังคมและชุมชน

เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งที่มีคุณภาพ และลดต้นทุนพลังงานในกระบวนการผลิตลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying) เป็นกระบวนการแปรสภาพของเหลว ของเหลวกึ่งแข็ง หรือแม้กระทั่งของแข็ง ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายในสภาพของของแข็ง โดยการระเหยเอาของเหลวส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดออกไปจากวัสดุโดยการให้ความร้อน ทั้งนี้อาจยกเว้นกรณีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ในด้านการใช้พลังงาน การอบแห้งเป็นกระบวนการที่สิ้นเปลืองพลังงานมากพอๆ กับการกลั่น โดยในประเทศอุตสาหกรรม เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ฝรั่งเศส และอังกฤษ การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงถึงร้อยละ 10-15 ของความต้องการพลังงานในภาคอุตสาหกรรมของประเทศ แต่อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งแปรเปลี่ยนไปตามประเภทของอุตสาหกรรม (สัคมณ, 2555)

โดยทั่วไปแล้ว วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการอบแห้งก็คือ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์เกษตรและอาหาร) เนื่องจากการอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีผลทำให้จุลินทรีย์ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสียไม่สามารถเจริญได้ ปฏิกริยาเคมี เช่น ปฏิกริยาออกซิเดชัน ก็ยังมีอัตราการเกิดปฏิกริยาที่ต่ำลงมากเมื่อปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง การอบแห้งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ จากการอบแห้งอีกด้วย

2.1.1.1 หลักการพื้นฐานของการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออก โดยการระเหยความชื้นในวัสดุและความร้อนที่ถ่ายเทไปยังวัสดุขึ้นเป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540) เมื่ออากาศร้อนหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหาร และน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ น้ำจะแพร่ผ่านอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่

2.1.1.2 ความชื้นในวัสดุ (Moisture Content, M)

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ความชื้นฐานเปียกและความชื้นฐานแห้ง ความชื้นฐานเปียก คือ อัตราส่วนของน้ำที่อยู่ในวัสดุกับน้ำหนักทั้งหมดของวัสดุ นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์โดยทั่ว ๆ ไปอ้างถึงในภาพของเปอร์เซ็นต์

$$M_w = \frac{(w - d)}{w} \times 100\% \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นฐานแห้ง คือ อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในวัสดุกับน้ำหนักแห้งของวัสดุ คำนวณน้ำหนักแห้งของวัสดุเป็นค่าคงที่หรือเกือบคงที่ในระหว่างการอบแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} \times 100\% \quad (2.2)$$

d คือ มวลของวัสดุแห้งที่ไม่มีน้ำ, kg

M_d คือ ความชื้นฐานแห้ง, %

M_w คือ ความชื้นฐานเปียก, %

w คือ มวลของวัสดุเปียก, kg

2.1.1.3 ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, M_{eq})

ความชื้นสมดุล คือ ความชื้นของวัสดุในขณะที่มีความดันไอน้ำภายในวัสดุสมดุลกับความดันไอน้ำของอากาศแวดล้อมวัสดุนั้น โดยความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมวัสดุ

2.1.1.4 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

อัตราการอบแห้ง คือ ความชื้นที่ออกจากวัสดุต่อช่วงเวลาการอบแห้ง สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่วัสดุปรับตัวเข้าสู่ภาวะการอบแห้ง ช่วงอัตราการทำให้แห้งคงที่ และช่วงอัตราการทำให้แห้งลดลง หรือมวลของเหลวที่ระเหยต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อเวลา สมการของอัตราการอบแห้ง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.3)

$$R = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \quad (2.3)$$

เมื่อ R คือ อัตราการแห้งหรืออัตราการระเหย ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$)

A คือ พื้นที่ที่เกิดการระเหย (m^2)

$\frac{dm}{dt}$ คือ มวลของน้ำที่ระเหยต่อหนึ่งหน่วยเวลา (kg/h)

ความสัมพันธ์ของมวลของน้ำในอาหารและความชื้นในอาหาร สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\frac{M}{dm} = \frac{WM}{MdW} = \frac{M}{lA\rho_s dW} = lA\rho_s \quad (2.4)$$

เมื่อ m คือ มวลของน้ำในสารชิ้น (kg)

M คือ มวลของสารแห้งสนิท (kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W คือ ความชื้นในอาหารฐานแห้ง (kg water/kg dry solid)

l คือ ความหนาของสารแห้งสนิท (m)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของสารแห้งสนิท (kg/m)

แทนค่า dm ในสมการที่ (2.3) จะได้

$$R = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = -l\rho_s \frac{dW}{dt} \quad (2.5)$$

$$dT = -\frac{M}{A} \frac{dW}{R} = -l\rho_s \frac{dW}{dt}$$

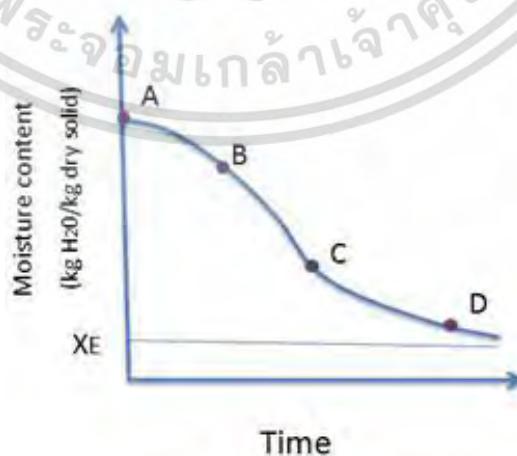
เวลาที่ใช้ในการทำแห้ง (drying time) หาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (2.5) จากความชื้น เริ่มต้น (W_0) ถึงความชื้นที่เวลาใดๆ (W_t) จะได้

$$t = -\frac{M}{A} \int_{W_0}^{W_t} \frac{dR}{R} = -l\rho_s \int_{W_0}^{W_t} \frac{dW}{R} \quad (2.6)$$

เนื่องจาก $W_0 > W_t$ เสมอ ดังนั้น สามารถเขียนสมการที่ (2.7) ใหม่ ดังต่อไปนี้

$$t = -\frac{M}{A} \int_{W_t}^{W_0} \frac{dR}{R} = -l\rho_s \int_{W_t}^{W_0} \frac{dW}{R} \quad (2.7)$$

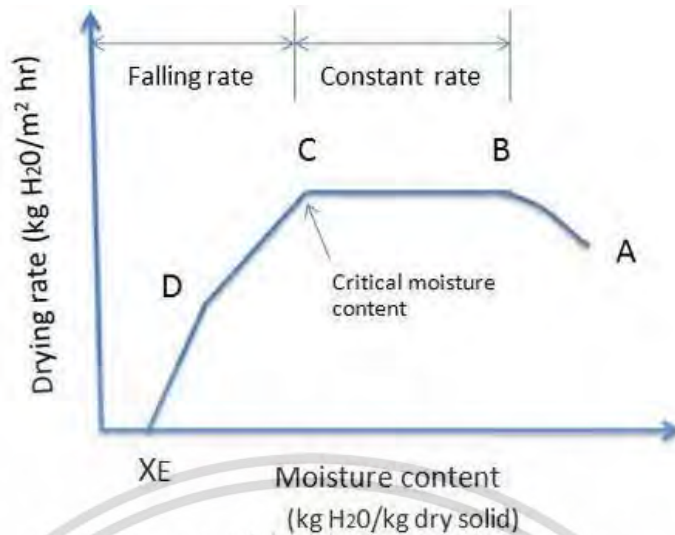
จากสมการที่ (2.7) หาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งได้โดยการเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{R}$ และ ที่เวลาใดๆ จากนั้นหาพื้นที่ใต้กราฟจาก W_t ถึง W_0 แล้วนำมาคูณด้วยค่า $\frac{M}{A}$ หรือ $l\rho_s$ ก็จะได้เวลาที่ใช้การทำแห้งที่ต้องการ กราฟระหว่างอัตราการอบแห้ง (drying rate) และความชื้นในสารนั้น (moisture content) แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังภาพที่ 2.1 และ 2.2 คือ



ภาพที่ 2.1 กราฟแสดงความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการอบแห้ง

ที่มา : พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับเวลาในการอบแห้ง
ที่มา : พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2558

1) ช่วงที่วัสดุปรับตัวเข้าสู่สภาวะการอบแห้ง (ช่วง AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่วัสดุที่ใช้ในการอบแห้ง มีความชื้นเริ่มต้น (A) ที่สูงอยู่ ผิววัสดุจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมนร้อนกับชิ้นวัสดุ อัตราการอบแห้งค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (ช่วง BC) เป็นช่วงที่ผิวของวัสดุมีน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้อัตราการระเหยของน้ำจากผิววัสดุ ขึ้นอยู่กับความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุ (External Heat and Mass Transfer Resistance) เท่านั้น กล่าวคือ หากความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุมีค่าน้อย น้ำจะระเหยจากผิววัสดุได้อย่างรวดเร็ว อัตราการอบแห้งจะมีค่าสูง ความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุ ระบุโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer Coefficient) ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองค่านี้ ขึ้นอยู่กับความเร็วและทิศทางไหลของตัวกลางการอบแห้งผ่านวัสดุเป็นหลัก ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ อุณหภูมิผิวของวัสดุจะมีค่าคงที่อยู่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของตัวกลางการอบแห้งเสมอ ทั้งนี้ เนื่องจากผิวของวัสดุมีชั้นฟิล์มของน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลาในตัวเอง เมื่อความชื้นของวัสดุลดลงจนถึงค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ค่าความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content, จุด C) ผิวของวัสดุจะเริ่มไม่มีชั้นฟิล์มของน้ำหล่อเลี้ยงอยู่มากพอที่จะทำให้เกิดการระเหยของน้ำด้วยอัตราที่เท่ากับอัตราการระเหยของน้ำในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ประกอบกับระยะทางที่น้ำต้องเคลื่อนที่จากภายในมายังผิววัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น (เนื่องจากน้ำที่อยู่บริเวณใกล้ผิววัสดุ เคลื่อนที่ออกไปทดแทนน้ำที่ระเหยจากผิววัสดุในช่วงแรกๆของการอบแห้งจะหมดแล้ว) ทำให้น้ำเคลื่อนที่มาที่ผิววัสดุไม่ทันต่อการระเหย อัตราการอบแห้งในช่วงนี้จึงมีค่าลดลง

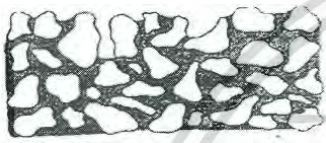
การคำนวณอัตราการอบแห้งในช่วงนี้ สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$R_c = \frac{h}{\lambda} (T_v - T_i) \quad (2.8)$$

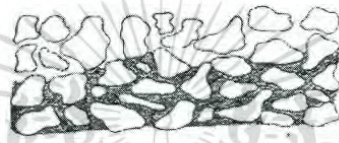
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ R_c คือ อัตราการอบแห้งในช่วงความเร็วคงที่ (w/m)
 h_v คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient, w/m² °C)
 T_v คือ อุณหภูมิของลมร้อน (°C)
 T_i คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (°C)

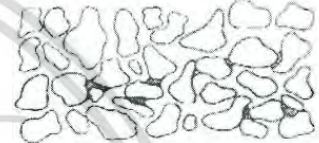
3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (ช่วง CD และ DE) ในช่วงนี้อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในวัสดุเป็นหลัก กระบวนการอบแห้งในช่วงนี้จึงขึ้นอยู่กับทั้งสภาวะในการอบแห้งและชนิดของวัสดุที่นำมาอบแห้ง และแตกต่างจากการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งกระบวนการอบแห้งขึ้นอยู่กับสภาวะการอบแห้งเป็นส่วนใหญ่ (ชนิดของวัสดุมีผลน้อย) ท้ายที่สุดความชื้นของวัสดุก็จะลดลงจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล



ภาพที่ 2.3 ช่วงอัตราการอบแห้งเริ่มลดลง



ภาพที่ 2.4 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง



ภาพที่ 2.5 ช่วงสิ้นสุดการอบแห้ง

2.1.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

การทำแห้งอาหารโดยทั่วไปอาศัยความร้อนส่งผ่านเข้าไปให้น้ำในอาหาร เพื่อทำให้น้ำในอาหารเคลื่อนที่และระเหยออกจากผิวอาหาร ในขณะที่ทำแห้งจะเกิดปรากฏการณ์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ การส่งผ่านความร้อน (Heat transfer) จากแหล่งให้ความร้อนไปยังน้ำในอาหารและการเคลื่อนที่ของมวล (mass-transfer) ของน้ำในอาหารมาที่ผิวอาหารเพื่อระเหยออกไป ดังนั้น อัตราการทำแห้งโดยทั่วไปจะช้าหรือเร็วเพียงใด ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำในอาหาร ซึ่งปัจจัยต่างที่มีผลต่อประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนและการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารนั้น ย่อมจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งของอาหารซึ่งอัตราการอบแห้งโดยทั่วไปจะหมายถึงอัตราการระเหยของน้ำหรือการลดลงของปริมาณน้ำในอาหาร (โดยน้ำหนัก) ต่อหน่วยเวลา โดยปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการทำแห้งอาหารพอจะกล่าวได้ดังต่อไปนี้

1) สภาพธรรมชาติของอาหาร

สภาพธรรมชาติของอาหารหรือคุณลักษณะของอาหารที่นำมาทำแห้งนั้น เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดประการแรกที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของอาหาร สภาพธรรมชาติของอาหารนั้นจะเป็นอย่างไร ขึ้นกับโครงสร้างสภาพของน้ำและองค์ประกอบทางเคมีในอาหารดังกล่าว ซึ่งสภาพธรรมชาติของอาหารจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งคือ ถ้าสภาพธรรมชาตินี้เอื้ออำนวยหรือสะดวกต่อการส่งผ่านของความร้อนมายังโมเลกุลของน้ำ และง่ายต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำและไอน้ำในอาหารระเหยออกไปที่ผิวอาหาร จะทำให้อัตราการทำแห้งของอาหารชนิดนั้นเป็นไปได้เร็ว

2) ขนาด ภาพร่าง การเตรียมและการจัดเรียงอาหาร

อาหารที่มีขนาดและภาพร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรอาหารมาก จะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งผ่านความร้อนไปทั่วชิ้นอาหาร เพื่อระบายน้ำออกจากชิ้นอาหารได้ดีขึ้น ทำให้อัตราเร็วของการทำแห้งเร็วขึ้น โดยทั่วไปอาหารที่อยู่ในสภาพที่มีภาพร่าง หรืออยู่ในสภาพของแข็ง ก่อนการนำมาทำแห้ง มักมีการตัดแต่งและลดขนาดก่อนก่อนที่จะนำมาทำแห้ง ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว ก่อนการทำแห้ง นอกจากการลดขนาดแล้ว การจัดเตรียมอาหารในลักษณะอื่น ๆ ก็มีผลต่ออัตราการทำแห้ง เช่น การลวก หรือการนวดคลึง ก็จะทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำง่ายขึ้น ส่งผลให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น เป็นต้น รวมถึงปริมาณอาหารก็มีผลต่ออัตราการทำแห้ง เช่นในการทำแห้งแบบถาด ถ้าปริมาณอาหารต่อถาดมากเกินไป จะทำให้อาหารบางส่วนได้รับความร้อนได้ยากและไม่ทั่วถึง ทำให้บริเวณดังกล่าวมีอัตราการทำแห้งช้ากว่า ดังนั้นจึงควรมีการจัดเรียงอาหารและจัดปริมาณในการทำแห้งให้เหมาะสม เพื่อให้อาหารทุกชิ้นได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึง

3) สภาพขณะทำแห้ง

ถ้าสภาพขณะทำแห้งเอื้ออำนวยให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนเข้าไปในอาหารได้ดี และขณะเดียวกันช่วยทำให้น้ำหรือไอน้ำเคลื่อนที่ออกจากอาหารได้เร็วขึ้น จะเป็นผลทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น

ก) อุณหภูมิ ถ้าตัวกลางที่ให้ความร้อนแก่น้ำในอาหาร เช่น อากาศร้อนในเครื่องทำแห้งแบบตู้อุณหภูมิสูง จะมีผลทำให้อุณหภูมิของอากาศร้อนกับอุณหภูมิของน้ำในอาหารนั้นมีความแตกต่างกันมาก ให้ความร้อนส่งผ่านให้กับน้ำในอาหารได้ดี ซึ่งจะทำให้ น้ำในอาหารเคลื่อนที่และระเหยออกจากอาหารได้ง่าย และทำให้อัตราการทำแห้งสูงขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของการทำแห้งที่สูงขึ้นโดยทั่วไปมักจะทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้นก็ตาม แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งอาหารนั้นควรให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ไม่ควรสูงเกินไป เนื่องจากจะมีผลต่อการเสื่อมเสียคุณภาพและคุณค่าทางอาหารของอาหารที่นำมาทำแห้งเนื่องจากผลของความชื้น

ข) ความชื้นสัมพัทธ์ ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขณะทำแห้งนั้นมีค่าสูง จะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากชิ้นอาหารมาสู่อากาศโดยรอบนั้นเป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากอากาศภายนอกนั้นมีปริมาณน้ำสูงอยู่แล้ว

ค) ความดันบรรยากาศ ถ้าลดความดันของบรรยากาศในขณะที่ทำแห้ง จะทำให้จุดเดือดของน้ำในอาหารนั้นลดลง ทำให้การเคลื่อนตัวและการระเหยของน้ำออกจากอาหารได้ง่ายขึ้น โดยน้ำสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำลง เหมาะที่จะใช้ทำแห้งอาหารเสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องความชื้น

ง) ความเร็วลม ในขณะที่ทำแห้งอาหารถ้าบรรยากาศโดยรอบมีลมพัดผ่าน จะช่วยทำให้น้ำและไอน้ำเคลื่อนมาที่ผิวอาหารนั้น ระเหยออกจากผิวอาหารได้รวดเร็วขึ้น ทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น

2.1.2 สมบัติไซโครเมตริก

2.1.2.1 แผนภูมิไซโครเมตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์สมบัติของอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ (หรือความชื้น) เนื่องจากความชื้นมีความสำคัญอย่างมากต่อสภาวะการแปรสภาพอาหารและการเก็บรักษาอาหาร เช่น ปรับอากาศเพื่อการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (cold storage) โดยการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ การทำแห้ง การแช่เยือกแข็ง เป็นต้น

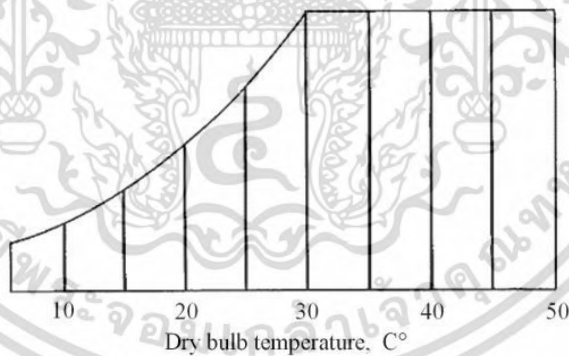
แผนภูมิไซโครเมตริกได้มีการสร้างขึ้นโดยหลายหน่วยงาน ซึ่งแผนภูมิของแต่ละหน่วยงานจะมีโครงสร้างที่สำคัญเหมือนกัน แต่อาจจะมีรายละเอียดปลีกย่อยที่แตกต่างกัน เช่น สเกล หน่วย เป็นต้น

แผนภูมิไซโครเมตริก เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการหาค่าสมบัติของอากาศได้อย่างรวดเร็ว ไม่ต้องใช้เวลาในการคำนวณ สามารถอ่านค่าได้เลย ดังนั้นขอบเขตของแผนภูมิจึงเป็นขอบเขตที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยปกติแผนภูมินี้จะใช้ได้สำหรับความดันคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งความดันที่นิยมใช้คือความดันที่ระดับน้ำทะเล ที่ความดันนี้มีแผนภูมิอยู่ด้วยกัน 3 ระดับอุณหภูมิ คือ แผนภูมิสำหรับอุณหภูมิต่ำ (ช่วง -40 - 50 องศาฟาเรนไฮต์) แผนภูมิสำหรับอุณหภูมิปานกลาง (ช่วง 32 - 120 องศาฟาเรนไฮต์) และแผนภูมิสำหรับอุณหภูมิสูง (ช่วง 60 - 250 ฟาเรนไฮต์) ในกรณีที่ต้องการทราบค่าของอากาศที่ความดันอื่นๆ ซึ่งไม่มีในแผนภูมิ สามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการสมบัติของอากาศ

2.1.2.2 ส่วนประกอบของแผนภูมิไซโครเมตริก

1) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry – bulb Temperature)

โดยทั่วไปแล้วจะแสดงบนแกนนอนของแผนภูมิ เป็นอุณหภูมิที่เครื่องวัดอุณหภูมิสัมผัสกับอากาศโดยตรง สามารถวัดและอ่านค่าได้ด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบธรรมดา



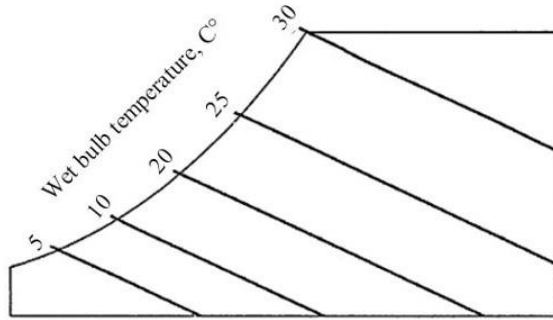
ภาพที่ 2.6 เส้นอุณหภูมิกะเปาะแห้งบนแผนภูมิไซโครเมตริก

ในแผนภูมิไซโครเมตริก เส้นแสดงอุณหภูมิกะเปาะแห้งจะเป็นเส้นตามแนวตั้ง อาจเอียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 2.6 โดยค่าจะเรียงจากน้อยไปหามาก จากซ้ายมือไปยังขวามือ เส้นแต่ละเส้นหมายถึงอุณหภูมิคงที่แต่ละค่า

2) อุณหภูมิกะเปาะเปียก (Wet – bulb Temperature)

โดยทั่วไปจะแสดงบนเส้นแนวทแยงของแผนภูมิ อุณหภูมิกะเปาะเปียก สามารถวัดและอ่านค่าได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่มีผ้าหรือสำลีชุบน้ำหุ้มอยู่ที่กระเปาะ อุณหภูมินี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอากาศในจุดที่ทำการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

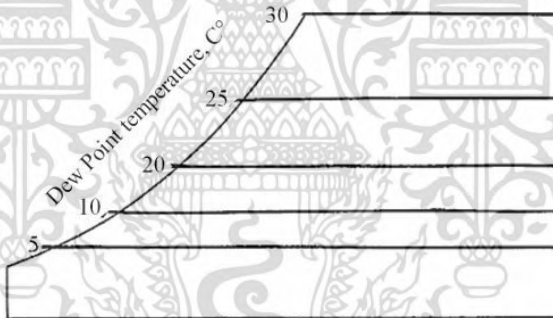


ภาพที่ 2.7 เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกบนแผนภูมิไซโครเมตริก

ในแผนภูมิไซโครเมตริก เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะเอียงทแยงจากซ้ายไปขวาดังภาพที่ 2.7 โดยค่าจะเพิ่มจากน้อยไปมาก จากด้านล่างขึ้นด้านบน เส้นแต่ละเส้นหมายถึงอุณหภูมิกระเปาะแห้งแต่ละค่า อุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียกจะเท่ากันที่เส้นอากาศอิ่มตัว (Saturated Temperature) หรือจุดที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100%

3) อุณหภูมิจุดกลั่นตัว (Dew - point Temperature)

คือ อุณหภูมิที่ทำให้ความชื้นในอากาศเริ่มกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ เมื่ออากาศถูกลดอุณหภูมิที่ความดันคงที่

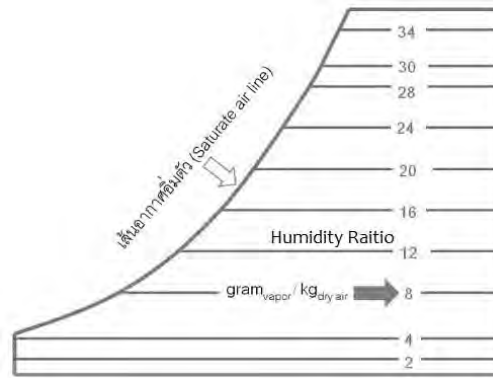


ภาพที่ 2.8 เส้นอุณหภูมิจุดกลั่นตัวบนแผนภูมิไซโครเมตริก

อุณหภูมิจุดกลั่นตัวหรืออุณหภูมิหยดน้ำค่าที่ภาวะใดๆ อ่านค่าได้โดยการลากเส้นแนวนอนจากสภะนั้นๆ ไปทางซ้ายของแผนภูมิจนตัดเส้นโค้งความชื้นสัมพัทธ์ 100% (Saturated Temperature) และค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่อ่านได้ ณ จุดนั้นคืออุณหภูมิจุดกลั่นตัว

4) ความชื้น

ความชื้นจำเพาะ (Specific Humidity) หรือ อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำในอากาศกับมวลของอากาศแห้ง ($g_{\text{vapor}}/kg_{\text{dry air}}$) ในปริมาตรอากาศที่พิจารณา



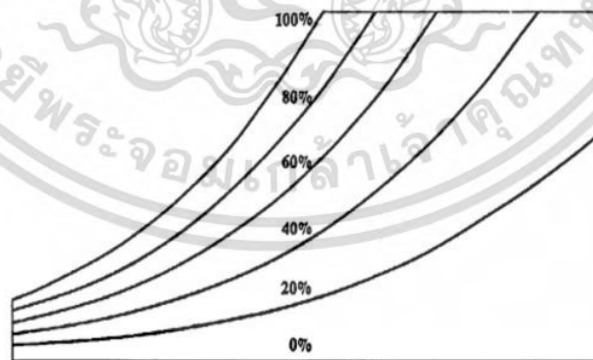
ภาพที่ 2.9 เส้นแสดงอัตราส่วนความชื้นบนแผนภูมิไซโครเมตริก

อัตราส่วนความชื้นในแผนภูมิไซโครเมตริก อ่านค่าได้โดยลากที่เส้นไอน้ำอิ่มตัว จากซ้ายมือ ไปยังด้านขวามือ ดังภาพที่ 2.9 โดยที่อัตราส่วนความชื้นจะไล่จากน้อยไปมาก จากล่างขึ้นบน สำหรับในกรณีที่ต้องใช้การคำนวณ สามารถหาค่าอัตราส่วนความชื้นได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Y = \frac{0.622P_v}{P_{atm} - P_v} \tag{2.9}$$

Y คือ อัตราส่วนความชื้น, $g_{vapor}/kg_{dry\ air}$
 P_v คือ แรงดันย่อยของไอน้ำในอากาศ, kN/m^2
 P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ, kN/m^2

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) หมายถึง อัตราส่วนของความดันไอน้ำที่ปริมาณไอน้ำจริงในอากาศต่อความดันไอน้ำที่ปริมาณไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน



ภาพที่ 2.10 เส้นความชื้นสัมพัทธ์บนแผนภูมิไซโครเมตริก

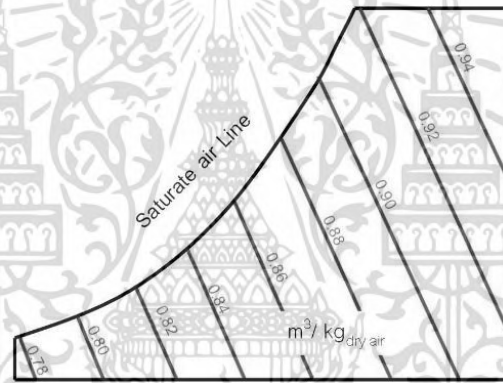
เส้นแสดงความชื้นสัมพัทธ์ในแผนภูมิไซโครเมตริกแสดงในภาพที่ 2.10 โดยเส้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% จะเป็นเส้นเดียวกับเส้นอากาศอิ่มตัว หรือจุดที่อากาศสามารถรองรับปริมาณไอน้ำได้สูงสุดที่อุณหภูมิต่างๆ ถัดจากเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100% ค่าความชื้นสัมพัทธ์ก็จะลดลงเรื่อยๆ จนเป็น 0% ที่เส้นตามแนวนอน สำหรับในกรณีที่ต้องใช้การคำนวณ สามารถหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้จากสมการดังต่อไปนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$RH = \frac{P_v}{P_g} \times 100 \quad (2.10)$$

RH	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์, %
P_v	คือ	แรงดันย่อยของไอน้ำในอากาศ, kN/m^2
P_g	คือ	แรงดันย่อยของอากาศ, kN/m^2

5) ปริมาตรจำเพาะของอากาศ (Specific Volume)

ปริมาตรจำเพาะ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรต่อมวลของอากาศ (m^3/kg) เนื่องจากอากาศมีคุณสมบัติในการขยายตัวตามอุณหภูมิ ในสภาวะความดันคงที่ ถ้าอุณหภูมิต่ำ อากาศจะมีปริมาตรจำเพาะน้อย หมายถึง น้ำหนักอากาศต่อหน่วยปริมาตรจะมาก ในทางตรงกันข้าม ถ้าอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น อากาศจะขยายตัวออก ทำให้ปริมาตรจำเพาะของอากาศมากขึ้น น้ำหนักอากาศต่อหน่วยปริมาตรจะลดลงหรืออากาศเบาขึ้นนั่นเอง



ภาพที่ 2.11 เส้นปริมาตรจำเพาะของอากาศบนแผนภูมิไซโครเมตริก

สำหรับเส้นแสดงปริมาตรจำเพาะในแผนภูมิไซโครเมตริกนั้น จะเป็นเส้นทแยงจากซ้ายไปขวา โดยเส้นที่อยู่ทางด้านซ้ายมือจะมีค่าปริมาตรจำเพาะน้อยและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไปสู่ด้านบน ดังภาพที่ 2.11 สำหรับในกรณีที่ต้องใช้การคำนวณ สามารถหาค่าปริมาตรจำเพาะได้จากสมการดังต่อไปนี้

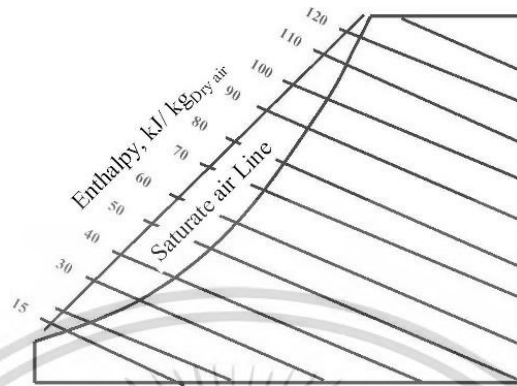
$$V = \frac{R_a T}{P_a} = \frac{R_a T}{(P_{atm} - P_v)} \quad (2.11)$$

V	คือ	ปริมาตรจำเพาะ, m^3/kg
R_a	คือ	ค่าคงที่ของอากาศแห้ง, 0.2870 kJ/kg.K
T	คือ	อุณหภูมิในสภาวะที่พิจารณา, K
P_{atm}	คือ	ความดันบรรยากาศ, kN/m^2
P_v	คือ	แรงดันย่อยของไอน้ำ, kN/m^2
P_a	คือ	แรงดันย่อยของอากาศแห้ง, kN/m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เอนทัลปี (Enthalpy)

เอนทัลปีคือ ค่าพลังงานภายในของของไหลบวกกับพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความดันและปริมาตร



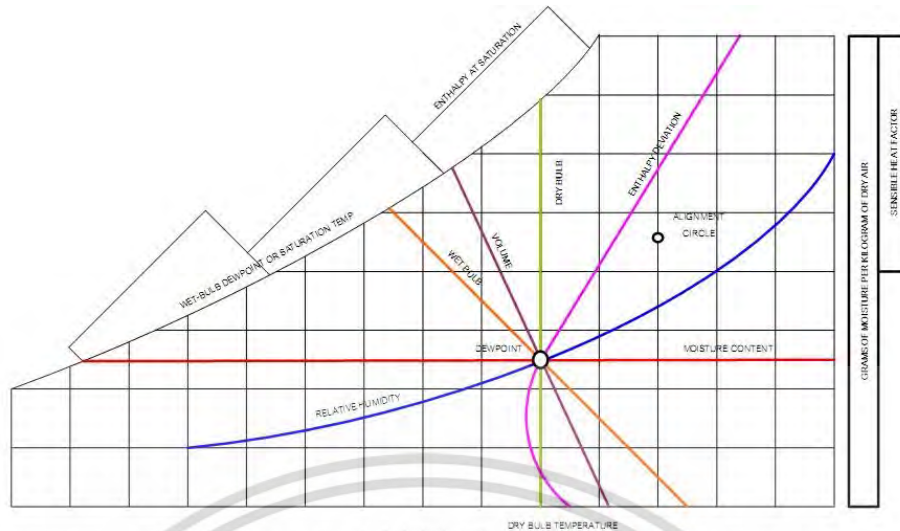
ภาพที่ 2.12 เส้นเอนทัลปีบนแผนภูมิไซโครเมตริก

เส้นแสดงระดับค่าเอนทัลปีในแผนภูมิไซโครเมตริกนั้นจะอยู่ทางด้านซ้ายมือสุดหรือด้านหน้าของเส้นอากาศอิ่มตัว โดยค่าจะเพิ่มจากน้อยไปหามากตามอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้น สำหรับในกรณีที่ต้องใช้การคำนวณ สามารถหาค่าเอนทัลปีของอากาศได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$h = C_p T + Y h_g \quad (2.12)$$

h	คือ	ค่าเอนทัลปี, kJ/kg
C_p	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, 1 kJ/kg.K
T	คือ	อุณหภูมิในสถานะที่พิจารณา, K
Y	คือ	อัตราส่วนความชื้น
h_g	คือ	ค่าเอนทัลปีของไอน้ำอิ่มตัว, kJ/kg

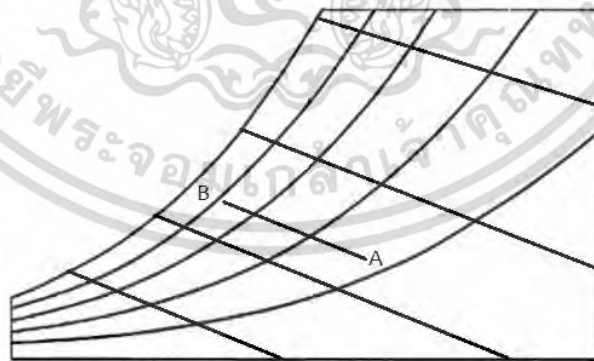
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.13 ค่าสมบัติของอากาศบนแผนภูมิไซโครเมตริก

2.1.2.3 เส้นกระบวนการอบแห้งบนแผนภูมิไซโครเมตริก

แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงกระบวนการอบแห้ง จะแสดงถึงกระบวนการอะเดียบาติก เซททูเรชัน (Adiabatic Saturation) คือ ความร้อนของการระเหยที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ จะใช้จากอากาศร้อนเท่านั้น ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำความร้อน หรือการแผ่รังสีความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้น ขณะที่อากาศผ่านมวลดังกล่าว ความร้อนสัมผัสของอากาศส่วนใหญ่จะเปลี่ยนเป็นความร้อนแฝงเมื่อน้ำอยู่ในสภาวะเป็นไอในอากาศมากขึ้น จากภาพที่ 2.14 จะเห็นวาระหว่างกระบวนการ อุณหภูมิ กระเปาะแห้งจะลดลง ขณะที่เอนทัลปียังคงที่ หรือก็คืออุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่นั่นเอง ขณะที่อากาศได้รับความชื้นจากผลิตภัณฑ์มากขึ้น อัตราส่วนความชื้นจะเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.14 กระบวนการอบแห้งจาก A ไป B

2.1.3 ประเภทของสารดูดความชื้น

สารดูดความชื้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะและความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปดังนี้ (บริษัทธนพลวานิช, 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1 ซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลเป็นสารสังเคราะห์ในภาพของซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide, SiO₂) ส่วนประกอบของซิลิกาเจลแสดงอยู่ในตารางที่ 2.1 ที่มีพื้นที่ผิวมากประมาณ 800 m² ต่อ 1 g การดูดความชื้นของ ซิลิกาเจลเป็นลักษณะทางกายภาพ (Physical Adsorption) โดยซิลิกาเจลกักเก็บความชื้นไว้ที่โพรงโครงสร้างด้านใน สมบัติของซิลิกาเจลแสดงอยู่ในตารางที่ 2.2 ซิลิกาเจลถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในบรรจุภัณฑ์อาหารและยา โดยปกติ ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้ระหว่าง 24-40% ของน้ำหนักตัวเอง และมีประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25°C ตารางที่ 2.3 แสดงความสามารถในการดูดความชื้นของซิลิกาเจลหากอุณหภูมิสูงกว่านี้ ประสิทธิภาพ ในการดูดความชื้นจะลดลงไปเรื่อยๆ และมีโอกาสที่จะคายความชื้น (Desorption) ออกจากตัวเองเช่นกัน โดยเหตุนี้ การใช้ซิลิกาเจลกับประเทศร้อนชื้น ดังเช่นประเทศไทย จึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่งต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรอบข้าง

ซิลิกาเจล ที่ใช้งานอยู่ทั่ว ๆ ไปมี 2 ชนิด คือ เม็ดสีใสๆขนาด 2-5 มิลลิเมตร และเม็ดสีน้ำเงิน (Indicating Silica gel) ขนาดเท่า ๆ กัน คุณสมบัติของซิลิกาเจลทั้ง 2 ชนิดนี้ แตกต่างกันตรงที่มีการเติมโคบอลต์คลอไรด์ลงไปทำให้มีสีน้ำเงินบนซิลิกาเจล สีน้ำเงินนี้จะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพู เมื่อความชื้นสัมพัทธ์รอบข้างสูงขึ้นมากกว่า 40% ซิลิกาเจลชนิดนี้ ตารางที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนสีของซิลิกาเจลตามปริมาณความชื้นที่ซิลิกาเจลดูดไว้ มีประโยชน์ในการสังเกตได้โดยง่ายว่าสินค้ามีโอกาสเสี่ยงต่อความชื้นมากน้อยเพียงไร หากซิลิกาเจลที่ใช้อย่างยังมีสีน้ำเงินหรือไม่เปลี่ยนสีมากนัก แสดงว่าความชื้นรอบข้างถูกซิลิกาเจลดูดไว้และมีระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ ในทางตรงกันข้าม หากสีของซิลิกาเจลเปลี่ยนเป็นสีชมพู แสดงว่าความชื้นรอบข้างนั้น มีปริมาณที่สูงเกินกว่าที่ซิลิกาเจลจะดูด และควบคุมให้อยู่ในระดับที่ต่ำได้ อย่างไรก็ตาม การใช้ซิลิกาเจลชนิดสีน้ำเงินนี้ ควรระมัดระวังการใช้งานเป็นอย่างยิ่ง เพราะหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับสุขอนามัยระดับโลก บางแห่ง เช่น European Commission และ International Agent for Research on Cancer ได้จัดโคบอลต์คลอไรด์ไว้อยู่ในประเภทของสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็ง (carcinogen) หากสูดดมเข้าไป และอาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวได้

ประโยชน์ของซิลิกาเจล ได้แก่ ซิลิกาเจลมีความสามารถในการดูดความชื้นได้สูง ไม่มีวันหมดอายุ ไม่ใช้วัตถุไวไฟ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยวิธีการอบที่อุณหภูมิ 60°C

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของซิลิกาเจล ที่มา : POWERDRY, 2559

แร่ธาตุ	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	ZrO ₂	Na ₂ O	Ig.loss
ปริมาณ (%)	99.71	0.01	0.19	0.09	0.01	0.02	0.02	0.02

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางกายภาพของซิลิกาเจล ที่มา : POWERDRY, 2559

จุดเดือดเท่ากับ 2900 °F หรือ 1900 °C	ความหนาแน่นเท่ากับ 43 lb/ft ³ หรือ 0.70 ถึง 0.78 g/ M ³
พื้นที่ผิวเท่ากับ 650 m ² / g	อัตราการระเหยของน้ำ น้อยกว่า 10% ที่ 175 °F
ลักษณะทางกายภาพเป็นเม็ดสีน้ำเงินหรือ เม็ดใส	ความต้านทานเท่ากับ 4,000 ถึง 7,000 Wcm
ลักษณะทางกายภาพไม่ละลายน้ำ	ความชื้นในสารน้อยกว่า 3.0%

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการดูดความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 30°C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ
ที่มา : POWERDRY, 2559

ความชื้นสัมพัทธ์	ความสามารถในการดูดความชื้น
20%	> 10%
50%	> 20%
90%	> 30%

ตารางที่ 2.4 ความหมายของสีที่แสดงบนเม็ดสีซิลิกาเจล ที่มา : POWERDRY, 2559

ปริมาณความชื้นในซิลิกาเจล	สี
20%	สีฟ้า
35%	สีม่วง
50%	สีชมพู

2.1.3.2 ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ หรือดินไดอะตอม

ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธเป็นดินที่เกิดจากซากพืชเซลล์เดียว ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เมื่อได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูง และเติมสารเร่งปฏิกิริยาบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride) จะมีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้ดีมากถึง 70-80% ของน้ำหนักตัว เมื่อเทียบกับซิลิกาเจลแล้ว อัตราเร็วในการดูดความชื้นของไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ จะต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 25°C และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 75% ซิลิกาเจลจะดูดความชื้นจนอิ่มตัวภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง ในขณะที่เดียวกัน ต้องใช้เวลาหลายวันหรือเป็นเดือนสำหรับไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ ที่จะดูดความชื้นจนอิ่มตัว อย่างไรก็ตาม การดูดความชื้นของไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธนี้ มีแรงดึงดูดของโมเลกุลค่อนข้างมาก การคายความชื้น เมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้นจึงมีน้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย ความสามารถในการดูดความชื้นที่มาก อัตราเร็วของการทำงานที่ไม่เร็วจนเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

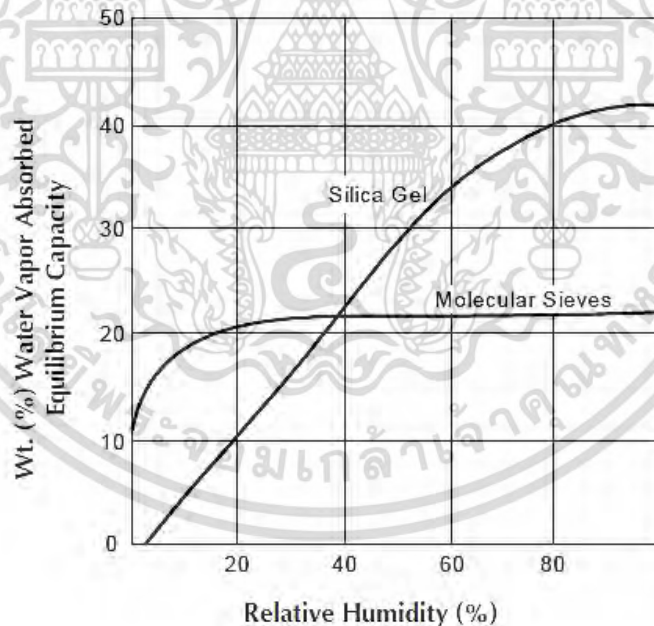
และโอกาสในการคายความชื้นที่ต่ำมาก เป็นเหตุให้ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ เป็นทางเลือกที่ดีของสารดูดความชื้น และได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ

2.1.3.3 มอนต์โมริลโลไนต์เคลย์

มอนต์โมริลโลไนต์เคลย์เป็นดินธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมาก ดินประเภทนี้เมื่อได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ความสามารถในการดูดความชื้น และการคงสภาพหลังการใช้ดีขึ้น โดยปกติ มอนต์โมริลโลไนต์เคลย์ มีความสามารถในการดูดความชื้นประมาณ 25% ของน้ำหนักตัว ประสิทธิภาพดังกล่าว จะลดลงค่อนข้างมาก เมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยเหตุนี้ การใช้มอนต์โมริลโลไนต์เคลย์ สำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง จะต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดข้อนี้ เช่นเดียวกับการใช้ซิลิกาเจล

2.1.3.4 โมเลกุลาร์ซีฟ

โมเลกุลาร์ซีฟ หรือที่เรียกว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์ เป็นสารสังเคราะห์ ที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นที่ดีมาก ๆ ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์รอบข้างในระดับต่ำ (10%-30%) โดยมีประสิทธิภาพในการดูดความชื้นประมาณ 22% ของน้ำหนักตัว โครงสร้างพิเศษทำให้โมเลกุลาร์ซีฟ มีพื้นผิวสัมผัสประมาณ 7-800 m² ต่อ 1 g และมีแรงดึงดูดความชื้นที่สูงมาก ข้อดีดังกล่าว ทำให้ปัญหาการคายความชื้นน้อยกว่าซิลิกาเจลและมอนต์โมริลโลไนต์เคลย์ เมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม โมเลกุลาร์ซีฟยังไม่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานของรัฐในการใช้งานในอาหารและยา จึงทำให้สารชนิดนี้ยังไม่แพร่หลายมากนัก



ภาพที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของซิลิกาเจลและโมเลกุลาร์ซีฟ ที่มา : AIR XChange, 2559

จากภาพที่ 2.15 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเส้นโค้งของการดูดซับความชื้นจนถึงจุดสมดุลของซิลิกาเจลและโมเลกุลาร์ซีฟ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่แตกต่างกัน ซิลิกาเจลมีความสามารถในการรับน้ำไวจนถึงจุดสมดุลได้ดีในทุกช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในขณะที่โมเลกุลาร์ซีฟมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถจะรับน้ำไว้จนถึงจุดสมดุลได้ดี หากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าอยู่ในช่วง 0-40% เท่านั้น แต่ในช่วงนี้ หากเปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ พบว่าโมเลกุลลาร์ซีฟมีความสามารถในการดูดน้ำดีกว่า

2.1.3.5 ดินเหนียวดูดซับ (Montmorillonite)

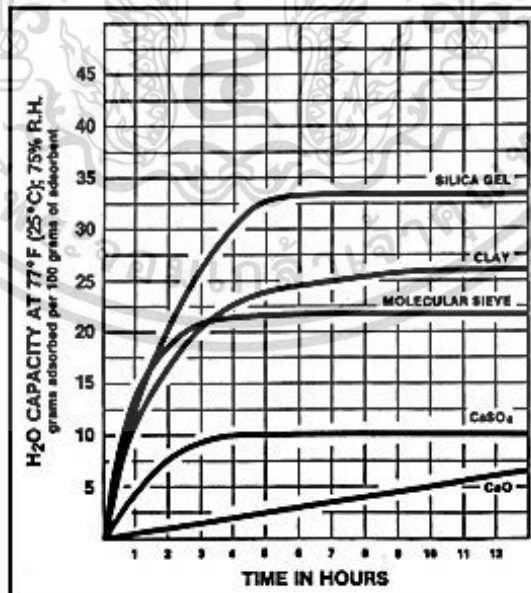
เป็นตัวดูดซับที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมาก ในการนำกลับมาใช้ใหม่จะต้องนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำมากๆ เป็นการป้องกันการเสื่อมสภาพ โดยปกติดินชนิดนี้มีความสามารถในการดูดซับประมาณ 25% ของน้ำหนักดิน ประสิทธิภาพดังกล่าวจะลดลงค่อนข้างมาก เมื่ออุณหภูมิรอบข้างเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ

2.1.3.6 แคลเซียมออกไซด์

แคลเซียมออกไซด์เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้มากกว่า 28.5% ของน้ำหนักตัว สารชนิดนี้มีคุณสมบัติเด่นในการดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำและมีอัตราการคายความชื้นที่ต่ำ เช่นเดียวกับโมเลกุลลาร์ซีฟ อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการดูดความชื้นค่อนข้างช้า เมื่อเทียบกับสารชนิดอื่น ๆ และจะกลายเป็นสารกึ่งเหลว (swell) เมื่อดูดความชื้นจนกระทั่งอิ่มตัว สารดูดความชื้นประเภทนี้มีคุณสมบัติในการกัดกร่อนสูง (corrosive) ดังนั้น บรรจุภัณฑ์ของสารดูดความชื้นประเภทนี้ ต้องป้องกันไม่ให้สารดูดความชื้นหลุดรอดออกมาได้

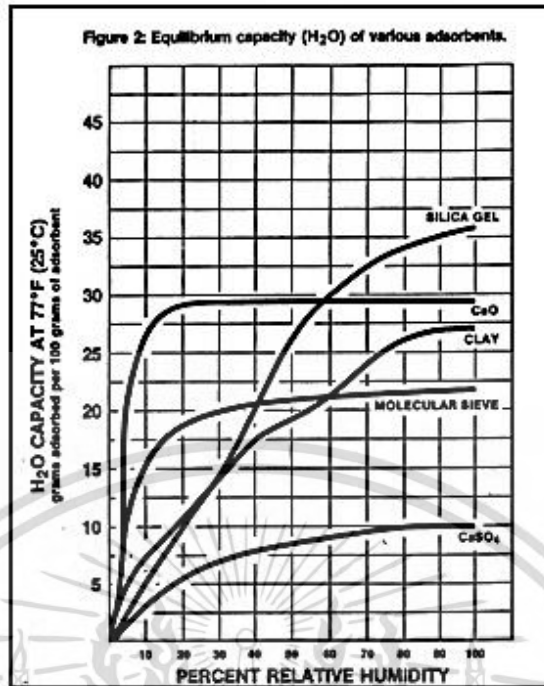
2.1.3.7 แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4)

เกิดจากการทำดีไฮเดรชันยิปซัม เพื่อนำน้ำออก โดยมีคุณสมบัติเสถียร ไม่มีความเป็นพิษ ไม่สีกกร่อน สามารถหาซื้อได้โดยทั่วไป และมีราคาไม่สูงมากนัก



ภาพที่ 2.16 อัตราการดูดน้ำของสารดูดความชื้นประเภทของแข็งชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.17 Equilibrium Capacity ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

2.1.3.8 สารดูดความชื้นประเภทของเหลว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน)

สารละลายที่ใช้เป็นสารดูดความชื้นเหลวต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือความดันไอต่ำเพื่อการถ่ายเทมวลที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างความดันไอของอากาศและความดันไอของสารดูดความชื้นเหลว นอกจากคุณสมบัติด้านความดันไอแล้ว สารดูดความชื้นจะต้องมีความหนืดต่ำและคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดี รวมถึงคุณสมบัติที่ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน ไม่มีกลิ่น ไม่ก่อให้เกิดสารพิษ มีความเสถียร และราคาไม่แพง

สารดูดความชื้นเหลวที่นิยมใช้ ได้แก่ สารละลายลิเทียมโบรไมด์ (LiBr) ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) และไตรเอทิลีนไกลคอล (TEG) ความดันไอของสารดูดความชื้นเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสาร

ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นเหลวนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสารดูดความชื้นชนิดของแข็ง เนื่องจากสามารถดูดซึมสารปนเปื้อนอื่นๆ ในอากาศได้ เช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ รวมถึงเชื้อแบคทีเรีย แต่มีการออกแบบลักษณะการบรรจุที่ยุ่งยาก ซับซ้อน

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติของตัวดูดซับในการดูดซับความชื้น

คุณสมบัติ	Molecular Sieve	Silica Gel	Montmorillonite Clay	CaO	CaSO ₄
ประสิทธิภาพการดูดซับที่ความชื้นต่ำ	ยอดเยี่ยม	คุณภาพต่ำ	พอใช้	ยอดเยี่ยม	ดี
อัตราการดูดซับ	ยอดเยี่ยม	ดี	ดี	คุณภาพต่ำ	ดี
ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นที่ 77° F , 40% RH	สูง	สูง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ
ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิสูง	ยอดเยี่ยม	คุณภาพต่ำ	คุณภาพต่ำ	ดี	ดี
แยกโดยขนาดของโมเลกุล	ใช่	ไม่ใช่	ไม่ใช่	ไม่ใช่	ไม่ใช่

2.1.4 ซิลิกาเจล

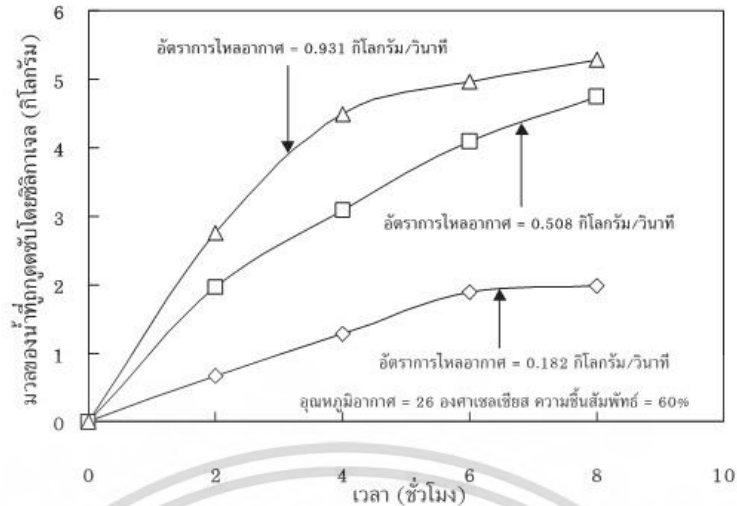
2.1.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการดูดความชื้น

1) ลักษณะของสารดูดความชื้น

ตรีรัตน์ เจียมรัตน์ประทีป (2553) คุณสมบัติของสารดูดความชื้นที่มีผลต่อการดูดความชื้น ได้แก่ พื้นที่ผิวของสารดูดความชื้นและโครงสร้างรูพรุน โดยความสามารถในการดูดความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดความชื้นมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของสารดูดความชื้นไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น ถ้าขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับจะลดลง ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ สำหรับตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน ซึ่งมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดของตัวดูดซับให้เล็กลง จึงมีอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ และสำหรับตัวดูดซับที่มีรูพรุนมาก พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ทำให้ขนาดของตัวดูดซับไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

2) อัตราการไหลของอากาศ

อติพงศ์ นันทพันธุ์ (2548) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีผลต่อสมรรถภาพการดูดความชื้นของชุดสารดูดความชื้น ที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.182 กิโลกรัมต่อวินาที ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับจะมีค่าต่ำกว่าที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.931 กิโลกรัมต่อวินาที



ภาพที่ 2.18 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดซับโดยซีลีกาเจล
ที่มา : อติพงษ์, 2548

ตรีรัตน์ เจียมรัตนประทีป (2553) ได้ทำการศึกษามวลของอัตราการไหลในการลดความชื้นในอากาศด้วยตัวดูดซับชนิดซีลีกาเจล โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์บรรจุซีลีกาเจล 7 เซนติเมตร ความสูงเบด 10 เซนติเมตร ความดัน 1 บรรยากาศ อัตราการไหล 2000 และ 4000 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าที่อัตราการไหลสูงจะสามารถดูดซับความชื้นได้มากกว่าขณะที่เวลาในการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบผลของอัตราการไหล ที่มา : ตรีรัตน์, 2554

อัตราการไหลของอากาศ (L/h)	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นของอากาศ (%RH)	ความชื้นของอากาศขาเข้า (%RH)	น้ำหนักซีลีกาเจลก่อนการดูดซับ	ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (g)	เวลาในการดูดซับ (min)
2,000	0.14	29.0	68.6	70.3	276.24	65.5	173
4,000	0.28	29.5	64.3	70.3	269.71	83.48	174

3) อุณหภูมิ

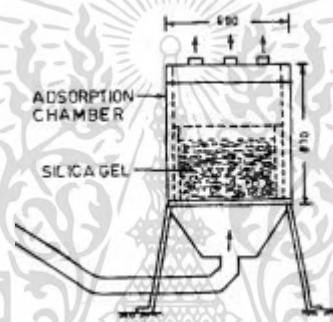
ตรีรัตน์ เจียมรัตนประทีป (2553) ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะน้อยลง เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

2.1.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการคายความชื้น

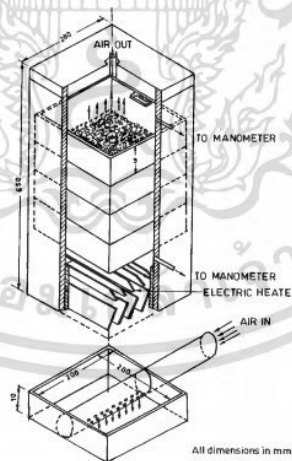
1) ลักษณะการบรรจุสารดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Singh and Singh (1998) ได้ศึกษาการฟื้นฟูซิลิกาเจล ใช้ในการฟื้นฟูอยู่ในช่วง 0.175-0.55 เมตรต่อวินาที และ 42-72 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการฟื้นฟูซิลิกาเจลจำนวน 300 นาที การทดลองทำการเปรียบเทียบระหว่างการบรรจุซิลิกาเจล 2 แบบ โดยแบบแรกคือบรรจุซิลิกาเจลทั้งหมด 3 กิโลกรัม โดยไม่แบ่งชั้น และแบบที่สองบรรจุซิลิกาเจล โดยแบ่งบรรจุซิลิกาเจลเป็น 2 3 และ 4 ส่วน เมื่อทำการทดลองพบว่าที่เวลา 300 วินาที ความชื้นสุดท้ายในซิลิกาเจลที่บรรจุแบบแรกมีค่าเป็น 14% db ในขณะที่แบบที่สองมีค่าความชื้นสุดท้ายน้อยกว่าแบบแรก คือมีค่าความชื้นสุดท้ายประมาณ 7% db จะเห็นได้ว่าการแบ่งบรรจุซิลิกาเจลออกเป็นชั้นๆ ทำให้ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูซิลิกาเจลดีกว่า ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าลักษณะการบรรจุสารดูดความชื้นที่แตกต่างกัน ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและอากาศร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูมีค่าน้อยแตกต่างกัน โดยการแบ่งบรรจุสารดูดซับออกเป็นชั้นๆ เปรียบเสมือนกับการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารดูดความชื้นกับอากาศ ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลมากขึ้น



ภาพที่ 2.19 ลักษณะเบตบรรจุแบบแรก ที่มา : Singh and Singh, 1998



ภาพที่ 2.20 ลักษณะเบตบรรจุแบบสอง ที่มา : Singh and Singh, 1998

Kiatsiriroat and Tachajapong (2002) ได้นำเอาสารดูดความชื้นซิลิกาเจล มาใช้ในระบอบีความร้อน โดยสารดูดความชื้นบรรจุในท่อทรงกระบอกซึ่งมีรูพรุน และจัดเรียงแบบกลุ่มท่อ (tube bank) ใช้สำหรับการลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าสู่กลุ่มฮีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) โดยจากการศึกษาพบว่า ระบบดังกล่าวสามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 7-20% ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงาน

2) อัตราการไหลของอากาศ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Singh and Singh (1997) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของความเร็วอากาศต่อเวลาในการฟื้นฟูซิลิกาเจลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการทดลองมีการกำหนดสภาวะของความเร็วอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูซิลิกาเจลที่ต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.175 , 0.25 , 0.40 และ 0.55 เมตรต่อวินาที พบว่าเวลาที่ใช้การฟื้นฟูซิลิกาเจลโดยลดความชื้นจาก 42.8% db ไปเป็น 15% db จะลดลง เมื่อมีการเพิ่มความเร็วอากาศในทุกค่าของอุณหภูมิและจำนวนชั้นแบ่งสารดูดความชื้นที่ใช้ในการทดลอง

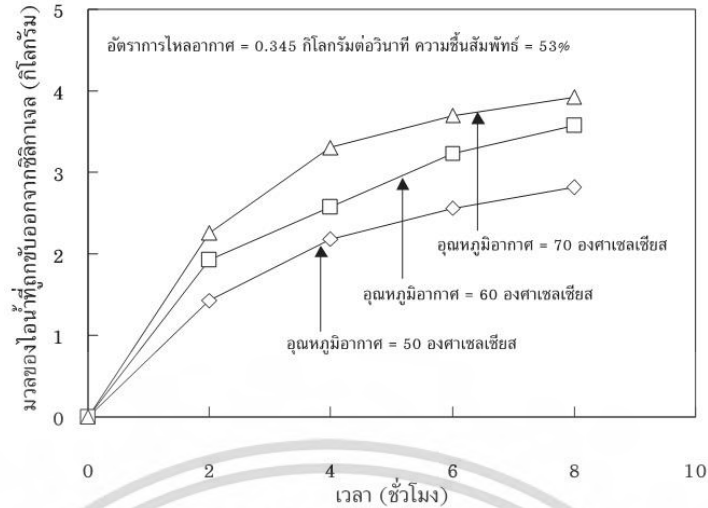
Y. Satio (1993) ได้ศึกษาการนำสารดูดความชื้นชนิดซิลิกาเจลกลับมาใช้ใหม่โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการคายความชื้นออกจากซิลิกาเจล ลักษณะของระบบนี้คือตัวดูดซับเป็นชั้นบางอยู่ในแผงรับรังสีจากแสงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของการคายความชื้นขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง Reynolds number ในชั้นของสารดูดซับคือ 1.2-1.7 อัตราการไหลของอากาศ 2-3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

3) อุณหภูมิที่ใช้ในการคายความชื้น

Singh and Singh (1997) ได้ศึกษาการนำซิลิกาเจลกลับมาใช้ใหม่ใน Multi-shelf regeneration (2-4 shelves) ดังภาพที่ 2.20 ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิอากาศ 42-72 องศาเซลเซียส และความเร็วอากาศที่ 0.175-0.55 เมตรต่อวินาที พบว่าค่าอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่สิ้นเปลืองพลังงานเข้าหาน้อยที่สุดเท่ากับ 52 องศาเซลเซียสและ 0.175 เมตรต่อวินาที โดยไม่คำนึงถึงจำนวนชั้น

Kuei-Sen Chang (2003) ได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการคายความชื้นซิลิกาเจลแบบเบดนิ่ง โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของผิวและ ซิลิกาเจลทั่วไป ปริมาณการดูดซับที่เกิดขึ้นในตัวดูดซับเป็นผลมาจากกระดัดการคายซับของตัวดูดซับ จากการศึกษาพบว่าเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคายซับคือที่จุด Break Point ที่อัตราส่วนของความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้ามีค่าเท่ากับ 0.15 ซิลิกาเจลที่ผ่านการปรับปรุงแล้วและซิลิกาเจลทั่วไปใช้ระยะเวลาในการคายซับที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส กับ 0.5 และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ

อดิพงษ์ นันทพันธุ์ (2548) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย ในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าชุดสารดูดความชื้นเพื่อทำการไล่ความชื้นส่งผลให้อุณหภูมิของสารดูดความชื้นเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือจะเป็นการเพิ่มความดันไอน้ำในสารดูดความชื้นในคราวเดียวกัน ดังนั้นความชื้นในสารดูดความชื้นจะถูกขับออกมามากขึ้น



ภาพที่ 2.21 ผลของอุณหภูมิกอากาศเข้าสู่สารดูดความชื้นต่อมวลน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล
ที่มา : อติพงษ์, 2548

Kabeel (2009) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิกอากาศขาเข้าในกระบวนการคายความชื้นที่ระดับชั้นต่างกันของเบตบรจในช่วงเวลา 60 นาที ความเร็วอากาศขาเข้าคงที่ 3.9 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 42 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิกอากาศขาเข้าเพิ่มขึ้น อัตราการคายความชื้นจะเพิ่มขึ้น และค่าความแตกต่างในอัตราการคายความชื้นระหว่างชั้นแรกกับชั้นสุดท้ายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ค่าอัตราการคายความชื้นที่ชั้นแรกหลังจากผ่านไป 10 นาที มีค่าเท่ากับ 0.8 และ 1.1 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 42 และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ

2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง

2.1.5.1 การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบธรรมดา

สำหรับการอบแห้งแบบอะเดียเบติก (กระบวนการที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน) ความร้อนสัมผัสที่หายไปของอากาศที่นำมาอบแห้งจะเท่ากับความร้อนแฝงที่เพิ่มขึ้นจากความชื้นสะสม ดังนั้นสมดุลพลังงานของระบบอบแห้งด้วยลมร้อนแบบทั่วไปจะเป็นดังสมการ (2.13)

$$F_a \left[(C_{pa} + Y_{ain} C_{pv}) T_{ain} - (C_{pa} + Y_{aout} C_{pv}) T_{aout} \right] = F_a (Y_{aout} - Y_{ain}) \Delta H_v = Q_{out} \quad (2.13)$$

F_a	คือ	อัตราไหลของอากาศเข้า
Y_{ain}	คือ	ปริมาณความชื้นขาเข้า
T_{ain}	คือ	อุณหภูมิกอากาศเข้า
Y_{aout}	คือ	ปริมาณความชื้นขาออก
T_{aout}	คือ	อุณหภูมิกอากาศออก
C_{pa}	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง
C_{pv}	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ΔH	คือ	ค่าความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอ
F_p	คือ	อัตราไหลของผลผลิต (ฐานแห้ง)
X_{pin}	คือ	ปริมาณความชื้นของผลผลิตขาเข้า
X_{pout}	คือ	ปริมาณความชื้นขาออกของผลผลิต

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการอบแห้งถูกกำหนดด้วยอัตราส่วนของความร้อนแฝงที่เพิ่มขึ้นโดยอากาศอบแห้งหรือความร้อนสัมผัสที่ลดลงต่อปริมาณความร้อนที่ให้กับระบบ สำหรับอากาศที่ถูกให้ความร้อนจากอุณหภูมิบรรยากาศ T_{amb} เป็น T_{ain} ความร้อนที่ให้กับระบบและประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยประมาณของระบบจะเป็นตามสมการที่ (2.14) และสมการที่ (2.15) ตามลำดับ

$$Q_{in} = F_a (C_{pa} + Y_{ain} C_{pv}) (T_{ain} - T_{amb}) \quad (2.14)$$

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \approx (T_{ain} - T_{aout}) / (T_{ain} - T_{amb}) \quad (2.15)$$

สำหรับอุณหภูมิบรรยากาศที่ให้มา ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีตัวแปรควบคุมสองตัวแปร คือ T_{ain} และ T_{aout} โดยประสิทธิภาพจะปรับปรุงได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิขาเข้า หรือลดอุณหภูมิขาออก การเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนมากขึ้นด้วยเครื่องทำความร้อนนอกห้องอบแห้ง แต่วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมสภาพได้ง่ายจากความร้อน สำหรับผลิตภัณฑ์เหล่านี้จึงควรเพิ่มประสิทธิภาพโดยวิธีการลดอุณหภูมิขาออก และการที่จะลดอุณหภูมิขาออกนั้นจะสามารถทำได้โดยลดปริมาณความชื้นขาเข้าของอากาศ Y_{ain} เพื่อที่จะให้อากาศสามารถดูดซับความชื้นได้เพิ่มมากขึ้น สำหรับผลของตัวแปรควบคุมที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน แสดงได้จากสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพต่ออุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (2.16) และสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพต่ออุณหภูมิลมร้อนขาออก (2.17)

$$\frac{\partial \eta}{\partial T_{ain}} = (T_{aout} - T_{amb}) / (T_{ain} - T_{amb})^2 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial T_{aout}} = -1 / (T_{ain} - T_{amb}) \quad (2.17)$$

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิลมร้อนขาออกต่อปริมาณความชื้นของลมร้อนขาเข้า แสดงให้เห็นว่า การลดลงของปริมาณความชื้นในลมร้อนขาเข้าเพียงเล็กน้อยจะสามารถทำให้อุณหภูมิของลมร้อนขาออกลดลงตามไปได้ ดังแสดงในสมการที่ (2.12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial T_{aout}}{\partial Y_{ain}} = (C_{pv} T_{ain} + \Delta H_V \circ C) / (C_{pa} + Y_{aout} C_{pv}) \quad (2.18)$$

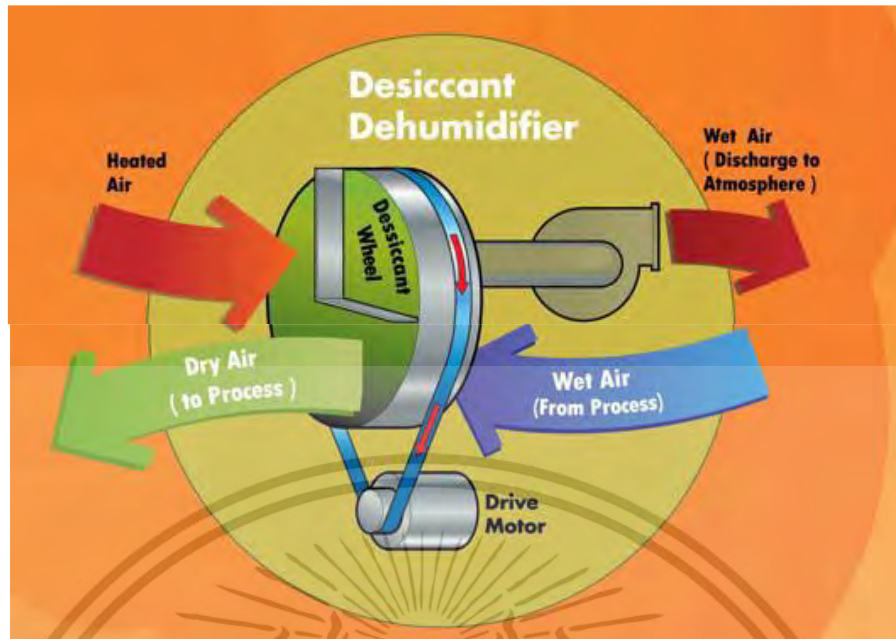


ภาพที่ 2.22 ระบบอบแห้งด้วยลมร้อนแบบธรรมดา

2.1.5.2 การอบแห้งร่วมกับสารดูดความชื้น

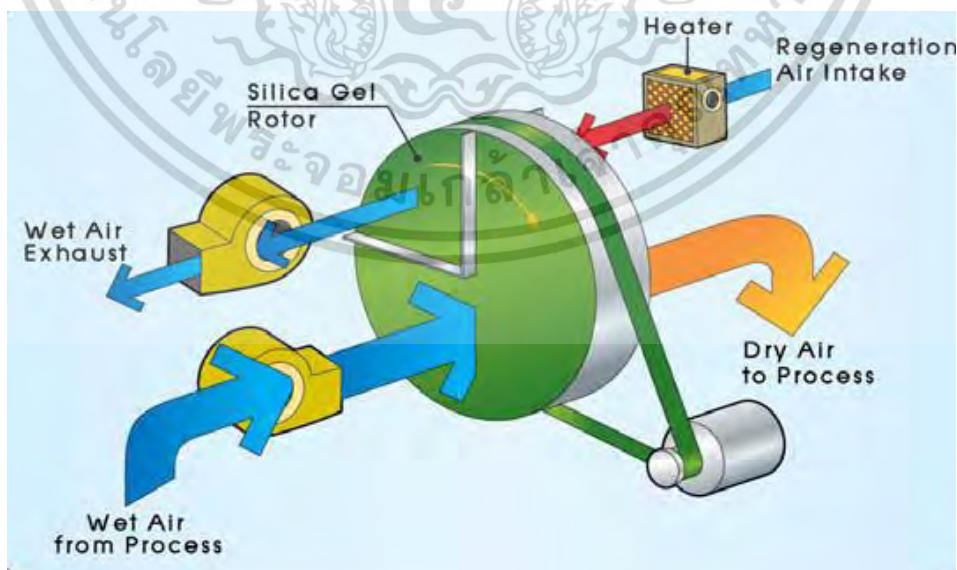
ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นเป็นระบบการอบแห้งวัสดุในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งต่ำกว่าสถานะปกติ ซึ่งเป็นผลดีต่อกระบวนการอบแห้ง การใช้สารดูดความชื้นในการอบแห้งมีประโยชน์ในการเพิ่มอัตราการอบแห้ง (Drying rate) อันเกิดขึ้นมาจากอากาศร้อนและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ การอบแห้งจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มคุณภาพในผลผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลผลิตที่ไวต่อความร้อน แต่ในระบบสารดูดความชื้นก็พบปัญหาอื่น เช่น ความดันตกคร่อม (Pressure drop) ในสารดูดความชื้นชนิดแข็ง ในขณะที่สารดูดความชื้นแบบเหลวจะไม่พบปัญหาดังกล่าว ดังนั้นการทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด ควรเลือกชนิดของสารดูดความชื้นให้เหมาะสมกับการออกแบบระบบสารดูดความชื้น งานวิจัยต่าง ๆ ได้มีการศึกษาความคุ้มค่าและอุณหภูมิสำหรับไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น เพื่อนำสารดูดความชื้นนั้นกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่การที่จะนำสารดูดความชื้นมาใช้ต่อนั้นจะต้องใช้พลังงานสูงมาก การใช้ความร้อนเพื่อจะนำสารดูดความชื้นให้กลับมาใช้ใหม่ในระบบการอบแห้งอีกครั้งนั้นยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการกักเก็บพลังงาน อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานน้อยลงหรือพลังงานที่มีอยู่ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์หรือการนำความร้อนจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมนำกลับมาใช้ใหม่ หากนำมาใช้ในการไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้นได้ จะส่งผลให้ประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก (ThanidMadhiyanon, 2007)

1) ลักษณะการทำงานโดยปล่อยอากาศขึ้นจากกระบวนการผลิต (Process Air) ให้ไหลผ่านวงล้อที่เคลือบสารดูดความชื้นซึ่งจะทำหน้าที่ดูดเก็บความชื้นของอากาศไว้ หลังจากนั้นวงล้อจะถูกหมุนไปถ่ายความชื้นที่เก็บไว้ให้กับอากาศที่ร้อนและความชื้นต่ำ (Heated air) เพื่อระบายความชื้นออกจากเครื่องดูดความชื้นต่อไป การผลิตอากาศร้อนที่ใช้ในการดึงความชื้นออกจากเครื่องดูดความชื้นนั้น สามารถใช้ความร้อนทิ้งที่เหลือจากกระบวนการผลิตหรือแสงอาทิตย์ สารดูดความชื้นที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบันได้แก่ ซิลิกาเจล อะลูมินาแกมมันต์ ซีโอไลต์สังเคราะห์ ลิเทียมคลอไรด์ ไททาเนียมซิลิเกต และพอลิเมอร์สังเคราะห์



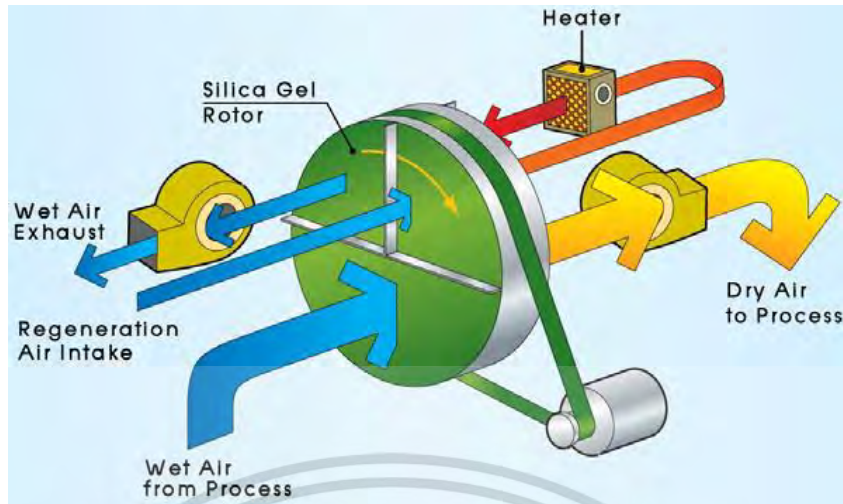
ภาพที่ 2.23 ระบบลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นแข็ง
ที่มา : กระทรวงพลังงาน, 2558

เครื่องลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นมีส่วนประกอบหลักคือ ชุดวงล้อหมุน (ภาพที่ 2.23) ซึ่งมีส่วนประกอบของสารดูดความชื้น เช่นซิลิกาเจล ชุดวงล้อดังกล่าวจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เพื่อไล่ความชื้นออกจากอากาศที่ไหลผ่านมาจากกระบวนการผลิต ตัวอย่างของเครื่องลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นที่ใช้ในอุตสาหกรรม 2 แบบได้แก่ เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนใช้ฮีตเตอร์ในการให้ความร้อนแก่อากาศ (ภาพที่ 2.24) ที่จะใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น เหมาะกับการใช้งานกับพื้นที่เก็บสินค้าและห้องสะอาดขนาดเล็ก (กระทรวงพลังงาน, 2558)



ภาพที่ 2.24 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนใช้ฮีตเตอร์
ที่มา : กระทรวงพลังงาน, 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.25 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนที่มีระบบนำความร้อนกลับมาใช้
ที่มา : กระทรวงพลังงาน, 2558

2) ในระบบอบแห้งร่วมกับสารดูดความชื้นอากาศในบรรยากาศจะถูกลดความชื้นด้วยหอดูดความชื้น ในขณะที่หอดูดความชื้นอีกด้านจะถูกไล่ความชื้นออกหรือเรียกว่าการคายความชื้น (Regeneration) การคายความชื้นทำได้โดยใช้ความร้อนอุณหภูมิสูงมาไล่ความชื้นออก ประสิทธิภาพของระบบอบแห้งร่วมกับสารดูดความชื้นจะเหมือนกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนธรรมดา ดังแสดงในสมการที่ (2.15) แต่จะมีข้อแตกต่างดังต่อไปนี้

อุณหภูมิอากาศจากบรรยากาศ T_{amb} จะถูกปรับเป็นอุณหภูมิขาออกจากหอดูดความชื้น ซึ่งจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ $T_{aA} > T_{amb}$ เนื่องจากกระบวนการดูดความชื้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้น $T_{aA} = T_{amb} + \Delta T_{ads}$ อากาศหลังจากออกจากหอดูดความชื้นแล้ว สามารถนำไปให้ความร้อนเพิ่มจนถึงอุณหภูมิสำหรับการอบแห้ง T_{ain} ด้วยเครื่องให้ความร้อน 2 อุณหภูมิสำหรับคายความชื้นจะถูกเพิ่มอุณหภูมิโดยเครื่องให้ความร้อน 1 และสามารถนำความร้อนทั้งไปช่วยให้ความร้อนกับอากาศก่อนเข้าเครื่องให้ความร้อน 2 ต่อไปด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน HX1

สำหรับห้องอบแห้ง อากาศขาเข้าและปริมาณความชื้นขาออกจะถูกปรับด้วยกระบวนการลดความชื้น อุณหภูมิขาออกของอากาศจากห้องอบแห้ง จะลดลงตามสมการที่ (2.18)

พลังงาน $F_{aR}(C_{pa} + Y_{amb}C_{pv})(T_{aRin} - T_{amb})$ ถูกใช้ในการคายความชื้นที่ซึ่ง F_{aR} และ T_{aRin} คือ อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการคายความชื้นและอุณหภูมิขาเข้าหอดูดคายความชื้นตามลำดับ

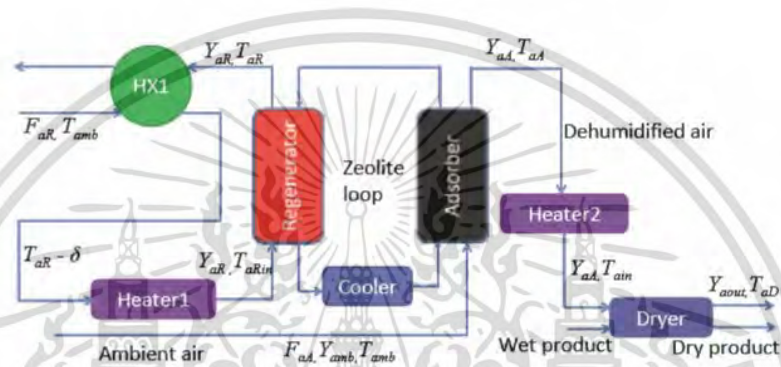
สำหรับการอบแห้งร่วมกับสารดูดความชื้น ความร้อนอุณหภูมิสูงจะพบในอากาศขาออกของด้านคายความชื้น เนื่องจากอุณหภูมิขาเข้าของด้านคายความชื้นมักจะสูงถึง 300 องศาเซลเซียส เช่นในระบบ Zeolite อากาศขาออกจากด้านคายความชื้นอาจใช้เพื่อให้ความร้อนก่อนเข้าด้านคายความชื้นต่อไป ถ้าอากาศที่ออกจากด้านคายความชื้นอุณหภูมิ T_{aR} ถูกนำมาใช้อุ่นอากาศขาเข้า สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ δ พลังงานที่ใช้สุทธิจะถูกลดลงเป็น $F_{aR}(C_{pa} + Y_{amb}C_{pv})(T_{aRin} - T_{aR} - \delta)$ ปรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.15) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (หลังนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่) จะถูกกำหนดดังสมการที่ (2.19)

$$\eta_{AD} \approx (T_{ain} - T_{aD}) / \left(\left(\frac{F_{aR}}{F_a} \right) (T_{aRin} - T_{aR} - \delta) + (T_{ain} - T_{aA}) \right) \quad (2.19)$$

$$T_{aD} = T_{aout} - \left(\frac{\partial T_{aout}}{\partial Y_{ain}} \right) dY_{ain} = T_{aout} - \left(\frac{C_{pv} T_{ain} + \Delta H_v}{C_{pa} + Y_{aA} C_{pv}} \right) (Y_{amb} - Y_{aA}) \quad (2.20)$$



ภาพที่ 2.26 ระบบอบแห้งร่วมกับสารดูดความชื้น

2.1.5.3 ระบบอบแห้งร่วมกับการควบแน่น

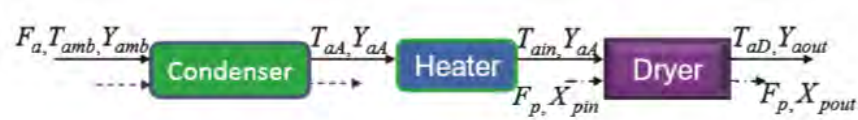
อากาศที่บรรยากาศจะถูกลดความชื้นด้วยการให้ความเย็นผ่านทางอุณหภูมิลด ΔT_{dpt} ไปยังอุณหภูมิควบแน่น T_{dpt} จากนั้นมีอุณหภูมิเกิดขึ้นจากการควบแน่นของความชื้น ΔT_{cool} ข้อเสียสำคัญของระบบนี้คือ ความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงที่เพิ่มขึ้นโดยสารทำความเย็นในเครื่องควบแน่นจะไม่ถูกนำมาใช้ใหม่ในการทำอากาศแห้ง ซึ่งจะทำให้สูญเสียความร้อนสัมผัสไป ดังนั้นประสิทธิภาพของพลังงานจึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย กำหนดให้อากาศที่บรรยากาศถูกลดความชื้นไปจนถึงปริมาณความชื้นของอากาศที่ออกมาจากหอดูดความชื้น Y_{aA} และถูกเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้ง T_{ain} ข้อแตกต่างจากระบบอบแห้งร่วมกับสารดูดความชื้นคือ

แทนที่จะมีการปล่อยความร้อนจากการดูดความชื้นออกมา กลายเป็นการทำเย็น 2 ชั้น ชั้นแรกทำเย็นจนถึงจุดควบแน่นและชั้นที่สองคือต่ำกว่าจุดควบแน่น ในระหว่างนี้ความร้อนแฝงจะถูกปล่อยออกมาและไม่มีการใช้พลังงานสำหรับการคายความชื้น

จากสมการ (2.15) ประสิทธิภาพของพลังงานของระบบอบแห้งร่วมกับการควบแน่นจะเป็นดังสมการที่ (2.21)

$$\eta_{CD} = (T_{ain} - T_{aD}) / (T_{ain} - T_{aA}) \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.27 ระบบอบแห้งร่วมกับการควบคุมความชื้น

2.1.5.4 ระบบอบแห้งร่วมกับปั๊มความร้อน

ข้อแตกต่างหลักระหว่างระบบอบแห้งร่วมกับการควบคุมความชื้น และระบบอบแห้งร่วมกับปั๊มความร้อนคือ

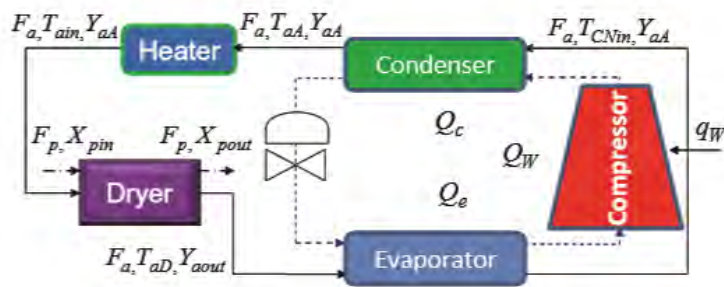
สำหรับระบบอบแห้งร่วมกับปั๊มความร้อน อากาศขาออกจากห้องอบแห้งจะถูกนำไปลดความชื้นแทนที่จะเป็นอากาศขาเข้า ดังนั้นจุดควบคุมความชื้นจึงสูงกว่า ผลก็คือ อุณหภูมิในการทำความเย็น ΔT_{bptHP} และ ΔT_{coolHP} ที่ใช้เพื่อการลดความชื้นที่เท่ากัน จะน้อยกว่าระบบอบแห้งร่วมกับการควบคุมความชื้น

ความร้อนสัมผัสที่หายไปสู่อากาศที่เครื่องระเหยจะถูกนำกลับมาใช้ในสารทำความเย็นพร้อมกับความร้อนแฝงและถูกส่งไปที่เครื่องควบคุมความชื้นด้วยเครื่องอัดไอ ใช้พลังงาน q_w ในการเดินเครื่องอัดไอ

ประสิทธิภาพของพลังงานในการทำแห้งของระบบอบแห้งร่วมกับปั๊มความร้อนมักจะแสดงในภาพของสัมประสิทธิ์การดึงน้ำ ซึ่งจะถูกเขียนในภาพของอัตราส่วนระหว่างมวลของความชื้นที่ระเหยออกต่อพลังงานที่ใช้ (มักเป็นพลังงานไฟฟ้าในหน่วย kWh) เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นได้ชัด จึงแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนที่เท่ากัน ดังนั้นประสิทธิภาพทั้งสองจะถูกแสดงในภาพ η_{comp} ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน และประสิทธิภาพ η_{elect} คือประสิทธิภาพทั้งหมดของพลังงานไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้น กำหนดให้คอมเพรสเซอร์ทำงานด้วยไฟฟ้า $T_{aA} = T_{\text{amb}} - \Delta T_{\text{dptHP}} - \Delta T_{\text{coolHP}}$ จากสมการที่ (2.14) ประสิทธิภาพของพลังงานจะแปลงเป็นดังสมการที่ (2.22)

$$\eta_{\text{HPD}} = \frac{T_{\text{ain}} - T_{\text{aD}}}{(T_{\text{ain}} - T_{\text{aout}}) + \Delta T_{\text{dptHP}} + \Delta T_{\text{coolHP}} + \left(\frac{q_w}{\eta_{\text{comp}} \eta_{\text{elect}} (F_a (C_{\text{pa}} + Y_{\text{aA}} C_{\text{pv}}))} \right)} \quad (2.22)$$

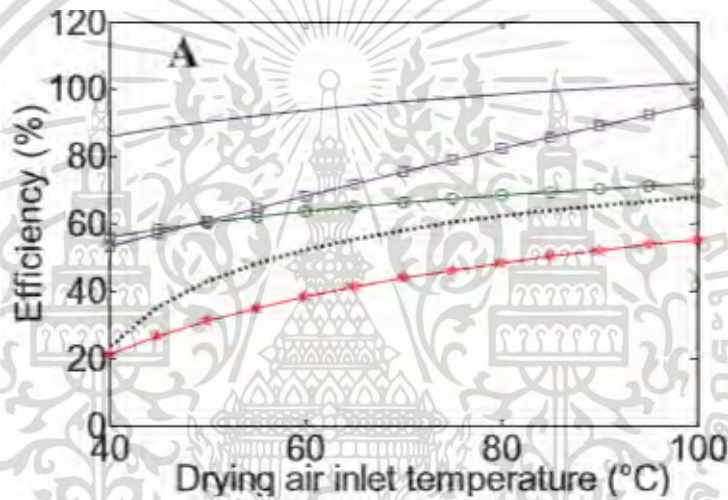
กระบวนการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเป็นกระบวนการที่มีการนำความร้อนกลับมาใช้อยู่แล้ว ดังนั้นไม่มีความร้อนใดที่จะถูกนำกลับมาใช้เพิ่มจากไอของมัน



ภาพที่ 2.28 ระบบอบแห้งร่วมกับปั๊มความร้อน

2.1.5.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบอบแห้งแบบต่างๆ

..... Conventional ⇌ Adsorption — Adsorption (with heat recovery) → Condensation ⇌ Heat pump

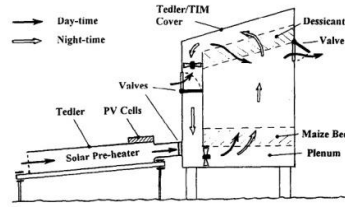


ภาพที่ 2.29 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบอบแห้งแบบต่างๆ

2.1.6 การประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นร่วมกับกระบวนการอบแห้ง

Thoruwa et al. (1996) สร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดธัญพืชร่วมกับสารดูดความชื้น ดังภาพที่ 2.28 เพื่ออบแห้งเมล็ดข้าวโพดสด โดยใช้สารดูดความชื้นเป็นดินเบนโทไนต์และแคลเซียมคลอไรด์ สารดูดความชื้นชนิดนี้จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และดูดความชื้นได้สูงสุด 45% (dwb) หลักการทำงานคือจะใช้เครื่องทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบเป็นตัวเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศแห้ง ซึ่งถูกเชื่อมต่อไปยังห้องอบแห้ง สารดูดความชื้นจะถูกวางไว้บนเบดบรรจุข้าวโพดในห้องอบแห้ง กระบวนการอบแห้งใช้ช่วงเวลากลางวันผลิตอากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ และเวลากลางคืนสำหรับการอบแห้ง การอบแห้งจะเกิดขึ้นโดยการใช้อากาศหมุนเวียนภายในเบดบรรจุสารดูดความชื้น ซึ่งสารดูดความชื้นที่อิ่มตัวจะเข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างกลางวัน เครื่องอบแห้งนี้สามารถอบแห้งข้าวโพดสดที่มีความชื้นเริ่มต้น 38% (dwb) ลดลงเหลือ 15% (dwb) จำนวน 90 กิโลกรัม ในเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.30 เครื่องอบแห้งเมล็ดธัญพืชพลังงานแสงอาทิตย์

ที่มา : Thoruwa, 1996

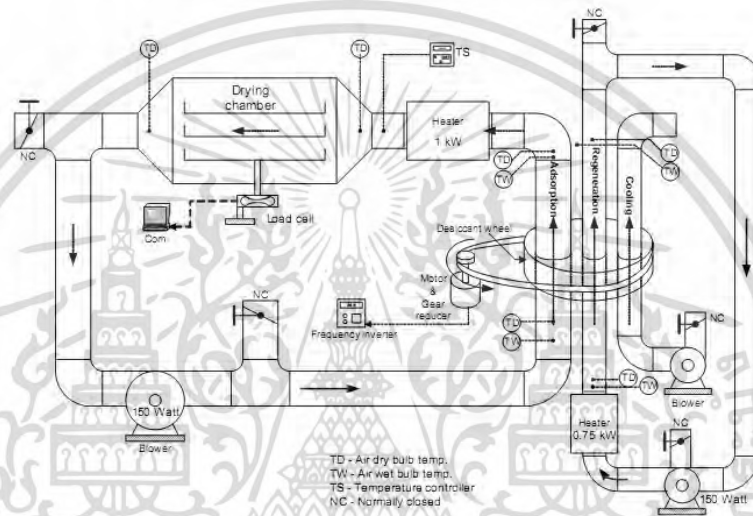
อติพงศ์ นันทพันธุ์ และคณะ ได้ศึกษาการทดสอบสมรรถภาพของชุดสารดูดความชื้นแบบถาด สำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย โดยทำการลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งนอกจากจะช่วย ประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงในการอบแห้งแล้วยังสามารถช่วยลดระยะเวลาของการอบแห้งลงได้ โดยชุดสารดูด ความชื้นมีลักษณะเป็นชั้นบรรจุซิลิกาเจล ชั้นละ 3 กิโลกรัม ขนาด $49.5 \times 49.5 \times 2.5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 10 ชั้น วางซ้อนกันในแนวตั้งโดยมีระยะห่างระหว่างชั้น 2.5 เซนติเมตร ทดสอบสมรรถภาพของชุดสาร ดูดความชื้นทั้งในกรณีของกระบวนการดูดความชื้นและกระบวนการอบไล่ความชื้น โดยนำชุดสารดูดความชื้น ไปทดสอบสมรรถนะในอุโมงค์ลม และได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิของอากาศขาเข้าชุดสารดูดความชื้น และเวลาที่ใช้ทดสอบ โดยพบว่า อัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นจะเพิ่มสูงขึ้นในกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและความชื้น สัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการดูดความชื้นดังกล่าวจะลดลง ในกรณีที่อุณหภูมิขาเข้าชุด สารดูดความชื้นของอากาศเพิ่มขึ้น ในกรณีของการอบไล่ความชื้นออกจากชุดสารดูดความชื้น พบว่าปริมาณ ความชื้นที่ถูกดูดซับออกมา จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและอุณหภูมิขาเข้าของอากาศ เพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับออกมาก็จะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น

Ismail (1991) มีการทดลองนำซิลิกาเจลมาใช้ลดความชื้นของอากาศและนำไปลดอุณหภูมิ ของข้าวโพดที่ถูกจัดเก็บอยู่ในไซโล โดยให้อากาศไหลผ่านซิลิกาเจลเพื่อลดความชื้นในอากาศก่อนผ่านไปยัง ไซโลที่เก็บข้าวโพด และได้ติดตั้งแผงรวมแสงอาทิตย์ขนาด 5.85 ตารางเมตร เพื่อทำการคืนสภาพซิลิกาเจลใน เวลากลางวัน จากการทดลองพบว่า สามารถลดอุณหภูมิของข้าวโพดได้ดีกว่าการผึ่งด้วยลมธรรมชาติ อีกทั้งค่า ความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ก็สูงกว่าเพียงเล็กน้อย

Ming and Colleagues (1994) ศึกษาการใช้สารดูดความชื้นเพื่อลดความชื้นของอากาศใน กระบวนการอบแห้งใบชาเพื่อคงไว้ซึ่งกลิ่นและสีที่ดีของใบชา โดยลดความชื้นในอากาศเหลือ 1-30% และใช้ อุณหภูมิในการอบแห้งระหว่าง 30-80 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า คุณภาพของใบชาดีขึ้นและใน ขณะเดียวกันสามารถประหยัดพลังงานได้ 15% เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งใบชาแบบปกติ ทั้งนี้ เนื่องจากการลดความชื้นของอากาศลง ส่งผลให้ลดอุณหภูมิของการอบแห้งลงได้ จาก 110 องศาเซลเซียสเป็น 80 องศาเซลเซียส

ธวัชชัย และคณะ (มปป) ศึกษาความเป็นไปได้ในการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อสาร ดูดความชื้น โดยเลือกใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้น ซึ่งบรรจุอยู่ในวงล้อหมุนเคลื่อนที่ตลอดเวลา จากผลการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองอบแห้งกับผ้าฝ้ายชุบน้ำ พบว่า ระบบสามารถทำงานได้ดีโดยมีค่า อัตราการอบแห้ง อัตราการดูดความชื้น และอัตราการไล่ความชื้นสอดคล้องกัน การนำอากาศที่ผ่านการไล่ความชื้น ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความชื้นค่อนข้างคงที่แล้วเวียนกลับมาใช้ใหม่ ช่วยลดพลังงานลงได้มาก อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจาก regeneration section มีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจากการรั่วไหลของไอน้ำที่บริเวณวงล้อสารดูดความชื้น กระบวนการดูดซับความชื้นโดยซิลิกาเจลใน adsorption section จะคายพลังงานความร้อนกลับคืนให้อากาศอบแห้ง แต่ยังคงมีการใช้พลังงานของขดลวดไฟฟ้าสำหรับห้องอบแห้งอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งที่ใช้ป้อนความร้อนพบว่าสมรรถนะของระบบอบแห้งที่ใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้นในด้านของอัตราการอบแห้งจะเพาะและการใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะมีแนวโน้มที่ดีกว่าอย่างชัดเจน



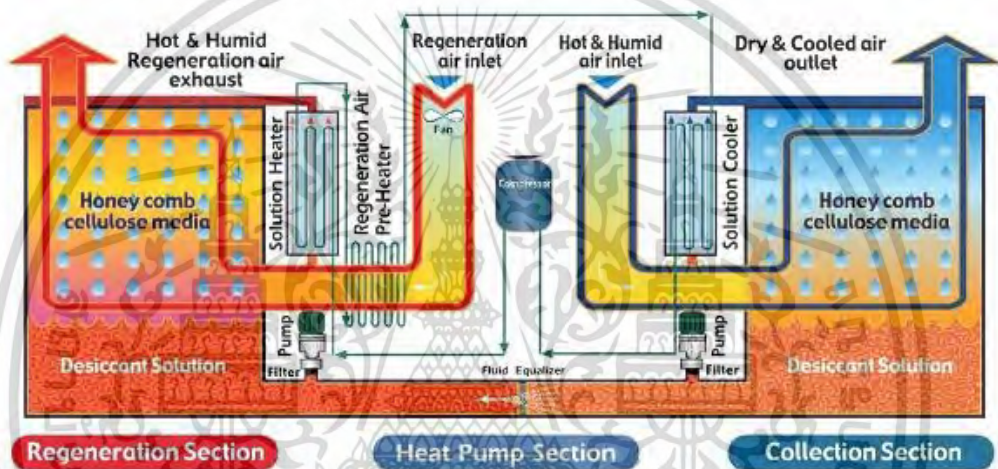
ภาพที่ 2.31 แบบจำลองเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น
ที่มา : ธวัชชัย จอมใจ



ภาพที่ 2.32 เครื่องอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้น
ที่มา : ธวัชชัย จอมใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Liquid Desiccant Dehumidification หลักการทำงาน อาศัยการทำงานของสารละลายของ สารดูดความชื้น LiCl ในการดึงความชื้นออกจากอากาศ และใช้ปั๊มความร้อนเป็นตัวดึงความร้อนออกจาก อากาศไปใช้ในการไล่ความชื้นจากสารดูดความชื้น ใช้ควบคุมความชื้นของอากาศในระดับต่ำกว่า 40%RH ทดแทนการใช้กัณฑ์ดูดความชื้น (Desiccant Wheel) และใช้ Electric Heater หรือ Steam Heater ในการ เพิ่มอุณหภูมิอากาศเพื่อไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น ซึ่งต้องใช้พลังงานสูงมากและทำให้อากาศแห้งที่ ส่งกลับสู่ห้องมีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก จากข้อมูลกรณีศึกษาในประเทศไทย เทคโนโลยีการลดความชื้นด้วยสารดูด ความชื้นเหลวสามารถลดการใช้พลังงานในกระบวนการลดความชื้นได้ประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบ ความชื้นเดิมที่ใช้กัณฑ์ดูดความชื้นและ Electric Heater หรือ Steam Heater ในการไล่ความชื้นจากกัณฑ์ ดูดความชื้น (Regeneration)



ภาพที่ 2.33 ระบบ Liquid Desiccant Dehumidification

2.1.7 การอนุรักษ์พลังงานในระบบอบแห้ง

2.1.7.1 การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

ความร้อนทิ้งมี 2 ลักษณะด้วยกันคือของเหลวร้อน (เช่น น้ำร้อน น้ำมันร้อน) และก๊าซ ร้อน (เช่น อากาศร้อน ก๊าซไอเสียร้อน) การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้อีก ในขั้นแรกต้องประเมินตัวแปร ดังต่อไปนี้ อัตราการไหลของกระแสอุณหภูมิและองค์ประกอบของความร้อนทิ้งเมื่อสามารถหาค่าตัวแปรเหล่านี้ ได้แล้วก็สามารถหาปริมาณความร้อนที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งจะต้องกำหนดวิธีการนำความร้อนทิ้งกลับมา ใช้ใหม่และต้องทำให้สอดคล้องกับการใช้งาน โดยพิจารณาศักยภาพในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ทำให้เกิดการใช้ความร้อนทิ้งอย่างคุ้มค่า ทางเลือกของการใช้ความร้อนทิ้งมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการนำความร้อนทิ้งใน ภาวะก๊าซไอเสียร้อนกลับมาใช้ใหม่ เช่น การอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้การผลิตไอน้ำการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยตัวอย่างของเทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ที่ได้รับการยอมรับ ได้แก่ รีคูเพอเรเตอร์เครื่อง สระผสมความร้อน เป็นต้น

2.1.7.2 แหล่งความร้อนทิ้งในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระบวนการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการใช้พลังงานความร้อนและจะมีพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งถูกทิ้งออกมาจากกระบวนการ หากมีการนำความร้อนส่วนนี้กลับมาใช้ประโยชน์ได้ ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมากโดยความร้อนที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการอุตสาหกรรมมีหลายภาพแบบ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ความร้อนที่มี 2 ลักษณะได้แก่

1. ของเหลวร้อน เช่น

- น้ำร้อน (อาจมีสารปนเปื้อน)
- น้ำมันร้อน
- ของเหลวร้อนอื่นๆ

2. ก๊าซร้อน เช่น

- ก๊าซร้อนจากเตาเผาและเตาอบ
- อากาศร้อนจากกระบวนการระบายความร้อน
- ก๊าซร้อนจากแหล่งอื่นๆ

ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับคือ

1. อุณหภูมิสูงหมายถึงอุณหภูมิ $> 650^{\circ}\text{C}$
2. อุณหภูมิปานกลางหมายถึงอุณหภูมิระหว่าง $230-650^{\circ}\text{C}$
3. อุณหภูมิต่ำหมายถึงอุณหภูมิ $< 230^{\circ}\text{C}$

2.1.7.3 เทคโนโลยีการนำความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่

การสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นทั้งจากอุปกรณ์ที่ไร้ประสิทธิภาพและข้อจำกัดของอุปกรณ์และกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ การนำความร้อนทิ้งในอุตสาหกรรมมีหลายวิธี มีทั้งนำกลับมาใช้ใหม่จากกระบวนการเดียวกันและจากกระบวนการอื่น รวมถึงการเอาก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้มาอุ่นน้ำที่จะเข้าหม้อไอน้ำหรืออากาศที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ในโรงงานอุตสาหกรรม การทำเช่นนี้จะทำให้ปริมาณพลังงานที่ใช้ให้ไปถึงอุณหภูมิสุดท้ายลดลง

2.1.7.4 เทคโนโลยีที่เป็นที่ยอมรับ (Established Technology)

ในปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้ในการนำความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 400°C กลับมาใช้ใหม่นั้น ได้นำเอาหลักการหลายอย่างของการแลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ ซึ่งในส่วนต่อไปจะได้กล่าวถึงเทคโนโลยีที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยนำเสนอในภาพของตารางสรุปเนื้อหาของแต่ละเทคโนโลยี ประกอบด้วยศักยภาพในการใช้งานช่วงอุณหภูมิที่นำมาใช้งานประสิทธิภาพโดยทั่วไป และข้อดีข้อเสียของแต่ละเทคโนโลยี

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังอีกชนิดหนึ่งส่วนใหญ่จะใช้เมื่อต้องการลดความร้อนของผลิตภัณฑ์ให้เย็นลง ในทางตรงกันข้ามสามารถใช้ในการเพิ่มความร้อนให้กับวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิต (เช่น ความร้อนจากเชื้อเพลิงถ่ายเทให้กับน้ำใน

ท่อของหม้อไอน้ำ) ได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังสามารถถ่ายเทความร้อนจากกระบวนการผลิตหนึ่งไปยังอีกกระบวนการหนึ่งได้ด้วย

2.1.7.5 ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำแนกออกได้เป็น 3 แบบตามสภาวะของไหลที่ใช้ ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบก๊าซกับก๊าซ (Gas-gas heat exchanger), เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบก๊าซกับของเหลว (Gas-liquid heat exchanger), เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบของเหลวกับของเหลว (Liquid-liquid heat exchanger)

1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบก๊าซกับก๊าซ (Gas-gas heat exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate Exchanger) ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น อากาศเย็นและก๊าซร้อนที่จะมีการไหลสวนทางกัน (Counter flow) ระหว่างแผ่นที่เรียงติดกัน ดังนั้น การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างกระแสน้ำร้อนกับกระแสน้ำเย็น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้อาจมีข้อจำกัดในการใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกับก๊าซออกซิเจน (Oxidation) ที่ระดับอุณหภูมิสูงกว่า 800°C ยกเว้นว่าจะใช้โลหะผสมชนิดพิเศษ (Special Alloys)

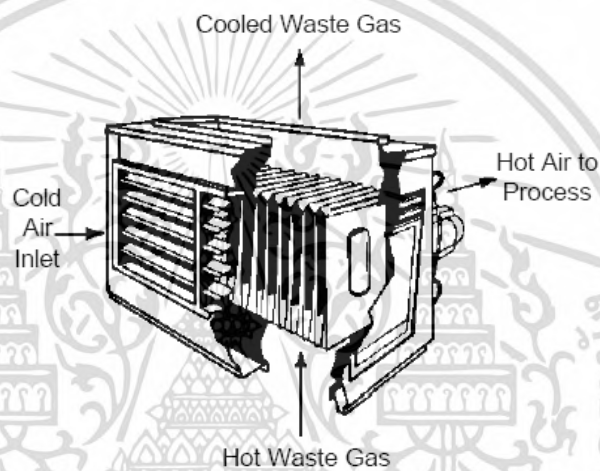


ภาพที่ 2.34 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำด้วยเซรามิกแบบให้อากาศเข้าไหลวกกลับ และไหลตัดกันกับไอเสีย (Ceramic Cross flow Heat Exchanger)

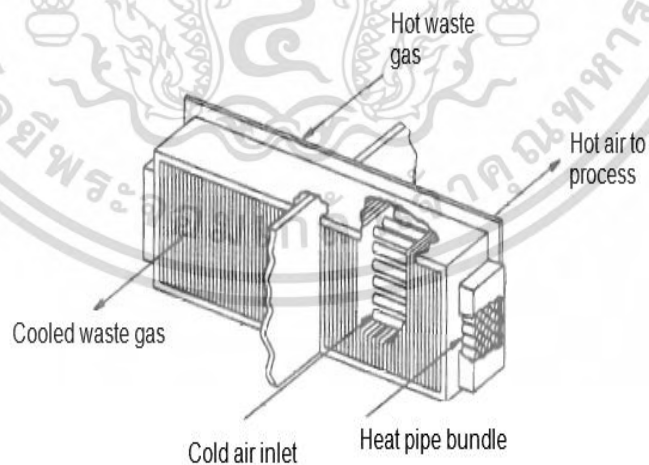
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคอยล์ (Run around coil heat exchanger) จะมีสองท่อแบบมีครีบนำมาต่อกับท่อหลักของระบบและมีของไหลทำงาน เหมาะสำหรับแหล่งความร้อนที่ที่อยู่ไกลจากแหล่งรับความร้อนมาก มีราคาลงทุนเพิ่มขึ้นตามอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในระบบ และค่าใช้จ่ายด้านการดูแลรักษาเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้ปั๊มในระบบ ระยะเวลาคืนทุนประมาณ 3 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารหนึ่งวันเวลาให้กับกริเซจันเพื่อกริศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เช่าเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอุ่นอากาศแบบพาสซีฟ (Passive Air Preheaters) ใช้แลกเปลี่ยนระหว่างก๊าซกับก๊าซ เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำถึงอุณหภูมิปานกลาง ซึ่งมีการป้องกันการปนเปื้อนระหว่างก๊าซร้อนและก๊าซเย็น เครื่องอุ่นอากาศแบบพาสซีฟมีสองแบบ ได้แก่ แบบแผ่น และแบบฮีทไปป์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (ภาพที่ 2.33) ประกอบด้วยแผ่นบางหลาย ๆ แผ่น วางขนานกัน และมีช่องว่างแยกระหว่างก๊าซร้อนกับก๊าซเย็นที่ไหลคนละทิศทาง การปนเปื้อน เกิดขึ้นได้น้อยมาก มีโครงสร้างขนาดใหญ่ ราคาสูงมักเกิดตะกรัน ส่วนเครื่องอุ่นอากาศแบบฮีทไปป์โครงสร้างของเครื่องจะประกอบด้วยท่อเล็กๆ จำนวนมากแบบปลายเปิด (ภาพที่ 2.34) ก๊าซร้อนไหลผ่านด้านหนึ่งของฮีทไปป์ ทำให้ของเหลวที่อยู่ในท่อจะระเหยเป็นไอ ส่วนก๊าซร้อนจะควบแน่นและไหลกลับไปด้านร้อนของท่ออีกครั้ง (ภาพที่ 2.35) มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมาก จึงสามารถใช้ได้กับพื้นที่ขนาดเล็ก

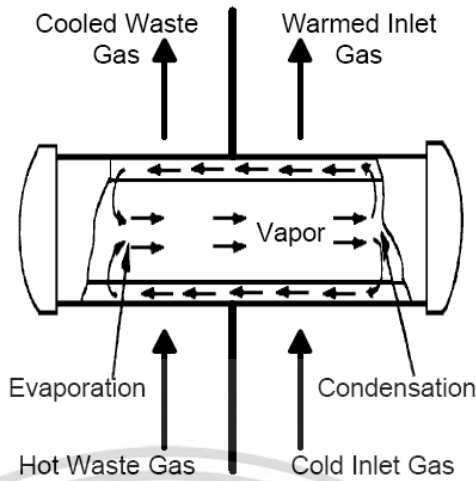


ภาพที่ 2.35 เครื่องอุ่นอากาศแบบพาสซีฟแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับก๊าซ ที่มา : PG & E, 1997



ภาพที่ 2.36 เครื่องอุ่นอากาศแบบฮีทไปป์ ที่มา: Turner, 2006

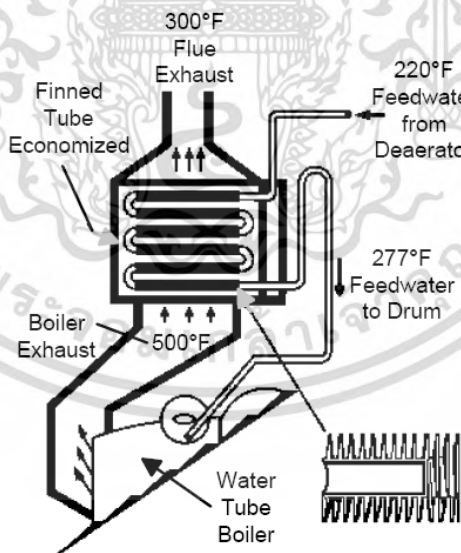
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.37 การทำงานของฮีทไปป์ ที่มา : PG&E, 1997

2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบก๊าซกับของเหลว (Gas-liquid heat exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อครีป หรืออีโคโนไมเซอร์ (Finned Tube Heat Exchanger or Economizer) อีโคโนไมเซอร์ใช้ความร้อนทั้งจากก๊าซไอเสียมาให้ความร้อนของเหลว จะเป็นท่อยึดติดกับครีปเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว ของเหลวในท่อรับความร้อนจากก๊าซไอเสียที่ไหลตัดขวางกับแนวท่อ (ภาพที่ 2.36)

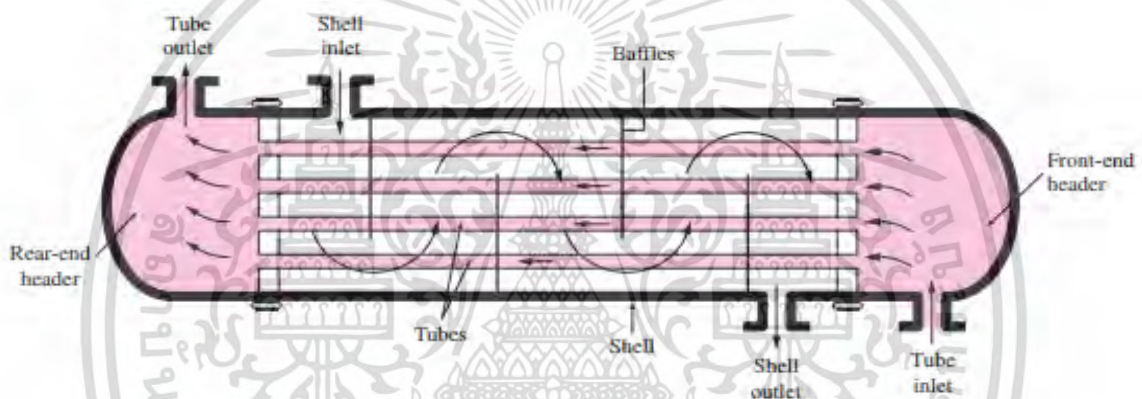


ภาพที่ 2.38 อีโคโนไมเซอร์ที่ติดตั้งกับหม้อต้มน้ำ ที่มา : PG & E, 1997

3) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบของเหลวกับของเหลว (Liquid-liquid heat exchanger)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell-and-Tube Heat Exchanger) ประกอบด้วยชุดท่อขนาดเล็กมัดรวมกันแล้วบรรจุไว้ในเปลือกท่อหรือท่อขนาดใหญ่อีกทีหนึ่ง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวกับของเหลว แต่ก็มีการใช้งานในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับก๊าซ โดยก๊าซ ด้านหนึ่งจะมีแรงดันสูงส่วนอีกด้านหนึ่งมีแรงดันต่ำกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อนี้มีข้อได้เปรียบกว่าอุปกรณ์การพาความร้อน (Convection) ชนิดใช้ท่อแบบอื่น เพราะสามารถถอดชุดท่อเพื่อทำความสะอาดได้สะดวก ทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้มีความเหมาะสมในการใช้งานกับก๊าซที่สกปรกได้มากกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้โดยทั่วไป จะถูกออกแบบและสร้างตามความต้องการของลูกค้าเพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน ดังนั้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้จึงค่อนข้างจะมีราคาแพงกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่น



ภาพที่ 2.39 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger)

ในทางเศรษฐศาสตร์มักจะจำกัดความเป็นไปได้ในการนำความร้อนทิ้งที่อุณหภูมิต่ำกลับมาใช้ใหม่ ในโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้ความร้อนทิ้งคุณภาพต่ำกลับมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่า ด้วยวิธีการที่หลากหลาย ปริมาณจำนวนมากของความร้อนทิ้งที่นำไปใช้ได้อยู่ในช่วง 38 – 200 °C

2.1.7.6 วิธีการคำนวณและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

วิธีที่นิยมใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมี 2 วิธี

1. Log-Mean Temperature Difference Method (LMTD)
2. Effectiveness-NTU Method

พิจารณาวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสองวิธีได้แก่วิธี LMTD และ NTU พบว่าวิธีทั้งสองสามารถใช้หาผลลัพธ์ได้เช่นเดียวกันโดยการใช้วิธี LMTD นั้นเราจำเป็นต้องรู้อุณหภูมิของของไหลทั้งสองที่ทางเข้าและออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอุณหภูมิเหล่านี้ใช้ในการหา Log-Mean Temperature Difference (ΔT_{lm}) ปัญหาที่กำหนดอุณหภูมิดังกล่าวมาให้เรียกว่าปัญหาการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Design Problems) ที่เรียกเช่นนี้เป็นเพราะปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเลือกชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน รวมทั้งการคำนวณพื้นที่ผิวของเครื่องเพื่อให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มาซึ่งอุณหภูมิและอัตราการไหลตามที่กำหนด ตัวอย่างเช่น เรารู้อัตราการไหลของของไหลเย็นและร้อน (\dot{m}_c, \dot{m}_h) อุณหภูมิของของไหลเย็นและร้อนที่เข้าสู่อุปกรณ์ (T_{ci}, T_{hi}) แล้วต้องการอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่จะทำให้ได้อุณหภูมิของของไหลเย็นออกจากอุปกรณ์ (T_{co}) ที่ต้องการ ในกรณีนี้เราสามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน (q) และอุณหภูมิของไหลร้อนที่ออกจากอุปกรณ์ (T_{ho}) จากนั้นก็สามารถคำนวณหา ΔT_{lm} เมื่อได้ค่าเหล่านี้มาก็สามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (A) ได้สำหรับอีกวิธีหนึ่ง คือ NTU การคำนวณหา A ทำได้โดยเริ่มจากการคำนวณหา \mathcal{E} และ C_r จากนั้นก็สามารถใช้กราฟ หรือสมการที่เหมาะสมเพื่อหาค่า NTU ซึ่งสามารถนำไปใช้หา A ได้จากนิยาม NTU

ปัญหาอีกชนิดหนึ่งเป็นปัญหาที่เรารู้ประเภทและขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และต้องการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิของของไหลทั้งสองที่ทางออก เมื่อกำหนดอัตราการไหลและอุณหภูมิของไหลที่ทางเข้า ปัญหานี้มีชื่อเรียกว่า ปัญหาการคำนวณสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Performance Calculation) แม้ว่าปัญหานี้สามารถคำนวณได้โดยใช้ LMTD แต่การคำนวณจะมีความยุ่งยากกว่า คือต้องสมมติค่าจนกว่าจะได้คำตอบที่ถูกต้องโดยใช้กระบวนการทำซ้ำ (Iterative Procedure) ตัวอย่างเช่นเราเดาอุณหภูมิ และหา q และ T_{ho} ได้ จากนั้นก็สามารถคำนวณหา ΔT_{lm} และนำไปใช้ในการหา q ถ้าค่า q ที่ได้นี้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าเราได้ค่าที่ถูกต้องตามต้องการ ปัญหาดังกล่าวจะหมดไปถ้าเราใช้วิธี NTU

ในการศึกษานี้จะกล่าวถึงเฉพาะในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ คือ Log-Mean Temperature Difference (ΔT_{lm}) ซึ่งในที่นี้มีความสามารถในการออกแบบมากเพราะ เรากำหนดอุณหภูมิของอากาศป้อนที่ออกจากอุปกรณ์ตามต้องการ และใช้วิธี Effectiveness-NTU Method หาประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นอากาศ

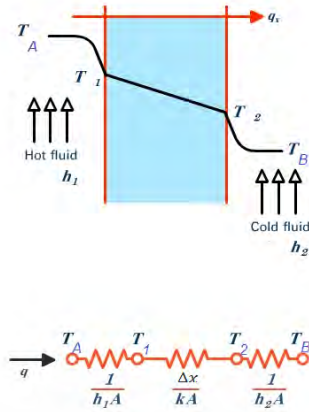
การประยุกต์หลักการของการถ่ายเทความร้อนเพื่อออกแบบอุปกรณ์นั้น เพื่อพัฒนาผลผลิตให้คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ ในที่สุดแล้วผลทางเศรษฐศาสตร์จะเป็นกุญแจที่สำคัญเพื่อนำไปใช้เป็นพื้นฐานของการออกแบบและเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต้องคำนึงถึงน้ำหนักและขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องใช้กับการติดตั้งให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่ และในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำเป็นต้องทราบค่าพื้นฐานเหล่านี้

1) สมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม

พิจารณาผนังระนาบแสดงดังภาพที่ 2.40 ซึ่งมีของไหลร้อน A สัมผัสอยู่ด้านหนึ่ง และของไหลเย็น B สัมผัสอีกด้านหนึ่งของผนัง สมการการถ่ายเทความร้อนเขียน ได้ดังนี้

$$q = h_1 A (T_1 - T_2) = \frac{kA}{\Delta x} (T_1 - T_2) = h_2 A (T_2 - T_B) \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.40 การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังราบ

กระบวนการของการถ่ายเทความร้อนนำมาแสดงเป็นโครงข่ายความต้านทานได้ ดังภาพที่ 2.40 การถ่ายเทความร้อนรวมคำนวณได้จากอัตราส่วนของอุณหภูมิแตกต่างทั้งหมดหารด้วยผลรวมของความต้านทานของความร้อน

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{k A} + \frac{1}{h_2 A}} \quad (2.24)$$

สังเกตได้ว่าค่า $\frac{1}{hA}$ ที่ใช้คือความต้านทานของการพาความร้อน การถ่ายเทความร้อนรวมทั้งหมดได้จากการรวมของค่าการนำความร้อนกับการพาความร้อนให้อยู่ในเทอมของสัมประสิทธิ์ของการการถ่ายเทความร้อนรวม U ซึ่งกำหนดได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$q = UAF\Delta T_{รวม} \quad (2.25)$$

ซึ่ง A คือพื้นที่ที่เหมาะสมกับความร้อนไหล ในสมการ (2.18) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมคือ

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}} \quad (2.26)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะสัมพันธ์กับค่าของ R ของสมการ

$$R = \frac{\Delta T}{\frac{Q}{A}} \quad \text{ดังนั้น}$$

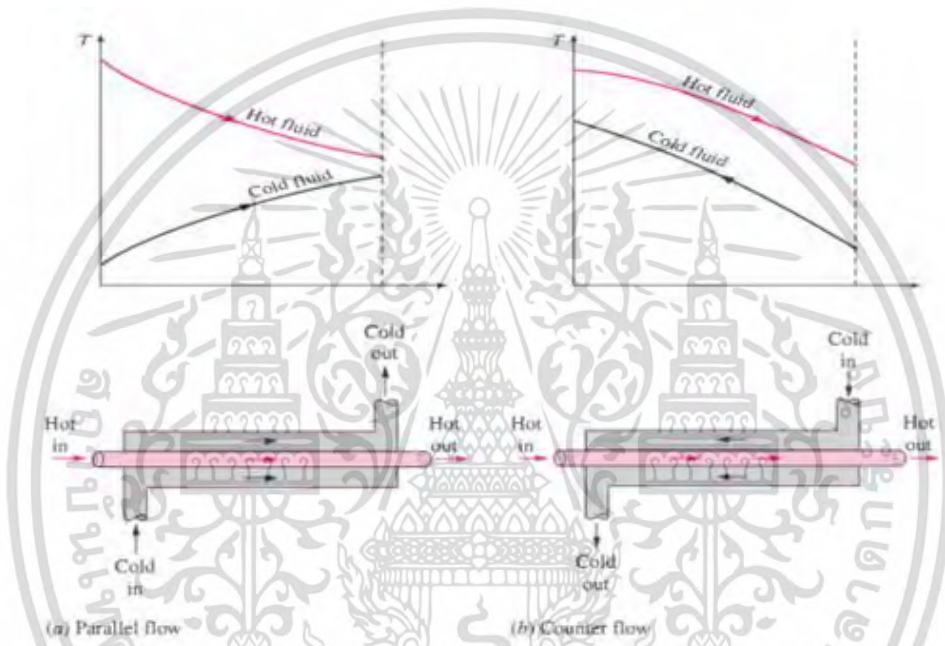
$$U = \frac{1}{\text{ค่าของ R}} \quad (2.27)$$

2) ความแตกต่างของค่าอุณหภูมิล็อกเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อคู่ การไหลของของไหลนั้นเป็นไปได้ทั้งการไหลแบบขนานกันหรือการไหลแบบสวนทางกันและลักษณะของอุณหภูมิที่แสดงด้วยภาพด้านข้างนั้นเป็นไปได้สองกรณีดังแสดงในภาพที่ 2.41 สมมติว่าการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบท่อคู่ ประกอบด้วยสมการดังนี้

เมื่อพิจารณาในภาพที่ 2.41 แสดงค่าอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างการเปลี่ยนแปลงของของไหลร้อนกับของไหลเย็นในระหว่างที่ไหลเข้ากับไหลออก และเราต้องหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำมาใช้กับสมการ (2.28) สำหรับกรณีที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จัดการไหลให้เป็นการไหลแบบขนานการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นที่ da เขียนได้ดังนี้



ภาพที่ 2.41 ลักษณะภาพด้านข้างของอุณหภูมิ
(a) การไหลแบบขนาน (b) การไหลแบบสวนทาง

$$q = UAF\Delta T_m \tag{2.28}$$

- U คือ สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม
- A คือ พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อนที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ
- ΔT_m คือ ชุดค่าของอุณหภูมิแตกต่างของของไหลที่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- F คือ ตัวปรับแก้ (correction factor)

$$dq = -\dot{m}_h c_h dT_h = \dot{m}_c c_c dT_c \tag{2.29}$$

ซึ่งสัญลักษณ์กำกับล่าง h และ c กำหนดให้เป็นของไหลร้อนและของไหลเย็นตามลำดับ การถ่ายเทความร้อนสามารถแสดงได้ดังนี้

$$dq = U(T_h - T_c)dA \tag{2.30}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.29)

$$dT_h = \frac{-dq}{\dot{m}_h c_h}$$

$$dT_c = \frac{-dq}{\dot{m}_c c_c}$$

ซึ่ง \dot{m} แสดงถึงอัตราการไหลของมวล และ c คือค่าความร้อนจำเพาะของของไหล ดังนั้น

$$dT_h - dT_c = -dq \left(\frac{1}{\dot{m}_h c_h} + \frac{1}{\dot{m}_c c_c} \right) \quad (2.31)$$

ให้แก้ปัญหาคือหาค่า dq จากสมการ (2.30) และแทนค่าลงในสมการที่ (2.31)

$$\frac{d(T_h - T_c)}{T_h - T_c} = -U \left(\frac{1}{\dot{m}_h c_h} + \frac{1}{\dot{m}_c c_c} \right) dA \quad (2.32)$$

สมการดิฟเฟอเรนเชียลนี้ อาจจะทำกรอินทิเกรตระหว่างเงื่อนไข 1 ไป 2 ดังแสดงในภาพที่ 2.41 ผลลัพธ์ที่ได้คือ

$$\ln \frac{T_{h2} - T_{c2}}{T_{h1} - T_{c1}} = -UA \left(\frac{1}{\dot{m}_h c_h} + \frac{1}{\dot{m}_c c_c} \right) \quad (2.33)$$

ย้อนกลับไปสมการที่ (2.24) ผลที่ได้ของ $\dot{m}_c c_c$ และ $\dot{m}_h c_h$ อาจนำมาแสดงในเทอมของการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด q และอุณหภูมิที่แตกต่างกันทั้งหมดของของไหลร้อนและเย็น ดังนั้น

$$\dot{m}_h c_h = \frac{q}{T_{h1} - T_{h2}}$$

$$\dot{m}_c c_c = \frac{q}{T_{c2} - T_{c1}}$$

ให้แทนความสัมพันธ์เหล่านี้ลงในสมการ (2.33)

$$q = UA \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln \left(\frac{T_{h2} - T_{c2}}{T_{h1} - T_{c1}} \right)} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเปรียบเทียบสมการ (2.34) กับ (2.28)

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h2}-T_{c2}) - (T_{h1}-T_{c1})}{\ln\left(\frac{T_{h2}-T_{c2}}{T_{h1}-T_{c1}}\right)} \quad (2.35)$$

อุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้เรียกว่า ค่าแตกต่างของอุณหภูมิล็อกเฉลี่ย (log-mean temperature difference; LMTD) รายละเอียดที่ปรากฏก็คือ ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ปลายด้านหนึ่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมีความน้อยกว่าค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ปลายอีกด้านหนึ่งหารด้วยค่าล็อกธรรมชาติของอัตราส่วนอุณหภูมิที่แตกต่างกันทั้งสองนี้ สำหรับผลที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นนั้นเป็นค่าความสัมพันธ์ที่ได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้คำนวณค่า LMTD ในกรณีที่เป็นการไหลแบบสวนทาง อย่างไรก็ตามค่า LMTD มีสมมุติฐานที่สำคัญ 2 ประการ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลต้องไม่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าอุณหภูมิ และ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าคงที่ตลอดช่วงที่ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้

สำหรับสมมุติฐานประการที่สองโดยปกติแล้วสำคัญมากกว่าสมมุติฐานประการที่หนึ่งเพราะมีผลต่อจุดทางเข้า ความหนืดของของไหลและการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพการนำความร้อน เป็นต้น

3) การสมดุลความร้อน

ความร้อนจะถ่ายเทผ่านผนังของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้สภาวะคงที่ (steady state) ปริมาณความร้อนที่สูญเสียของของไหลอุณหภูมิสูงจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ได้รับของของไหลอุณหภูมิต่ำ

$$q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (2.36)$$

$$q_c = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (2.37)$$

$$q_h = q_c = q$$

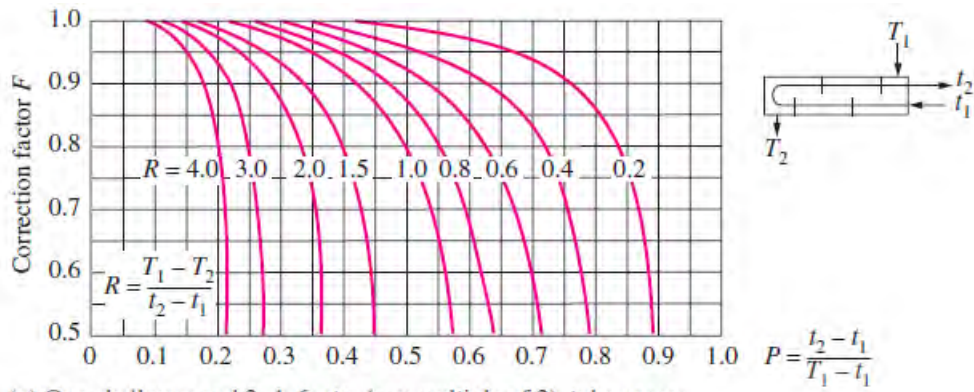
และอัตราการไหลของของไหลหาได้จาก

$$\dot{m} = \rho VA \quad (2.38)$$

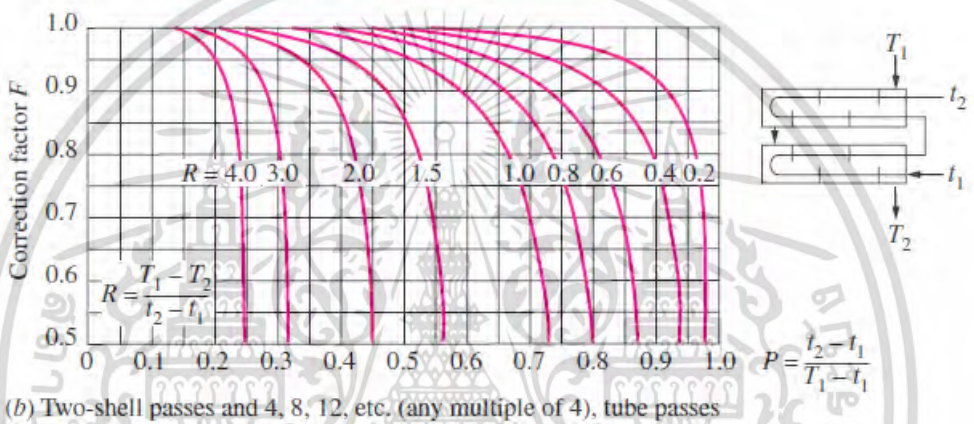
โดยที่ V ได้มาจากการใช้เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer)

4) ค่า correction factor, F ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ

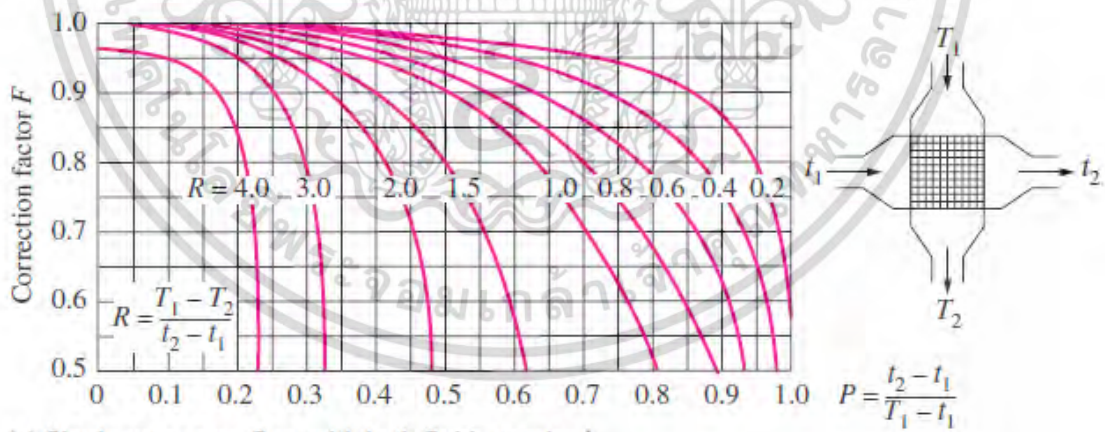
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.42 ค่าปรับแก้แบบ one-shell pass

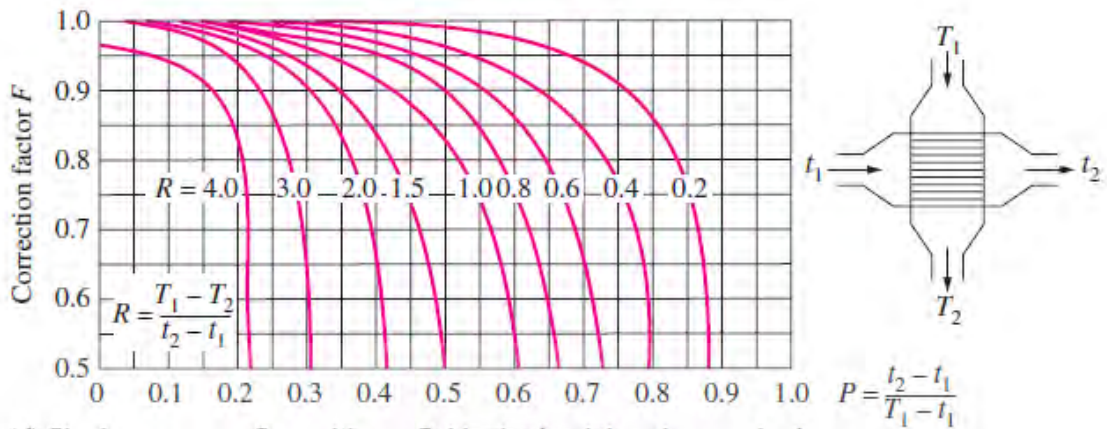


ภาพที่ 2.43 ค่าปรับแก้แบบ two-shell passes



ภาพที่ 2.44 ค่าปรับแก้แบบ Single-pass cross-flow with both fluids unmixed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.45 ค่าปรับแก้แบบ Single-pass cross-flow with one mixed and the other unmixed

5) การหาประสิทธิภาพด้วยวิธี Effectiveness-NTU Method

ค่า effectiveness เกี่ยวข้องกับ NTU (Number of transfer units) ถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดย nusselt อัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถหาได้จากสมดุลพลังงานของของไหลร้อนหรือของไหลเย็น ดังนั้นจะได้

$$\dot{Q}_{max} = C_c(T_{c,o} - T_{c,i}) = C_h(T_{h,i} - T_{h,o}) \tag{2.39}$$

จากผลลัพธ์ข้างต้นสามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{Q}_{max} = C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \tag{2.40}$$

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \tag{2.41}$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$\epsilon = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \tag{2.42}$$

หรือ

$$\epsilon = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \tag{2.43}$$

- โดยที่ \dot{Q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่แท้จริง (W)
- \dot{Q}_{max} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เป็นไปได้ (W)
- C_c, C_h คือ อัตราความจุความร้อนของของไหลเย็นและร้อน (kW/°C)
- $T_{c,i}, T_{c,o}$ คือ อุณหภูมิของของไหลเย็นเข้าและออก (°C)
- $T_{h,i}, T_{h,o}$ คือ อุณหภูมิของของไหลร้อนเข้าและออก (°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_{min}	คือ ค่าน้อยที่สุดระหว่าง C_c และ C_h
ϵ	คือ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

2.1.7.7 กรณีตัวอย่างการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับการอนุรักษ์พลังงานในระบบบอบแห้ง

หาพื้นที่ผิวทั้งหมดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อโดยจะไหลแบบตัดกัน ด้านท่อ ทำให้อากาศบริสุทธิ์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 32 ไปเป็น 40°C โดยอากาศบริสุทธิ์ถูกดูดเข้ามาด้วยความเร็วลม 11 m/s ผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วด้านเปลือกมีการไหลผ่านครั้งเดียวโดยใช้อากาศทิ้งจากห้องอบแห้งขนาด 30 × 30 cm² มีความเร็วอากาศ 1 m/s ไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอุณหภูมิ 55°C โดยความร้อนจำเพาะของอากาศเท่ากับ 1.008 kJ/kg°C และสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวมเท่ากับ 5 w/m²°C

ขั้นตอนที่ 1 หาอุณหภูมิของอากาศร้อนทิ้งที่ออกมาจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

(ด้านท่อ) อัตราการไหลของอากาศ(Q) = พื้นที่หน้าตัดท่อ(A) × ความเร็วลม(V)

$$= \frac{\pi D^2}{4} \times V$$

$$= \frac{\pi (0.1016)^2}{4} \times 11$$

$$= 0.089135 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$= 89.15313 \text{ kg/s}$$

(ด้านเปลือก) อัตราการไหลของอากาศ (Q) = พื้นที่หน้าตัดท่อ(A) × ความเร็วลม(V)

$$= 0.3 \times 0.3 \times 1$$

$$= 0.09 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$= 90.018 \text{ kg/s}$$

$$q = \dot{m}_c c_c \Delta T_c = \dot{m}_h c_h \Delta T_h$$

$$(89.15313)(1.008)(40-32)$$

$$\Delta T_h = \frac{(90.018)(1.008)}{(89.15313)(1.008)}$$

$$= 7.9231$$

ดังนั้น อุณหภูมิของอากาศร้อนทิ้ง $T_{h2} = 55 - 7.9231 = 47.07686 \text{ }^\circ\text{C}$

ขั้นตอนที่ 2 ความต้องการของการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดสำหรับอากาศบริสุทธิ์

$$q = \dot{m}_c c_c \Delta T_c$$

$$= (89.15313)(1.008)(40-32)$$

ดังนั้น การถ่ายเทความร้อนทั้งหมดสำหรับอากาศบริสุทธิ์ = 718.9309 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกัน

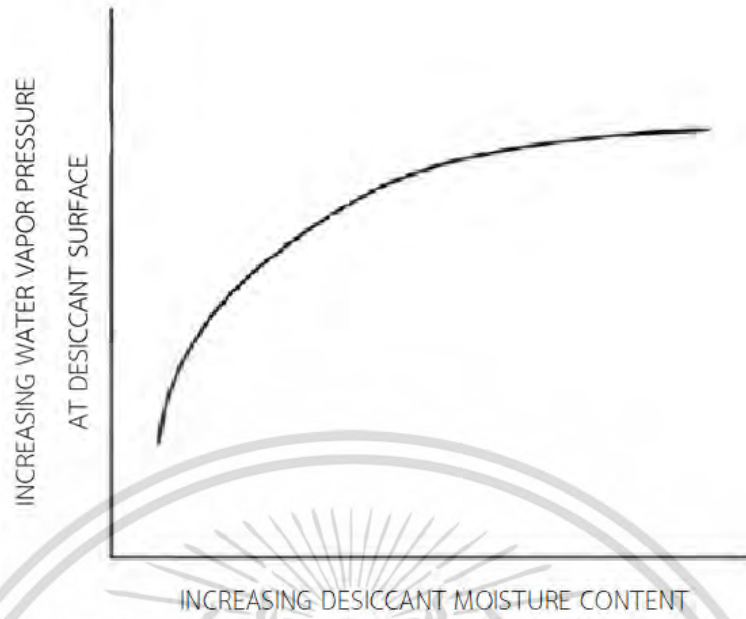
$$\begin{aligned} \text{LMTD} = \Delta T_m &= \frac{(T_{h2}-T_{c2})-(T_{h1}-T_{c1})}{\ln\left(\frac{T_{h2}-T_{c2}}{T_{h1}-T_{c1}}\right)} \\ &= \frac{(47.07686-40)-(55-32)}{\ln\left(\frac{47.07686-40}{55-32}\right)} \\ &= 15.0384 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= UA\Delta T_m \\ \text{พื้นที่ทั้งหมดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(A)} &= \frac{718.9309}{(5)(15.0384)} = 13.6589 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

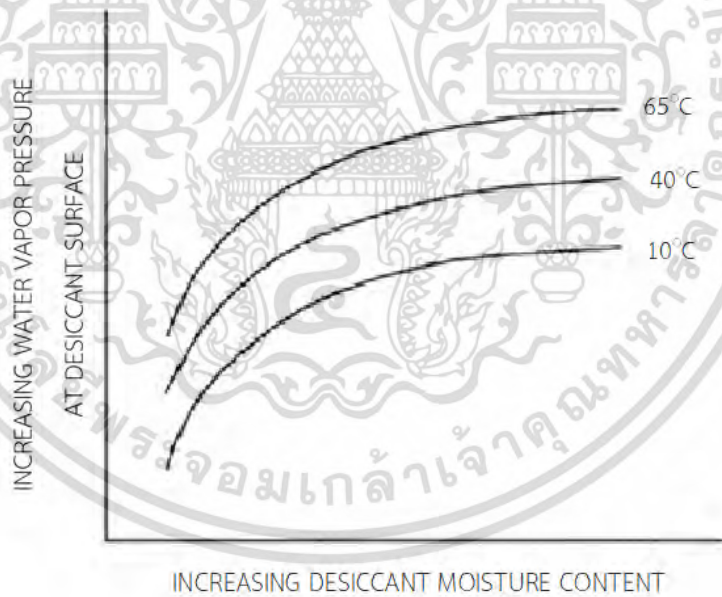
2.1.8 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบการลดความชื้นในอากาศโดยใช้สารดูดความชื้น

2.1.8.1 วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น (ชาตรี, 2553)

หลักการทำงานของระบบ คือ เมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำในอากาศ สารดูดความชื้นจะเริ่มกระบวนการดูดความชื้นในอากาศ ในขณะที่เมื่อใดก็ตามที่ความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำในอากาศ สารดูดความชื้นจะเริ่มกระบวนการคายไอน้ำออกมาในอากาศ การนำสารดูดความชื้นมาคืนสภาพสารดูดความชื้นนั้น ถือเป็นกระบวนการอบสารดูดความชื้นให้แห้งโดยใช้ความร้อนและลดอุณหภูมิของสารดูดความชื้นให้ลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิของอากาศปกติ ซึ่งความดันไอน้ำที่ผิวสารดูดความชื้นจะแปรผันตรงกับปริมาณความชื้นที่ผิวของสารดูดความชื้นดังภาพที่ 2.46 และจากภาพที่ 2.47 เมื่อพิจารณาที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารดูดความชื้น จะพบว่าความดันไอน้ำที่ผิวสารดูดความชื้นจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิของสารดูดความชื้นเช่นกัน



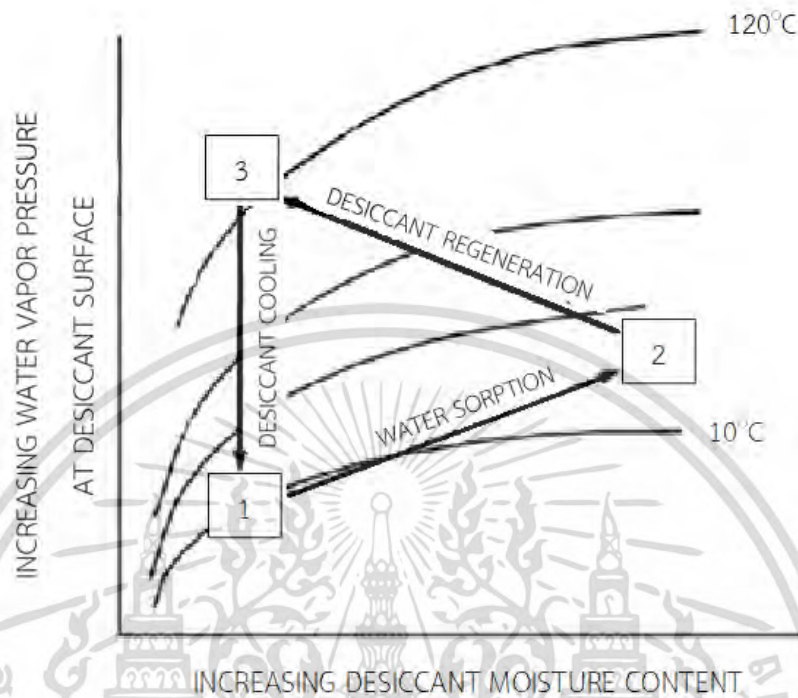
ภาพที่ 2.46 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำกับปริมาณความชื้นในสารดูดความชื้น
ที่มา : ชาตรี, 2553



ภาพที่ 2.47 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำกับปริมาณความชื้นในสารดูดความชื้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารดูดความชื้น
ที่มา : ชาตรี, 2553

จากภาพที่ 2.48 แสดงถึงพลังงานที่ใช้ในวัฏจักรสารดูดความชื้น จะประกอบด้วย 3 พลังงานหลักสำหรับกระบวนการอบสารดูดความชื้นให้แห้ง คือ พลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของสารดูดความชื้นจนทำให้ความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำในอากาศ (จากจุดที่ 1 ถึง 2) พลังงานที่ใช้ในการคืนสภาพสารดูดความชื้น คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้ความชื้น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลายเป็นไอ และพลังงานความร้อนในการกำจัดน้ำออกจากสารดูดความชื้น (จากจุดที่ 2 ถึง 3) และพลังงานที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของสารดูดความชื้น (จากจุดที่ 3 ถึง 1)



ภาพที่ 2.48 วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น

ที่มา : ชาตรี, 2553

2.1.8.2 ประสิทธิภาพในการลดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น

ความสามารถในการลดความชื้นในวงล้อดูดความชื้นสามารถพิจารณาได้จากสองกระบวนการหลักที่เกิดขึ้น คือกระบวนการถ่ายโอนเชิงมวลและการถ่ายเทความร้อน (คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มก., 2560)

การลดความชื้นด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ถือเป็นระบบการลดความชื้นแบบอะเดียแบติก (Mandegari, 2009) โดยระบบจะไม่มี การถ่ายเทความร้อนและมวลสารให้กับสิ่งแวดล้อม

ซึ่งจากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (กฎอนุรักษ์พลังงาน) คือกระบวนการใด ๆ พลังงานอาจเปลี่ยนแปลงสภาพได้ แต่ไม่สามารถสูญหายหรือเกิดขึ้นใหม่ได้ โดยความร้อนที่ระบบจะได้รับเท่ากับพลังงานภายในของระบบที่เพิ่มขึ้นบวกกับงานที่ระบบได้รับจากสิ่งแวดล้อม (Jones, 2017) ซึ่งสำหรับกฎอนุรักษ์พลังงานสามารถเขียนอยู่ในภาพแบบสมการ (2.43)

กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (กฎอนุรักษ์พลังงาน) (คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มก., 2560)

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (2.43)$$

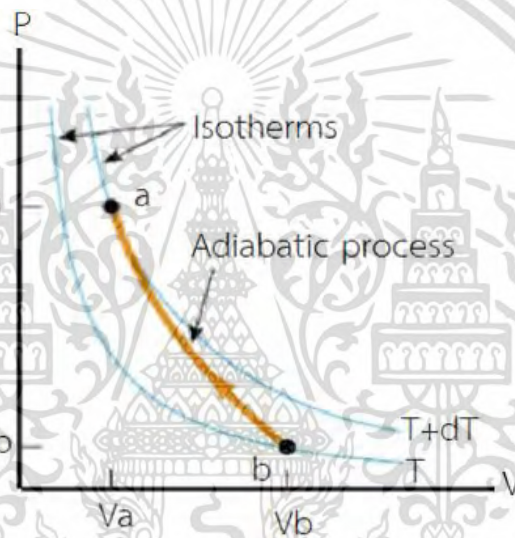
เมื่อ U คือ พลังงานภายใน (+ พลังงานที่เพิ่มขึ้น, - พลังงานที่ลดลง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W คือ งานที่ทำโดยระบบ (+ งานที่ทำโดยระบบ, - งานที่ให้กับระบบ)

Q คือ ความร้อนที่เข้าสู่ระบบ (+ ความร้อนที่เข้าสู่ระบบ, - ความร้อนที่ออกสู่ระบบ)

กระบวนการลดความชื้นแบบอะเดียแบติกสำหรับแก๊สอุดมคติจะเป็นไปตามแผนภูมิ ดังภาพที่ 2.49 เมื่อแก๊สขยายตัวจากปริมาตร V_a เป็น V_b แก๊สจะทำงานส่งผลให้พลังงานภายในและอุณหภูมิของแก๊สลดลงด้วย และถ้าจุด a แทนสถานะเริ่มต้นที่อยู่บนเส้น isotherm ($T+dT$) แล้วจุด b ซึ่งเป็นสถานะสุดท้ายจะอยู่บนเส้น isotherm ที่อุณหภูมิต่ำกว่า (T) สำหรับแก๊สอุดมคติ จากภาพจะเห็นได้ว่าเส้นโค้งอะเดียแบติก ณ จุดใด ๆ จะมีความชันมากกว่าเส้นโค้ง isotherm ที่ผ่านจุดเดียวกันเมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่า (ปฏิกิริยาเกิดในภาชนะที่สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ โดยปริมาตรและความดันจะเปลี่ยนแปลงไป) (Jones, 2017) กระบวนการอัดตัวแบบอะเดียแบติกจากปริมาตร V_a เป็น V_b จะสามารถเป็นแบบผันกลับและมีอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน (สถาบันนวัตกรรมฯ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2560)



ภาพที่ 2.49 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะกระบวนการอะเดียแบติกสำหรับแก๊สอุดมคติ
ที่มา : สถาบันนวัตกรรมฯ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2560

ในกระบวนการลดความชื้นแบบอะเดียแบติก ระบบจะไม่มีความร้อนไหลเข้าหรือออกจากระบบ ($\Delta Q=0$) ซึ่งเกิดได้ในกรณีที่ให้งานแก่ระบบอย่างรวดเร็ว หรือ ระบบถูกห่อด้วยฉนวน ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.43) (Mahidol, 2017)

$$\Delta U = \Delta W \quad (2.43)$$

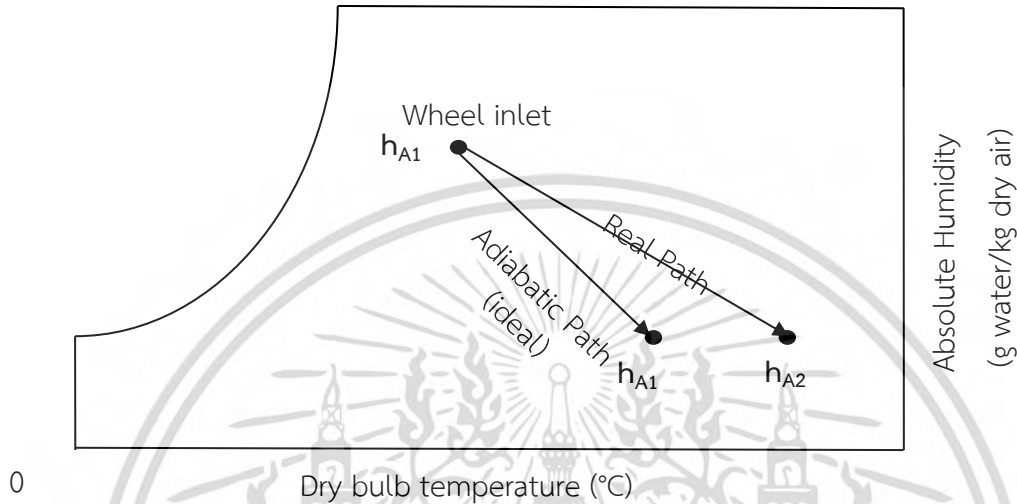
$$\Delta U = -P\Delta V \quad (2.44)$$

เมื่อ P คือ ความดัน

V คือ ปริมาตร

โดยสำหรับกระบวนการอะเดียแบติกดังภาพที่ 2.50 แสดงความแตกต่างระหว่างค่าเอนทัลปีของอากาศทางเข้าและออกจากวงล้อดูดความชื้นจะเท่ากับศูนย์ คือระบบจะไม่มีความร้อนไหลเข้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือออกจากระบบ ทำให้การเบี่ยงเบนของค่าเอนทัลปีจึงมีผลต่อค่าประสิทธิผลของกระบวนการอะเดียแบติก ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.45 ระหว่างเส้นกระบวนการอะเดียแบติกที่เป็นไปตามทฤษฎีและเส้นกระบวนการอะเดียแบติกที่ได้จากการทดลอง ซึ่งระบบจะสามารถทำการลดความชื้นได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อค่าประสิทธิผลมีค่าเป็น 100% (Mandegari, 2009)



ภาพที่ 2.50 แผนภูมิไซโครเมตริกในกระบวนการลดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้นซึ่งเป็นไปตามกระบวนการอะเดียแบติก ที่มา : Mandegari, 2009

ประสิทธิภาพกระบวนการอะเดียแบติก (Adiabatic DW 's effectiveness)

$$\epsilon = 1 - \frac{(h_{A2} - h_{A1})}{h_{A1}} = \frac{2h_{A1} - h_{A2}}{h_{A1}} \quad (2.45)$$

เมื่อ h_{A1} และ h_{A2} คือ ค่าเอนทัลปีของอากาศทางเข้าและออกจากวงล้อดูดความชื้นที่เป็นไปตามการลดความชื้นแบบกระบวนการอะเดียแบติก และค่าเอนทัลปีของอากาศหลังออกจากวงล้อดูดความชื้นที่ได้จากการทดลองจริง ตามลำดับ

2.1.9 การลดความชื้นในเมล็ดข้าว

การลดความชื้นเมล็ด (หน่วยส่งเสริมและพัฒนาสหกรณ์, 2560) ความชื้นในเมล็ดข้าวมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา ซึ่งหลังจากเก็บเกี่ยวที่นวดข้าวแล้วควรลดความชื้นเมล็ดให้เร็วที่สุด ข้าวเปลือกที่ดีควรมีความชื้นอยู่ในช่วง 13-14% ซึ่งการรักษาความชื้นในระดับนี้จะส่งให้สามารถเก็บข้าวเปลือกไว้ได้นานขึ้น 2-3 เดือน แต่ถ้าหากต้องการเก็บรักษาไว้ได้นานมากกว่า 3 เดือนควรลดความชื้นของเมล็ดให้ต่ำกว่า 12% โดยการลดความชื้นในเมล็ดข้าวสามารถแบ่งได้ 2 วิธีหลัก คือ วิธีธรรมชาติและ การใช้เครื่องอบ

วิธีธรรมชาติ (Natural drying or Sun drying) ใช้แสงแดดเป็นแหล่งความร้อนและอากาศทำให้ความชื้นลดลง เกษตรกรลดความชื้นของข้าวโดยวิธีธรรมชาติ 2 วิธี คือ การตากข้าวทิ้งไว้ในนาหลังการเก็บเอกสารนเป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตราหน้าไปเซปรีเยชันดานการคําไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยว การนำข้าวไปนวดทันทีโดยไม่ตากข้าวไว้ในนาจะได้ข้าวมีคุณภาพการสีที่ดีที่สุด การตากข้าวทิ้งไว้ในนามีผลทำให้คุณภาพการสีของข้าวลดลง การตากไว้ในนานานขึ้นจะยิ่งทำให้คุณภาพการสีของข้าวลดลง และการตากในลานหลังนวดข้าวแล้ว การลดความชื้นด้วยแสงแดด ช่วยลดความเสียหายของเมล็ดข้าวได้ดีกว่าการตากข้าวไว้ในนา การตากข้าวในลานให้ได้ผลดีมีข้อปฏิบัติดังนี้คือ ควรมีวัสดุที่สะอาดและแห้งรองรับ เช่น ฟ้าใบหรือเสื่อที่สานด้วยไม้ไผ่ ไม่ควรตากกับพื้นซีเมนต์หรือถนนโดยตรง เพราะเมล็ดอาจได้รับความร้อนจากพื้นสูงเกินไปทำให้เกิดการแตกร้าวภายในเมล็ดได้ในลานนวดควรมีวัสดุรองรับ เพื่อป้องกันสิ่งเจือปน และความชื้นจากพื้นดินจะมารวมอยู่ที่ผิวดิน ทำให้เมล็ดที่ติดกับผิวดินมีความชื้นสูง ความหนาของข้าวที่ตากควรมิเกิน 5-10 ซม. หากการตากเมล็ดหนาเกินไปทำให้การระบายอากาศไม่ดี ข้าวแห้งช้า การตากเมล็ดบางเกินไปจะทำให้อุณหภูมิของข้าวสูงถึง 55-70°C ซึ่งมีผลต่อคุณภาพการสี เพราะเกิดการแตกร้าวขึ้นภายในเมล็ดและเกิดเมล็ดเหลืองได้ระหว่างการตากควรหมั่นกลับกองข้าวทุก ๆ 2 ชั่วโมง หรือวันละ 4 ครั้ง เพื่อช่วยให้ลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ความชื้นสัมพัทธ์ขณะลดความชื้นควรต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่จะสมดุลย์ของเมล็ด การลดความชื้นจึงจะได้ผลทั้งนี้ความชื้นสัมพัทธ์ไม่ควรจะเกิน 60% เวลากลางคืนควรใช้วัสดุคลุมกองเมล็ดข้าวเพื่อป้องกันน้ำค้างหรือฝน และเวลาตากข้าวไม่ควรตากนานเกินไป เมื่อมีความชื้นประมาณ 12-14% ให้หยุดตากข้าวที่เก็บไว้เป็นเมล็ดพันธุ์ จะเก็บรักษาได้นาน มีความงอกสูงหากความชื้นของเมล็ดต่ำ และขณะเก็บต้องพยายามรักษาให้ระดับความชื้นของเมล็ดต่ำอยู่เสมอ เมล็ดพันธุ์ข้าวที่เก็บไว้ทำพันธุ์ควรผึ่งแดดเพื่อลดความชื้นให้เหลือ 9-10%

การใช้เครื่องอบ (Artificial drying) การใช้เครื่องอบมีข้อดี คือ สามารถทำได้ทุกสภาวะอากาศ แม้ขณะฝนตกหรือมีแสงแดดน้อย ไม่เปลืองลานตาก สามารถควบคุมการลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ ใช้เวลาการลดความชื้นไม่นานและยังสามารถป้องกันการสูญเสียคุณภาพการสีได้ดีกว่าวิธีธรรมชาติแต่มีข้อเสีย คือ เสียค่าใช้จ่ายสูง การเปรียบเทียบคุณภาพการสีข้าวที่ตากลดความชื้นและใช้เครื่องอบแห้งพบว่าวิธีการผึ่งแดดจะได้ข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวระหว่าง 40-50% และน้อยกว่า 40% การใช้เครื่องอบแห้งได้ข้าวเต็มเมล็ดระหว่าง 50-60% การลดความชื้นของข้าวเปลือกอุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรจะสูงเกิน 50°C และถ้าเป็นเมล็ดพันธุ์ไม่ควรสูงเกิน 43°C ข้อเสียของการลดความชื้นในเมล็ดข้าวล่าช้าจะทำให้เมล็ดมีความเสียหายจากเชื้อรา เกิดข้าวเมล็ดเหลือง และเมล็ดพันธุ์เสื่อมความงอกเร็วขึ้น

สำหรับการเก็บรักษาเมล็ดข้าว สามารถแบ่งวิธีการเก็บรักษาข้าวออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

การเก็บในสภาพปกติไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Uncondition storage) ภายในโรงเก็บ เป็นวิธีที่นิยมใช้ในประเทศไทยเพราะลงทุนน้อย และเสียค่าใช้จ่ายต่ำ

การเก็บในที่ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ไม่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เช่น การเก็บไว้ในตู้เย็นหรือไนโซลเก็บข้าวที่มีการเป่าลมเย็น เป็นต้น

การเก็บในที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ ไม่ควบคุมอุณหภูมิ ได้แก่ การเก็บข้าวไว้ในภาชนะเก็บที่มิดชิดสามารถป้องกันการเคลื่อนผ่านเข้าออกของอากาศได้ (Hermetic conditon) เช่น การเก็บเมล็ดพันธุ์ไว้ในปี๊บสังกะสี หรือ ถังพลาสติก การเก็บรักษาด้วยวิธีนี้ ความชื้นของเมล็ดข้าวก่อนเก็บต้องไม่เกิน 10% โดยการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวให้เหลือ 6% แล้วเก็บในปี๊บสังกะสีปิดผนึกฝาให้แน่น เก็บรักษาในโรงเก็บธรรมดาจะสามารถเก็บเมล็ดพันธุ์ข้าวไว้ได้นานถึง 8 ปี ความงอกของเมล็ดลดลงเหลือ 80% ส่วนเมล็ดพันธุ์ข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ญี่ปุ่นที่นำมาปลูกในประเทศไทย เมื่อเก็บรักษาในปีสังกะสีโดยลดความชื้นให้เหลือ 9% จะยืดอายุการเสื่อมความงอกนาน 40 เดือน และสำหรับเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ความชื้น 10% ในถังพลาสติกหรือถังน้ำมันขนาด 200 ลิตรจะเก็บรักษาได้นาน 2 ปี

การเก็บในที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ สามารถป้องกันและลดความเสียหายของเมล็ดข้าวและคงคุณภาพได้ยาวนานหลายสิบปี แต่เสียค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูงมาก จึงนิยมใช้สำหรับงานการอนุรักษ์เชื้อพันธุ์ (Germplasm bank) เท่านั้น

2.1.10 ข้าวกล้องงอก

ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice หรือ GABA-rice) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน จากการศึกษาทางกายภาพและทางชีวเคมีพบว่า ข้าวกล้องงอกประกอบด้วยสารอาหารจำนวนมาก เช่น โยอาอาหาร กรดไฟติก (Phytic acid) วิตามินซี วิตามินอี และ GABA (Gamma aminobutyric acid) (Kaosa-ard and Songsermpong, 2012) โดยจากงานวิจัยพบว่าข้าวกล้องที่ผ่านการเพาะงอกจะมีสารมากกว่าข้าวกล้องปกติถึง 15 เท่า (บุษยา, 2560) การบริโภคข้าวกล้องงอกเป็นประจำจะสามารถช่วยป้องกันโรคต่าง ๆ ได้ เนื่องจากสารกาบาในข้าวกล้องงอกเป็นกรดอะมิโนที่ผลิตจากกระบวนการ decarboxylation ของกรดอะมิโน (Glutamic acid) (สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร, 2560) ซึ่งกรดนี้จะมียับยั้งบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท (Neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง รักษาสมดุลของสารสื่อประสาทในสมอง (Miura and Mizukuchi, 2006) นอกจากนี้ยังเป็นสารสื่อประสาทประเภทสารยับยั้ง (Inhibitor) รักษาสมดุลในสมองที่ได้รับการกระตุ้นซึ่งช่วยทำให้สมองเกิดการผ่อนคลายและนอนหลับสบาย ป้องกันการเกิดโรคสมองเสื่อมหรือโรคอัลไซเมอร์ อีกทั้งยังทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นต่อมไร้ท่อ (Anterior pituitary) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโต (HGH) ทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อ ทำให้กล้ามเนื้อเกิดความกระชับและเกิดสาร lipotropic ซึ่งเป็นสารป้องกันการสะสมไขมัน (Liao and Wang, 2013) ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด (Seiki and Nagase, 2005) และ การเร่งการเผาผลาญแอลกอฮอล์ (Preventing chronic alcohol-related diseases) (Oh, Soh and Cha, 2003) ทั้งนี้คาดว่าจะยังมีฤทธิ์ระงับมะเร็งลำไส้ใหญ่ ป้องกันมะเร็งลำไส้และลดอาการท้องผูก (ศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี, 2560) เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีการนำสารกาบามาใช้ในวงการแพทย์ (วิรัชพัชร, 2560) เพื่อการรักษาโรคเกี่ยวกับระบบประสาทต่าง ๆ หลายโรค เช่น โรควิตกกังวล โรคนอนไม่หลับ โรคลมชัก เป็นต้น

โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 ถือเป็นพันธุ์ข้าวที่เหมาะสมที่สุดในการเพาะงอก ให้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระสูงสุดเมื่อเทียบกับการเพาะงอกข้าวเหนียวดำและข้าวหอมนิล (วรัณพร, 2560) สภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ข้าวกล้องงอกได้ดีคือการนำข้าวกล้องที่ผ่านการกะเทาะเปลือกมาไม่นานเกิน 2 สัปดาห์แช่น้ำราว 48 - 72 ชั่วโมงในหม้อแช่ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิ การไหลเวียนน้ำ ความดันและความเป็นกรดต่างของน้ำอย่างสม่ำเสมอ (ทีมงานครบวงจรครัวบ้านนอกดอทคอม, 2560) ซึ่งเมล็ดข้าวกล้องที่ผ่านการเพาะงอกแล้วจะสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของเมล็ดข้าวได้ดังภาพ 2.51 นอกจากนี้จากการศึกษาของสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,

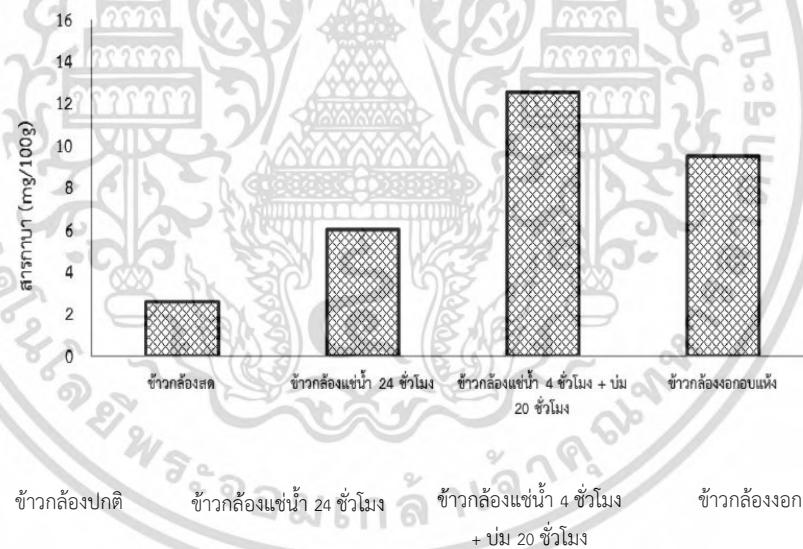
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2560) ดังภาพ 2.52 พบว่าการเพาะงอกข้าวกล้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง คือ 4 ชั่วโมงสำหรับการแช่ข้าวกล้องในน้ำสะอาดและ 20 ชั่วโมงสำหรับการบ่มในภาชนะ (กล่องพลาสติก) จะได้ข้าวกล้องงอกที่มีปริมาณสารกาบาสูงสุด โดยหลังจากการอบแห้ง คือการนำข้าวกล้องงอกที่ผ่านการเพาะงอกไปอบแห้งเพื่อลดความชื้นและยืดอายุการเก็บรักษาจะส่งผลกระทบต่อคุณค่าทางอาหารที่ลดลงของข้าวกล้องงอกเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 2.51 ภาพเปรียบเทียบระหว่างเมล็ดข้าวกล้องธรรมดา (แถบบน) กับเมล็ดข้าวกล้องงอก (แถบล่าง)

ที่มา : บุญยา, 2560



ภาพที่ 2.52 ปริมาณสารกาบา (GABA) ของข้าวกล้องงอกจากขั้นตอนการผลิตช่วงต่าง ๆ

ที่มา : สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2560

ในปัจจุบันประเทศไทยถือได้ว่าเป็นผู้ส่งออก "ข้าว" เป็นอันดับหนึ่งของโลก (ชาญวิทย์, 2560) โดยในปี พ.ศ. 2548 มูลค่าการส่งออกสินค้าข้าวและผลิตภัณฑ์แปรรูปมีมูลค่าสูงถึง 98,777 ล้านบาท ซึ่งในจำนวนนี้เป็นค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ในภาพของ "ข้าวสาร" ที่ไม่ได้มีการแปรรูปถึงร้อยละ 95 ของผลิตภัณฑ์ข้าวทั้งหมด จากที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าสัดส่วนการส่งออกในภาพของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากข้าวที่มาจากอุตสาหกรรมข้าวไทยเพียงร้อยละ 5 หรือคิดเป็นมูลค่า 5,858 ล้านบาท ดังนั้น หากเราสามารถพัฒนาข้าวสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์นวัตกรรมที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับประเทศได้มากกว่าเดิม 1-5 เท่า ซึ่งส่งผลให้ประเทศมีศักยภาพทางการแข่งขันกับอุตสาหกรรมข้าวในตลาดโลกได้มากยิ่งขึ้น

2.1.11 สารกาบา

สาร “GABA” (เทคโนโลยีชาวบ้าน, 2560) ย่อมาจากคำว่า “Gamma – Amino Butyric Acid” (แกมมา-อะมิโนบิวโทริกแอซิด) สารตัวนี้ทำหน้าที่เป็น Neurotransmitter หรือสารสื่อประสาทในสมองประเภทสารยับยั้ง (Inhibitor) ทำหน้าที่รักษาสมดุลและควบคุมการทำงานของสมอง สารกาบา (พิมพ์เพ็ญ, 2560) พบมากในใบชาแห้ง แดงเมลอน มะเขือเทศ กิมจิ (Kimchi) ช็อกโกแลต (Chocolate) และข้าวกล้อง ซึ่งในข้าวกล้องกาบาจะเพิ่มขึ้นสูงมากระหว่างกระบวนการงอก

โดยปกติสารกาบาชนิดนี้มีอยู่ในระบบประสาทส่วนกลางของมนุษย์ทุกคนอยู่แล้ว ซึ่งสารกาบาสามารถเกิดขึ้นได้จากกระบวนการทางธรรมชาติที่เปลี่ยนสารกลูตาเมท (Glutamate) ในสมองให้กลายเป็นสารกาบานั่นเอง แต่การได้รับสารกลูตาเมทจากธรรมชาติเพียงอย่างเดียว อาจจะมีผลแปรปรวนในด้านปริมาณ และในบางครั้งอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกายมนุษย์ ด้วยเหตุนี้เองจึงมักมีการเติมกาบาเสริมลงในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ผู้บริโภคได้รับสารกาบาในปริมาณที่เพียงพออย่างแท้จริง

สารกาบาที่ใช้เติมในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อลดความเครียด หรือความอ่อนคลายอารมณ์ มักจะพบผสมอยู่ในเครื่องดื่ม น้ำผลไม้ โยเกิร์ต ลูกอม หมากฝรั่ง ไส้กรอก ขนมปัง ซีสม นมถั่วเหลืองพร้อมดื่ม หรือ กาแฟพร้อมดื่ม นอกจากนี้ อาจอยู่ในภาพแบบของผลิตภัณฑ์อาหารเสริมชนิดเม็ด เพื่อความสะดวกในการรับประทานจากตัวอย่างงานวิจัยของ Nakamura (Nakamura, 2009) พบว่าเมื่อนำช็อกโกแลตที่มีส่วนผสมของสารกาบาที่ผลิตจากกรดกลูตามิกปริมาณ 0.28 มิลลิกรัม ให้ผู้ที่ผ่านการเพิ่มความเครียดโดยการทำแบบทดสอบประเภท Arithmetic รับประทาน และตรวจวัดค่าความเครียดผ่านค่า HRV และ CGA ภายในเวลาที่กำหนด ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณตัวชี้วัดทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงในทางที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองนี้จึงสนับสนุนข้อเท็จจริงที่ว่า ช็อกโกแลตผสมกาบาสามารถช่วยลดความเครียดได้จริง

การผลิตกาบาในระดับอุตสาหกรรมถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการในการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อตอบสนองความต้องการของกลุ่มผู้บริโภคที่ประสบภาวะเครียดสะสม ซึ่งการผลิตสามารถทำได้ทั้งการผลิตจากวัตถุดิบและกรรมวิธีทางธรรมชาติ ไปจนถึงการสังเคราะห์จากวัตถุดิบประเภทปิโตรเคมี โดยหากเป็นสารกาบาที่ผลิตจากกรดกลูตามิก (Glutamic acid) โดยใช้วิธีการหมักทางธรรมชาติ จะเป็นการผลิตด้วยเชื้อ Lactobacillus hilgardii K-3 แล้วจึงนำมาทำแห้งเพื่อเก็บในภาพแบบผงละเอียด

อย่างไรก็ตาม จากหลักฐานทางงานวิจัยพบว่า (Tea institute Mae Fah Luang University , 2560) ปริมาณกาบาแค่เพียงประมาณ 20-30 มิลลิกรัมต่อวัน ก็เพียงพอต่อการผ่อนคลายความเครียด ซึ่งหากไม่ต้องการรับประทานกาบาในภาพแบบที่สังเคราะห์ขึ้นมา ก็สามารถรับประทานได้จากแหล่งอาหารตามธรรมชาติ (วัชรียา,2560) เช่น ใบชาแห้ง (100-200 mg GABA /100g), เมลอน (74.5 mg GABA /100g), มะเขือเทศ (62.6 mg GABA /100g), กิมจิ (59.4 mg GABA /100g), ช็อกโกแลต (14.5 mg GABA /100g),

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวกล้องงอก (10 mg GABA /100g), ฟักทอง (9.7 mg GABA /100g) หรือเต้าหู้ (6.4 mg GABA /100g) เป็นต้น ก็สามารถช่วยในการผ่อนคลายความเครียดของสมองได้ดี

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การทำแห้งชาสมุนไพรด้วยเครื่องอบลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดความชื้น

การอบแห้งตะไคร้ และ ใบเตย ในเครื่องอบลมร้อนแบบถาดร่วมกับการใช้สารดูดความชื้น เป็นวิธีการทำแห้งแบบ 2 ชั้นตอนคือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 240 นาทีสำหรับตะไคร้ และ 90 นาทีสำหรับใบเตย แล้วนำสมุนไพรอบแห้งมาใส่ในตู้ดูดความชื้น จนสมุนไพรมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ที่ 0.7 ซึ่งใช้เวลา 480 และ 90 นาทีสำหรับตะไคร้และใบเตย ตามลำดับ รวมทั้งสิ้นตะไคร้ใช้เวลาในการทำแห้ง 720 นาที ได้ความชื้น 9.3817 g water/g dry matter (8.5770%wb) ใบเตย 180 นาที ได้ความชื้น 5.4599 g water/g dry matter (5.1772%wb) จะเห็นว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดร่วมกับการใช้สารดูดความชื้นนี้ใช้เวลานานกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว แต่จะมีประสิทธิภาพในการดูดความชื้นได้ดีมากกว่าการอบลมร้อน หรืออาจกล่าวได้ว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดความชื้นสามารถดูดน้ำกลับได้ดีกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว (Food Network, 2559)

2.2.2 อิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของผักชีฝรั่ง

การอบแห้งผักชีฝรั่งที่อุณหภูมิ 50°C โดยให้อากาศร้อนเข้าสู่ระบบผ่านการไหลที่ความเร็วลม 1.3 m/s โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ที่ $50 \pm 2^\circ\text{C}$ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ปกติ 58-63% RH และ ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ 28-30% RH โดยจากการทดลองพบว่าวิธีการอบแห้งผักชีฝรั่งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำทำให้สารต้านอนุมูลอิสระในผักชีฝรั่งมีค่าสูงกว่าวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ทั้งยังช่วยรักษาคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี ผักชีฝรั่งอบแห้งมีส่วนประกอบของ โพลีฟีนอล วิตามินซี และแร่ธาตุ ซึ่งเป็นสารอาหารที่มีโยชน์และเป็นที่ยอมรับในหมู่ผู้บริโภค ดังนั้นการอบแห้งผักชีฝรั่งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นสามารถยืดอายุการเก็บรักษาและสามารถนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งอาหารที่มีคุณค่าเพื่อเสริมสร้างโภชนาการของมนุษย์ (MadhavaNaidu and Vedashree, 2015)

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบลดความชื้นในอากาศ

การศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้งที่ส่งผลต่อคุณภาพของผักชีฝรั่ง (Naidu and Vedashree, 2016) การทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ที่ $50 \pm 2^\circ\text{C}$ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ปกติ 58-63% และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (28-30%) พบว่า วิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำทำให้สารต้านอนุมูลอิสระในผักชีฝรั่งมีค่าสูงกว่าวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ทั้งยังช่วยรักษาคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของผักชีฝรั่งอบแห้ง

การศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่ส่งผลต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของวัสดุ (Madhiyanon and Adirekrut, 2007) ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นสามารถลดเวลาในการอบแห้งเครื่องอบแห้งลงถึง 25% เมื่อเทียบกับระบบอบแห้งลมร้อนแบบปกติ ซึ่งสามารถช่วยสามารถลดต้นทุนการอบแห้งได้ โดยเมื่อเทียบพลังงานในเฉพาะส่วนอบแห้ง ไม่คิดรวมพลังงานในส่วนของการคั้นสภาพสารดูดความชื้น จะพบว่าระบบแบบผสมจะใช้พลังงานน้อยกว่าการอบแห้งแบบทั่วไป เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่า ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่แปรผันตรงกับพลังงานที่ใช้ แต่หากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คิดจากพลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมดจะพบว่าระบบแบบผสมใช้พลังงานมากกว่าการอบแห้งแบบทั่วไประหว่าง 40-80% ซึ่งส่วนพลังงานที่เพิ่มขึ้นนี้ มาจากส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้นถึง 40% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด

การลดภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศโดยใช้สารดูดความชื้นเพื่อการประหยัดพลังงาน (ชาตรี, 2553) โดยสารดูดความชื้นที่นำมาใช้ในการทดลอง ได้แก่ ทรายแอก (Dry act) และอีโคทราย (Co dry) ซึ่งเป็นสารดูดความชื้นจากธรรมชาติและ ซิลิกาเจล (Silica gel) ซึ่งเป็นสารดูดความชื้นสังเคราะห์ จากการทดลองพบว่าสารดูดความชื้นจากธรรมชาติโดยเฉพาะสารอีโคทรายมีความสามารถในการดูดซับความชื้นดีกว่าสารดูดความชื้นซิลิกาเจล ส่วนความสามารถในการคายความชื้นมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถนำสารดูดความชื้นจากธรรมชาติมาใช้ทดแทนสารดูดความชื้นจากการสังเคราะห์ในกรณีที่น่าไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศได้ ซึ่งการใช้สารดูดความชื้นร่วมกับระบบปรับอากาศสามารถช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศลงได้คิดเป็น 5-10% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้สารดูดความชื้นร่วมกับระบบปรับอากาศ

2.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งข้าวกล้องงอก

ผลของการอบแห้งแบบถาดของข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 งอกต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (เทเวียกา, 2554) การทดลองทำการศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 40, 50 และ 60°C ในเวลาการอบแห้ง 10, 12 และ 14 ชั่วโมง พบว่าอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและเวลาไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ แต่อิทธิพลของอุณหภูมิจึงมีผลต่อปริมาณสารกาบา และ γ -tocopherol อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อุณหภูมิ 40°C เวลา 14 ชั่วโมงจะทำให้ข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณ GABA สูงสุดที่ 15.83 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และเมื่อเทียบที่เวลาอบแห้งเดียวกันจะพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งจะส่งผลให้สารกาบามีปริมาณลดน้อยลง

วิธีการเตรียมและการอบแห้งต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวฮางงอก จากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (กรรณิการ์, 2556) จากการทดลองทำการศึกษาอิทธิพลของสองปัจจัยหลัก คือ อิทธิพลของการเตรียมข้าวฮางงอกก่อนการอบแห้ง (การแช่เย็นที่อุณหภูมิ 5°C และการแช่เยือกแข็ง -20°C) และอิทธิพลของวิธีการอบแห้ง (แบบถาด และแบบอินฟราเรด) ต่อการอบแห้งข้าวฮางงอก จากผลการวิจัยพบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดจะส่งผลให้ข้าวฮางงอกมีสารกาบาสูงสุดคือ 23.37 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม ในขณะที่เครื่องอบแห้งแบบถาดจะให้ปริมาณสารกาบาเพียง 19.40 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม

ผลของวิธีการหุงต่อปริมาณกรดแกมมาอะมิโนบิวทีริก (กาบา) และสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก (อินทาวุธ, 2557-2558) พบว่าวิธีการหุงมีผลต่อปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกหุงสุก การหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่มีการซาวด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2 (w/w) โดยก่อนทำการหุงข้าวกล้องงอก ทำการแช่ข้าวที่น้ำอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการหุงข้าวกล้องงอกจนกระทั่งหม้อหุงข้าวไฟฟ้าตัดไฟอัตโนมัติ และให้ความร้อนข้าวใหม่เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเกลี่ยข้าว และให้ความร้อนข้าวต่อเป็นเวลา 5 นาที จะให้ปริมาณกาบาสูงกว่าการหุงด้วยวิธีอื่นๆ

อิทธิพลของการทำแห้งต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และคุณภาพของข้าวหอมนิลฮางงอก (สุกัญญา,2559) จากทดลองอบแห้งข้าวหอมนิลฮางงอก พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิ และความเร็วลมที่ใช้ในการทำแห้งไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาณกาบา และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวฮางงอก โดยพบว่าหลังการทำแห้งปริมาณกาบาจะลดลงเล็กน้อย เนื่องจากกาบาเป็นสารที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูง ในขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบด้วยวิธีการทำแห้งแบบต่างๆ คือการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกพบว่าวิธีการอบแห้งไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณกาบาในข้าวฮางงอกหลังการการทำแห้งเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

งานวิจัยเรื่องการออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นนี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนสำคัญคือ 1) การทดลองเบื้องต้น 2) การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น และ 3) การทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

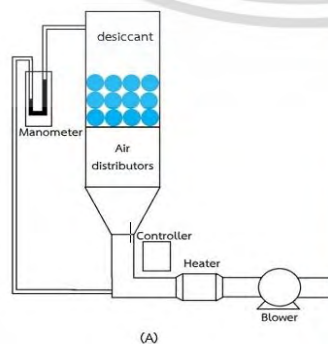
3.1.1 การทดลองเบื้องต้น

ในการออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น จำเป็นต้องมีการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอากาศ อุณหภูมิอากาศ และความหนาของชั้นซิลิกาเจล อัตราการดูดความชื้น และอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ในงานวิจัยนี้จึงได้แบ่งการทดลองเบื้องต้นออกเป็น 5 การทดลอง ได้แก่

- 1) ศึกษาอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลอากาศ
- 2) ศึกษาอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลอากาศ
- 3) ศึกษาความดันตกคร่อมตามความสูงของซิลิกาเจล
- 4) ศึกษาอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นซิลิกาเจล
- 5) ศึกษาอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นซิลิกาเจล

3.1.1.1 อุปกรณ์

1. ชุดทดลองเบื้องต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตรสำหรับบรรจุซิลิกาเจล
2. สารดูดความชื้นชนิดซิลิกาเจล
3. เครื่องวัดความชื้น (Model Fluke 971, Fluke Corporation, USA)
4. เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Model DA-43A, Digital, Japan)
5. เครื่องชั่งมวลสองตำแหน่ง (Model DX3200H, Shimadzu, Japan)
6. อุปกรณ์วัดความดันตกคร่อมมาโนมิเตอร์แบบหลอดแก้วภาพด้วย
7. ไม้บรรทัด



ภาพที่ 3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลองเบื้องต้น (A) ประกอบด้วย หอดูดความชื้น, ท่อกระจายลม, อุปกรณ์ทำ

อากาศร้อน, พัดลม และอุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม และชุดทดลองเบื้องต้นที่ใช้งาน (B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 วิธีการทดลอง

การทดลองที่ 1 ศึกษาอัตราดูดความชื้นของซิลิกาเจลเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลอากาศ

1. วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดลองด้วยเครื่องวัดความชื้น
2. อบแห้งซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และบรรจุซิลิกาเจลมวล 1.5 กิโลกรัม ลงในหอดูดความชื้นของชุดทดลองเบื้องต้น
3. ปรับอัตราการไหลอากาศก่อนเข้าหอดูดความชื้นเป็น 0.04, 0.06 และ 0.08 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ
4. บันทึกค่ามวลของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากดูดความชื้นทุก 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30
5. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างมวลของความชื้นในซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นตามเวลาและอัตราการไหลอากาศ

การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลอากาศ

1. วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดลองด้วยเครื่องวัดความชื้น
2. ปล่อยให้ซิลิกาเจลให้ดูดซับความชื้นจากอากาศเป็นเวลา 6 ชั่วโมงจนเต็ม ที่อุณหภูมิห้อง และบรรจุซิลิกาเจลมวล 1.5 กิโลกรัม ลงในหอดูดความชื้นของชุดทดลองเบื้องต้น
3. ปรับอัตราการไหลอากาศผ่านหอดูดความชื้นเป็น 0.04, 0.06 และ 0.08 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียสตามลำดับ
4. บันทึกค่ามวลซิลิกาเจลที่ลดลงเนื่องจากคายความชื้นทุก 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30
5. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างมวลของความชื้นในซิลิกาเจลที่ลดลงตามเวลาและอัตราการไหลอากาศ

การทดลองที่ 3 ศึกษาความดันตกคร่อมตามความหนาของซิลิกาเจล

1. วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดลองด้วยเครื่องวัดความชื้น
2. ปล่อยให้ซิลิกาเจลให้ดูดซับความชื้นจากอากาศเป็นเวลา 6 ชั่วโมงจนเต็ม ที่อุณหภูมิห้อง
3. บรรจุซิลิกาเจลมวล 5, 10 และ 15 เซนติเมตร ความสัมพันธ์ระหว่างมวลของซิลิกาเจลกับความหนาชั้นซิลิกาเจลแสดงในตารางที่ 3.1 ลงในหอดูดความชื้นที่อัตราการไหลอากาศก่อนเข้าหอดูดความชื้นเป็น 0.04, 0.06, 0.08, 1.00 และ 1.12 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ
4. บันทึกความแตกต่างของระดับความสูงของน้ำในหลอดแก้วภาพถ้วยของอุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม

5. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความหนาของชั้นซิลิกาเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 4 ศึกษาอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นซิลิกาเจล

1. จุดที่ทำการทดลอง วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดลองด้วยเครื่องวัดความชื้น
2. บรรจุซิลิกาเจลลงในห่อโดยให้ความหนา 1, 3 และ 5 เซนติเมตรตามลำดับ ที่อัตราการไหลอากาศผ่านห่อดูดความชื้นเป็น 0.04 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
3. ทำการบันทึกค่ามวลซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้น ทุก 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30
4. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างมวลของความชื้นในซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ความหนาของชั้นซิลิกาเจล

การทดลองที่ 5 ศึกษาอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นซิลิกาเจล

1. วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดลองด้วยเครื่องวัดความชื้น
2. บรรจุซิลิกาเจลที่ผ่านการดูดซับความชื้นจนเต็ม ที่อุณหภูมิห้อง ลงในห่อโดยให้ความหนา 1, 3 และ 5 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลอากาศผ่านห่อดูดความชื้นเป็น 0.04 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
3. ทำการบันทึกค่ามวลซิลิกาเจลที่ลดลงทุก 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30
4. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างมวลของความชื้นในซิลิกาเจลที่ลดลงตามเวลาที่ความหนาของชั้นซิลิกาเจล

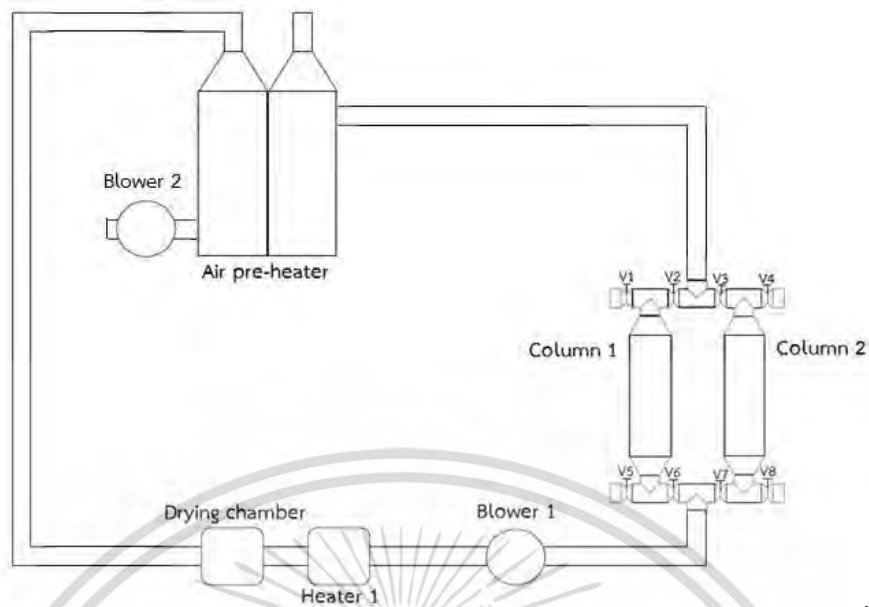
ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบปริมาณซิลิกาเจลกับความหนาของซิลิกาเจลภายในเบด

ความหนาของซิลิกาเจล (เซนติเมตร)	ปริมาณซิลิกาเจล (กิโลกรัม)
1	0.3
3	0.9
5	1.5
10	3.0
15	4.5

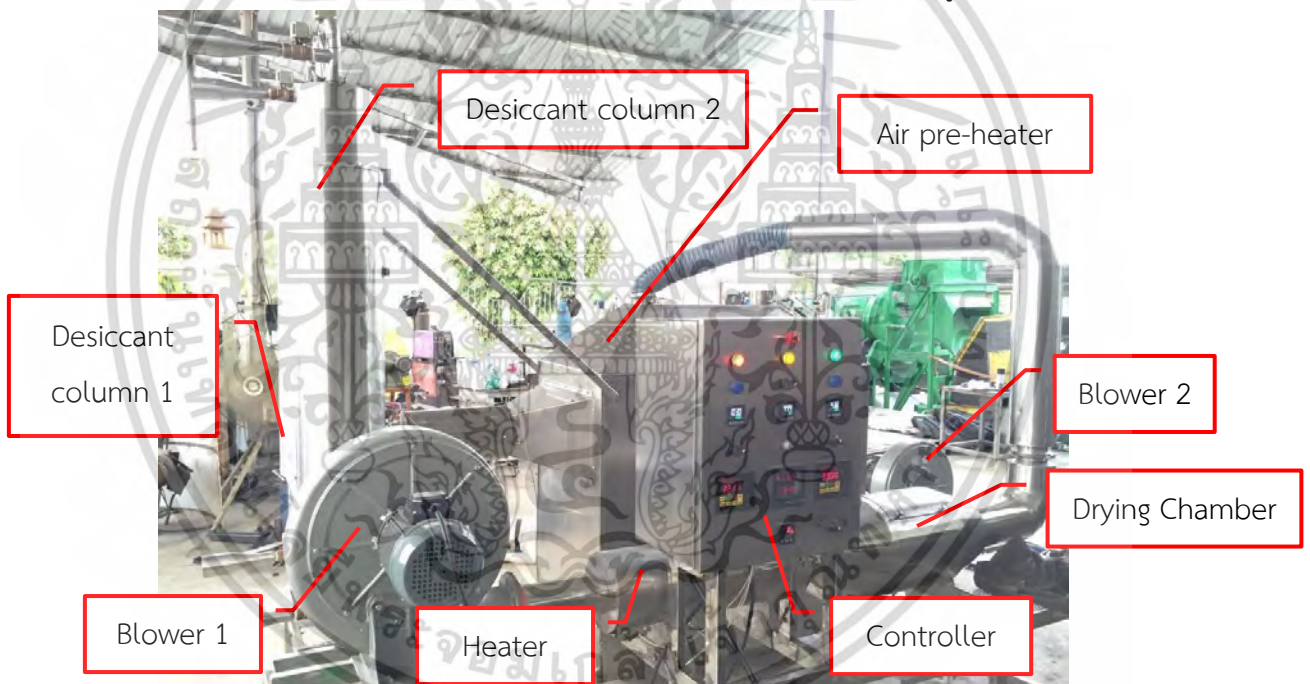
3.1.2 การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นได้นำข้อมูลเบื้องต้นมาใช้มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้ 1) พัดลม 2) เครื่อง 2) อุปกรณ์ทำอากาศร้อน 3) ห้องอบแห้ง 4) อุปกรณ์อุ่นอากาศ และ 5) ห่อดูดความชื้น 2 ห่อ ดังแสดงในภาพที่ 3.2-3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 ส่วนประกอบหลักของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น



ภาพที่ 3.3 ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

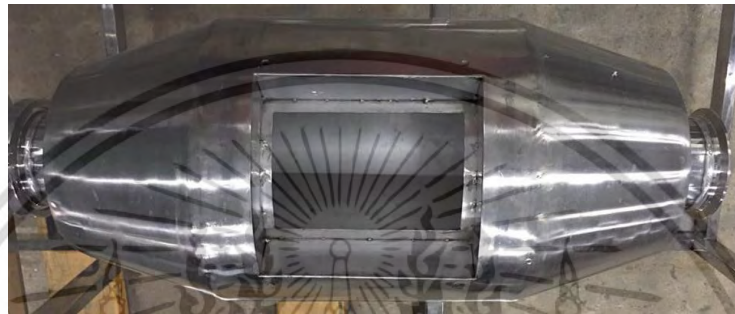
3.1.2.1 ส่วนประกอบของระบบและการออกแบบ

1) ห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ออกแบบให้มีหน้าตัดวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร และห้องอบแห้งมีความยาว 30 เซนติเมตรดังภาพที่ 3.4 และกำหนดความเร็วลมอบแห้งเป็น 1.5 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(A)



(B)

ภาพที่ 3.4 ห้องอบแห้งขณะปิดฝา (A) และห้องอบแห้งขณะเปิดฝา (B)

คำนวณอัตราการไหลอากาศที่ผ่านอบแห้งโดยสมการ 3.1 โดยที่ Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร, V คือความเร็วของอากาศ และ A คือพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง

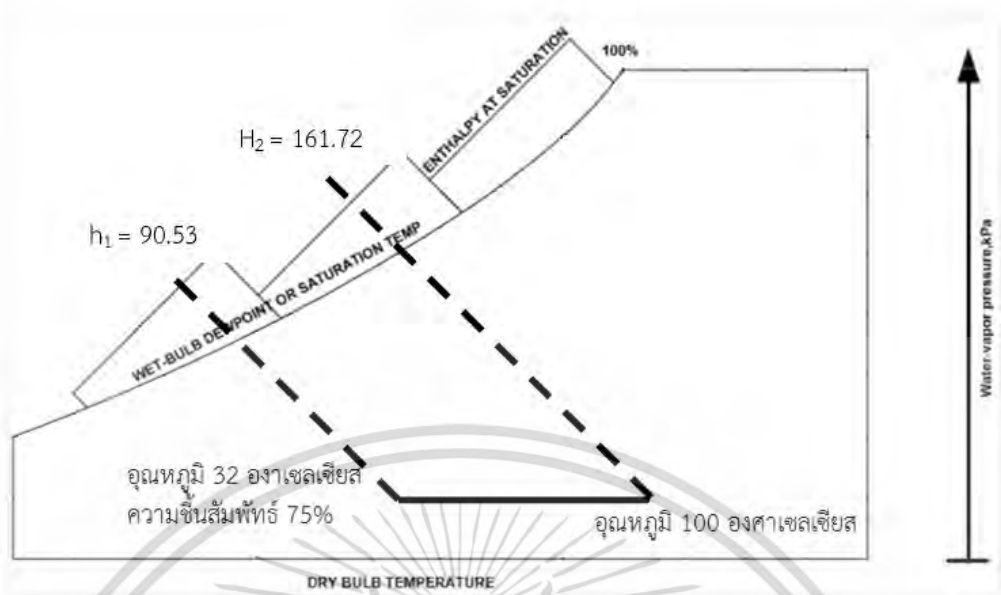
$$Q = VA \quad (3.1)$$

$$Q = 1.5 \times \frac{\pi(0.2)^2}{4} = 0.047 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที}$$

2) อุปกรณ์ทำอากาศร้อน (Heater) กำหนดให้สามารถทำอากาศร้อน จากอากาศอุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) ความชื้นสัมพัทธ์ 75 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตรจำเพาะ 0.895 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม เป็นอากาศอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สภาวะอากาศบนแผนภูมิไซโครเมตริกเป็นการเพิ่มเอนทัลปีจาก 90.53 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เป็น 161.72 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

คำนวณขนาดเครื่องทำอากาศร้อนจากสมการที่ 3.2 และ 3.3 โดยที่ \dot{Q} คืออัตราการไหลอากาศเชิงปริมาตร, \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวล, v คือปริมาตรจำเพาะของอากาศ, h_1 คือเอนทัลปีที่อากาศอุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 75 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 90.53 กิโลจูลต่อกิโลกรัม, h_2 คือเอนทัลปีที่อากาศอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เท่ากับ 161.72 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และ Q_{heater} คือ 3.74 กิโลวัตต์ ดังแสดงในภาพที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 สถานะการเพิ่มอุณหภูมิตั้งบนแผนภูมิไซโครเมตริก

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{v} \quad (3.2)$$

$$\dot{m} = \frac{0.047}{0.895} = 0.053 \text{ กิโลกรัม/วินาที}$$

$$Q_{\text{heater}} = \dot{m} \times (h_2 - h_1) \quad (3.3)$$

$$Q_{\text{heater}} = 0.053 \times (161.72 - 90.53) = 3.74 \text{ กิโลวัตต์}$$

จากการคำนวณจึงเลือกใช้อุปกรณ์ทำอากาศร้อนที่มีขนาด 6 กิโลวัตต์

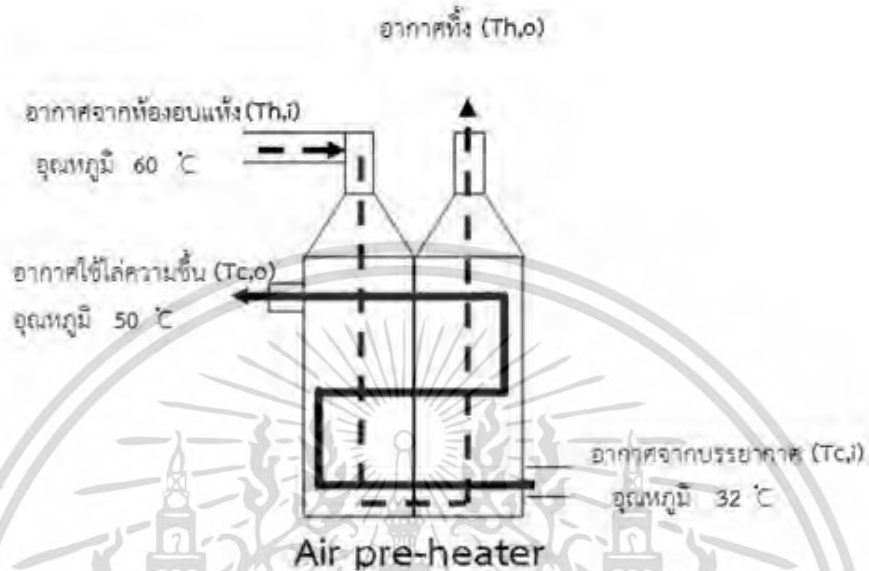
3) พัดลม (Blower 1 และ Blower 2) เป็นพัดลมแบบหอยโข่งหรือแบบใช้แรงเหวี่ยง (Centrifugal or Radial fan) ของบริษัท Eurovent รุ่น MA-40B แบบใบพัดโค้งหลัง เลือกใช้พัดลมที่มีกำลัง 1 แรงม้า



ภาพที่ 3.6 พัดลมดูดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) อุปกรณ์อุ่นอากาศ (Air pre-heater) กำหนดสถานะในการออกแบบ ให้อากาศจากห้องอบแห้ง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อากาศบรรยากาศอุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส เมื่อได้รับความร้อนที่อุปกรณ์อุ่นอากาศ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นมาเป็น 50 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 อุณหภูมิอากาศที่จุดต่าง ๆ ของอุปกรณ์อุ่นอากาศ

คำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน
จากตาราง A-1 ภาคผนวก ก

อากาศ $T_h = 60$ องศาเซลเซียส = 333 เคลวิน

$$C_{p,h} = 1.00832 \text{ กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน}$$

อากาศ $\bar{T}_c = (305+323)/2 = 314$ เคลวิน

$$C_{p,c} = 1.00756 \text{ กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน}$$

จากสมการที่ 2.37 $q_c = \dot{m}c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i})$

$$q_c = 0.046706 \times 1.00756 \times (50 - 32) = 0.85 \text{ กิโลวัตต์}$$

จากสมการที่ 2.36 $q_h = \dot{m}c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})$

$$T_{h,o} = 60 - (0.84706 / 0.049731 \times 1.00832) = 43.11 \text{ องศาเซลเซียส}$$

หาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน จากสมการที่ 2.28 $q = UFA\Delta T_{lm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{โดยที่ } T_{lm} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln\left[\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}}\right]} = \frac{(60 - 50) - (43.11 - 32)}{\ln[(60 - 50)/(43.11 - 32)]} = 10.55 \text{ องศาเซลเซียส}$$

จากตาราง A-2 ภาคผนวก ก

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างอากาศกับอากาศ คือ 5 วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน

หาค่า Correction Factor ; F จากกราฟ A-3 ภาคผนวก ก

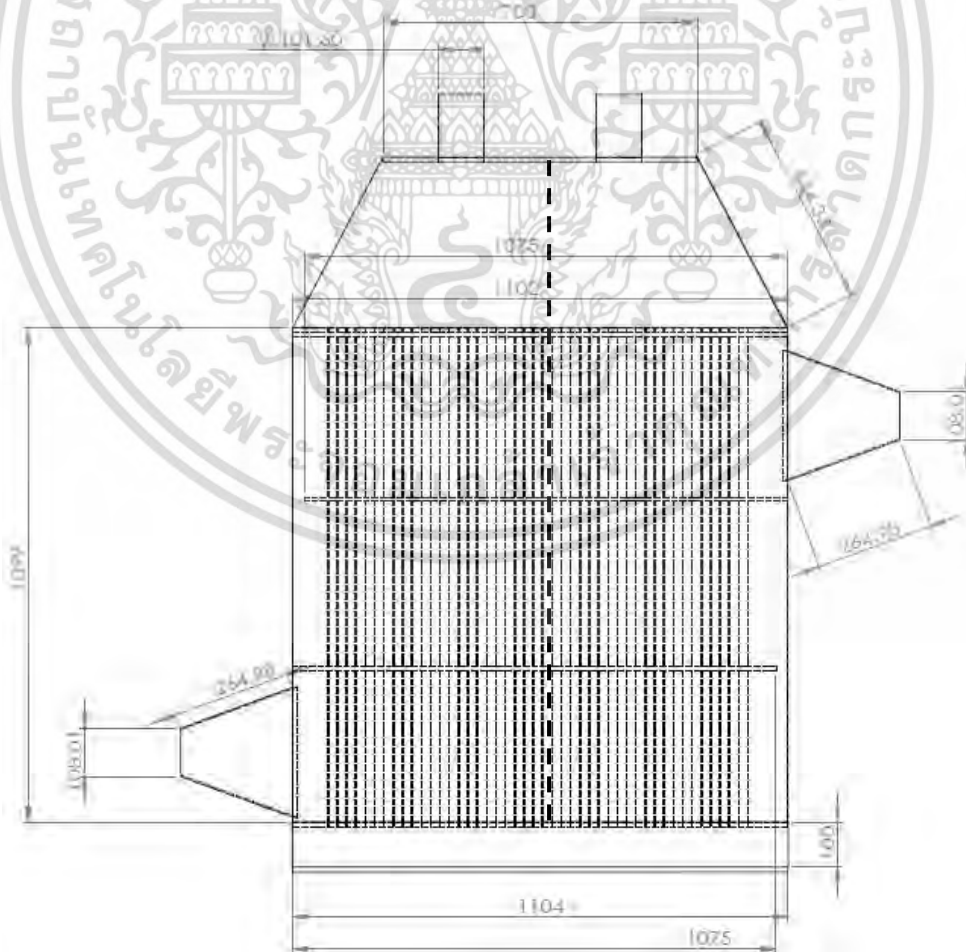
$$R = \frac{60-43.11}{50-32} = 0.94 \quad \text{และ} \quad P = \frac{50-32}{60-32} = 0.64$$

ดังนั้น $F = 0.8$

$$\text{พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนรวมที่ประสิทธิภาพ 100\% } A = \frac{0.84706 \text{ kW}}{0.005 \times 0.8 \times 10.55} = 20.07 \text{ ตารางเมตร}$$

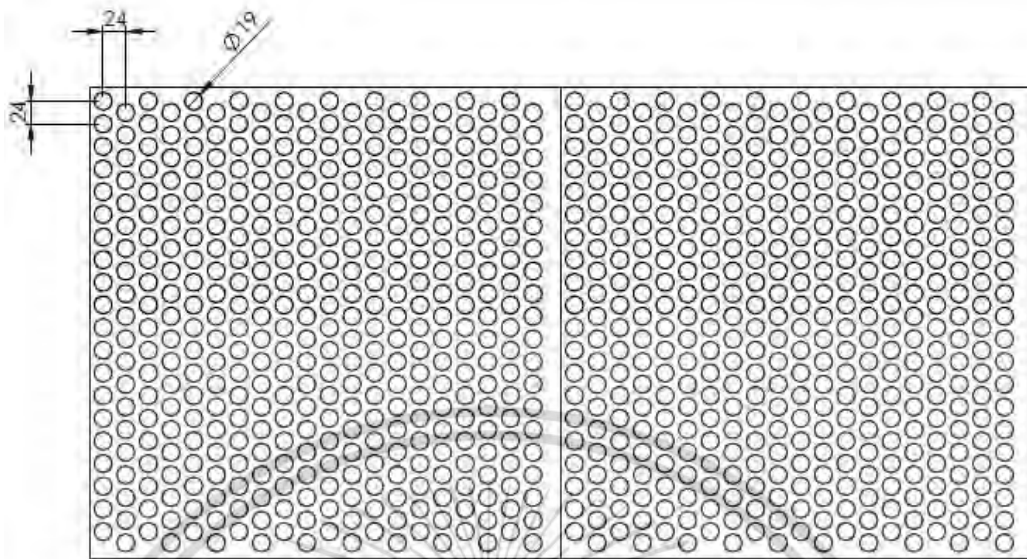
$$\text{พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนรวมที่ประสิทธิภาพ 70\% } A = \frac{0.84706 \text{ kW}}{0.005 \times 0.8 \times 10.55 \times 0.7} = 28.6 \text{ ตารางเมตร}$$

ในการสร้าง ออกแบบให้มีขนาดอุปกรณ์อุ่นอากาศ ดังภาพที่ 3.7 – 3.9 โดยมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนรวมทั้งหมด 49.66 ตารางเมตร



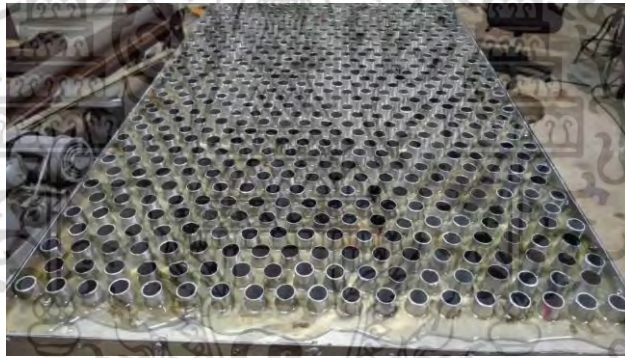
ภาพที่ 3.8 แสดงขนาดอุปกรณ์อุ่นอากาศด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จำนวนท่อทั้งหมด 833 ท่อ

ภาพที่ 3.9 การจัดเรียงท่อภายในอุปกรณ์อุ่นอากาศเป็นแบบแนวทแยง



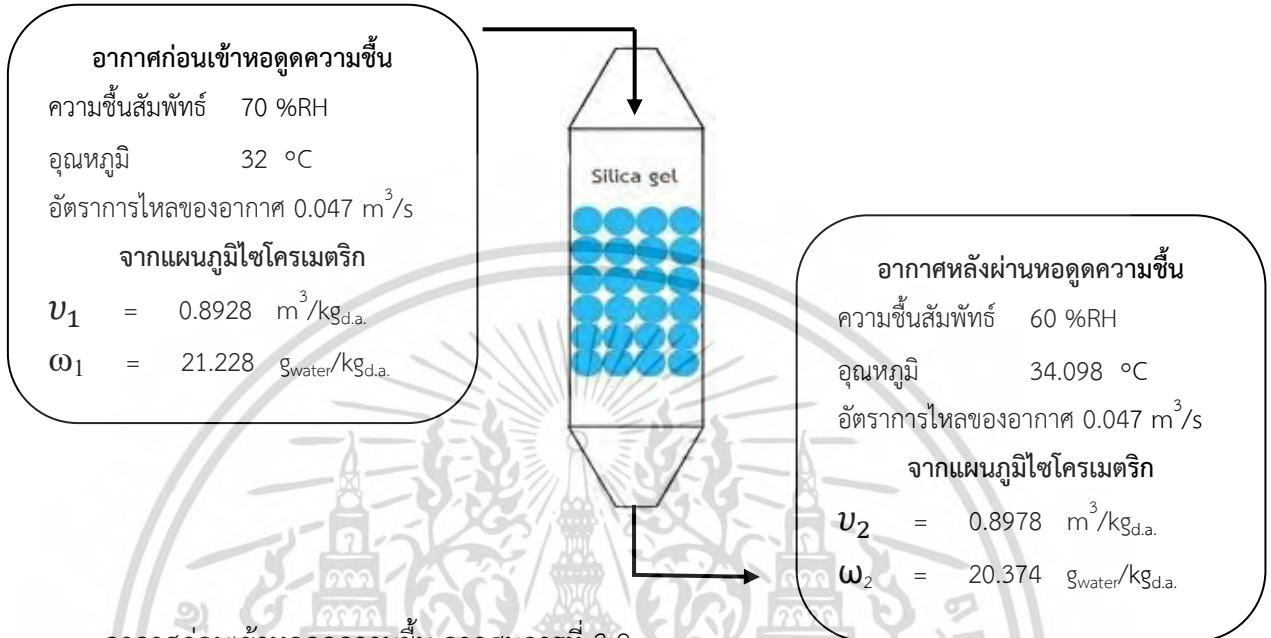
ภาพที่ 3.10 ท่อด้านในของอุปกรณ์อุ่นอากาศ



ภาพที่ 3.11 อุปกรณ์อุ่นอากาศ

- 5) หอดูดความชื้นแบบหอคู่ ดังภาพที่ 3.12 กำหนดให้แต่ละหอลดความชื้นสัมพัทธ์จาก 70 %RH ให้เหลือ 60 %RH มีระยะเวลาทำงานหอละ 5 นาที คำนวนหาปริมาณซิลิกาเจลที่ต้องเอกลำรินเป็นเอกลำรที่สวงนเวสให้รอบการเซง ในเพอกรรคกษาเทเอนน ไม่นุญเดเทเอนน เป็เซบระเอยชนต่านกรรคกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ จากสมการที่ 3.2 เมื่อ \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวล (ในหน่วย กิโลกรัมต่อวินาที) , \dot{Q} คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร (ในหน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) และ v คือปริมาตรจำเพาะอากาศ (ในหน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง)



อากาศก่อนเข้าหอดูดความชื้น จากสมการที่ 3.2

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{v_1} = \frac{0.047}{0.8928} = 0.0526 \text{ กิโลกรัมอากาศแห้งต่อวินาที}$$

อากาศหลังผ่านหอดูดความชื้น จากสมการที่ 3.2

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{v_2} = \frac{0.047}{0.8978} = 0.0524 \text{ กิโลกรัมอากาศแห้งต่อวินาที}$$

$$\Delta \omega = \dot{\omega}_1 - \dot{\omega}_2 = \dot{m}_1 \omega_1 - \dot{m}_2 \omega_2 = 1.1166 - 1.0666 = 0.05 \text{ กรัมน้ำต่อวินาที}$$

ตารางที่ 3.2 สมการคำนวณปริมาณซิลิกาเจล จากการทดลองเบื้องต้น

ภาพแบบสมการ	สมการ	R ²
Exponential	$y = 0.9074e^{-0.277d}$	0.8947
Logarithmic	$y = -0.334\ln(d) + 0.7476$	0.9599
Power	$y = 0.7482d^{-0.706}$	0.985
Linear	$y = -0.1285d + 0.8318$	0.8416

จากตารางที่ 3.2 เลือกใช้สมการ Power เนื่องจากค่า R² มีค่ามากที่สุด โดยที่ y คืออัตราการดูดน้ำของซิลิกาเจล (ในหน่วย กรัมต่อ 100 กรัมของซิลิกาเจล) และ d คือความหนาชั้นซิลิกาเจลซึ่งเท่ากับ 9 เซนติเมตร

$$y = 0.7482d^{-0.706} = 0.7482 \times 9^{-0.706} = 0.1586 \text{ กรัมน้ำต่อ 100 กรัมของซิลิกาเจลต่ออนาที}$$

$$\text{ดังนั้น ปริมาณซิลิกาเจลที่ต้องใช้} = \frac{0.05 \times 100 \times 60}{0.1586} = 1.892 \text{ กิโลกรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้าง ออกแบบให้บรรจุซิลิกาเจลลงในหอดูดความชื้นปริมาณ 2.250 กิโลกรัมในแต่ละหอ



ภาพที่ 3.12 หอดูดความชื้นแบบคอลัมน์คู่

6) ระบบท่อ ใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 นิ้วและหุ้มฉนวนประเภทใยหินหนา 2 นิ้ว

3.1.3 ทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

การทดสอบสมรรถนะของระบบเพื่อหาประสิทธิภาพ ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 4 การทดสอบ ได้แก่

1. ทดสอบประสิทธิผลของอุปกรณ์อุ่นอากาศ
2. ทดสอบความสามารถในการดูดความชื้นของหอดูดความชื้น
3. ทดสอบความสามารถในการคายความชื้นของหอดูดความชื้น
4. ทดสอบประสิทธิภาพรวมของทั้งระบบ

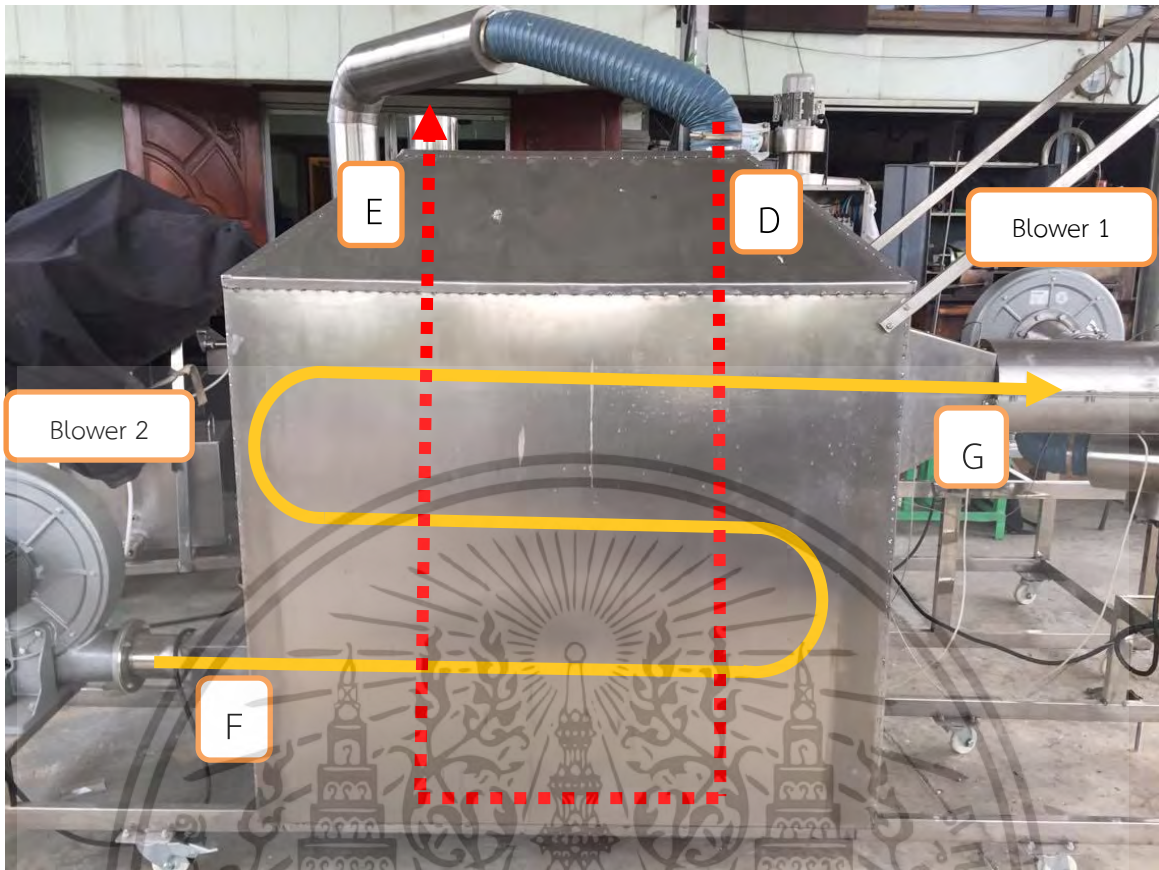
อุปกรณ์

1. เครื่องวัดความเร็วลม เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Model DA-43A, Digital, Japan)
2. เครื่องวัดความชื้น (Model Fluke 971, Fluke Corporation, USA)
3. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Model Fluke 51 II thermometer, Fluke Corporation, USA)

วิธีการทดลอง

การทดสอบที่ 1 ทดสอบประสิทธิผลของอุปกรณ์อุ่นอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



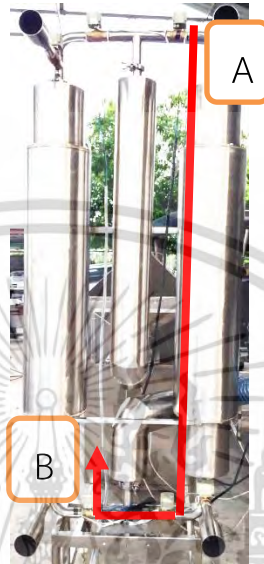
ภาพที่ 3.13 ทิศทางการไหลของอากาศและจุดวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์อุ่นอากาศ

1. วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดลองด้วยเครื่องวัดความชื้น
 2. เปิด blower 1 และ blower 2 ปรับให้มีอัตราการไหลอากาศที่จุด G และจุด E เป็น 0.04 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
 3. เปิดอุปกรณ์ทำอากาศร้อนให้มีอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าอุปกรณ์อุ่นอากาศ เป็น 60 , 80 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และให้เครื่องทำงานเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง ก่อนทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ
 4. บันทึกค่าอุณหภูมิที่จุด D, E, F และ G ดังภาพที่ 3.13 ทุก 1 นาที จนถึงนาทีที่ 5 ทำซ้ำ 3 ครั้ง
 5. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นอากาศ
- การทดสอบที่ 2 ทดสอบความสามารถในการดูดความชื้นของหอดูดความชื้น
1. วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดสอบด้วยเครื่องวัดความชื้น
 2. ใส่ซิลิกาเจลมวล 2,250 กรัม ลงในหอดูดความชื้น
 3. เปิด blower 1 ปรับให้มีอัตราการไหลอากาศที่ทางออกเป็น 0.02 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ทางเข้าจุด A และของอากาศที่ทางออกจุด B ดังภาพที่ 3.14 ทุก 1 นาที จนถึงนาทีที่ 10 จากนั้นบันทึกทุก 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30 ซึ่งอากาศไหลผ่านหอดูดความชื้นถูกลดความชื้นลง

5. วิเคราะห์ความสามารถในการดูดความชื้นของหอดูดความชื้น



ภาพที่ 3.14 ทิศทางการไหลของอากาศผ่านหอดูดความชื้นเพื่อดูดความชื้นออกจากอากาศ

การทดสอบที่ 3 ทดสอบความสามารถในการคายความชื้นของหอดูดความชื้น

1. วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดสอบด้วยเครื่องวัดความชื้น
2. ใส่ซิลิกาเจลมวล 2,250 กรัม ลงในหอดูดความชื้น

3. เปิด blower 2 ให้มีอัตราการไหลของอากาศที่ทางออกเป็น 0.02 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เปิดการทำงานของอุปกรณ์ทำอากาศร้อนและอากาศร้อนไหลผ่านอุปกรณ์อุ่นอากาศเพื่อให้อากาศออกจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่จุด G มีอุณหภูมิเป็น 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และให้เครื่องทำงานเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง ก่อนทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ

4. บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ทางเข้าจุด G และของอากาศที่ทางออกจุด H ดังภาพที่ 3.15 ทุก 1 นาที จนถึงนาทีที่ 10 จากนั้นบันทึกทุก 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30 ซึ่งอากาศร้อนไหลผ่านหอดูดความชื้นเพื่อกำจัดความชื้นออกจากซิลิกาเจล

5. วิเคราะห์ความสามารถในการคายความชื้นของหอดูดความชื้น



ภาพที่ 3.15 ทิศทางการไหลของอากาศผ่านหอดูดความชื้นเพื่อกำจัดความชื้นออกจากซิลิกาเจล

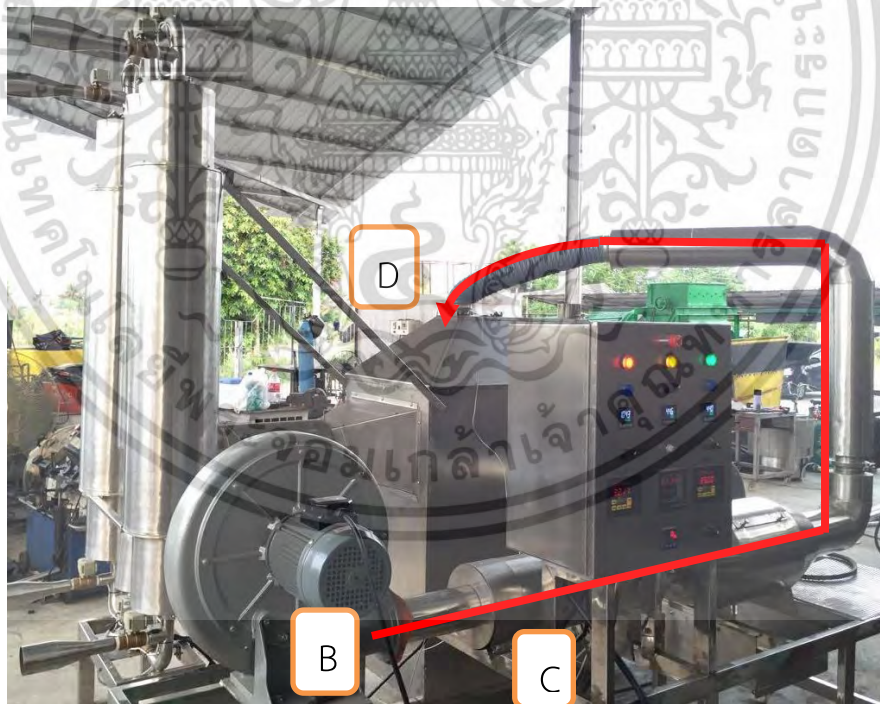
การทดสอบที่ 4 ทดสอบประสิทธิภาพรวมทั้งระบบ

1. วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดสอบด้วยเครื่องวัดความชื้น
2. ใส่ซิลิกาเจลมวล 2,250 กรัม ลงในหอดูดความชื้นทั้งสองหอ
3. เปิด blower 1 และ blower 2 ให้มีอัตราการไหลอากาศที่จุด E และ H เป็น 0.02 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
4. เปิดการทำงานของอุปกรณ์ทำอากาศร้อนและอากาศร้อนไหลผ่านอุปกรณ์อุ่นอากาศ เพื่อให้อากาศออกจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่จุด G มีอุณหภูมิเป็น 55 องศาเซลเซียส
5. สลับทิศทางการไหลของอากาศที่ผ่านหอดูดความชื้นทั้งสองหอทุก 5 นาที ด้วยอุปกรณ์ตั้งเวลา (Timer)
6. บันทึกค่าอุณหภูมิอากาศที่จุดต่าง ๆ จุด A, B, C, D, E, F, G และ H ดังภาพที่ 3.16-3.18 ทุก 5 นาที จนถึงนาทีที่ 60
7. บันทึกค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่จุด H ทุก 5 นาที จนถึงนาทีที่ 60
8. วิเคราะห์ประสิทธิภาพรวมของทั้งระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

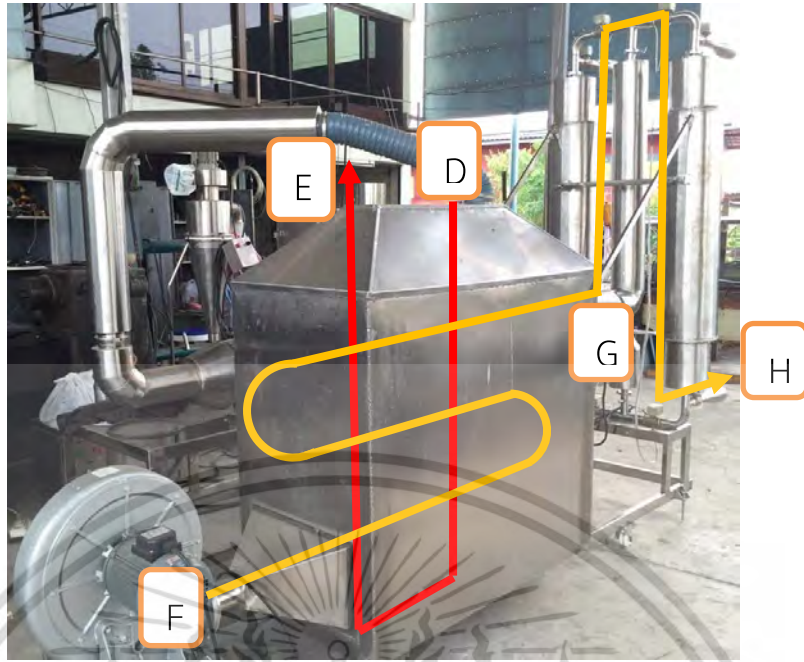


ภาพที่ 3.16 ทิศทางการไหลของอากาศผ่านหลอดความชื้นเพื่อลดความชื้นของอากาศ



ภาพที่ 3.17 ทิศทางการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์ทำอากาศร้อนและห้องอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.18 ทิศทางการไหลของอากาศร้อนผ่านอุปกรณ์อุ่นอากาศ (เส้นสีแดง) และทิศทางการไหลของอากาศที่ใช้กำจัดความชื้นในหอดูดความชื้น (เส้นสีเหลือง)

3.2 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

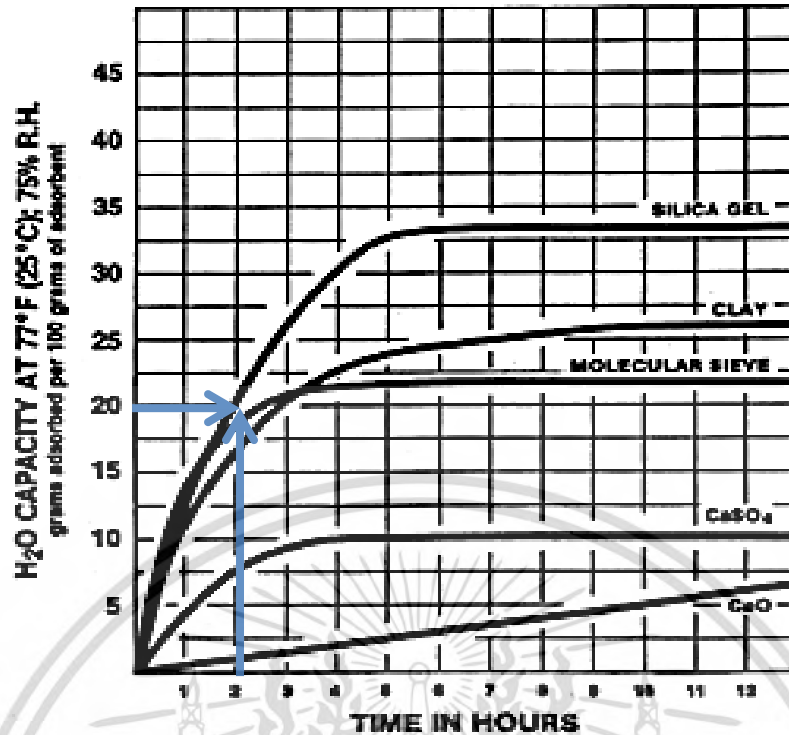
3.2.1 การออกแบบวงล้อดูดความชื้นและเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

3.2.1.1 การคำนวณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศนี้

ในการจำลองการคำนวณน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้ง จากอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยกำหนดให้ความเร็วลมเป็น 1 m/s พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งภาพสี่เหลี่ยมจัตุรัส คือ $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการไหลได้จากสมการที่ (3.1) จากนั้นทำการคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจากสมการที่ (3.2)

ในการจำลองสภาวะการดูดความชื้นของอากาศกำหนดให้อากาศภายนอกเข้าสู่วงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 32°C ความชื้นสัมพัทธ์ 75% และอุณหภูมิความชื้นแบบอะเดียแบติกตามเส้นกระบวนการลดความชื้นสารดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิ 40°C ความชื้นสัมพัทธ์ 40% จะได้ปริมาณความชื้นอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔW) โดยปริมาณความชื้นในอากาศที่มีค่าลดลงมีค่าเท่ากับปริมาณที่ซิลิกาเจลดูดซับไว้ จากนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำในอากาศที่ซิลิกาเจลในสภาวะอากาศนี้ ดังภาพที่ 3.1 เพื่อคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้ง ข้อมูลปริมาณของซิลิกาเจลที่คำนวณได้ถือเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการประมาณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.19 กราฟอัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ

ที่มา : H2OUT FOREVER, 2559

3.2.1.2 การคำนวณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศไหล

ในการจำลองการคำนวณน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้งจากอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยทำการปรับความเร็วลมเป็น 1.85 m/s พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งสี่เหลี่ยมจัตุรัสคือ $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการไหลได้จากสมการที่ (3.1) และคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจากสมการที่ (3.2)

โดยการจำลองสภาวะการดูดความชื้นของอากาศกำหนดให้อากาศภายนอกเข้าสู่วงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 30.7°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65.6% และถูกลดความชื้นแบบอะเดียแบติกตามเส้นกระบวนการลดความชื้นสารดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิ 40°C ความชื้นสัมพัทธ์ 30% จะได้ปริมาณความชื้นอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔW) โดยปริมาณความชื้นในอากาศที่มีค่าลดลงมีค่าเท่ากับปริมาณความชื้นที่ซิลิกาเจลดูดไว้ จากนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำในอากาศที่ซิลิกาเจลในสภาวะอากาศไหลซึ่งสามารถหาได้จากแผนภูมิไซโคเมตริก เพื่อคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบ ข้อมูลปริมาณของซิลิกาเจลที่คำนวณได้ถือเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการประมาณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

3.2.1.3 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ เพื่อคายความชื้นจากซิลิกาเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในหัวข้อ 3.2.2 ซึ่งจะทราบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอากาศเนื่องจากการจากราคาดูดความชื้นของซิลิกาเจล ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดซับไว้ต่อเวลา 1 ชั่วโมง ($\Delta w/h$) ได้ดังสมการที่ (3.4)

$$\Delta w/h = \frac{W \text{ silica gel}}{\text{Moisture desorption rate}} \quad (3.4)$$

เมื่อ $\frac{\Delta w}{h}$ คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปต่อเวลา 1 ชั่วโมง (kg water/h)

Δw คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป (kg water/kg dry air)

จากสมการที่ (3.5) แสดงให้เห็นถึงปริมาณความชื้นในอากาศที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะมีค่าเท่ากับปริมาณน้ำที่อากาศดูดไว้ได้ ซึ่งเราสามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศได้ดังสมการ

$$\dot{m} = \Delta w \times \frac{\Delta w}{h} \quad (3.5)$$

เมื่อ \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg dry air/h)

$\frac{\Delta w}{h}$ คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปต่อเวลา 1 ชั่วโมง (kg water/h)

Δw คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป (kg_{H₂O}/kg dry air)

การจำลองการคายความชื้นของซิลิกาเจลโดยกำหนดให้ซิลิกาเจลดูดซับความชื้นเท่ากับ 30% ของน้ำหนักตัวเอง จะได้อัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่ากับ 0.0008 m³/s

3.2.1.4 การคำนวณขนาดของวงล้อดูดความชื้น

จากการจำลองการดูดความชื้นของซิลิกาเจลเพื่อคำนวณน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ใช้ในระบบที่ใช้ในอากาศไหลในหัวข้อ 4.1.2 ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.04 m³/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลของอากาศที่มีอัตราการดูดความชื้นต่ำที่สุดและสอดคล้องกับความเร็วลม 1 m/s ที่ใช้ในระบบบอบแห้งในระบบซึ่งได้เลือกชั้นความหนาของซิลิกาเจล 1 cm ซึ่งเป็นชั้นความหนาที่มีอัตราการดูดความชื้นสูงที่สุดมาใช้ในการคำนวณหาปริมาตรภาพทรงกระบอกของวงล้อ โดยคิดที่เฉพาะบริเวณดูดความชื้นจากสมการที่ (3.6) และสามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากสมการที่ (3.7)

$$v = \frac{\pi}{8} d^2 l \quad (3.6)$$

$$d = \frac{\sqrt{8v}}{\pi l} \quad (3.7)$$

เมื่อ v คือ ปริมาตรของซิลิกาเจล (cm³)

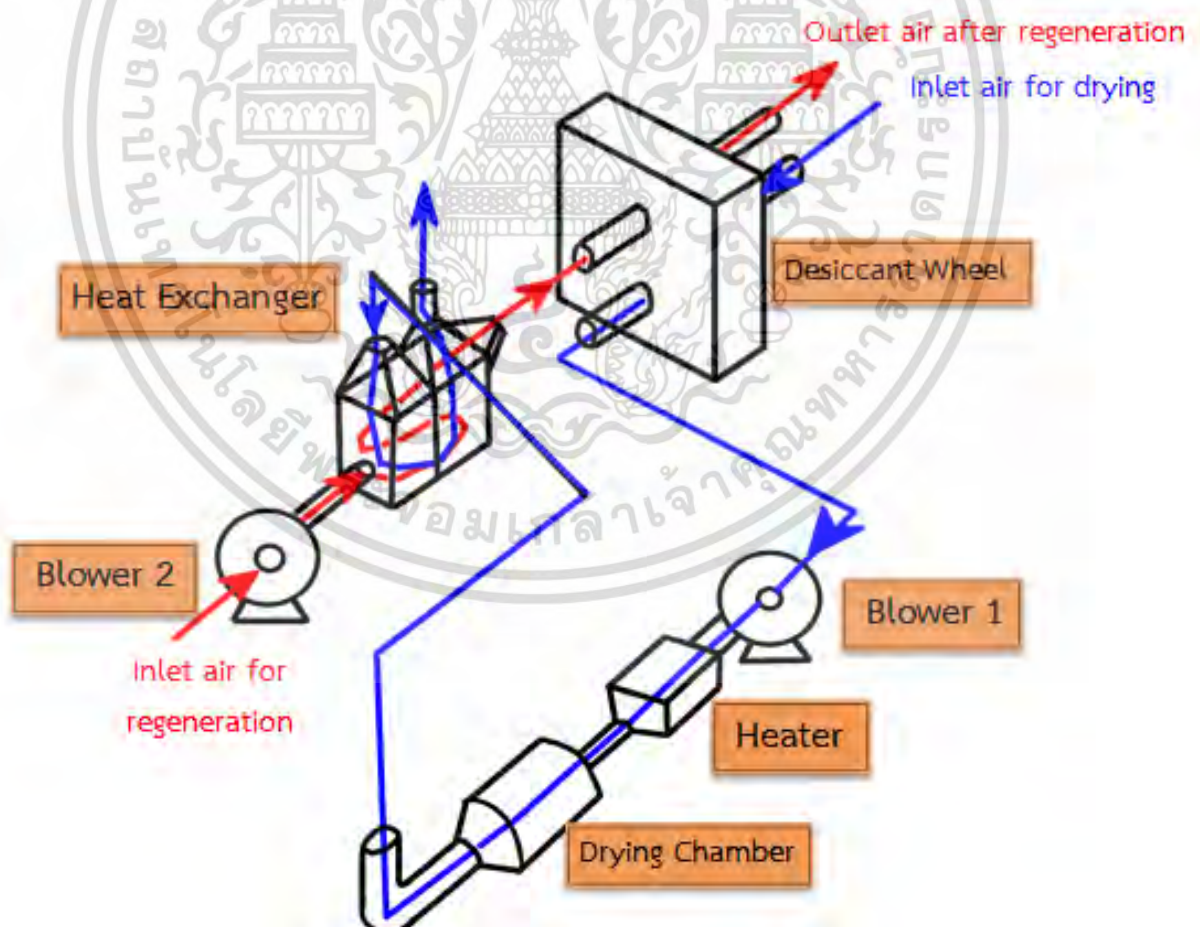
d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงล้อดูดความชื้น (cm)

l คือ ชั้นความหนาของชั้นซิลิกาเจล (cm)

3.2.1.5 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนภาพแสดงเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นในภาพที่ 3.20 เครื่องอบแห้งมีขนาดท่อที่ใช้ในระบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกเท่ากับ 102.4 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในเท่ากับ 100.0 mm ใช้อะลูมิเนียมชนิด ss304 วงล้อดูดความชื้นที่ใช้ในระบบมีขนาดเท่ากับ (dimeter x thickness) เท่ากับ 700x50 mm สายพายขนาดร่องA วัสดุที่ใช้ทำวงล้อคือ อะลูมิเนียม ss304 รูของตะแกรงที่ใส่ซิลิกาเจลในวงล้อดูดความชื้นใช้ลวดเบอร์ 16 ขนาด 26 m²/in มอเตอร์ที่ใช้กำลังขับวงล้อ (RS Motor Industy TAIWAN) ความเร็วเท่ากับ 28 rpm กำลังขับ 45 watt เครื่องอุ่นอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกเท่ากับ 19.0 mm เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในเท่ากับ 18.2 mm เครื่องเป่าลมร้อน(MA40B,Euro vent) กำลังการทำงานของเครื่องเท่ากับ 0.75 kw แรง (RPM) เท่ากับ 2800 rpm อัตราการไหลสูงสุดที่เครื่องสามารถทำงานได้เท่ากับ 24 m³/min เครื่องทำความร้อนแบบชนิด แท่งไม่มีพิน ทำความร้อนได้สูงสุด 800°C ยี่ห้อ เทคโนโลยี อินสตรูเมนท์ ฉนวนที่ใช้ชนิด โยหินหนา ห้องอบแห้ง ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในเท่ากับ 200 mm ความยาวของท่อเท่ากับ 300.0 mm ซึ่งเราเปิดเครื่องทำความร้อนเพื่อทำอากาศร้อนให้ห้องอบแห้ง และวงล้อดูดความชื้น เพื่อลดความชื้นสัมพัทธ์ให้ห้องอบแห้ง และมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำอากาศร้อนขาออกจากห้องอบแห้งมาแลกเปลี่ยนกับอากาศปกติ โดยนำอากาศผสมไปใช้ในการกำจัดความชื้นออกจากสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้นในระบบได้ใหม่



ภาพที่ 3.20 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ



ภาพที่ 3.21 ชุดทดสอบสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้น

3.2.2.1 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ

การทดลองนี้ใช้ชุดทดสอบดังภาพที่ 3.21 ซึ่งนำหนักสารดูดความชื้นที่ไม่มีสารดูดความชื้นสะสมอยู่ 1500 g ใส่ในห่อบรรจุสารดูดความชื้นของชุดทดสอบสมบัติการดูดการคายความชื้นของสารดูดความชื้นทำการเปรียบเทียบสมบัติการดูดความชื้นของซิลิกาเจล และโมเลกุลลาร์ซีฟโดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 0.04, 0.06 และ 0.08 m^3/s และสภาวะอากาศโดยรอบได้แก่อุณหภูมิ 30.7°C และความชื้นสัมพัทธ์ 65.6% ให้อากาศไหลผ่านสารดูดความชื้นเพื่อให้สารดูดความชื้นดูดความชื้นจากอากาศ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักสารดูดความชื้นทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วคำนวณหาความจุความชื้นของสารดูดความชื้นในการดูดความชื้น เป็นหน่วย g adsorbed per 100 g of desiccant

3.2.2.2 การเปรียบเทียบสมบัติการคายความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจล และโมเลกุลลาร์ซีฟ

การทดลองนี้ใช้ชุดทดสอบดังภาพที่ 3.3 ซึ่งนำหนักสารดูดความชื้นที่ปล่อยให้ดูดความชื้นจนอิ่มตัวแล้ว 1500 g ใส่ในห่อบรรจุสารดูดความชื้น ในการเปรียบเทียบสมบัติการคายความชื้นของซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟให้อัตราการไหลของอากาศ 0.08 m^3/s และอุณหภูมิของอากาศ 90°C ไหลผ่านสารดูดความชื้นเพื่อคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้น จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักสารดูดความชื้นทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วคำนวณหาความจุความชื้นของสารดูดความชื้นในการคายความชื้น เป็นหน่วย g adsorbed per 100 g of desiccant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล

จากหัวข้อ 3.2.2.2 ได้คัดเลือกซิลิกาเจลมาเพื่อศึกษาต่อ โดยมีการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ซิลิกาเจลที่ใช้ในการทดลอง คือ ซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ สำหรับการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ 3 ระดับ ได้แก่ 0.04, 0.06 และ 0.08 m³/s ตัวแปรควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ (อุณหภูมิ 30.7°C และ 65.6%) และความหนาของชั้นสารดูดความชื้น (5 cm) สำหรับการศึกษาอิทธิพลของความหนาของชั้นสารดูดความชื้น ใช้สารดูดความชื้น 3 ระดับ ความชื้น 1, 3, และ 5 cm โดยมีตัวแปรควบคุม คือ อัตราการไหลของอากาศ (0.04 m³/s) และอุณหภูมิของอากาศโดยรอบ (30.7°C) ในการทดลองทำการชั่งน้ำหนัก 300, 900 และ 1500 g adsorbed per 100 g of desiccant โดยการทดลองนี้ใช้ชุดทดสอบดังภาพที่ 3.21

3.2.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจล

ในการศึกษาหัวข้อนี้ใช้ซิลิกาเจลที่ดูดความชื้นไว้จนอิ่มตัวแล้ว โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 มีการจัดการทดลองแบบ แฟคทอเรียล 2 ตัวแปร ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ (0.04, 0.06 และ 0.08 m³/s) และอุณหภูมิลมร้อน (50, 70 และ 90°C) โดยมีตัวแปรควบคุม คือ ความหนาของชั้นสารดูดความชื้น (5 cm) ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาอิทธิพลของความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจล ใช้ความหนาของชั้นสารดูดความชื้น 3 ระดับ ได้แก่ 1, 3, และ 5 cm โดยมีตัวแปรควบคุม คือ อัตราการไหลของอากาศ (0.04 m³/s) และอุณหภูมิลมร้อน (50°C) ในการทดลองทำการชั่งน้ำหนัก 300, 900 และ 1500 g adsorbed per 100 g of desiccant โดยการทดลองนี้ใช้ชุดทดสอบดังภาพที่ 3.21

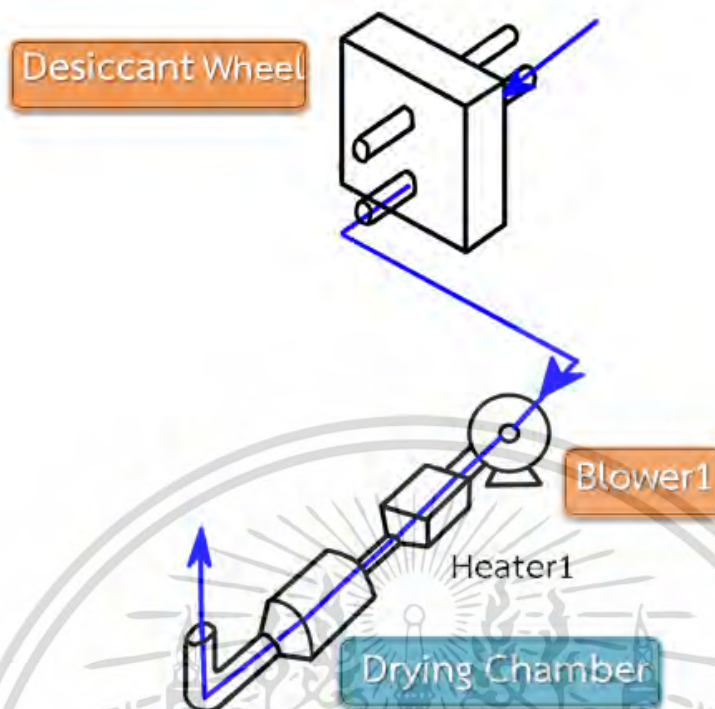
3.2.5 การศึกษาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้น

3.2.5.1 การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านการดูดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้น

บรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ 3 kg เข้าไปในวงล้อดูดความชื้น ให้อากาศไหลผ่านวงล้อดูดความชื้นโดยเปิดเพียงเครื่องเป่าลม 1 ในภาพที่ 3.22 ให้มีอัตราการไหลของอากาศโดยรอบ 0.04 m³/s ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทางเข้าวงล้อดูดความชื้นตามเส้นกระบวนการสีน้ำเงิน: อากาศสำหรับกระบวนการ (process air) ซึ่งเป็นอากาศโดยรอบ และเมื่อวงล้อทำงานโดยตั้งให้มีความเร็วรอบ 0.25 rpm ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้น โดยวัดในห้องอากาศแห้ง ทุก ๆ 1 นาทีจนถึงนาทีที่ 10 และทุก ๆ 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30 และนำค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้มาคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้นจากสมการที่ (3.8)

$$\text{สมรรถนะวงล้อดูดความชื้น(\%)} = \frac{\text{ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าวงล้อ} - \text{ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังออกจากวงล้อ}}{\text{ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าวงล้อ}} \quad (3.8)$$

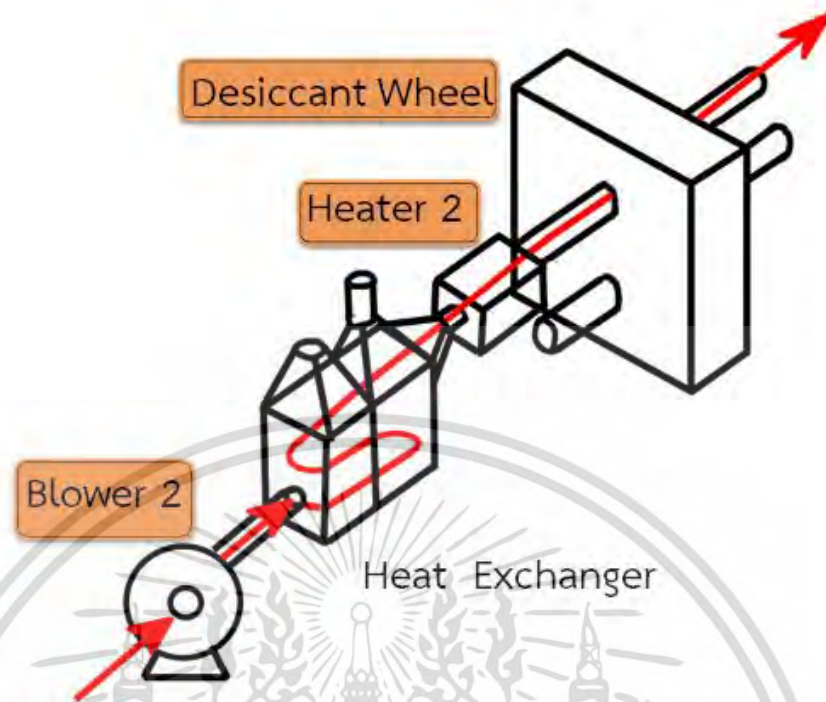
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.22 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบดูดความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นส่วนดูดความชื้น

3.2.5.2 การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านการคายความชื้นจากวงล้อดูดความชื้น

บรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ 3 kg เข้าไปในวงล้อดูดความชื้น ให้อากาศร้อนไหลผ่านวงล้อดูดความชื้นโดยเปิดเครื่องเป่าลม 2 และใส่เครื่องทำความร้อน 2 เพิ่มในระบบดังภาพที่ 3.5 เพื่อทำอากาศร้อนเข้าวงร้อนดูดความชื้น สภาวะการคายความชื้นจากวงร้อนดูดความชื้น อัตราการไหลของอากาศโดยรอบ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิลมร้อน 50 และ 60°C ทำการวัดอุณหภูมิของอากาศขาเข้าวงล้อดูดความชื้นตามเส้นกระบวนการสีแดง: อากาศสำหรับการคืนสภาพสารดูดความชื้น (regeneration) และเมื่อวงล้อทำงานโดยตั้งให้มีความเร็วรอบ 0.25 rpm ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้น โดยวัดในห้องอากาศแห้ง ทุกๆ 1 นาทีจนถึงนาทีที่ 10 และทุกๆ 5 นาที จนถึงนาทีนาที่ที่ 30 และนำค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้มาคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้นจากสมการที่(3.8)



ภาพที่ 3.23 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบยกความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นส่วนยกความชื้น

3.2.6 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

บรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ 3 kg เข้าไปในวงล้อดูดความชื้นเปิดทำงานอุปกรณ์ทุกส่วนของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ในส่วนของอากาศสำหรับกระบวนการ (Dehumidification air) ตามเส้นกระบวนการ A เปิดเครื่องเป่าลม 1 ให้อากาศที่มีอัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ผ่านวงล้อดูดความชื้น จากนั้นอากาศจะผ่านเครื่องทำความร้อน 1 โดยตั้งให้ทำอุณหภูมิลมร้อน 90°C สำหรับเข้าในห้องอบแห้ง เมื่ออากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำออกจากห้องอบแห้งอากาศเคลื่อนที่ต่อไปยังเครื่องอุ่นอากาศเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศจากเส้นกระบวนการ B (Regeneration air) สำหรับอากาศเข้าจากเส้นกระบวนการ B เป็นอากาศโดยรอบที่ผ่านเครื่องเป่าลมร้อน 2 มายังเครื่องอุ่นอากาศ ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น อากาศร้อนที่ไหลผ่านไปยังวงล้อดูดความชื้น เพื่อกายความชื้นออกจากวงล้อดูดความชื้น ในระหว่างการทดลองทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในจุดต่างๆของระบบ ดังภาพที่ 3.24 ทำการบันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 นาทีจนถึงนาทีที่ 10 และทุก ๆ 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30 และแสดงผลเป็นเส้นกระบวนการในแผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสมบัติของอากาศ (Psychrometric Chart)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพาะข้าวกล้องงอกสามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอนหลัก คือ การแช่น้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการบ่มเป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยในระหว่างกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกต้องทำการล้างข้าวทุกๆ 4 ชั่วโมงเพื่อลดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (จิรววัฒน์,2556) พบว่าการแช่และบ่มข้าวกล้องงอกที่อุณหภูมิและเวลาดังกล่าวจะส่งผลให้ข้าวกล้องงอกมีปริมาณสารกาบาสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่แช่และบ่มที่เวลาอื่นๆ ขั้นตอนการเพาะข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกหลังการเพาะบ่ม 24 ชั่วโมงสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.25 และ 3.26 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.25 ขั้นตอนการเตรียมข้าวกล้องงอก



ภาพที่ 3.26 ข้าวกล้องงอกหลังการเพาะบ่ม 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

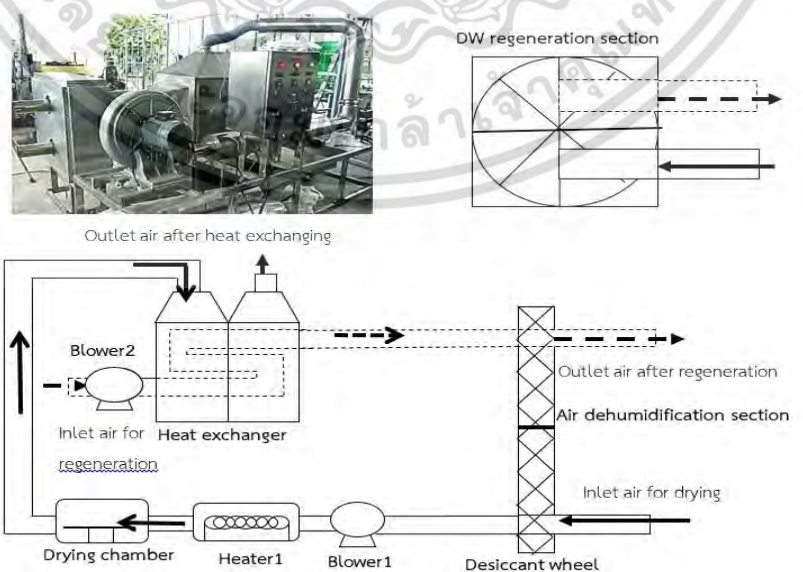
3.3.3 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

จากภาพที่ 3.27 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ วงล้อดูดความชื้นซึ่งทำหน้าที่ในการลดความชื้นในห้องอบแห้ง เครื่องทำความร้อนเพื่อทำอากาศร้อนให้ห้องอบแห้ง และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำอากาศร้อนออกจากห้องอบแห้งมาแลกเปลี่ยนกับอากาศปกติ และนำอากาศร้อนที่ได้ไปใช้ในการกำจัดความชื้นออกจากสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้นต่อไป

ในส่วนของวงล้อดูดความชื้น วงล้อทำมาจากสแตนเลสสตีลมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.7 m หนา 1 cm วงล้อจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ซึ่งทำการหมุนอย่างต่อเนื่อง วงล้อประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนดูดความชื้น และส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้น ในส่วนดูดความชื้น อากาศปกติจะถูกนำมาลดความชื้นขณะเข้าสู่วงล้อดูดความชื้นเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการอบแห้ง ขณะที่ส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้น อากาศปกติจะถูกนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อนำอากาศร้อนไปคายความชื้นออกจากซิลิกาเจลต่อไป

สำหรับการทดลองนี้ ห้องอบแห้งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 m ยาว 0.3 m มีฝาสำหรับนำวัสดุเข้า-ออกจากห้องอบแห้ง โครงสร้างของเครื่องอบแห้งทั้งหมดทำมาจากสแตนเลสสตีล ส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ พัดลมขนาด 0.5 แรงม้า (รุ่น MA40B, EuroVent, Thailand) ทำหน้าที่เป่าผ่านขดลวดเพื่อทำให้เกิดการไหลของอากาศร้อนผ่านท่อไปยังห้องอบแห้ง ในส่วนของชุดควบคุมอุณหภูมิจะใช้อุปกรณ์ทำอากาศร้อนขนาด 1 กิโลวัตต์ (Technology Instruments, Thailand) ขณะที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำมาจากอลูมิเนียมมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนรวมทั้งหมด 50 ตารางเมตร

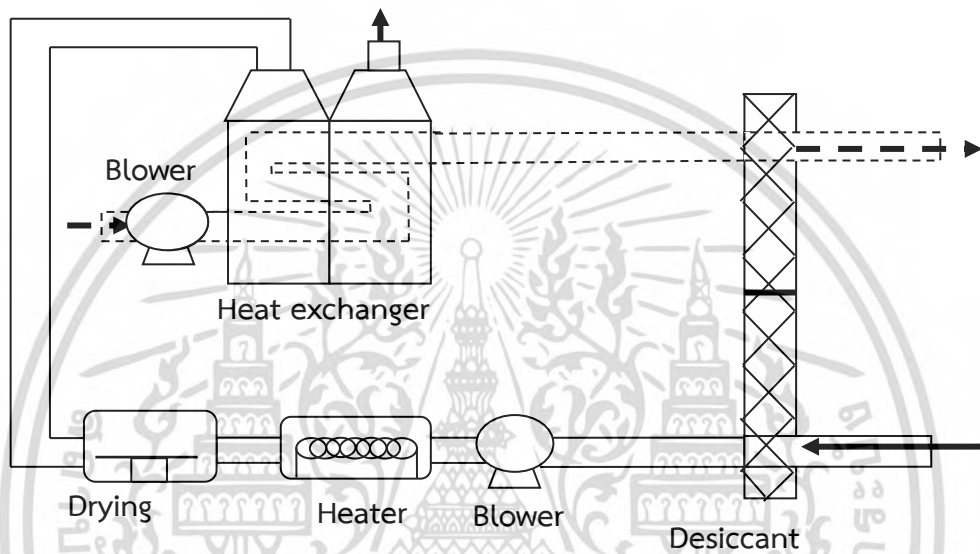
ในด้านการวัดพลังงานการอบแห้ง ใช้อุปกรณ์ที่วัดค่าพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบไฟ 3 เฟส (รุ่น KM-06-N, Pm PRIMUS, Thailand) เพื่อวัดค่าพลังงานไฟฟ้าในหน่วย kWh



ภาพที่ 3.27 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบวงล้อดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.28 -3.29 แสดงระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบการลดความชื้นในห้องอบแห้ง วงล้อดูดความชื้นจะถูกบรรจุด้วยซิลิกาเจลที่ไม่มีการดูดความชื้นผสมอยู่ปริมาณ 3 กิโลกรัม โดยใน ส่วนการลดความชื้น เริ่มจากอากาศปกติที่ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งจะมีความชื้นสัมพัทธ์สูง อุปกรณ์ลดความชื้นจึงมีหน้าที่สำคัญในการลดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง เพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดเวลาในการอบแห้งให้แก่ระบบ



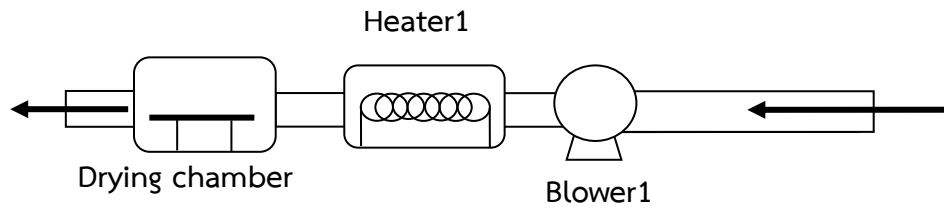
ภาพที่ 3.28 ระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น



ภาพที่ 3.29 วงล้อดูดความชื้น

ในการใช้เครื่องอบแห้งโดยไม่มีการลดความชื้นในอากาศ ส่วนประกอบที่ทำงานแสดงดังภาพที่ 3.6 ระบบอบแห้งแบบลมร้อนประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ได้แก่ พัดลม อุปกรณ์ทำอากาศร้อน และ ห้องอบแห้ง ระบบจะทำการอบแห้งโดยนำอากาศปกติจากภายนอกเข้าสู่ห้องอบแห้งเพื่อใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.30 ระบบอบแห้งแบบลมร้อน

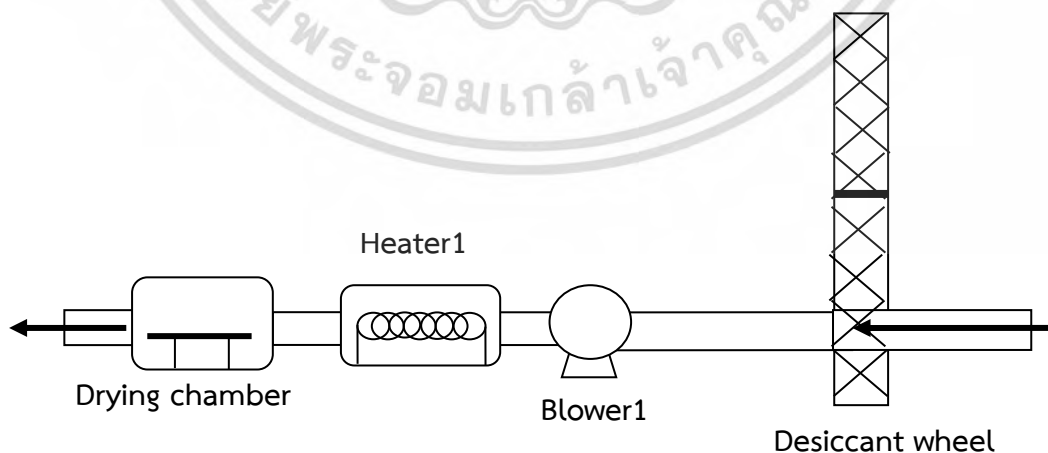
3.3.4 แผนการทดลอง

งานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1. การศึกษาการทำงานของวงล้อและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสถานะห้องอบแห้งเปล่า และ 2. การศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยรายละเอียดทางการทดลองมีดังนี้

3.3.4.1 การศึกษาการทำงานของวงล้อและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสถานะห้องอบแห้งเปล่า

1) การทดลองดูดความชื้นในอากาศของวงล้อดูดความชื้น

จากภาพที่ 3.7 แผนภาพไดอะแกรมในส่วนดูดความชื้นของระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยวงล้อดูดความชื้นถูกบรรจุด้วยซิลิกาเจลสีน้ำเงินสดที่ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ปริมาณ 3 กิโลกรัม ในการทดลองใช้อัตราการไหลของอากาศและความเร็วรอบของวงล้อเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 0.5 rpm ตามลำดับ มีอากาศโดยรอบเป็น 35.9°C , $50.2\% \text{ RH}$ และ $0.019 \text{ kg water/kg dry air}$ โดยในระหว่างกระบวนการทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (KT320, Kimo, France) ทุก ๆ 1 นาทีจนครบ 10 นาที และหลังจากนั้นทำการวัด ทุก ๆ 5 นาทีจนครบ 30 นาที

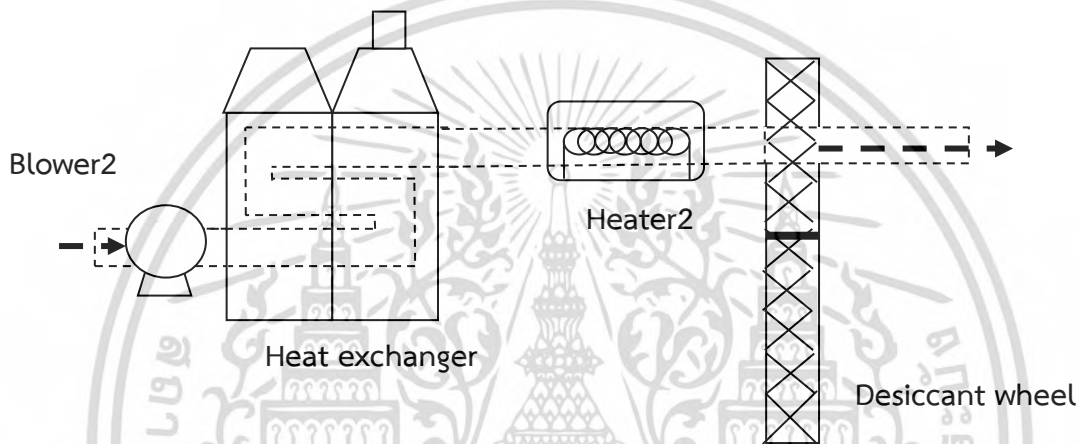


ภาพที่ 3.31 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้นในส่วนดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การทดลองการคืนสภาพสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้น

จากภาพที่ 3.32 แผนภาพโตอะแกรมในส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้นของระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยวงล้อดูดความชื้นถูกบรรจุด้วยซิลิกาเจลปริมาณ 3 กิโลกรัม ก่อนการทดลองกำหนดให้ซิลิกาเจลดูดความชื้นจนเต็มที่อยู่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมงจนมีสีชมพูทำการทดลองโดยให้อัตราการไหลของอากาศและความเร็วรอบของวงล้อคือ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 0.5 rpm ตามลำดับ และทำการกำหนดอุณหภูมิลมร้อนในการคืนสภาพสารดูดความชื้นคือ 60°C ซึ่งในระหว่างกระบวนการทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นเวลา 30 นาที เช่นเดียวกับในส่วนกระบวนการดูดความชื้น



ภาพที่ 3.32 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้นในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น

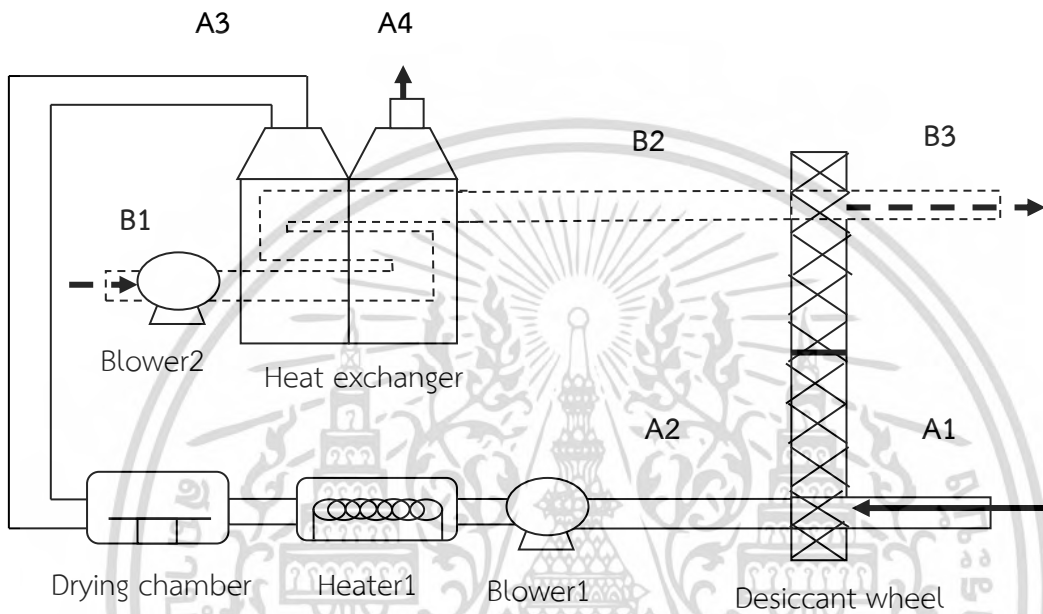
3) การศึกษาสมบัติของอากาศในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นในสถานะห้องอบแห้งเปล่า

จากภาพที่ 3.34 แผนภาพโตอะแกรมแสดงระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบ ในการทดลองทำการบรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสมปริมาณ 3 กิโลกรัม เปิดทำงานในอุปกรณ์ทุกส่วนของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยให้อัตราการไหลของอากาศคือ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ความเร็วรอบของวงล้อเป็น 0.5 rpm และอุณหภูมิลมร้อนเป็น 90°C ซึ่งในระหว่างกระบวนการทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทุก ๆ 5 นาทีจนครบ 30 นาที

ระบบลดความชื้นในห้องอบแห้งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนการดูดความชื้น (เส้นกระบวนการ A) และส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น (เส้นกระบวนการ B) ในส่วนการดูดความชื้นเริ่มจากอากาศปกติที่จุด A1 จะถูกนำมาลดความชื้นโดยผ่านวงล้อดูดความชื้น ซึ่งทำให้อากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้นที่จุด A2 มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ โดยอากาศที่ได้นี้จะถูกไปเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องทำความร้อนจนมีอุณหภูมิเป็น 90°C เพื่อใช้สำหรับกระบวนการอบแห้งต่อไป ซึ่งอากาศที่เหลือทิ้งจากกระบวนการอบแห้งคือจุด A3 จะถูกนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศปกติ คือจุด B1 ในส่วนของกระบวนการคืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพสารดูดความชื้นที่บริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อากาศที่เหลือทิ้งหลังจากการแลกเปลี่ยน ความร้อนแล้วที่จุด A4 มีอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์สูง ขณะที่ส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้น อากาศปกติ ที่จุด B1 จะถูกนำมาเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยอากาศร้อนที่ได้คือจุด B2 จะถูกนำไปใช้ในการคืนสภาพสารดูดความชื้นออกจากซิลิกาเจล ซึ่งส่งผลให้อากาศที่ออกจากวงล้อดูด ความชื้นในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้นที่จุด B3 มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ



ภาพที่ 3.33 แผนผังแสดงจุดในการวัดสมบัติอากาศของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบ วงล้อดูดความชื้น

4) การคำนวณประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสถานะห้องอบแห้งเปล่า ประสิทธิภาพของระบบวงล้อดูดความชื้นสามารถคำนวณในแง่ของการถ่ายเทความร้อนและการไอแห้งมวลจากสมการดังต่อไปนี้ (Mandegari, 2009)

ประสิทธิภาพทางการถ่ายเทความร้อน (Thermal effectiveness) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.9)

$$\epsilon = \frac{T_{A2} - T_{A1}}{T_{B2} - T_{A1}} \quad (3.9)$$

เมื่อ T_{A1} , T_{A2} และ T_{B2} คือ อุณหภูมิทางเข้าและทางออกของอากาศในส่วนการดูดความชื้น และอุณหภูมิทางเข้าของอากาศในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น ($^{\circ}\text{C}$) ตามลำดับ

ประสิทธิภาพทางการคืนสภาพสารดูดความชื้น (Regeneration effectiveness) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\epsilon = \frac{(W_{A1}-W_{A2}) h_{fg}}{h_{B2}-h_{B1}} \tag{3.10}$$

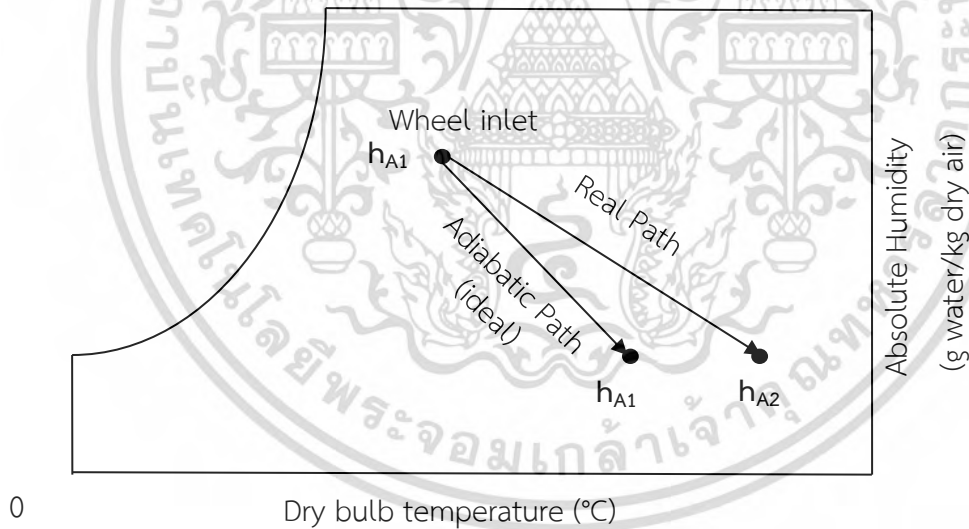
เมื่อ w และ h คือ ความชื้นจำเพาะและ ความร้อนแฝงในการระเหยของน้ำตามลำดับ

ประสิทธิภาพทางการลดความชื้น (Dehumidification effectiveness สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.11)

$$\epsilon = \frac{W_{A1}-W_{A2}}{W_{A1}-W_{A2,ideal}} \tag{3.11}$$

เมื่อ W_{A1} และ W_{A2} คือ ความชื้นจำเพาะทางเข้าและทางออกของอากาศในส่วนการดูดความชื้น ขณะที่ $W_{A2,ideal}$ คือ ความชื้นจำเพาะทางอุดมคติของทางออกของอากาศในส่วนการดูดความชื้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 หรือ ระบบสามารถทำการลดความชื้นได้อย่างสมบูรณ์

โดยความแตกต่างระหว่างค่าเอนทัลปีของอากาศทางเข้าและออกจากรังล้อดูดความชื้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.33 โดยการเบี่ยงเบนของค่าเอนทัลปีมีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการอะเดียแบติกสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.12)



ภาพที่ 3.34 แผนภูมิไซโครเมตริกในกระบวนการลดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้นซึ่งเป็นไปตามกระบวนการอะเดียแบติก ที่มา : Mandegari, 2009

ประสิทธิภาพกระบวนการอะเดียแบติก (Adiabatic DW 's effectiveness)

$$\epsilon = 1 - \frac{(h_{A2} - h_{A1})}{h_{A1}} = \frac{2h_{A1} - h_{A2}}{h_{A1}} \tag{3.12}$$

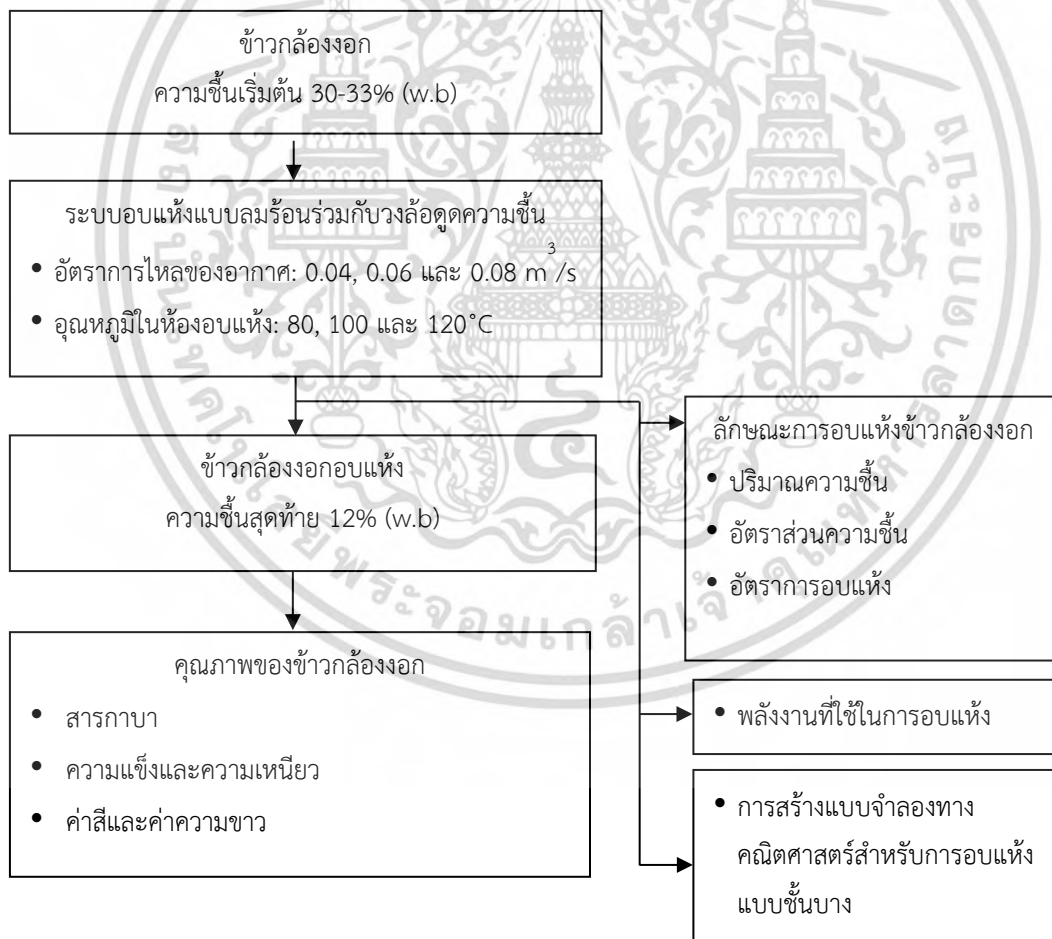
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ h_{A1} และ h_{A2} คือ ค่าเอนทัลปีของอากาศทางเข้าและออกจากวงล้อดูด ความชื้นที่เป็นไปตามการลดความชื้นแบบกระบวนการอะเดียแบติก และค่าเอนทัลปีของอากาศหลังออกจากวงล้อดูดความชื้นที่ได้จากการทดลองจริง ตามลำดับ

โดยอ้างอิงจากแผนภูมิไซโครเมตริกในภาพที่ 3.31 กระบวนการลดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้นต้องเป็นไปตามเส้นกระบวนการอะเดียแบติก คือระบบสามารถทำการลดความชื้นได้อย่างสมบูรณ์ มีค่าประสิทธิภาพ 100%

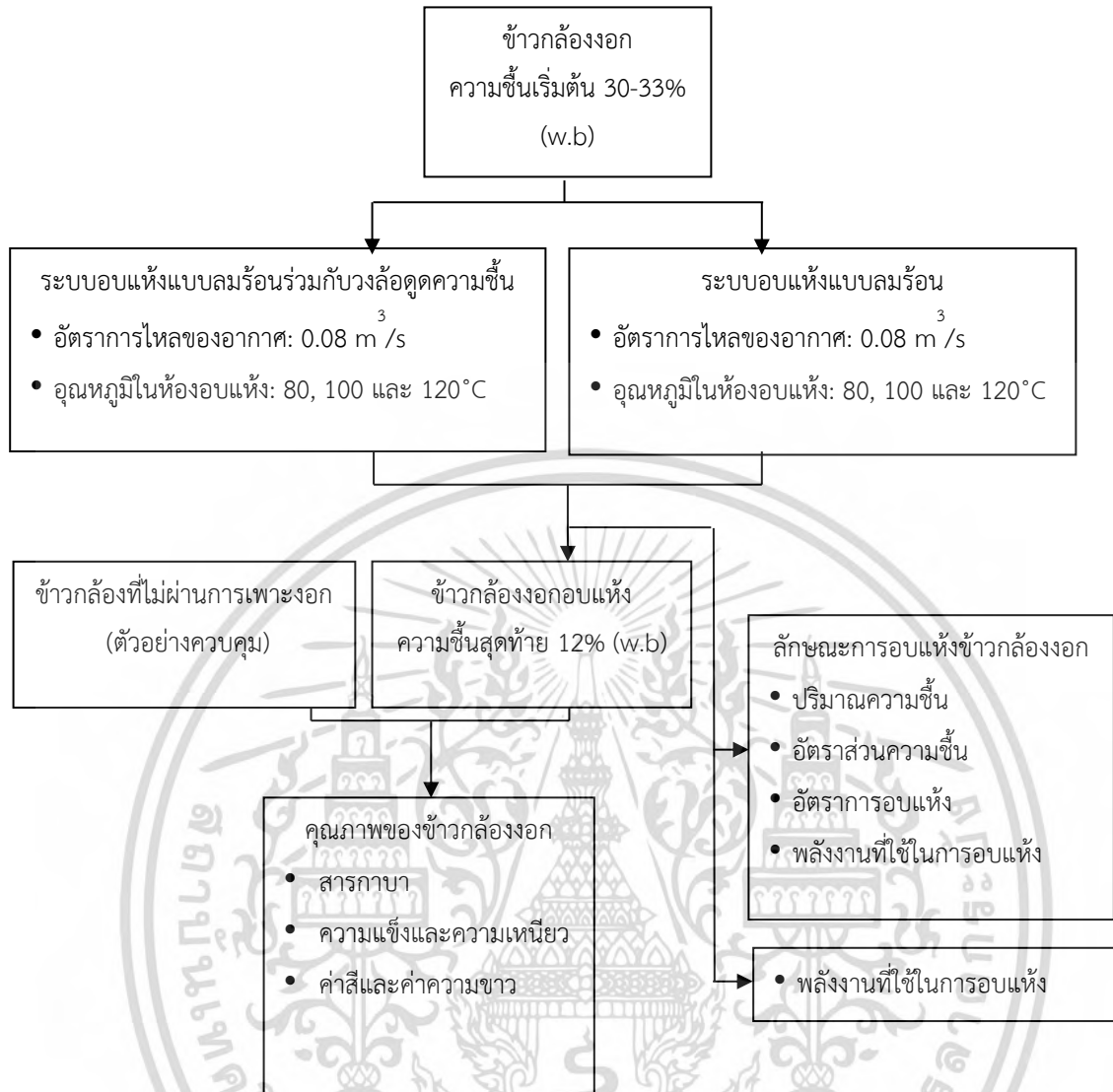
3.3.4.2 การศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 การทดลองหลัก ได้แก่ 1. อิทธิพลของอัตราการไหลและอุณหภูมิต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นซึ่งสามารถแสดงดังภาพที่ 3.35 และ 2. การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ โดยรายละเอียดการทดลองแสดงดังภาพที่ 3.36



ภาพที่ 3.35 แผนผังการทดลองอิทธิพลของอัตราการไหลและอุณหภูมิต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.36 แผนผังการทดลองการเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ

1) อิทธิพลของอัตราการไหลและอุณหภูมิต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ระบบที่ใช้ในการศึกษาคือระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิห้องอบแห้งที่ส่งผลต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยด้านคุณภาพของข้าวกล้องงอกจะทำการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา ความแข็ง ความเหนียว ค่าสี และค่าความขาวของข้าวกล้องงอกที่ได้หลังจากกระบวนการอบแห้งที่พัฒนาขึ้นซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ที่ได้ตั้งหัวข้อที่ 3.5, 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษาคือ ตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งดังภาพที่ 3.12 ที่อัตราการไหลของอากาศของสวนดูดความชื้นคือ 0.04, 0.06 และ 0.08 m³/s และอุณหภูมิในห้องอบแห้ง 80, 100 และ 120°C นอกจากนี้ยังทำการสร้างและเลือกแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบขั้นบันไดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทำนายลักษณะการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวนวโศภการศึกษานันทน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองทำการกำหนดความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้นที่ 1.5 rpm อัตราการไหลของอากาศของสวนคืนสภาพสารดูดความชื้นที่ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิของสวนคืนสภาพที่ 90°C ก่อนการทดลองกำหนดอากาศก่อนก่อนเข้าสู่วงล้อดูดความชื้นมีค่าควบคุมอยู่ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 45-55% ข้าวกล้องอกที่ใช้ในการศึกษาคือข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เพาะงอกเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนมีความชื้นอยู่ในช่วง 30-33% (w.b) การทดลองทำการอบแห้งแบบชั้นบาง (Thin-layer drying) ที่ชั้นความหนา 1 เซนติเมตรเกลี่ยให้เรียบเสมอกัน ให้ข้าวกล้องอกมีความชื้นสุดท้ายเป็น 12% (w.b) ซึ่งเป็นระดับความชื้นที่ปลอดภัย คือ 10-13% (w.b) (Jongyingcharoen and Cheevitsopon, 2016) ในการเก็บรักษาข้าวกล้องอก



ภาพที่ 3.37 ข้าวกล้องอกชั้นความหนา 1 เซนติเมตรเกลี่ยให้เรียบเสมอกัน

2) การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ

ในการทดลองจะทำการศึกษาและเปรียบเทียบตัวอย่างข้าวกล้องอกจำนวน 3 ตัวอย่างหลัก คือ ตัวอย่างควบคุม (ข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการเพาะงอก) ตัวอย่างข้าวกล้องอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น และตัวอย่างข้าวกล้องอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบในด้านลักษณะการอบแห้ง และด้านคุณภาพซึ่งได้แก่ ปริมาณสารกาบา ความแข็ง ความเหนียว ค่าสี และค่าความขาวที่ได้หลังจากกระบวนการอบแห้งเมื่อใช้วิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษาคือ ตัวอย่างข้าวกล้องอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอัตราการไหลของอากาศเดียวกันในสวนดูดความชื้น คือที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิในหอบแห้งเป็น 80, 100 และ 120°C ตามลำดับ

3.3.5 การวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง

3.3.5.1 ปริมาณความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการวัดปริมาณความชื้นถูกกำหนดโดย AOAC (AOAC, 2005) โดยทำการชั่งข้าวกล้องงอกใส่ลงในถ้วยวัดความชื้น หลังจากนั้นนำเข้าเครื่องอบแห้ง (UF260, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิร้อน 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำข้าวกล้องที่ผ่านการอบออกมาชั่งน้ำหนักและนำไปคำนวณหาความชื้นของแต่ละตัวอย่างได้ดังสมการ (3.13) และ (3.14)

การวิเคราะห์หาความชื้นฐานเปียกสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.13)

$$MR = \frac{M_w}{M_w - M_s} \times 100 \quad (3.13)$$

การวิเคราะห์หาความชื้นฐานแห้งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.6)

$$MR = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (3.14)$$

เมื่อ M_w และ M_s คือ ปริมาณน้ำ (g water) และน้ำหนักตัวอย่างแห้ง (g dry matter) ตามลำดับ

3.3.5.2 อัตราส่วนความชื้น (The moisture ratio, MR)

หลังจากที่ได้ความชื้นตามเงื่อนไขที่ต้องการ สามารถนำมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นได้ดังสมการ (3.15)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (3.15)$$

เมื่อ M_t , M_0 และ M_e คือ ปริมาณความชื้นข้าวที่เวลาใดๆ (g water/g dry matter), ปริมาณความชื้นข้าวที่เวลาเริ่มต้น (g water/g dry matter) และ ปริมาณความชื้นข้าวที่สมดุล (g water/g dry matter) ตามลำดับ ซึ่งสำหรับการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิสูงจะพบว่าค่า M_e จะมีค่าเท่ากับ 0 (Sripinyowanich and Noomhorm, 2011)

3.3.5.3 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

เมื่อคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นแล้วจึงสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการอบแห้งได้ดังสมการ (3.16)

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ M_{t+dt} , M_t และ dt คือ ปริมาณความชื้นข้าวที่เวลาเริ่มต้น (g water/g dry matter), ปริมาณความชื้นข้าวที่เวลาใดๆ (g water/g dry matter) และ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (min) ตามลำดับ

3.6 การวิเคราะห์พลังงานจำเพาะของการอบแห้ง

ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) เป็นค่าที่สะท้อนถึง ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และยังสามารถแสดงถึงต้นทุนทางด้านพลังงานของโรงงานอุตสาหกรรมได้ โดยทั่วไปค่า SEC สามารถคำนวณได้จากปริมาณพลังงานที่โรงงานใช้ในเวลานั้น ต่อปริมาณผลผลิตทั้งหมด ในช่วงเวลาเดียวกัน (กรมพัฒนาพลังงานฯ, 2560) สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.17)

$$SEC = \frac{\text{Energy}}{\text{Product}} \quad (3.17)$$

เมื่อ Energy คือ พลังงานที่ใช้หรือเกี่ยวข้องกับการผลิตสินค้าในช่วง 1 รอบการทำงานหรือ ช่วงเวลา (kWh) ในขณะที่ Product คือ ปริมาณผลผลิตที่ผลิตได้ในช่วง 1 รอบการทำงาน หรือช่วงเวลา โดย ต้องเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับการบันทึกพลังงาน

3.3.7 การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบชั้นบาง

จากการทดลองเลือกใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบชั้นบาง จำนวน 8 โมเดลได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

Model No.	Model name	Model
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Two term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$
6	Approximation of diffusion	$MR = (a \exp(-kt)) + (1-a) \exp(-kbt)$
7	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
8	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบชั้นบาง สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และ ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) (Thanimkarn and Jongyingcharoen, 2014) ได้ดังสมการที่ (3.18) และ (3.19) ตามลำดับ โดยตัวแปรทั้งสองตัวสามารถนำไปสู่ การเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการอบแห้ง คือ แบบจำลองที่มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจสูง และ ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.18)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{bar,exp})^2} \quad (3.18)$$

การคำนวณค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.19)

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$, $MR_{bar,exp}$, $MR_{pre,i}$ และ N คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง, อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง, อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และ จำนวนสิ่งทดลอง ตามลำดับ

3.3.8 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก

คุณภาพข้าวกล้องงอกที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ สารกาบา ความแข็ง ความเหนียว ค่าสีและความขาว โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.3.8.1 การเตรียมข้าวกล้องงอกหุงสุกสำหรับการวิเคราะห์ความแข็งและความเหนียว

วิธีการหุงข้าวกล้องงอกที่เหมาะสมที่สุด คือ วิธีการหุงสุกด้วยบีกเกอร์ในหม้อหุงข้าว ซึ่งเป็นวิธีการหุงข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแล้วยังคงมีปริมาณสารกาบาสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหุงข้าวด้วยวิธีอื่นๆ [59] โดยปริมาณน้ำที่ใส่ต่อข้าวกล้องงอกคือ 0.8:1 และเวลาที่เหมาะสมในการหุงคือ 12 นาที หลังจากน้ำเดือด

ซึ่งข้าวสารปริมาณ 25 กรัมและชั่งน้ำปริมาณ 20 กรัม (อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:0.8) ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ทำซ้ำ 4 บีกเกอร์โดยเกลี่ยข้าวให้เรียบเสมอกัน จากนั้นชั่งน้ำปริมาณ 400 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรัมใส่ลงไปในหม้อหุงข้าว (RC-100, Toshiba, Thailand) ปิดฝาแล้วกดหุง (Cook) สังเกตจากไอน้ำเดือดแล้วทำการจับเวลาต่อไปอีก 12 นาที แล้วกดยกเลิก (Cancel) ทำการปล่อยทิ้งไว้ในหม้อหุงข้าวต่ออีก 10 นาที เมื่อครบเวลานำข้าวที่หุงเสร็จแล้วพร้อมปิกเกอร์คว่ำลงบนตะแกรงโดยทิ้งไว้เป็นเวลา 40 นาที ข้าวกล้องงอกหุงสุกดังภาพที่ 3.14 เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วนำข้าวที่อยู่ตรงกลางใส่กล่องพลาสติกปริมาณกล่องละ 3 กรัม



ภาพที่ 3.38 ข้าวกล้องงอกหลังผ่านการหุงด้วยวิธีการหุงสุกด้วยปิกเกอร์

3.3.8.2 สารกาบา

นำตัวอย่างข้าวกล้องหลังผ่านกระบวนการอบแห้ง มาบดละเอียดให้มีลักษณะเป็นผงแป้งดังภาพที่ 3.38 จากนั้นนำตัวอย่างผงใส่ถุงพลาสติกใสซีลปิดสนิทถุงละ 25 กรัม ตัวอย่างละ 2 ถุง ส่งตรวจสอบสารกาบาที่สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ด้วยวิธี In-house method based on Journal of Chromatography B712 (1998): 43-49

การวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา ตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่ถูบดละเอียด 2.5 กรัมถูกเติมลงไปใต้น้ำ 1.8 ml และกรด sulfosalicylic 200 μ L ส่วนผสมต่างๆจะถูกคนให้เข้ากันด้วยกระบวนการ โซนิเคชันเป็นเวลา 20 นาที แล้วทำการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4200 rpm เป็นเวลา 10 นาทีหลังจากนั้นของผสมจะถูกกรองผ่านตัวกรองขนาด 0.45 μ m ส่วนใสเหนือตะกอน 50 μ L จะถูกนำมาผสมกับ 100 mmol sodium bicarbonate 50 μ L และ 4 mM Dabsyl-Cl 200 μ L เขย่าของผสมและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติม methanol 250 μ L และ potassium hydrogen phosphate ที่ค่าความเป็นกรดต่าง 6.8 ปริมาณ 250 μ L กรองสารผสมที่ได้ นำส่วนใสเหนือตะกอนฉีดเข้าระบบ HPLC ที่อุณหภูมิ 28 \pm 1°C และมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 nm

ใช้คอลัมน์ Supelcosil LC-DABS ขนาดอนุภาค 3 μ m ที่ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 150x4.6 mm² เป็นเฟสคงที่ โดยมีเฟสเคลื่อนที่ (gradient mobile phase) เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

soduim acetate ค่าความเป็นกรดต่าง 6.8 :acetonitrile ที่อัตราการไหล 1 mL/min โดยความเข้มข้นของ acetonitrile ที่ใช้ในระบบจะคือ 0-40 นาทีที่ linear gradient 35-40% : 40-80 นาที ที่ Isocratic 40% สุดท้ายล้างคอลัมน์ด้วย soduim acetate :acetonitrile ในอัตราส่วน 5:95 เป็นเวลา 20 นาทีและทำการปรับระบบใหม่ด้วย soduim acetate :acetonitrile ในอัตราส่วน 75:35



ภาพที่ 3.39 ข้าวกล้องงอกบดละเอียด

3.3.8.3 ความแข็งและความเหนียว

การวัดเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องด้วยเครื่องวัด Texture analyzer (TA HDplus, Stable Micro System, UK) โดยใช้วิธีผลักดันย้อนกลับ (Back extrusion) ซึ่งประกอบด้วยแท่นวัดและหัวกด ดังภาพที่ 3.16 กำหนดหัววัดสูงจากแท่น 100 มิลลิเมตร และตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองคือข้าวที่ซังไว้ตัวอย่างละ 3 กรัมใส่ลงในแท่นวัดโดยค่อย ๆ กดเมล็ดลงอย่างช้า ๆ แรงที่ใช้ในการกดข้าวกล้อง 1 นิวตัน ระยะที่ทำการกดคือ 99 มิลลิเมตร ด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตร/นาที (สมชาย, 2556) โดยทำการวัดค่าซ้ำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ทำการวิเคราะห์ผลค่าความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Stickiness)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.40 เครื่องวัด Texture analyzer

3.3.8.4 ค่าสีและค่าความขาว

การทดสอบทางด้านสีอาหารของข้าวกล้องด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab ดังภาพที่ 3.41 และ 3.42 ทำการวัดสีของข้าวกล้องในทอมของตัวแปร L^* , a^* และ b^* โดยแต่ละตัวอย่างทำการวัดค่าซ้ำ 3 ซ้ำ เมื่อติดตั้งเครื่องมือเสร็จแล้วก็นำข้าวมาใส่กระปุกข้าวสำหรับการวัดสี รอเครื่องอ่านค่าสีระยะเวลาหนึ่ง จะได้ค่าตัวแปร L^* , a^* และ b^* ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความขาว [59] ได้ดังสมการ (3.20)

$$\text{Whiteness} = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (3.20)$$

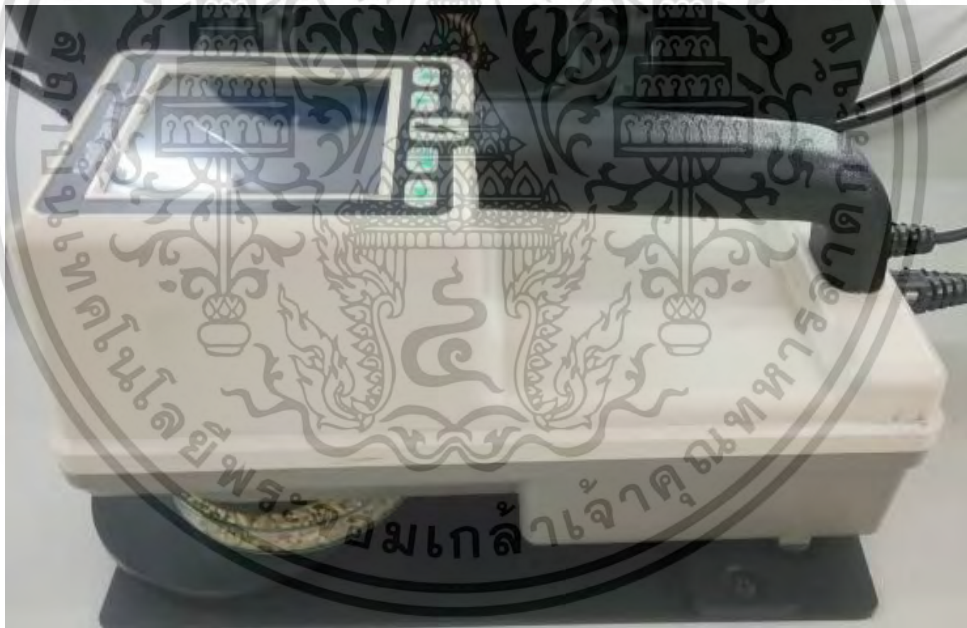
เมื่อ	L	คือ ค่าความสว่างมีค่าตั้งแต่ 0-100
	0	คือ สีมืดที่สุด
	100	คือ สีสว่างที่สุด
	a	คือ ค่าที่แสดงความเป็นสีแดงหรือเขียว
	+a	คือ แสดงความเป็นสีแดง
	-a	คือ แสดงความเป็นสีเขียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- b คือ ค่าที่แสดงความเป็นสีเหลืองหรือน้ำเงิน
- +b คือ แสดงความเป็นสีเหลือง
- b คือ แสดงความเป็นสีน้ำเงิน



ภาพที่ 3.41 เครื่องวัดสี Hunter lab



ภาพที่ 3.42 การวัดสีของเครื่องวัดสี Hunter lab

3.3.9 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อปริมาณสารกาบา ค่าความแข็ง ค่าความเหนียว ค่าสีและค่าความขาวสำหรับการอบแห้งด้วยระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ซึ่งมีตัวแปรต้น 2 ตัว ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อน ดังนั้นจึงวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีการวิเคราะห์แบบ Least Significant Difference test (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

95% ส่วนการเปรียบเทียบระบบอบแห้งระหว่างระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นและระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ต่อปริมาณสารกาบา ค่าความแข็ง ค่าความเหนียว ค่าสีและค่าความขาว ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีการวิเคราะห์แบบ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

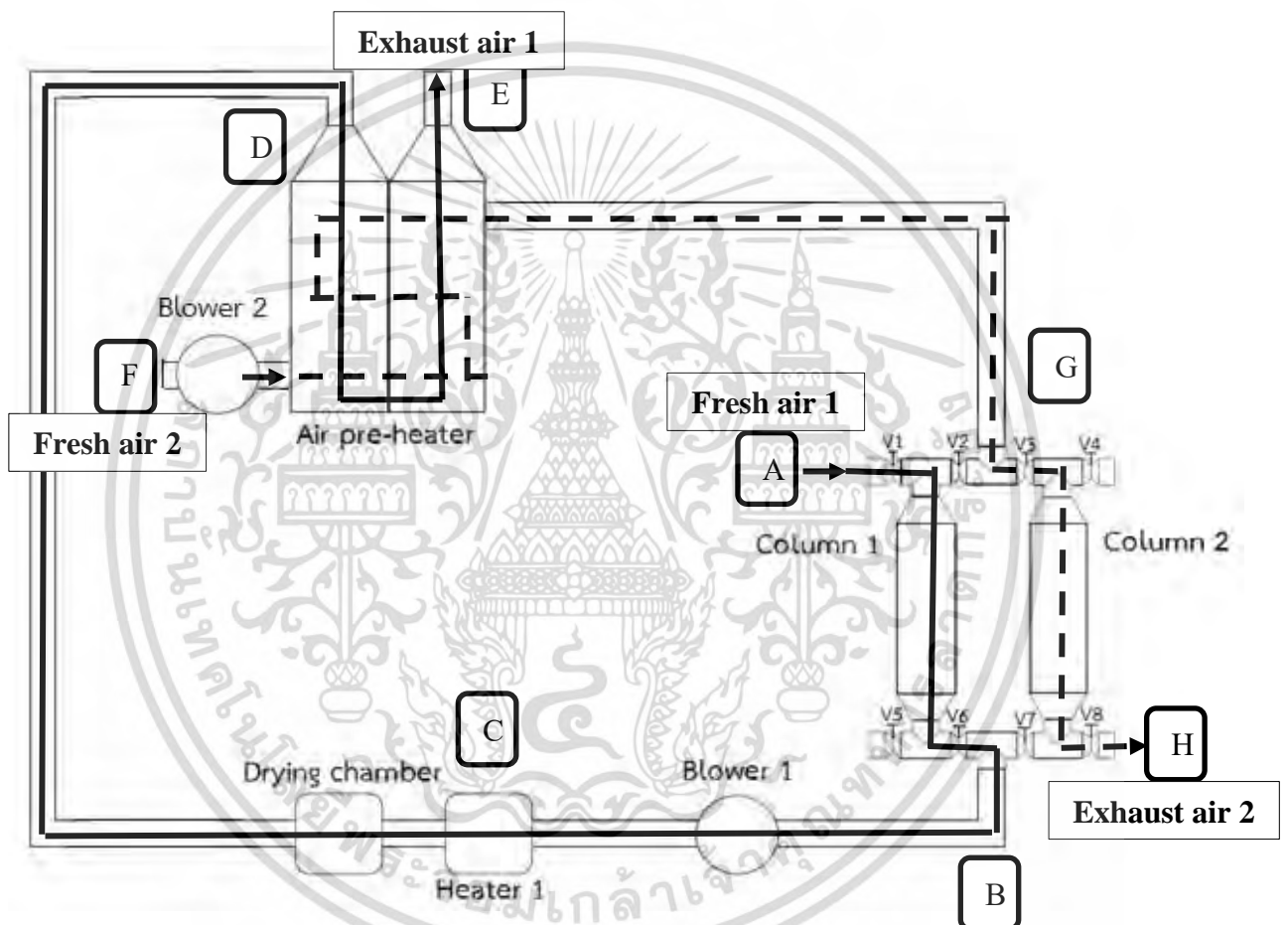
บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

4.1.1 การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

4.1.1.1 หลักการทำงานของระบบ

ผลจากการทดลองเบื้องต้น นำมาออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น ดังภาพที่ 4.1 – 4.2 ซึ่งระบบมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.1 ส่วนประกอบหลักของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

ในกระบวนการดูดความชื้นและการอบแห้ง อากาศที่บรรยากาศ (Fresh air 1) ถูกดูดเข้าสู่ระบบ ด้วยพัดลม 1 (Blower 1) ผ่านทางวาล์วตัวที่ 1 (V.1) โดยที่วาล์วตัวที่ 2 (V.2) กับวาล์วตัวที่ 5 (V.5) จะปิดทำให้อากาศไหลผ่านคอลัมน์ที่ 1 (Column 1) และออกทางวาล์วตัวที่ 6 (V.6) เข้าสู่ระบบไป ในระหว่างที่อากาศไหลผ่านคอลัมน์ที่ 1 จะทำให้ความชื้นในอากาศถูกดูดซับด้วยซิลิกาเจล ความชื้นในอากาศจึงลดลง เมื่ออากาศไหลออกจากวาล์วตัวที่ 6 (V.6) จะไหลเข้าสู่อุปกรณ์ทำอากาศร้อน (Heater) เพื่อทำให้อากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้มีอุณหภูมิสูงขึ้นสำหรับการอบแห้ง อากาศร้อนความชื้นต่ำนี้จะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ในระหว่างการทำแห้งอากาศจะมีอุณหภูมิลดลงเล็กน้อย และมีความชื้นสูงขึ้น อากาศที่ออกจากห้องอบแห้งจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์อุ่นอากาศ เพื่อทำการแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอากาศใหม่ (Fresh air 2) จากนั้นจึงไหลออกสู่บรรยากาศ (Exhaust air 1)

ในกระบวนการไล่ความชื้น อากาศใหม่จากบรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 32 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 70 %RH (Fresh air 2) ถูกดูดด้วยพัดลม 2 (Blower 2) ผ่านอุปกรณ์อุ่นอากาศ (Air pre-heater) เพื่อให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น อากาศที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นนี้ถูกนำไปใช้สำหรับกระบวนการไล่ความชื้นของซิลิกาเจลโดยเมื่อออกจากเครื่องอุ่นอากาศแล้ว วาล์วตัวที่ 2 (V.2) และวาล์วตัวที่ 5 (V.5) จะปิด อากาศจะไหลเข้าสู่คอลัมน์ที่ 2 (Column 2) ผ่านทางวาล์วตัวที่ 3 (V.3) เพื่อทำการไล่ความชื้นในคอลัมน์ที่ 2 หลังจากนั้นจะไหลผ่านวาล์วตัวที่ 8 (V.8) และออกสู่บรรยากาศ (Exhaust air 2)

สำหรับการสลับการทำงานระหว่างคอลัมน์ที่ 1 และคอลัมน์ที่ 2 วาล์วไฟฟ้าทั้ง 8 ตัว จะถูกตั้งเวลาให้ทำการเปิด - ปิด อัตโนมัติตามระยะเวลาที่กำหนด โดยการทำงานของวาล์วจะเป็นไปตามตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปิดปิดวาล์วเมื่อหอทที่ 1 อยู่ในกระบวนการดูดความชื้นและหอทที่ 2 อยู่ในกระบวนการคายความชื้น

Column 1 (กระบวนการดูดความชื้น)		Column 2 (กระบวนการคายความชื้น)	
วาล์วที่เปิด	วาล์วที่ปิด	วาล์วที่เปิด	วาล์วที่ปิด
V.1 , V.6	V.2 , V.5	V.3 , V.8	V.4 , V.7

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปิดปิดวาล์ว เมื่อหอทที่ 1 อยู่ในกระบวนการคายความชื้นและหอทที่ 2 อยู่ในกระบวนการดูดความชื้น

Column 1 (กระบวนการคายความชื้น)		Column 2 (กระบวนการดูดความชื้น)	
วาล์วที่เปิด	วาล์วที่ปิด	วาล์วที่เปิด	วาล์วที่ปิด
V.2 , V.5	V.1 , V.6	V.4 , V.7	V.3 , V.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

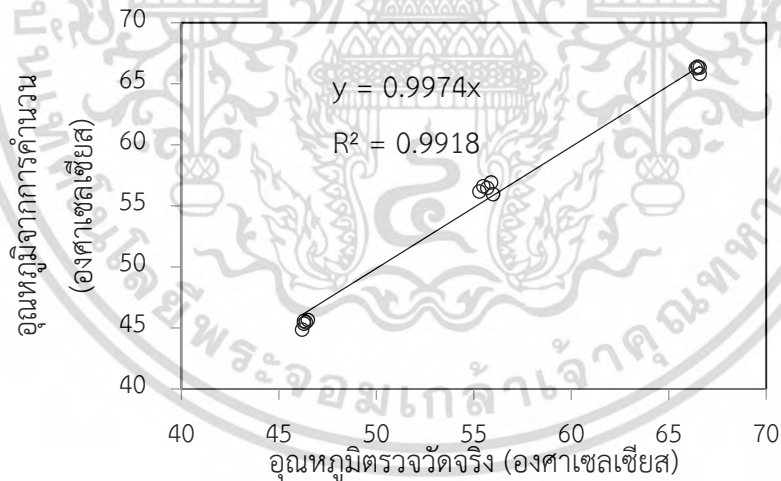


ภาพที่ 4.2 ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

4.1.1.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

1) ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นอากาศ

ในการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นอากาศ ทำการทดสอบที่อัตราการไหลของอากาศทั้งระบบ 0.04 ลูกบาศก์เมตร/วินาที กำหนดอุณหภูมิอากาศร้อนความชื้นสูงก่อนเข้าอุปกรณ์อุ่นอากาศที่จุด D เป็น 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส บันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ นำมาคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่จุด G ทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่จุด G ที่บันทึกได้จากการทดสอบ ดังภาพที่ 4.3



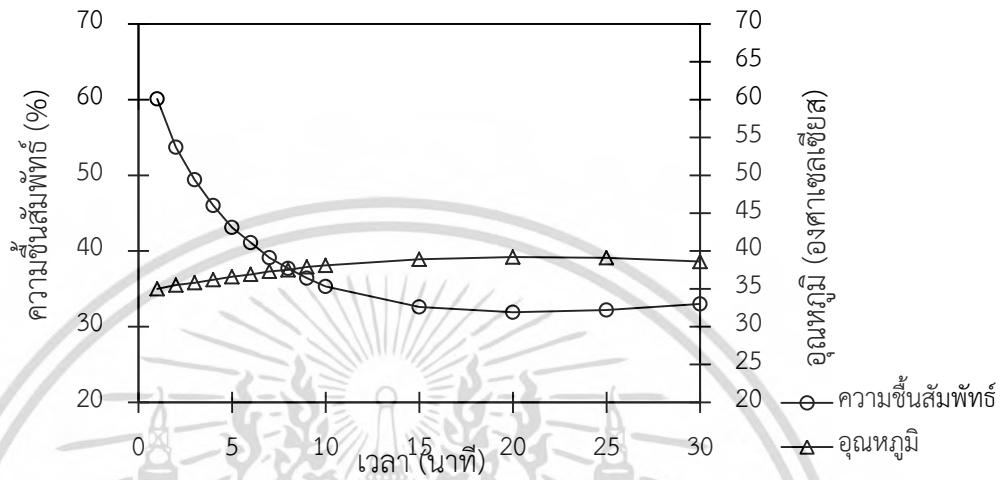
ภาพที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิอากาศขาออกจากอุปกรณ์อุ่นอากาศ

จากภาพที่ 4.3 ค่าความชันของกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิตรวจวัดจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่บันทึกได้จากการคำนวณ โดยมี $R^2 = 0.9918$ จากการคำนวณค่าประสิทธิภาพของเครื่องพบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์อุ่นอากาศเท่ากับ 78.6% และมีค่าความผิดพลาดของการคำนวณอยู่ในช่วง 0.1 – 2.9 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

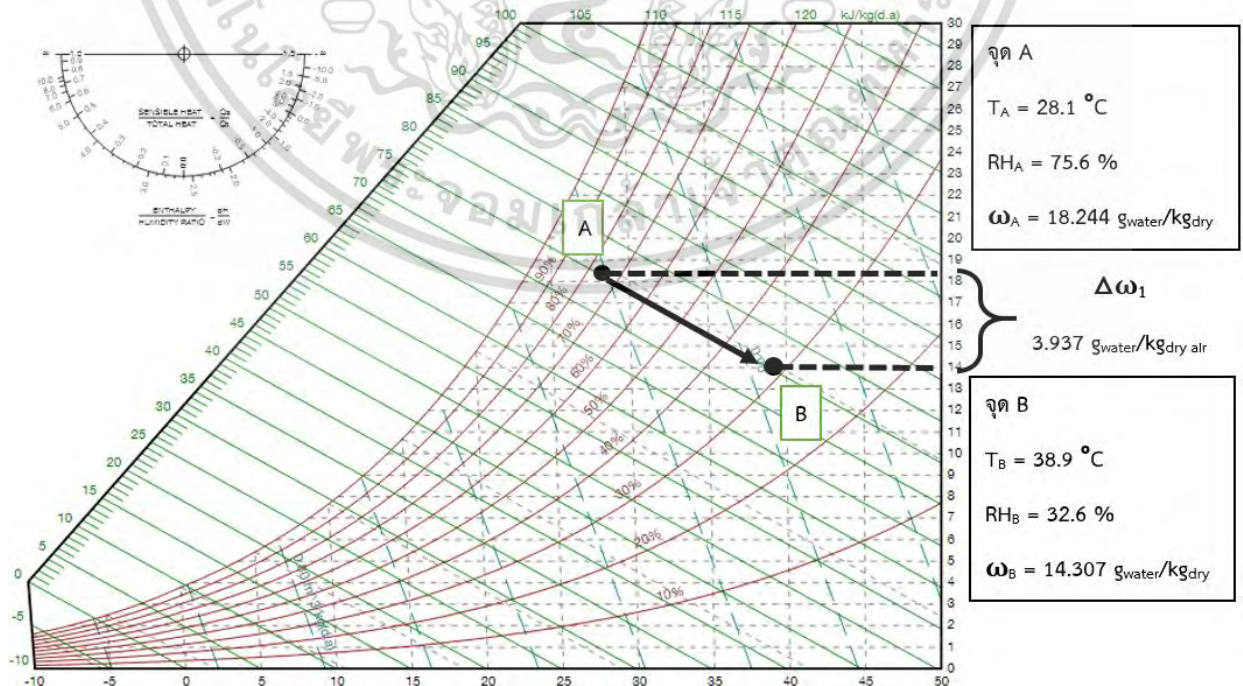
2) ผลการทดสอบความสามารถในการดูดความชื้นของหอดูดความชื้น

ทำการทดสอบที่อัตราการไหลของอากาศ 0.02 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ผ่านหอดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที บันทึกค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหอดูดความชื้นทุก 1 นาที จนถึงนาทีที่ 10 หลังจากนั้นบันทึกค่าทุก 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30



ภาพที่ 4.4 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศการดูดความชื้น

จากภาพที่ 4.4 แสดงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศในกระบวนการดูดความชื้นที่ทางออกของหอดูดความชื้น พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหอดูดความชื้นเพิ่มขึ้น และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศลดลง



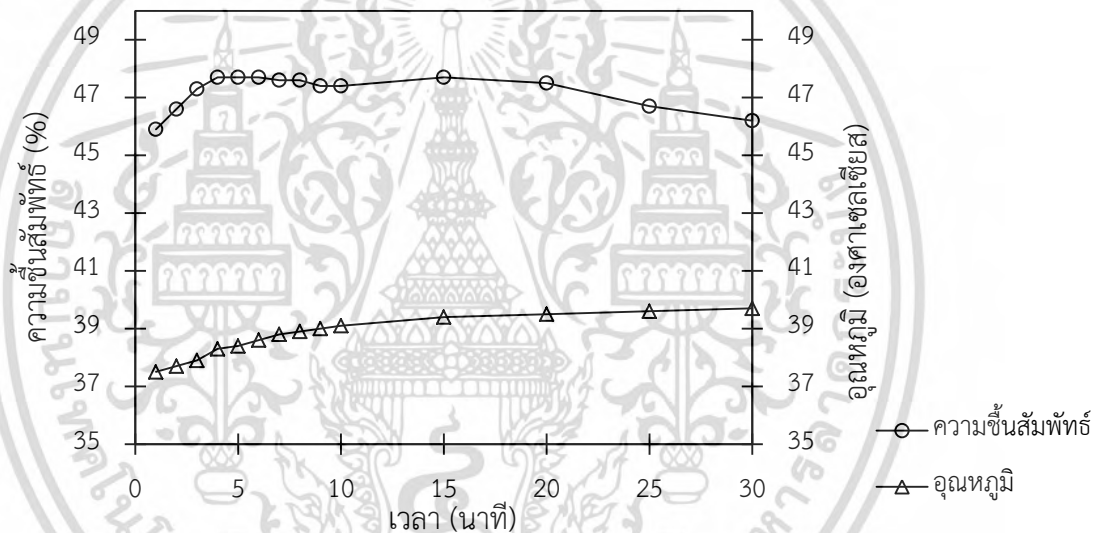
ภาพที่ 4.5 แผนภูมิไซโครเมตริกปริมาณการดูดความชื้นของซิลิกาเจลในนาทีที่ 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

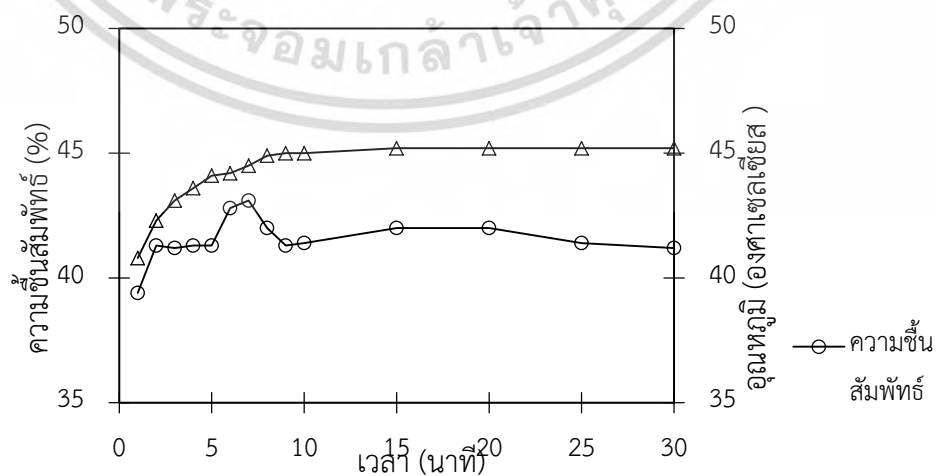
อากาศเริ่มต้นก่อนไหลเข้าหอดูดความชื้นมีอุณหภูมิเป็น 28.1 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75.6% เมื่ออากาศไหลออกจากหอดูดความชื้นพบว่า มีความชื้นสัมพัทธ์ลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำที่สุดเป็น 32.6% ในขณะที่เดียวกันพบว่าค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากหอดูดความชื้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนมีอุณหภูมิ 38.9 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ลดลงกับค่าอุณหภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้นเป็นไปตามกระบวนการอะเดียเบติก ซึ่งสามารถลดอัตราส่วนความชื้นได้ 3.937 กรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.5 บนแผนภูมิไซโครเมตริก

3) ผลการทดสอบความสามารถในการคายความชื้นของหอดูดความชื้น

ทำการทดสอบที่อัตราการไหลของอากาศ 0.02 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าหอดูดความชื้นเป็น 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส ผ่านหอดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที บันทึกค่าอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ที่ออกจากหอดูดความชื้นทุก 1 นาที จนถึงนาทีที่ 10 หลังจากนั้นบันทึกค่าทุก 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30

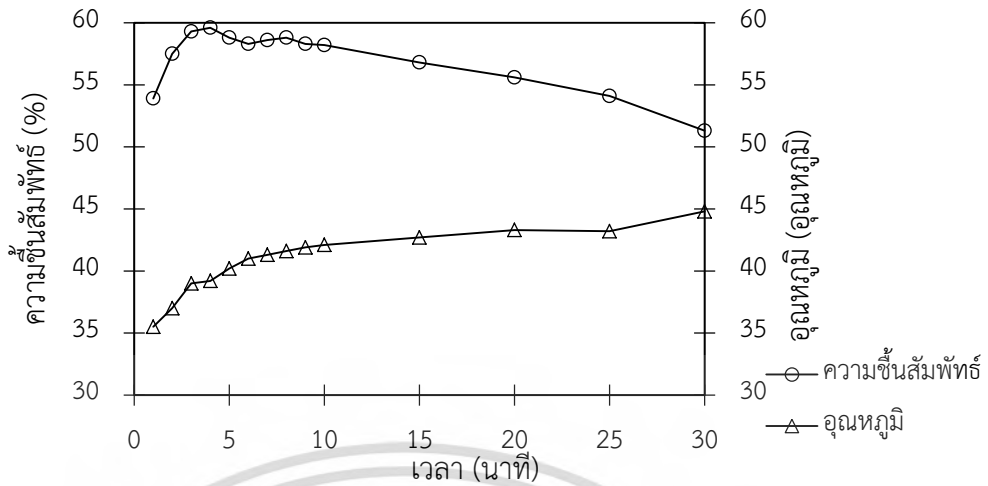


ภาพที่ 4.6 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



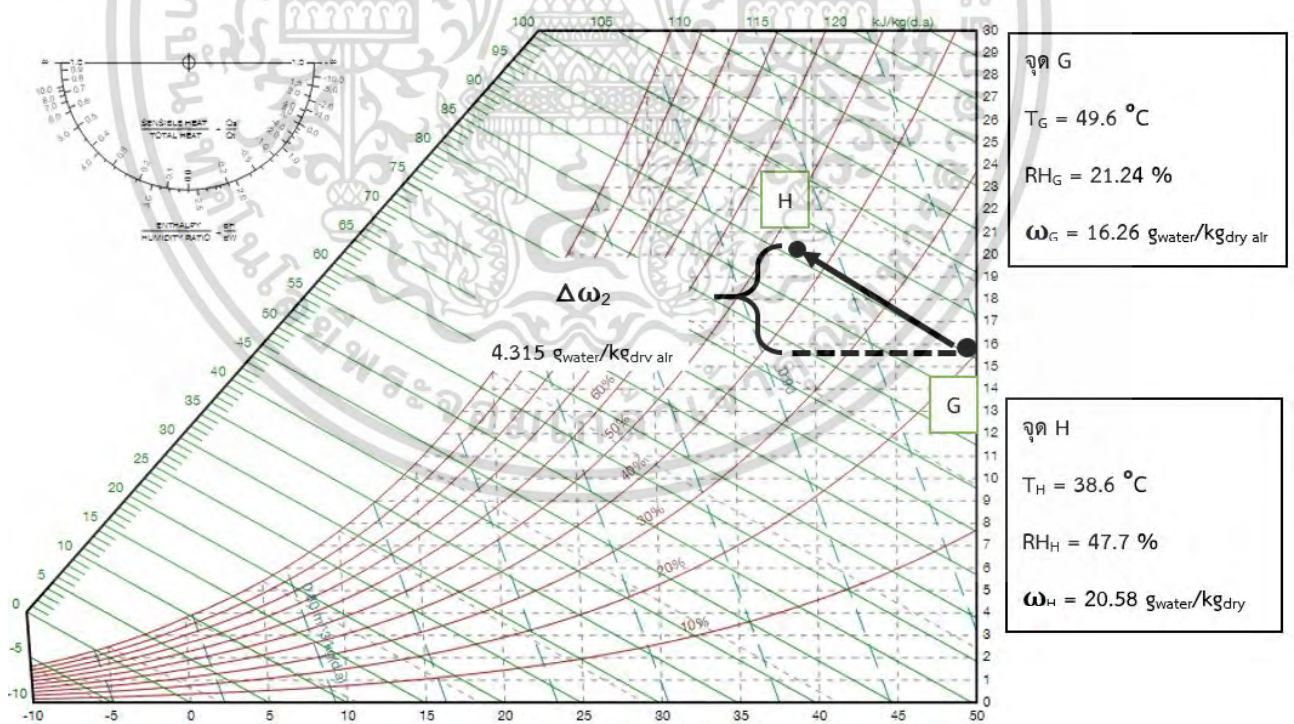
ภาพที่ 4.7 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



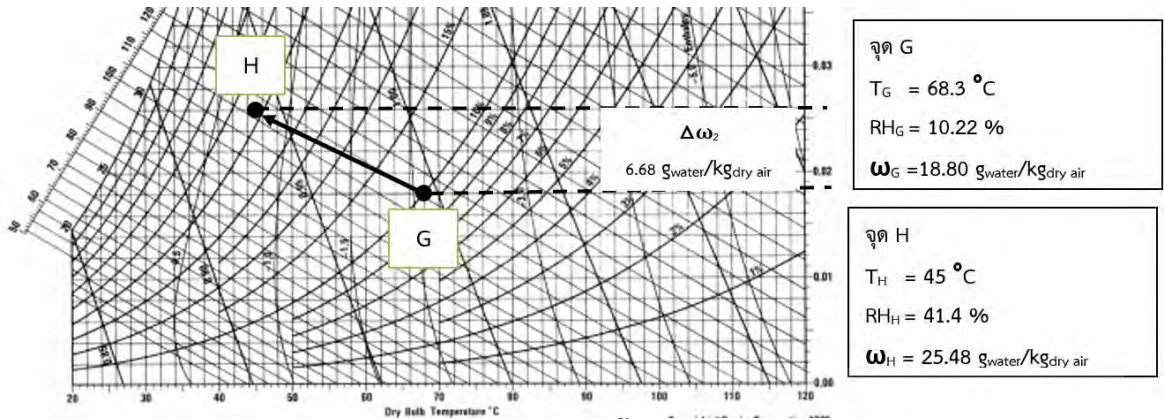
ภาพที่ 4.8 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4.6 ถึง 4.8 แสดงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศในกระบวนการคายความชื้นที่ทางออกจากหอดูดความชื้น เมื่ออากาศไหลเข้าหอดูดความชื้นมีอุณหภูมิเป็น 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าในช่วง 5 นาทีแรกความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากหอดูดความชื้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และหลังจากนั้นค่อย ๆ ลดลงตามระยะเวลา การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่วง 5 นาทีแรกแสดงให้เห็นว่าอากาศร้อนสามารถกำจัดความชื้นออกจากหอดูดความชื้นได้อย่างชัดเจน



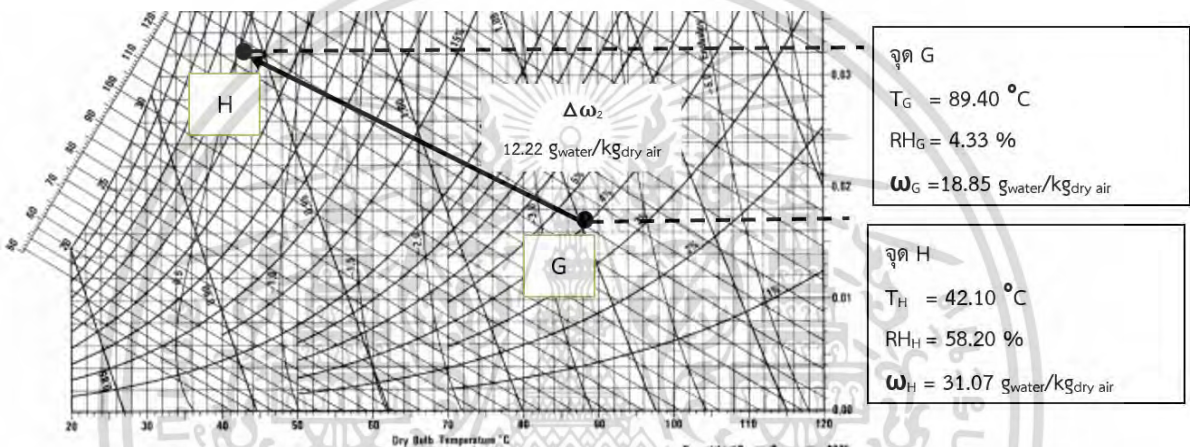
ภาพที่ 4.9 แผนภูมิไซโครเมตริกปริมาณการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสในเวลาที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 แผนภูมิไซโครเมตริกปริมาณการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสในนาที่ที่

10



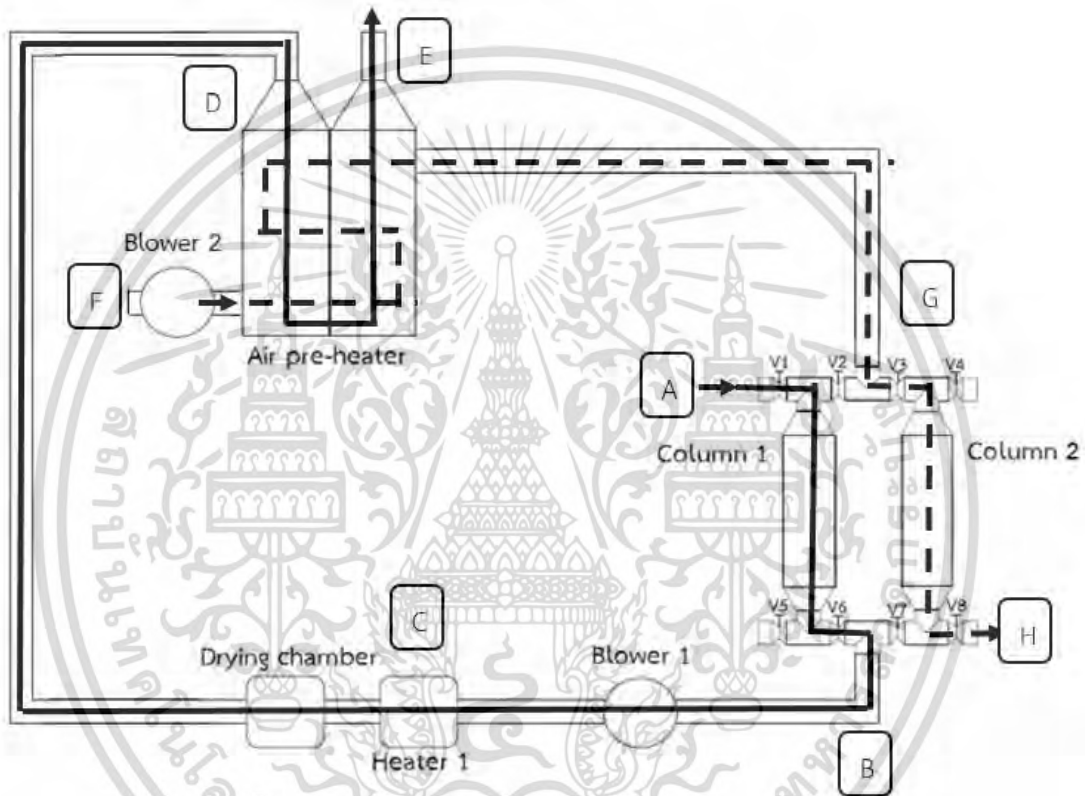
ภาพที่ 4.11 แผนภูมิไซโครเมตริกปริมาณการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสในนาที่ที่ 10

จากภาพที่ 4.9 ถึง 4.11 เป็นกระบวนการคายความชื้นออกจากซิลิกาเจลซึ่งเป็นกระบวนการเดียวกันกับการอบแห้ง ซึ่งพบว่าเมื่อใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส กำจัดความชื้นออกจากซิลิกาเจล มีผลต่างของอัตราส่วนความชื้นเป็น 4.32, 6.58 และ 12.22 กรัมต่อกิโลกรัม อากาศ แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถกำจัดความชื้นออกจากซิลิกาเจลได้มากยิ่งขึ้นด้วย

4) ผลการทดสอบประสิทธิภาพรวมทั้งระบบ

ทำการทดสอบที่อัตราการไหลของอากาศในระบบเป็น 0.02 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อุณหภูมิที่ห้องอบแห้งเป็น 120 องศาเซลเซียส บันทึกค่าอุณหภูมิของอากาศที่จุด A, B, C, D, E, F, G และ H ของระบบ (ภาพที่ 4.11) ตารางที่ 4.3 แสดงค่าอุณหภูมิของอากาศที่จุดต่าง ๆ จากการทดสอบระบบเป็นเวลา 60 นาที ค่าอุณหภูมิของอากาศที่จุดต่าง ๆ ค่อนข้างคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นสามารถทำงานได้อย่างสม่ำเสมอ เริ่มต้นอากาศที่จุด A มีอุณหภูมิเป็น 29.4 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เป็น 69.00 % ไหลผ่านหอดูดความชื้นห่อที่ 1 เพื่อลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อากาศหล่นผ่านหอดูดความชื้น (จุด B) มีอุณหภูมิเป็น 35.5 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์เป็น 42.36 % อากาศไหลผ่านอุปกรณ์ทำอากาศร้อน (จุด C) มีอุณหภูมิเป็น 120.0 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้สำหรับการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อบแห้งตัวอย่าง ในขณะที่เดียวกันอากาศที่จุด F มีอุณหภูมิเป็น 29.4 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เป็น 69.00 % ไหลผ่านอุปกรณ์อุ่นอากาศ (จุด G) มีอุณหภูมิเป็น 53.5 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เป็น 19.31 % หลังจากนั้นอากาศไหลผ่านหอดูดความชื้นห่อที่ 2 เพื่อกำจัดความชื้นจากซิลิกาเจล อากาศไหลออกจากหอดูดความชื้นห่อที่ 2 (จุด H) มีอุณหภูมิเป็น 38.0 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เป็น 50.80 % จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของอัตราส่วนความชื้นของการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ($\Delta\omega_1$) และของการคายความชื้นของซิลิกาเจล ($\Delta\omega_2$) พบว่า $\Delta\omega_2 \geq \Delta\omega_1$ แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถลดปริมาณความชื้นในอากาศลงได้ และระบบสามารถกำจัดความชื้นออกจากซิลิกาเจลได้



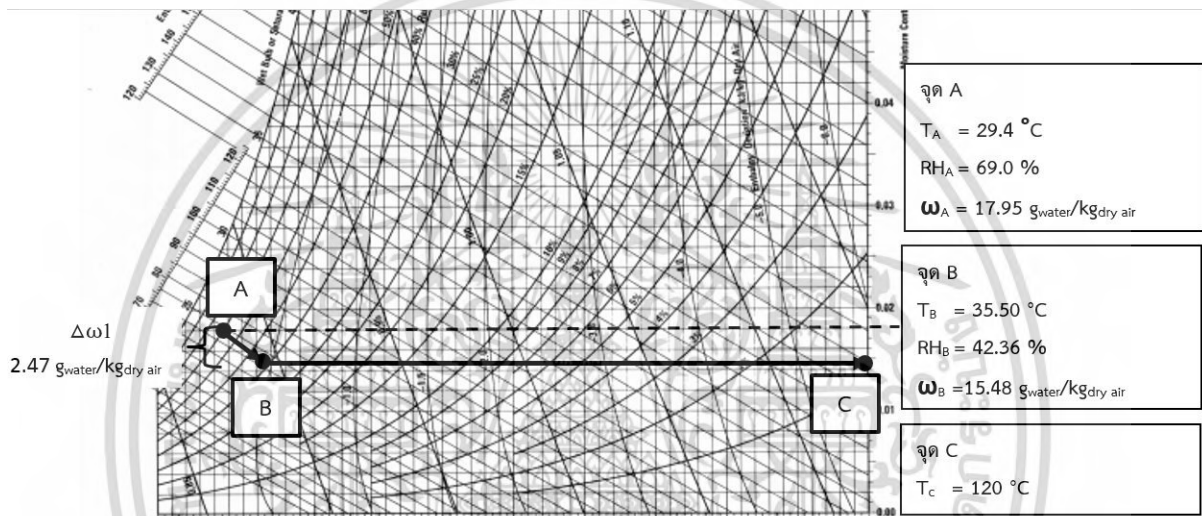
ภาพที่ 4.12 ส่วนประกอบหลักของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลค่าอุณหภูมิของอากาศที่จุด A, B, C, D, E, F, G และ H ของระบบ

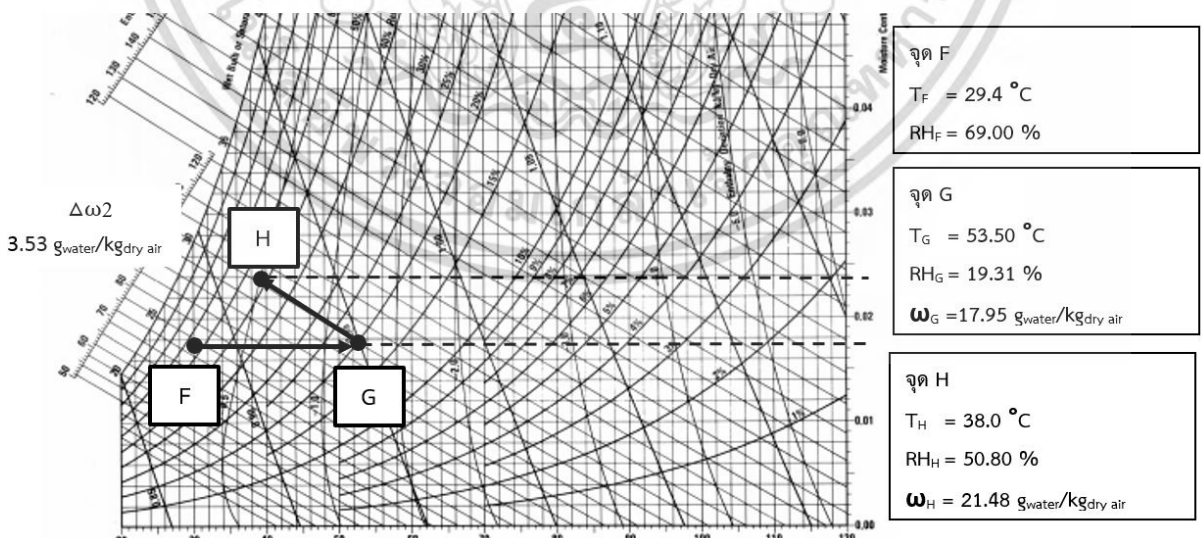
เวลา (min)	จุด A		จุด B	จุด C	จุด D	จุด E	จุด F	จุด G	จุด H	
	°C	RH%	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	RH%
5	28.0	82.0	36.7	122.5	90.0	37.5	37.5	55.4	36.7	53.1
10	29.1	72.8	35.4	122.9	90.5	38.1	38.1	54.5	38.8	49.8
15	30.1	66.8	36.3	119.5	89.1	38.4	38.4	54.0	37.1	52.5
20	29.1	71.2	35.5	122.0	89.5	38.4	38.4	53.8	38.3	50.4
25	30.5	65.1	36.2	122.0	89.6	38.4	38.4	53.6	37.1	53.2
30	29.4	69.0	35.5	124.5	89.9	38.3	38.3	53.5	38.0	50.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

35	29.6	68.9	36.0	120.2	89.4	38.4	38.4	53.4	37.2	53.6
40	29.4	68.3	35.5	124.0	89.9	38.2	38.2	53.0	38.0	51.2
45	28.3	72.5	35.8	120.5	88.7	38.2	38.2	52.9	37.1	53.8
50	29.7	67.4	35.5	123.2	89.6	38.1	38.1	52.9	37.8	51.4
55	29.0	69.0	35.8	121.9	89.1	38.1	38.1	52.8	36.7	53.8
60	30.8	66.6	35.6	118.5	89.0	38.1	38.1	52.7	37.0	53.2
เฉลี่ย	29.4	70.0	35.8	121.8	89.5	38.2	38.2	53.5	37.5	52.2



ภาพที่ 4.13 สภาวะอากาศที่ผ่านหอดูดความชื้นและผ่านอุปกรณ์ทำอากาศร้อนเป็น 120 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.14 สภาวะอากาศที่ผ่านอุปกรณ์อุ่นอากาศและอากาศหลังกำจัดความชื้นออกจากซิลิกาเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้วงล้อดูดความชื้น

4.2.1 การออกแบบวงล้อดูดความชื้นและเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

4.2.1.1 ผลปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศหนึ่ง

จากการกำหนดให้ความเร็วที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเป็น 1 m/s และพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งเป็น $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ จะได้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่อกำหนดให้อากาศโดยรอบเข้าสู่สารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 32°C และความชื้นสัมพัทธ์ 75% และอากาศที่ออกจากสารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 40°C และความชื้นสัมพัทธ์ 40% สามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเป็น $158.24 \text{ kg dry air/h}$ และอัตราส่วนความชื้นในอากาศลดลงไป $0.004 \text{ kg water/kg dry air}$ ดังภาพที่ 4.15 จากสองค่านี้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นในอากาศที่ลดลงต่อหน่วยเวลาเป็น 0.63 kg water/h จากข้อมูลอัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลที่สภาพอากาศหนึ่งในภาพที่ 4.15 สามารถคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่เพียงพอต่อการลดความชื้นออกจากอากาศตามที่คำนวณไว้ข้างต้นได้ โดยได้ผลเป็นปริมาณซิลิกาเจลที่ต้องการ 6.3 kg

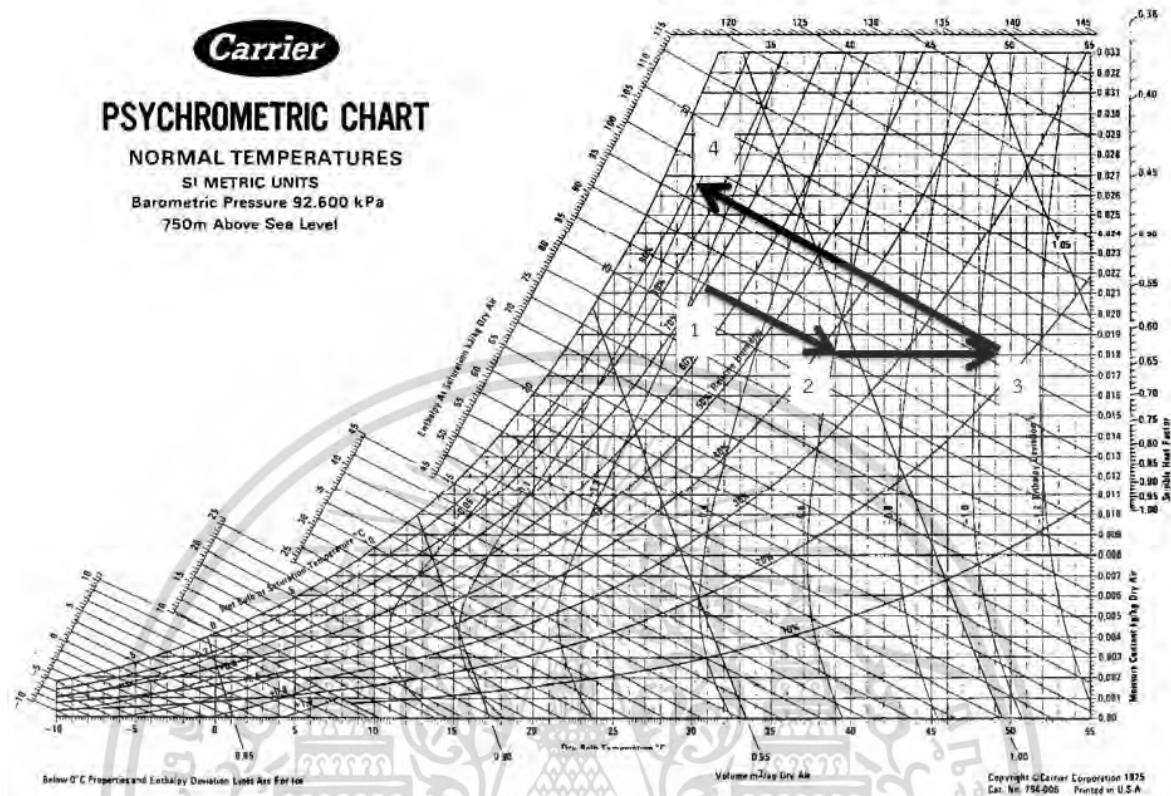
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบอบแห้ง

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ	ผลการคำนวณ
1. ความเร็วลม ^a	1 m/s
2. พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง ^a	$0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$
3. อัตราการไหลของอากาศ ^b	$0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ซึ่งเท่ากับ $144 \text{ m}^3/\text{h}$
4. อุณหภูมิของอากาศขาเข้า ^a	32°C
5. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้า ^a	75%
6. อุณหภูมิของอากาศขาออก ^a	40°C
7. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก ^a	40%
8. ปริมาตรจำเพาะของอากาศ ^c	$0.019 \text{ kg water/kg dry air}$
9. น้ำหนักของซิลิกาเจล ^b	6.3 kg

a คือ ค่าที่กำหนดขึ้น

b คือ ค่าที่คำนวณได้

c คือ ค่าจากแผนภูมิไซโครเมตริก



ภาพที่ 4.15 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสมบัติของอากาศนิ่งจากการจำลองการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น

- 1-2 คือ กระบวนการลดความชื้น
- 2-3 คือ กระบวนการทำความร้อน
- 3-4 คือ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

4.2.1.2 ผลการปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศไหล

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบอบแห้งเมื่ออากาศไหลอยู่รอบซิลิกาเจล โดยกำหนดให้ความเร็วที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเป็น 1.85 m/s และพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งเป็น $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ จะได้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่อกำหนดให้อากาศโดยรอบเข้าสู่สารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 30.7°C และความชื้นสัมพัทธ์ 65.6% และอากาศที่ออกจากสารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 40°C และความชื้นสัมพัทธ์ 30% สามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเป็น $158.24 \text{ kg dry air/h}$ และอัตราส่วนความชื้นในอากาศลดลงไป $0.0043 \text{ kg water/kg dry air}$ ดังภาพที่ 4.16 จากสองค่านี้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นในอากาศที่ลดลงต่อหน่วยเวลาที่เป็น 0.682 kg water/h จากข้อมูลตาราง 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล (kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

water) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา (h) เราสามารถคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ใช้สำหรับวงล้อดูดความชื้นโดยการนำค่าปริมาณน้ำในอากาศที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจลต่อเวลา 1 ชั่วโมง ($\Delta W/h$) มาเทียบบัญญัติไตรยางค์กับอัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลที่สภาพอากาศไหลเมื่อเทียบกับซิลิกาเจล 1 kg สามารถคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่เพียงพอต่อการลดความชื้นออกจากอากาศตามี่คำนวณไว้ข้างต้นได้ โดยได้ผลเป็นปริมาณซิลิกาเจลที่ต้องการ 8.97 kg

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้ง

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ	ผลการคำนวณ
1. ความเร็วลม ^a	1.85 m/s
2. พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง ^a	0.2×0.2 m ²
3. อัตราการไหลของอากาศ ^b	0.04 m ³ /s ซึ่งเท่ากับ 144 m ³ /h
4. อุณหภูมิของอากาศขาเข้า ^a	30.7 °C
5. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้า ^a	65.6%
6. อุณหภูมิของอากาศขาออก ^a	40 °C
7. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก ^a	30%
8. ปริมาตรจำเพาะของอากาศ ^c	0.0140 kg water/kg dry air
9. อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ^b	0.0043 kg water/kg dry air
10. น้ำหนักของซิลิกาเจล ^b	8.97 Kg

a คือ ค่าที่กำหนดขึ้น

b คือ ค่าที่คำนวณได้

c คือ ค่าจากแผนภูมิไซโครเมตริก

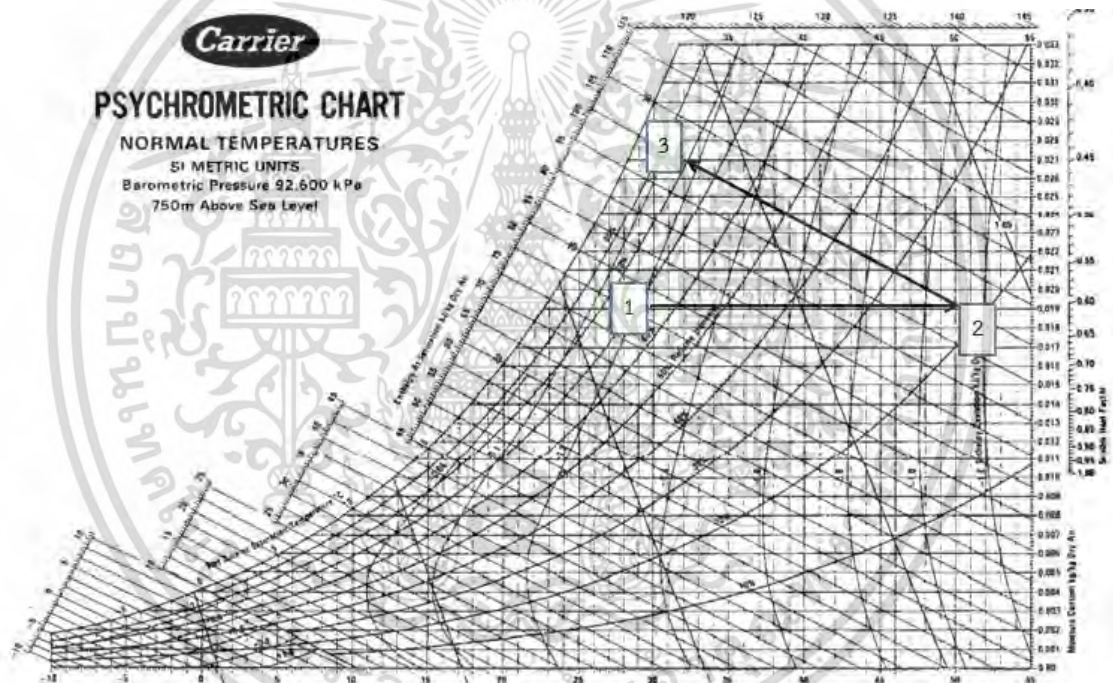
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล(kg water)ต่อหนึ่งหน่วยเวลา(h)

Q (m ³ /s)	ค่าเฉลี่ยอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลที่อากาศไหล(kg water/kg silica gel·h)
0.04	0.076
0.06	0.105
0.08	0.175

4.2.1.3 ผลการคำนวณอัตราการไหลของอากาศเพื่อคายความชื้นจากซิลิกาเจล

จากการกำหนดให้ความเร็วที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเป็น 1.85 m/s และพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งเป็น 0.2×0.2 m² โดยกำหนดอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.04 m³/s เมื่อกำหนดให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศโดยรอบเข้าสู่สารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 30.7°C และความชื้นสัมพัทธ์ 65.6% อากาศที่ออกจากสารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 80% สามารถคำนวณอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อากาศไหลในเวลา 1 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 0.07 kg water/h และอัตราส่วนความชื้นในอากาศลดลงไป 0.02205 kg water/ kg dry air จากแผนภูมิไซโครเมตริกดังภาพที่ 4.16 ดังนั้นจากการจำลองการคายความชื้นของซิลิกาเจลกำหนดให้ซิลิกาเจลดูดซับความชื้นเท่ากับ 30% ของน้ำหนักตัวเองจะได้อัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่ากับ 0.0008 m³/s ซึ่งค่าอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราการไหลจากกราฟที่กำหนดไว้ในข้างต้นคือ 0.006 kg water/kg silica gel·h ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และ อัตราการไหล 0.04 m³/s (kg water/kg silica gel·h) ดังข้อมูลตารางที่ 4.5 จึงสามารถกล่าวได้ว่าที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.0008 m³/s สามารถดูดความชื้นออกจากซิลิกาเจลได้หมดในการจำลองการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น



ภาพที่ 4.16 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสมบัติของอากาศไหลจากการจำลองการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้น

1-2 คือ กระบวนการทำความร้อน

3-4 คือ กระบวนการคายความชื้นจากซิลิกาเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศเพื่อคายความชื้นของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้ง

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ	ผลการคำนวณ
1. ความเร็วลม ^a	1.85 m/s
2. พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง ^a	0.2×0.2 m ²
3. อัตราการไหลของอากาศ ^b	0.04 m ³ /s ซึ่งเท่ากับ 144 m ³ /h
4. อุณหภูมิของอากาศขาเข้า ^a	30.7 °C
5. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้า ^a	65.6%
6. อุณหภูมิของอากาศขาออก ^a	35 °C
7. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก ^a	80%
8. ปริมาตรจำเพาะของอากาศ ^c	0.00687kg water/kg dry air
9. อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลง ^b	0.02205 kg water/kg dry air
10. อัตราการไหลของอากาศ ^b	0.0008 m ³ /s

a คือ ค่าที่กำหนดขึ้น

b คือ ค่าที่คำนวณได้

c คือ ค่าจากแผนภูมิไซโครเมตริก

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล(kg water)ต่อหนึ่งหน่วยเวลา(h)

อุณหภูมิ (°C)	Q (m ³ /s)	ค่าเฉลี่ยอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อากาศไหล (kg water/kg silica gel·h)
40	0.04	0.006
	0.06	0.023
	0.08	0.029
70	0.04	0.007
	0.06	0.053
	0.08	0.080
90	0.04	0.012
	0.06	0.077
	0.08	0.133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.4 ผลการคำนวณขนาดของวงล้อดูดความชื้น

จากการจำลองการดูดความชื้นของซิลิกาเจลเพื่อคำนวณน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ใช้ในระบบที่ใช้ในอากาศไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ซึ่งเป็นอัตราการไหลของอากาศที่มีอัตราการดูดความชื้นต่ำที่สุดและสอดคล้องกับความเร็วลม 1 m/s ที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนตามปกติโดยเลือกใช้ชั้นความหนาของซิลิกาเจล 1 cm ซึ่งเป็นชั้นความหนาที่อัตราการดูดความชื้นสูงสุดเมื่อเทียบกับชั้นความหนาในระดับอื่นๆ พบว่าน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ต้องการคือ 2.01 kg ทั้งนี้ในการกำหนดน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ต้องใช้จริงในระบบตั้งเกณฑ์ให้ใช้ซิลิกาเจล 1.5 เท่าของน้ำหนักที่คำนวณได้ จึงใช้ซิลิกาเจล 3 kg สำหรับใส่ในวงล้อดูดความชื้น จากการคำนวณความหนาแน่นและปริมาตรของซิลิกาเจลได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงล้อดูดความชื้นเป็น 70 cm ดังภาพที่ 4.17



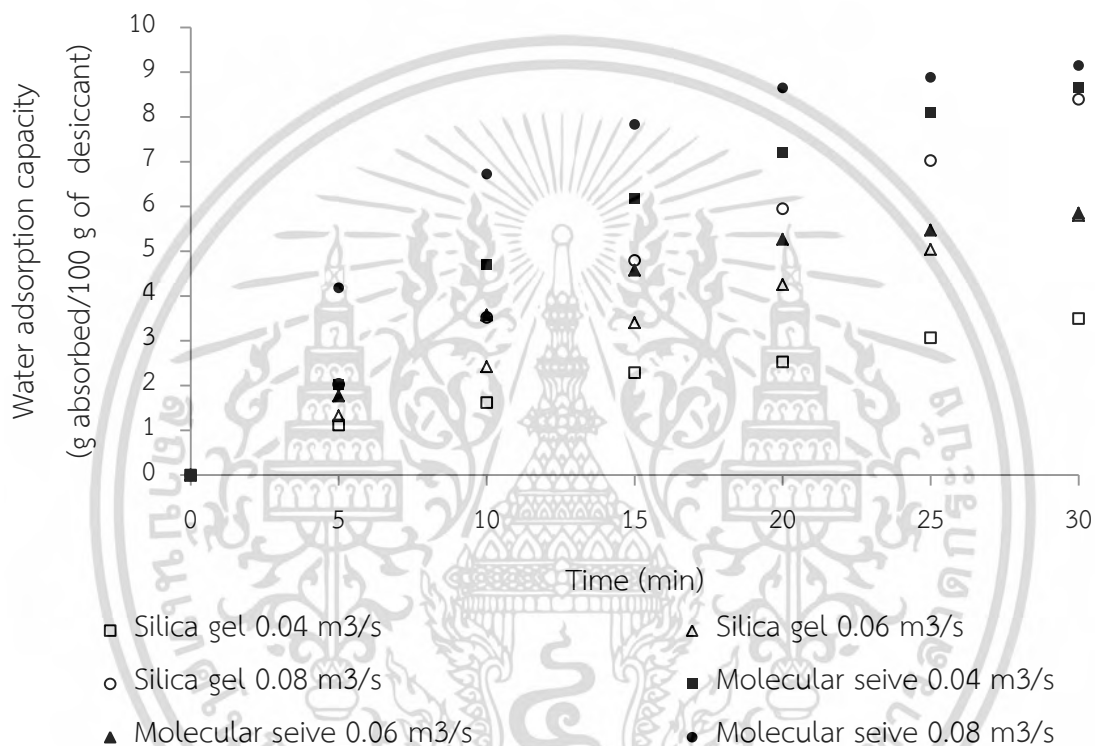
ภาพที่ 4.17 วงล้อดูดความชื้น

4.2.2 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.1 การดูดความชื้น

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟดังภาพที่ 4.18 ได้ผลว่า ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ในขณะที่โมเลกุลลาร์ซีฟจะดูดความชื้นได้ค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที อย่างไรก็ตามโมเลกุลลาร์ซีฟมีความสามารถในการดูดความชื้นสูงกว่าซิลิกาเจล เมื่อทำการเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของอากาศ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ โมเลกุลลาร์ซีฟจะสามารถดูดความชื้นได้ดีกว่าซิลิกาเจลในทุกสภาวะ



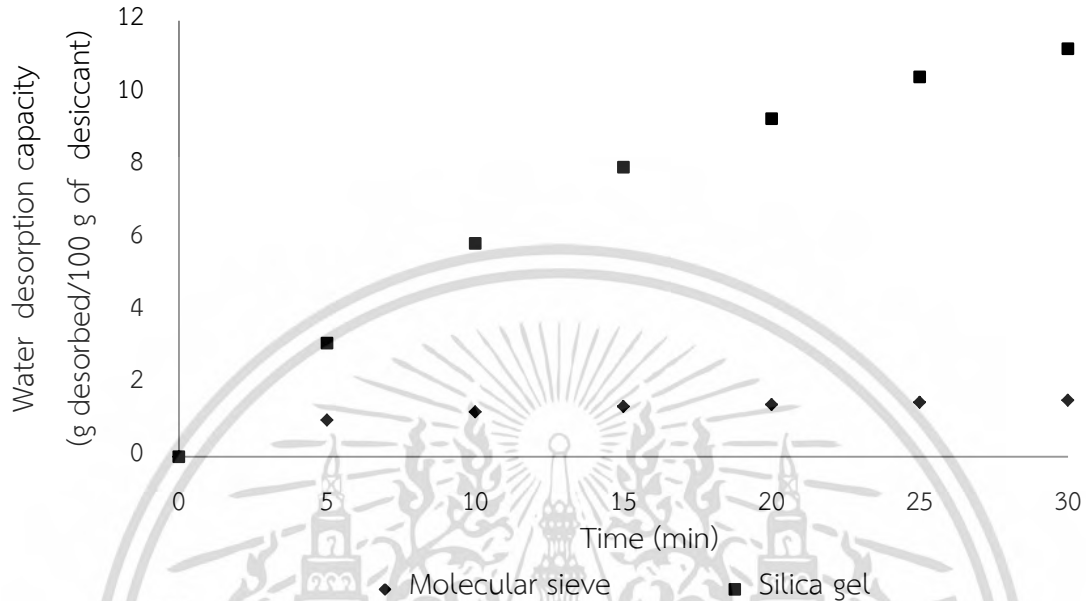
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ

4.2.2.2 การคายความชื้น

จากการทดลองการคายความชื้นของซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ พบว่าซิลิกาเจลมีความสามารถคายความชื้นได้ดีกว่าโมเลกุลลาร์ซีฟถึงเกือบ 12 เท่า เมื่อเวลาในการคายความชื้นผ่านไป 30 นาที จากภาพที่ 4.19 ซึ่งใช้อุณหภูมิ 90°C ในการคายความชื้นพบว่า ซิลิกาเจลยังมีแนวโน้มคายความชื้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่โมเลกุลลาร์ซีฟสามารถคายความชื้นได้เพียง $1 \text{ g}/100 \text{ g}$ of desiccant ในช่วง 5 นาทีแรก และค่อนข้างมีความจุความชื้นคงที่ในช่วงเวลาต่อไปจนถึง 30 นาทีของการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการจำลองอุณหภูมิที่อาจเกิดขึ้นจริงในการนำอากาศทิ้งจากห้องอบแห้งมาแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

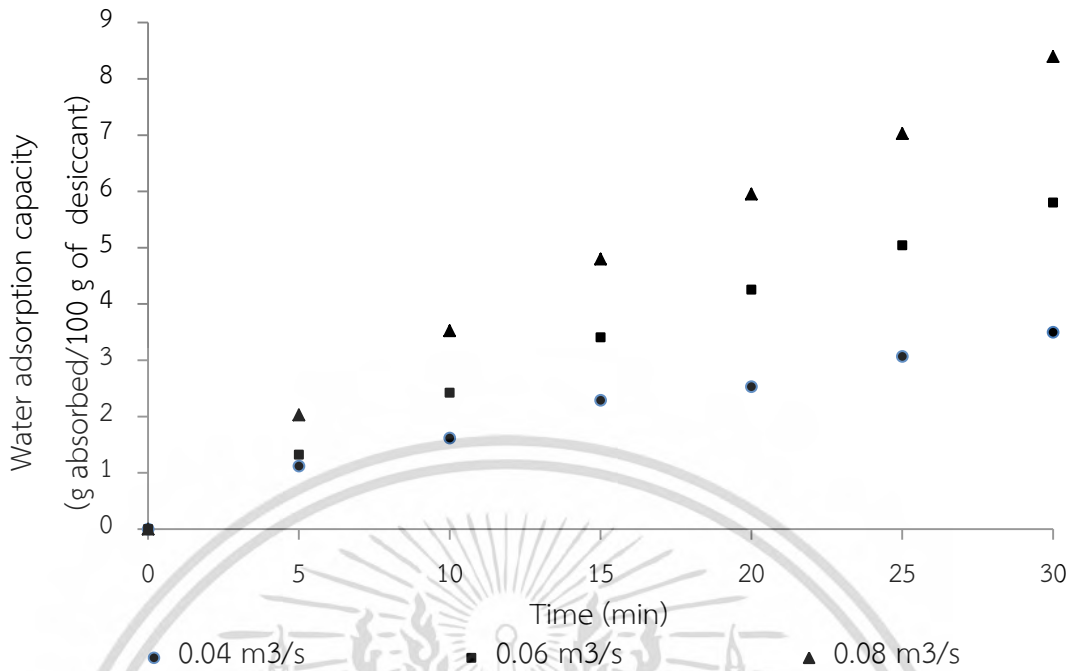
โดยรอบ เพื่อใช้ในการคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้นนั้น ซิลิกาเจลถือเป็นสารดูดความชื้นที่เหมาะสมกับระบบนี้มากกว่า เนื่องจากสามารถคายความชื้นที่สภาวะอากาศนี้ได้ดีกว่า



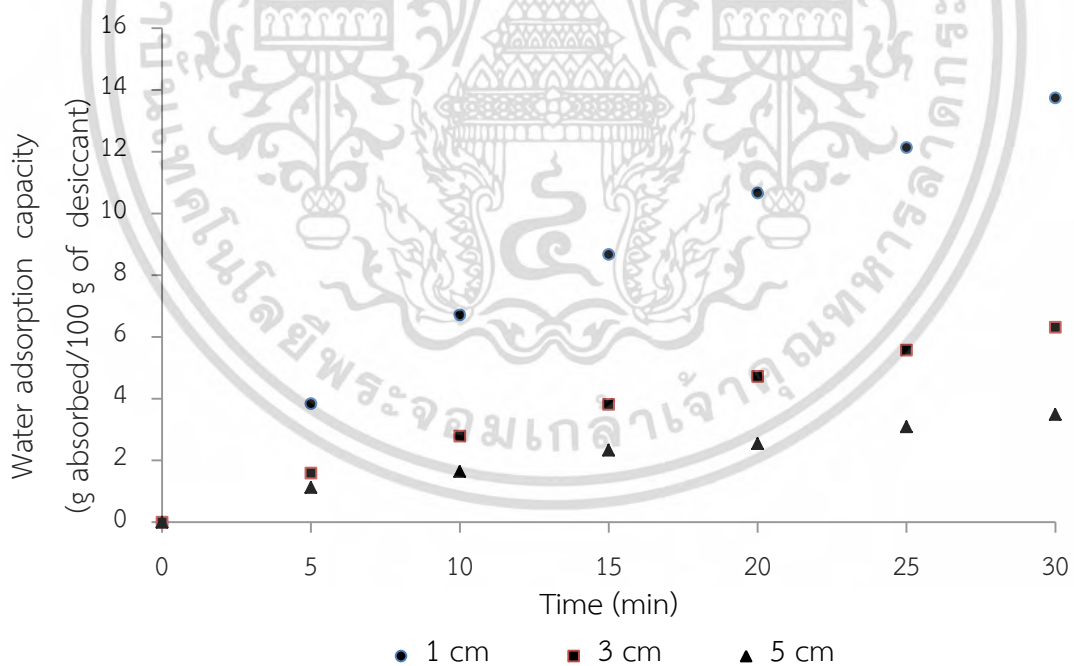
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการคายความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลาร์ซีฟ

4.2.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศดังภาพที่ 4.20 โดยทำการเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของอากาศ 0.04, 0.06 และ 0.08 m^3/s จะเห็นได้ว่าซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้ดีที่สุดที่อัตราการไหลของอากาศที่ 0.08 m^3/s ขณะที่ความหนาของชั้นสารดูดความชื้นก็มีอิทธิพลต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจลเช่นกันดังภาพ 4.21 โดยเมื่อความหนาของชั้นดูดความชื้นที่ต่ำลง ซิลิกาเจลจะมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดีขึ้น จากความหนาของชั้นดูดความชื้น 3 ระดับ ได้แก่ 1, 3 และ 5 cm จึงพบว่าความหนาของชั้นดูดความชื้นที่ทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นของซิลิกาเจลสูงสุด คือ 1 cm จากภาพที่ 4.21 เห็นได้ชัดว่าเมื่อเวลาผ่านไป การใช้ความหนาของชั้นดูดความชื้น 1 cm สามารถดูดความชื้นออกจากอากาศได้ประมาณ 2.2 และ 4.3 เท่าเมื่อเทียบกับความหนาของชั้นดูดความชื้น 3 cm และ 5 cm ตามลำดับ



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล

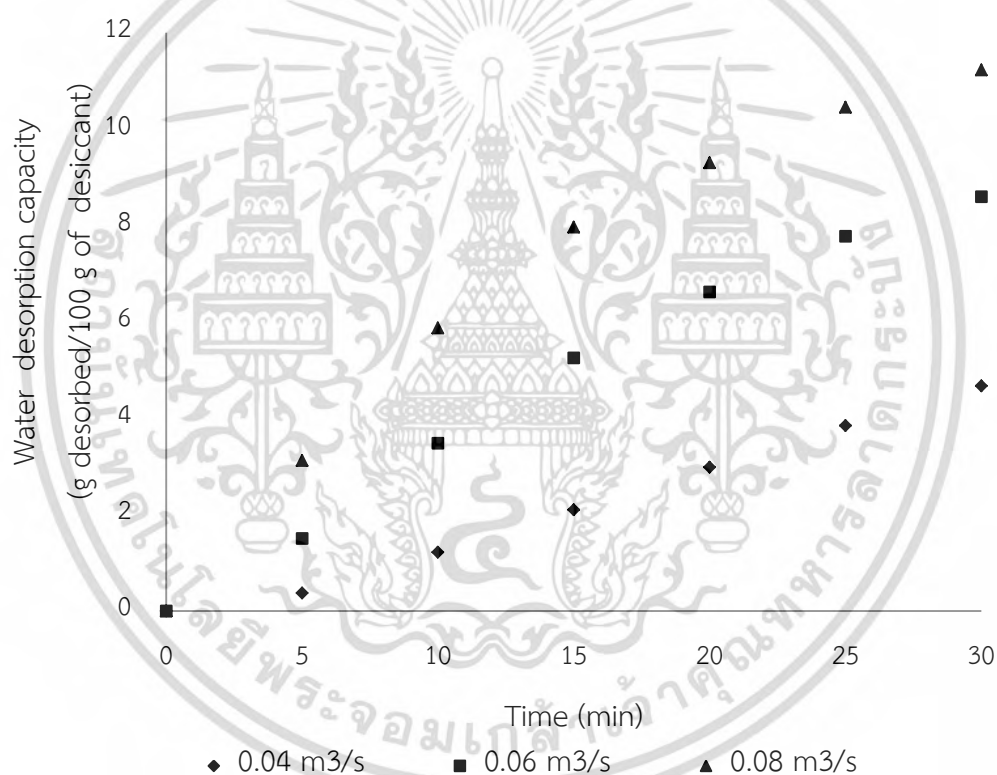


ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารดูดความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล

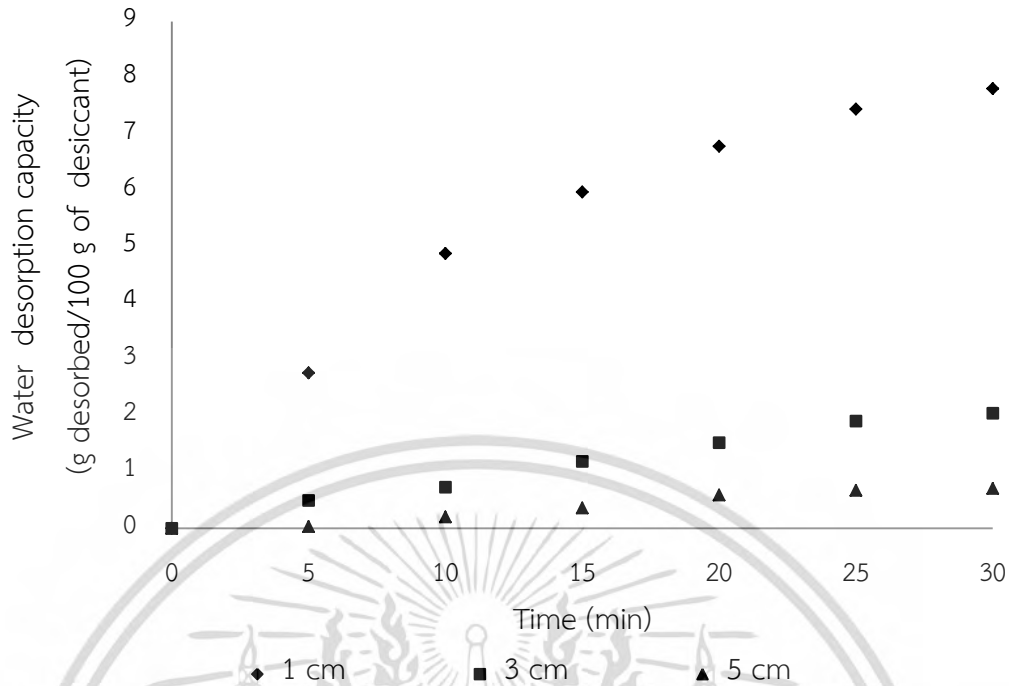
4.2.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิลมร้อน และความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกาเจลสามารถคายความชื้นได้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศดังภาพที่ 4.22 โดยทำการเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของอากาศ 0.04, 0.06 และ 0.08 m^3/s จะเห็นว่าซิลิกาเจลสามารถคายความชื้นได้ดีที่สุดที่อัตราการไหลของอากาศที่ 0.08 m^3/s ขณะที่ความหนาของชั้นสารดูดความชื้นก็มีอิทธิพลต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจลเช่นกันดังภาพ 4.7 โดยเมื่อความหนาของชั้นดูดความชื้นที่ต่ำลง ซิลิกาเจลจะมีความสามารถในการคายความชื้นได้ดีขึ้น จากความหนาของชั้นดูดความชื้น 3 ระดับ ได้แก่ 1, 3 และ 5 cm จึงพบว่าความหนาของชั้นดูดความชื้นที่ทำให้ความสามารถในการคายความชื้นของซิลิกาเจลสูงสุด คือ 1 cm จากภาพที่ 4.23 เห็นได้ชัดว่าเมื่อเวลาผ่านไปการใช้ความหนาของชั้นดูดความชื้น 1 cm สามารถดูดความชื้นออกจากอากาศได้ประมาณ 4 และ 8 เท่าเมื่อเทียบกับความหนาของชั้นดูดความชื้น 3 cm และ 5 cm ตามลำดับ



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ของซิลิกาเจล



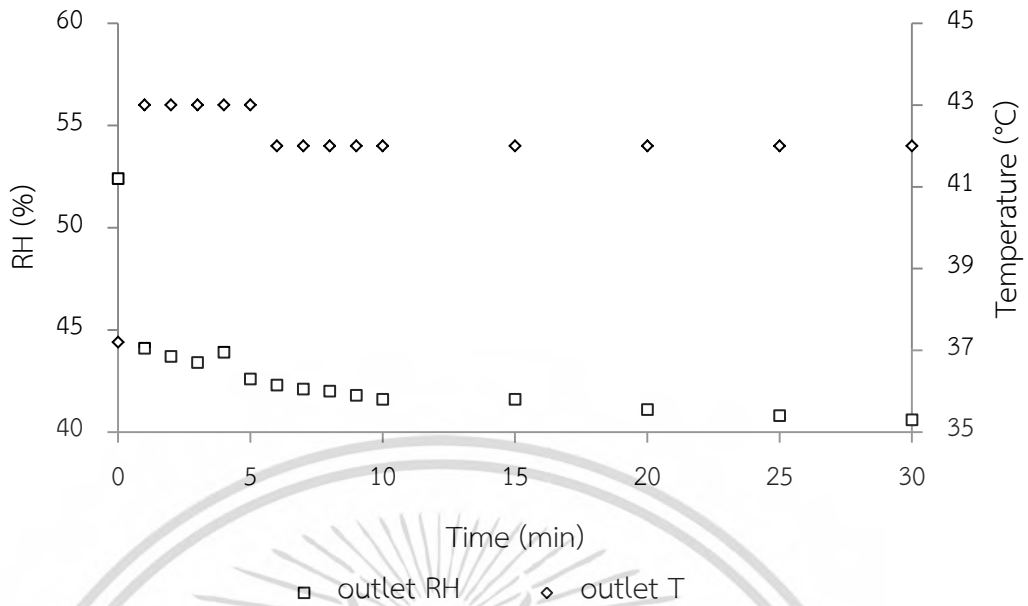
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารดูดความชื้นและเวลาในการคายความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล

4.2.5 การศึกษาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้น

4.2.5.1 การดูดความชื้น

จากภาพที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่อัตราการไหลของอากาศ คือ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการดูดความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 52.4% เมื่ออากาศถูกไหลผ่านวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถลดลงประมาณ 8% ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เวลา 30 นาทีของการทำงานของวงล้อเป็น 40.6% ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าระบบวงล้อดูดความชื้นที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงถึงประมาณ 12% สำหรับผลการวัดอุณหภูมิอากาศออกจากวงล้อดูดความชื้นของอากาศ พบว่าอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นจาก 37.2°C ไปเป็น 43°C ในนาทีที่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการการทำงานของวงล้อดูดความชื้น จากนั้นอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง $42-43^\circ\text{C}$ ตลอดการทำงานของวงล้อ ซึ่งเราสามารถคำนวณหาสมรรถนะของระบบวงล้อได้จากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านวงล้อดูดความชื้นแล้ว โดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านวงล้อดูดความชื้นจะลดลง 22.52% ซึ่งสามารถคำนวณหาสมรรถนะในการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น คือ 22.52%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



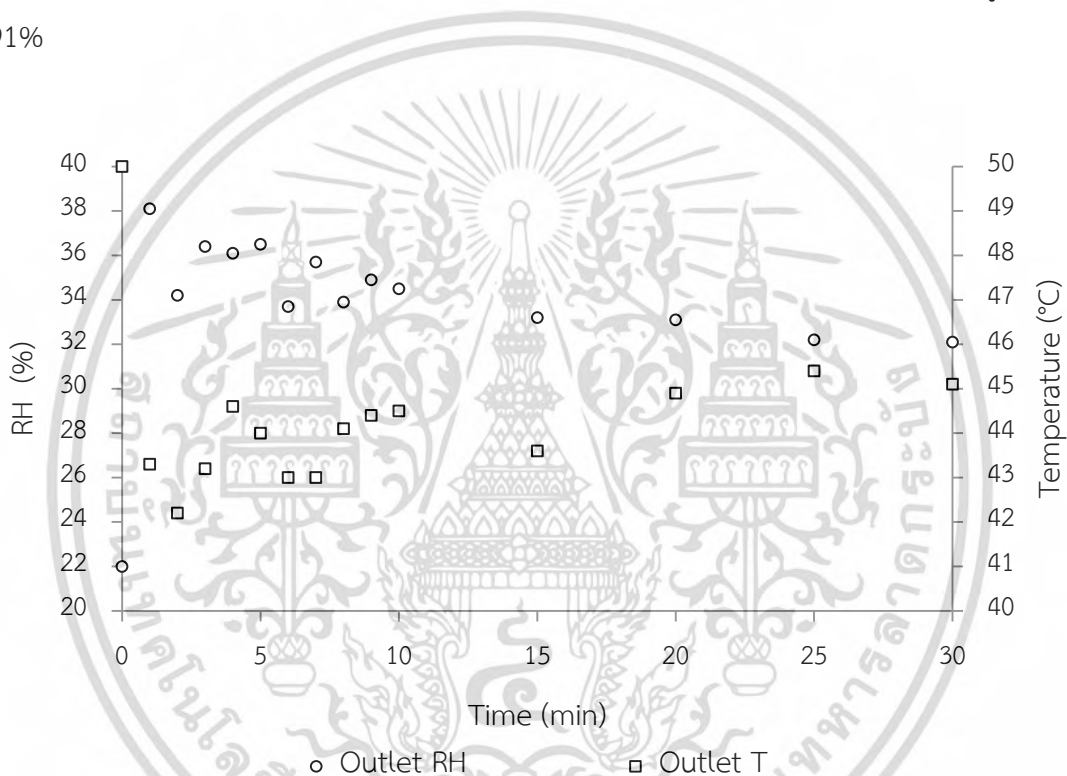
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$

4.2.5.2 การคายความชื้น

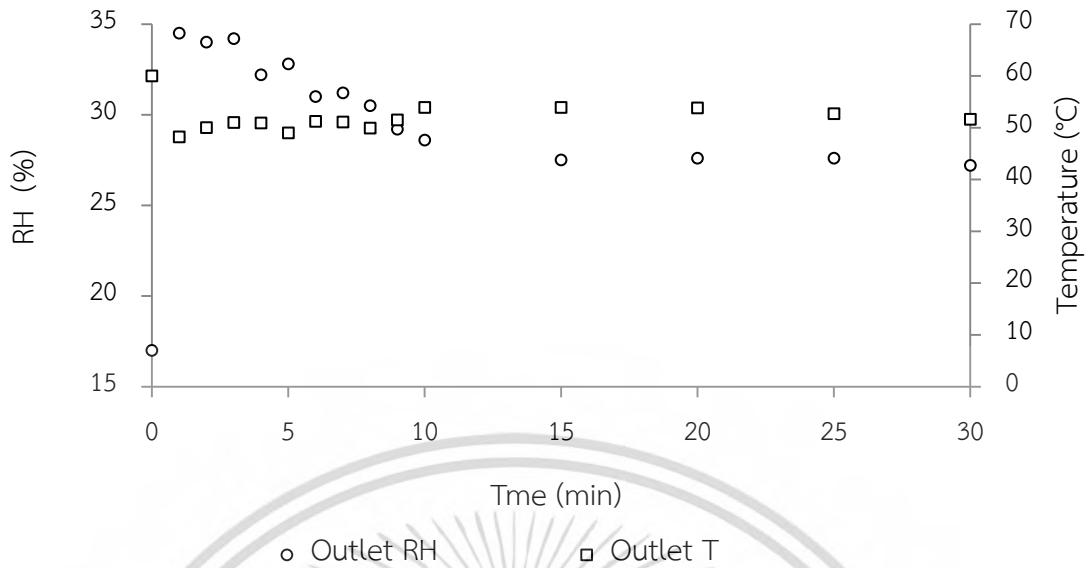
มีการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนการคายความชื้นจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 50°C และ 60°C จากภาพที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่อัตราการไหลและอุณหภูมิเดียวกัน คือ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 50°C พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่านวงล้อเพื่อคายความชื้นออกจากซิลิกาเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการคายความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 22% เมื่ออากาศถูกไหลผ่านวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 16% ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะเพิ่มอย่างสม่ำเสมอจนได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เวลา 30 นาทีของการทำงานของวงล้อเป็น 32.1% ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าวงล้อได้รับการคายความชื้นโดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 10.1% สำหรับผลการวัดอุณหภูมิขาออกจากวงล้อดูดความชื้นของอากาศ พบว่าอุณหภูมิของอากาศลดลงจาก 50°C ไปเป็น 43.5°C ในนาทีที่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการการทำงานของวงล้อดูดความชื้น จากนั้นอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง $42-46^\circ\text{C}$ ตลอดการทำงานของวงล้อ ซึ่งเราสามารถคำนวณหาสมรรถนะของระบบวงล้อได้จากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากออกจากวงล้อดูดความชื้นแล้ว โดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากออกจากวงล้อดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้น 45.91% ที่อุณหภูมิ 50°C ซึ่งสามารถคำนวณสมรรถนะในการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้นคือ 60%

จากภาพที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่อัตราการไหลและอุณหภูมิเดียวกัน คือ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 60°C พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงล้อเพื่อติดตามความชื้นออกจากซิลิกาเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการคายความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 17% เมื่ออากาศถูกไหลผ่านวงล้อติดตามความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 18% ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ เมื่อถึงนาทีที่ 30 ของการทำงานของวงล้อ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าเป็น 27.2% ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าวงล้อได้รับการติดตามความชื้น โดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 10.2% สำหรับผลการวัดอุณหภูมิขากออกจากวงล้อติดตามความชื้นของอากาศ พบว่าอุณหภูมิของอากาศลดลงจาก 60°C ไปเป็น 47°C ในนาทีที่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการการทำงานของวงล้อติดตามความชื้น โดยจากกราฟพบว่าอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง 45-52°C ของระบบ ซึ่งสามารถคำนวณสมรรถนะในการคายความชื้นของวงล้อติดตามความชื้น คือ 45.91%



ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคายความชื้นของวงล้อติดตามความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s และอุณหภูมิ 50°C



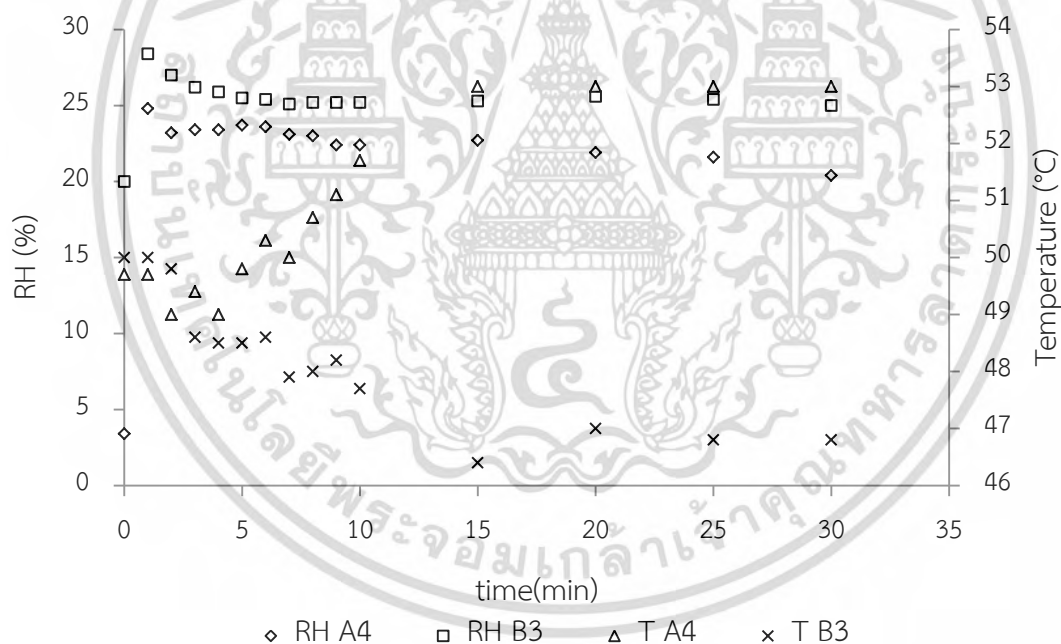
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 60°C

4.2.6 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

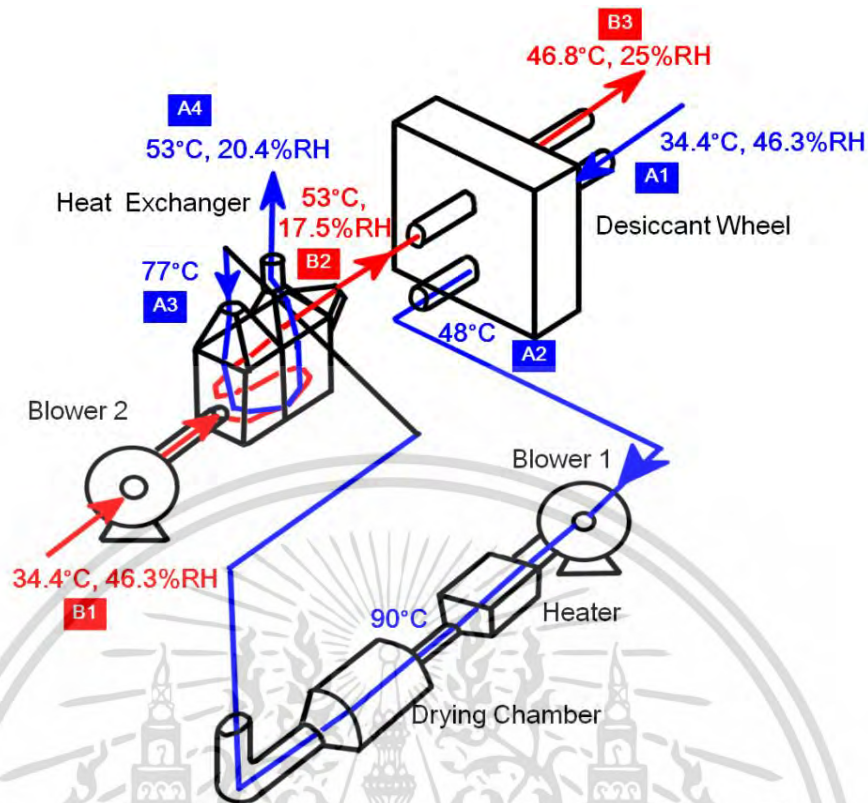
จากการศึกษาสมบัติของอากาศในการทำงานของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นทั้งระบบ โดยให้อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิของลมร้อนในเครื่องอบแห้งเป็น 90°C ซึ่งกำหนดให้จุดที่ทำการวัดผลความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของอากาศในกระบวนการลดความชื้น (Dehumidification Process) เป็นอากาศขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จุด A4 ดังภาพที่ 4.27 ส่วนในกระบวนการคายความชื้นจากวงล้อดูดความชื้น (Regeneration Process) กำหนดให้จุดที่ทำการวัดความสามารถของระบบในการคายความชื้นจากวงล้อดูดความชื้นเป็นอากาศออกจากวงล้อดูดความชื้นที่จุด B3 จากการทดลองพบว่าบรรยากาศมีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเป็น 46.3% และ 34.4°C โดยในส่วนการดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิที่เครื่องทำความร้อน 90°C เมื่อพิจารณาจากค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่จุด A4 คือ อากาศที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หลังจากกระบวนการนำอากาศร้อนขาออกจากห้องอบแห้งมาแลกเปลี่ยนกับอากาศปกติ ความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการดูดความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 46.3% เมื่ออากาศร้อนขาออกจากห้องอบแห้งมาแลกเปลี่ยนกับอากาศปกติ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถลดลงประมาณ 43.3% ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะค่อนข้างมีความจุความชื้นคงที่ในช่วงเวลาต่อไปจนถึง 30 นาทีของการทดลอง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง 20-24% ตลอดการทำงานของวงล้อ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าระบบวงล้อดูดความชื้นที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงถึงประมาณ 26% และสำหรับผลการวัดอุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หลังจากกระบวนการนำอากาศร้อนขาออกจากห้องอบแห้งมาแลกเปลี่ยนกับอากาศปกติ พบว่าอุณหภูมิของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงขึ้นจาก 34.4°C ไปเป็น 49.4°C ในนาที่ที่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการการทำงานของวงล้อดูดความชื้น จากนั้นอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง 52-53°C ตลอดการทำงานของวงล้อ ในขณะที่ส่วนคายความชื้นที่อัตราการไหลเดียวกันคือ 0.04 m³/s เมื่อพิจารณาจากค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่จุด B3 คือ อากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการคายความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 20% เมื่ออากาศถูกไหลผ่านวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 9% ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะลดลงอย่างสม่ำเสมอจนได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์คงที่ที่เวลา 30 นาทีของการทำงานของวงล้อเป็น 27.5% ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าระบบวงล้อดูดความชื้นที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 7.5% สำหรับผลการวัดอุณหภูมิขาออกจากวงล้อความชื้นของอากาศ พบว่าอุณหภูมิของอากาศลดลงจาก 50°C ไปเป็น 49.5°C ในนาที่ที่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการการทำงานของวงล้อดูดความชื้น ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบจะอยู่ในช่วง 46-48°C ตลอดการทำงานของระบบ



ภาพที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในระบบวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s และอุณหภูมิ 90°C



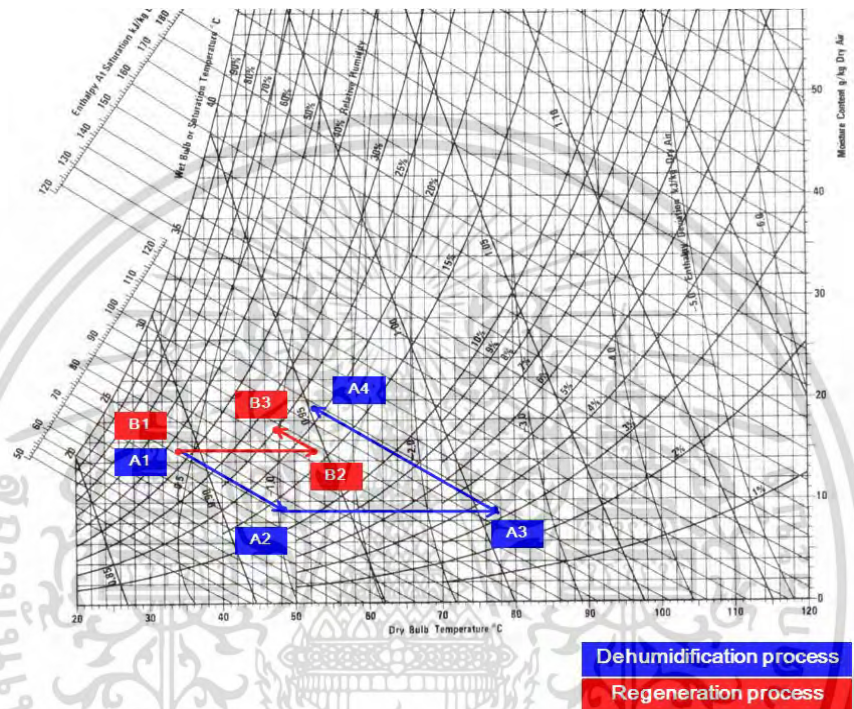
ภาพที่ 4.28 แผนภาพแสดงการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

โดยหลักการทำงานของระบบห้องอบแห้งแบบลมร้อนการใช้ความร้อนร่วมจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น สามารถแบ่งกระบวนการหลักได้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการการดูดความชื้นจากระบบวงล้อดูดความชื้น และกระบวนการคายความชื้นจากระบบวงล้อดูดความชื้น จากภาพที่ 4.29 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น กระบวนการดูดความชื้นจากระบบวงล้อดูดความชื้นเส้นสีน้ำเงิน เริ่มจากจุด A1 ที่นำอากาศจากภายนอกที่มีอุณหภูมิ 34.4°C ความชื้นสัมพัทธ์ 46.3%

เข้าสู่ระบบ ซึ่งอากาศจากภายนอกจะผ่านกระบวนการลดความชื้นซึ่งเป็นกระบวนการแบบอะเดียแบติก คือ กระบวนการที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากระบบ โดยจากภาพจะเห็นได้จากแผนภูมิไซโครเมตริกที่แสดงจุด A1 ไปยังจุด A2 มีอุณหภูมิกระเปาะเปียกและเอลทัลปีคงที่ ทำให้อากาศที่ได้ที่จุด A2 มีอุณหภูมิ 48°C หลังจากนั้นอากาศ A2 ที่ได้จะถูกนำไปเพิ่มอุณหภูมิด้วยกระบวนการทำความร้อน โดยตั้งให้ทำความร้อนเป็นอุณหภูมิ 90°C เมื่อวัดที่จุด A3 ได้อุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็น 77°C โดยอากาศที่จุด A3 นี้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศปกติที่จุด B1 ทำให้อากาศที่ได้หลังจากผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะมีอุณหภูมิ 53°C ความชื้นสัมพัทธ์ 20.4% ที่จุด A4 ทั้งนี้อาจมีอากาศภายนอกผสมในระบบในระหว่างกระบวนการ จึงทำให้เส้นกระบวนการจาก A3 ไป A4 ไม่ตรงตามกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ในขณะที่ส่วนกระบวนการคายความชื้นจากระบบวงล้อดูดความชื้นเส้นสีแดงเริ่มจากจุด B1 คืออากาศจากภายนอกซึ่งมีอุณหภูมิ 34.4°C ความชื้นสัมพัทธ์ 46.3% เข้าสู่ระบบ จากนั้นอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกนำไปสู่กระบวนการทำความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อากาศที่ได้หลังจากผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นอุณหภูมิ 53 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 17.5 %RH ที่จุด B2 โดยอากาศที่ได้จากจุด B2 นี้ คือ อากาศสำหรับการคืนสภาพสารดูดความชื้น จะถูกนำมาใช้สำหรับการดูดซับความชื้นออกจากซิลิกาเจลที่วงล้อดูดความชื้น ซึ่งทำให้อากาศที่ได้หลังจากผ่านวงล้อดูดความชื้นแล้วที่จุด B3 มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 46.8°C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 25%



ภาพที่ 4.29 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

กระบวนการลดความชื้นในอากาศ คือ เส้นกระบวนการ A (Dehumidification Process)

A1 - A2 กระบวนการลดความชื้น

A2 - A3 กระบวนการทำความร้อน

A3 - A4 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

กระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้น คือ เส้นกระบวนการ B (Regeneration Process)

B1 - B2 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

B2 - B3 กระบวนการคายความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

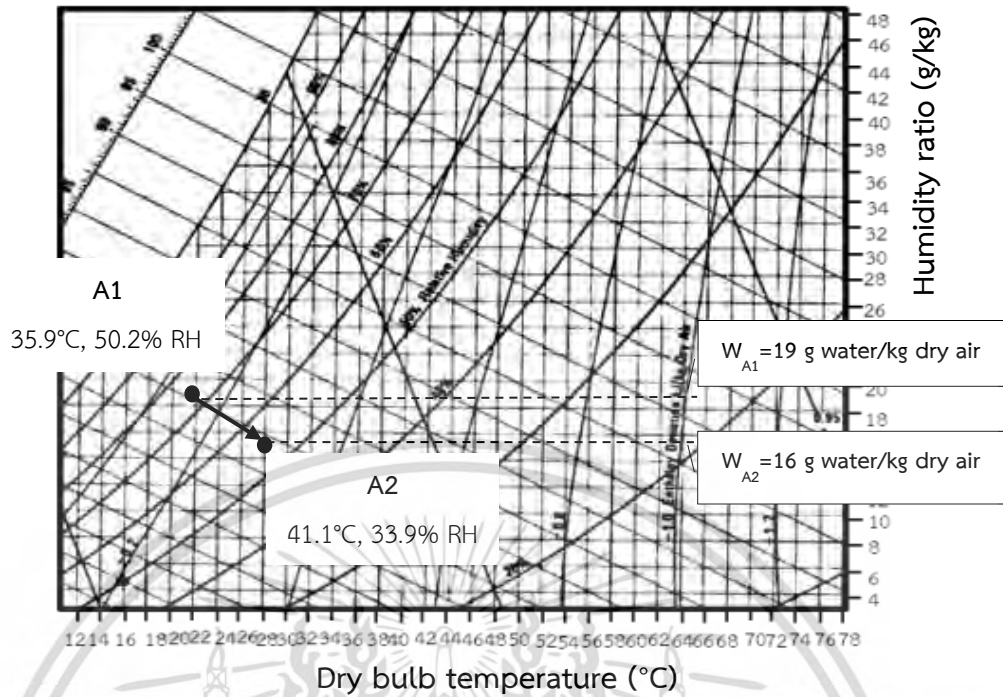
4.3 การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบลดความชื้นในอากาศสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอก

4.3.1 การทำงานของวงล้อและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อลดความชื้นทั้งระบบในสภาวะห้องอบแห้งเปล่า

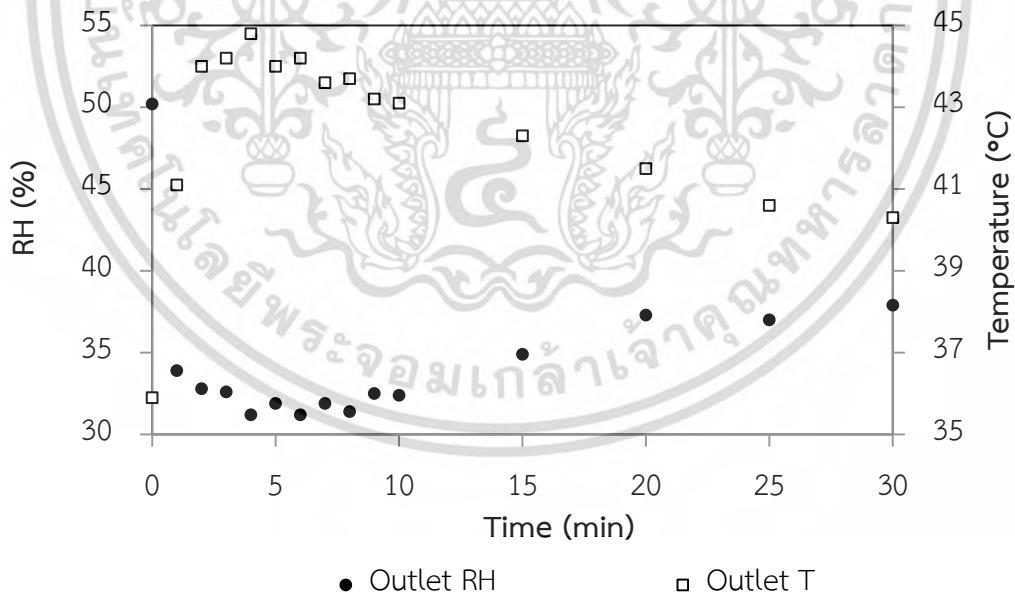
4.3.1.1 การลดความชื้นในอากาศของวงล้อลดความชื้น

ในระหว่างกระบวนการลดความชื้น วงล้อลดความชื้นถูกบรรจุด้วยซิลิกาเจลสีน้ำเงินสดที่ไม่มีความชื้นสะสม เมื่อเปิดทำงานเฉพาะส่วนลดความชื้นซึ่งได้แก่ พัดลมดูดอากาศในส่วนลดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากวงล้อลดความชื้นในกระบวนการลดความชื้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการลดความชื้นผ่านไป โดยเริ่มต้นจากอากาศปกติความชื้นสัมพัทธ์และอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นที่ 50.2% และ $19 \text{ g water/kg dry air}$ เมื่ออากาศถูกไหลผ่านวงล้อลดความชื้นความชื้นสัมพัทธ์และอัตราส่วนความชื้นของอากาศสามารถลดลงไปจนถึง 33.9% และ $16 \text{ g water/kg dry air}$ ตามลำดับ ซึ่งจากภาพที่ 4.30 กล่าวได้ว่าความชื้นสัมพัทธ์และอัตราส่วนความชื้นของอากาศสามารถลดลงประมาณ 16% และ $3 \text{ g water/kg dry air}$ ตามลำดับในช่วงเวลา 1 นาทีแรกของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ในนาทีที่ 25 ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศน้อยกว่า 1.5% และได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เวลา 30 นาทีของการทำงานของวงล้อเป็น 37.9% โดยแสดงได้ดังภาพที่ 4.31 ซึ่งประโยชน์จากการจำลองการลดความชื้นในอากาศของวงล้อลดความชื้น ทำให้สามารถคาดการณ์ความสามารถในการลดความชื้นของวงล้อจากการเปิดระบบอบทั้งระบบได้ เนื่องจากระบบวงล้อเมื่อทำการเปิดทำงานทั้งระบบ วงล้อจะถูกหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ระหว่างส่วนลดความชื้นและส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้นสลับกันอย่างต่อเนื่องภายในเวลาไม่เกิน 1 นาที โดยจากการทดลองลดความชื้น พบว่าวงล้อสามารถลดความชื้นได้จริงเป็นไปตามกระบวนการลดความชื้นแบบอะเดียแบติกในช่วง 1 นาทีของการทำงาน

สำหรับผลการวัดอุณหภูมิขาออกจากวงล้อลดความชื้นของอากาศ (ภาพที่ 4.31) พบว่าอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นประมาณ 5% จาก 35.9°C ไปเป็น 41.1°C ในช่วง 1 นาทีแรกทันทีตามการทำงานของวงล้อ คือหลังจากอากาศผ่านจากวงล้อลดความชื้นเพื่อลดความชื้นในกระบวนการลดความชื้น หลังจากนั้นอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง $40-41^\circ\text{C}$ ตลอดการทำงานของวงล้อ จึงสามารถกล่าวได้ว่าระบบวงล้อลดความชื้นที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงและอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นตามกระบวนการอะเดียแบติก โดยจากผลการวิจัยที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ (Dina and Ambarita, 2015) กล่าวว่าระบบลดความชื้นในห้องอบแห้งสามารถช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้



ภาพที่ 4.30 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสภาวะอากาศในระหว่างกระบวนการดูดความชื้น



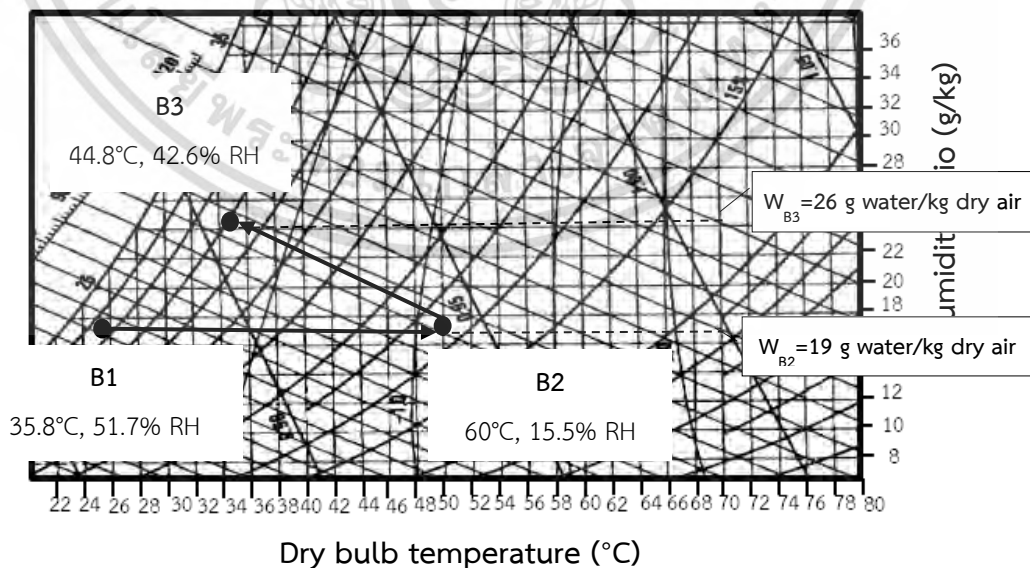
ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการดูดความชื้นของวง ลอดดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.2 การคืนสภาพสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้น

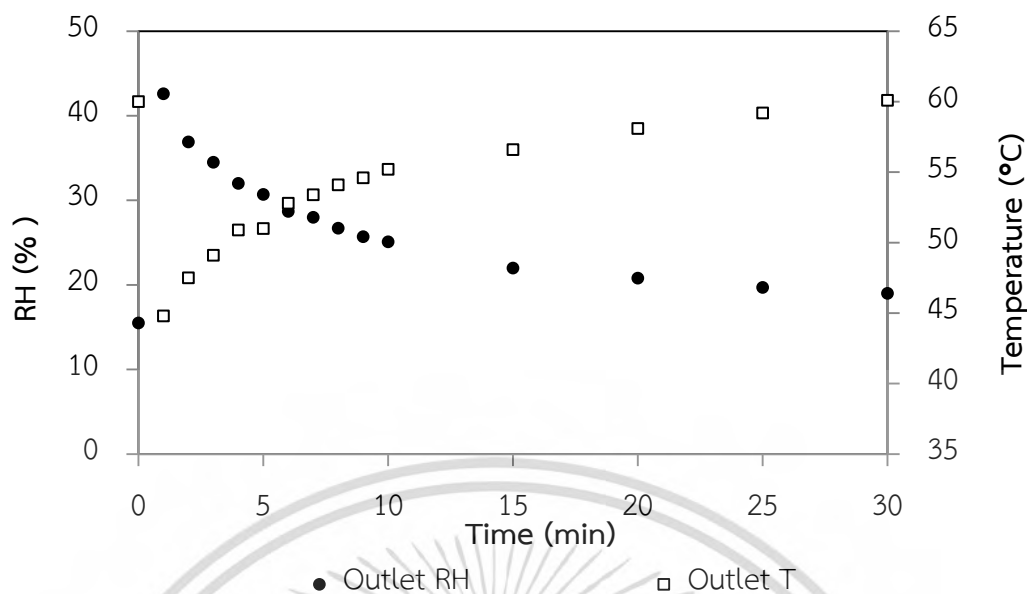
ในส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้นของระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมร่วมนกับวงล้อดูดความชื้น ก่อนการทดลองกำหนดให้ซิลิกาเจลดูดความชื้นจนเต็มที ในระหว่างกระบวนการทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ จากภาพที่ 4.32 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสภาวะอากาศในระหว่างกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นด้วยอากาศร้อนมีอัตราการไหลและอุณหภูมิเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 60°C พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่านวงล้อเพื่อนำความชื้นออกจากซิลิกาเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการคืนสภาพสารดูดความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 15.5% (60°C และ $19 \text{ g water/kg dry air}$) เมื่ออากาศไหลผ่านวงล้อดูดความชื้นในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 27% จาก 15.5% เป็น 42.6% ($26 \text{ g water/kg dry air}$) ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์จะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ในนาทิตี่ 20 ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 1.5% และเมื่อถึงนาทิตี่ 30 ของการทำงานของวงล้อดังภาพที่ 4.33 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าเป็น 19% โดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่กระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นจากวงล้อจะเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 3.5% จากอากาศปกติ (51.7%) ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าวงล้อได้รับการคืนสภาพสารดูดความชื้น นอกจากนี้จากการทดลองยังสามารถคาดการณ์ความสามารถในการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อเปิดทำงานวงล้อทั้งระบบได้ วงล้อสามารถคืนสภาพสารดูดความชื้นได้จริงเป็นไปตามกระบวนการอะเดียแบติกตั้งแต่ช่วง 1 นาทีแรกของการทำงานเช่นเดียวกับกับกระบวนการดูดความชื้น

สำหรับผลการวัดอุณหภูมิขาออกจากวงล้อดูดความชื้นของอากาศ พบว่าอุณหภูมิของอากาศลดลงจาก 60°C ไปเป็น 44.8°C ในนาทิตี่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการทำงานของวงล้อดูดความชื้น โดยจากกราฟพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบอยู่ในช่วง $59-60^\circ\text{C}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอากาศร้อนที่ใช้กำจัดความชื้น



ภาพที่ 4.32 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสภาวะอากาศในระหว่างกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคืนสภาพสารดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s และอุณหภูมิ 60°C

4.3.1.3 สมบัติของอากาศในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นในสภาวะห้องอบแห้งเปล่า

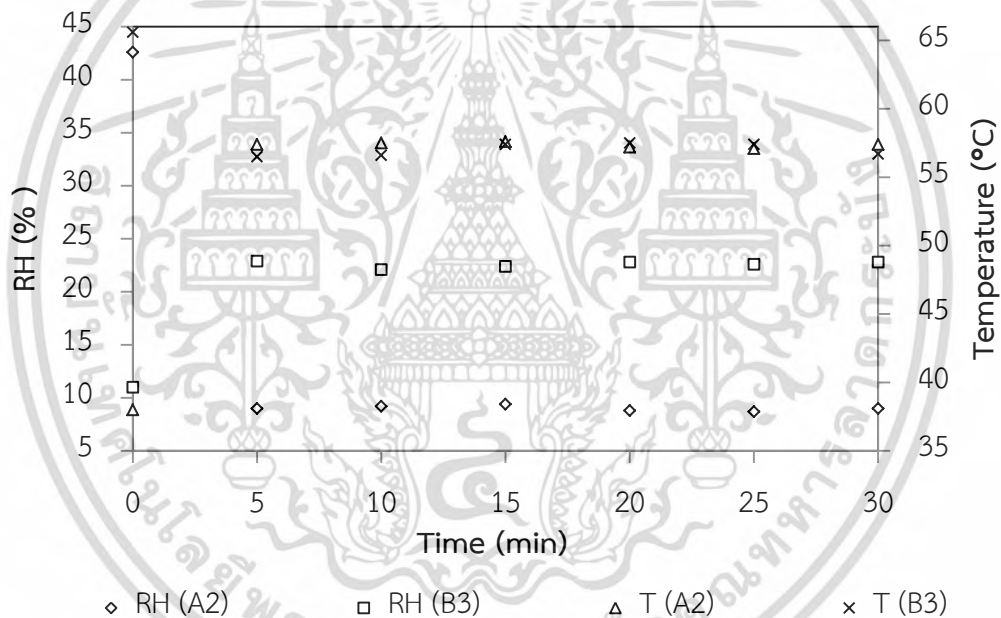
ในการทดลองทำการบรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสม เมื่อเปิดทำงานในอุปกรณ์ทุกส่วนของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศในส่วนดูดความชื้นและคืนสภาพสารดูดความชื้นเป็น 0.04 m³/s และอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งเป็น 90°C ซึ่งในระหว่างกระบวนการทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทุก ๆ 5 นาทีจนครบ 30 นาที จากภาพที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในระบบวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s และอุณหภูมิ 90°C พบว่าในกระบวนการดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในเวลา 5 นาทีแรกของการทำงาน อัตราส่วนความชื้นมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป อัตราส่วนความชื้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 9-10 g water/kg dry air กล่าวได้ว่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศสามารถลดลงประมาณ 7.5 g water/kg dry air จากอากาศปกติ ขณะที่กระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลา 5 นาทีแรกของการทำงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซิลิกาเจลภายในวงล้อดูดความชื้นสามารถดูดและคืนสภาพสารดูดความชื้นออกได้ในเวลาเดียวกันซึ่งเป็นไปตามแผนภูมิไซโครเมตริกของทฤษฎีกระบวนการดูดและคืนสภาพสารดูดความชื้น

การศึกษาสมบัติของอากาศในการทำงานของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นทั้งระบบ ซึ่งกำหนดให้จุดที่ทำการวัดผลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศเป็นตามภาพที่ 4.35 แผนผังแสดงสมบัติอากาศในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้น ในส่วนการลดความชื้น (Dehumidification Process) เริ่มจากอากาศปกติ A1 จะถูกลดความชื้นหลังจากผ่านวงล้อดูดความชื้น อากาศ A2 ที่ได้จะมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

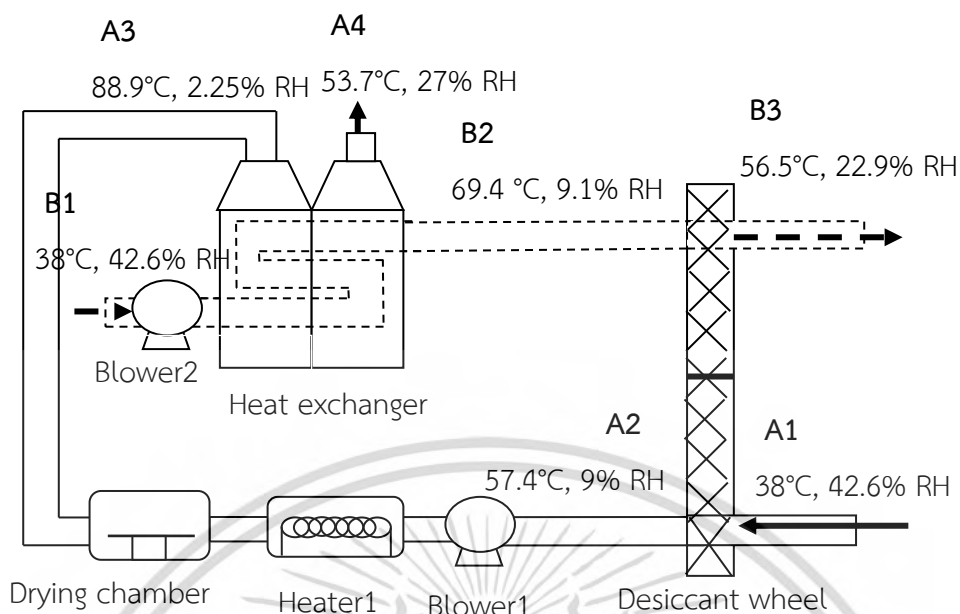
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะถูกนำไปเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90°C เพื่อใช้สำหรับกระบวนการอบแห้ง โดยอากาศที่เหลือทิ้งจากห้องอบแห้งที่จุด A3 จะถูกนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศปกติที่จุด B1 ในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น (Regeneration Process) ทำให้อากาศขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จุด A4 จะมีค่าเป็น 27%RH และ 53.7°C ตามลำดับ ในขณะที่ส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น เมื่อพิจารณาจากค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่จุด B3 คือ อากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นในการระหว่างการคืนสภาพสารดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่จุด B3 จะมีค่าเป็น 22.9% RH และ 56.5°C ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาในนาที่ที่ 30 ของกระบวนการดูดความชื้นและกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นของระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นดังภาพที่ 4.35 พบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของอากาศในส่วนการดูดความชื้นและในส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วงล้อดูดความชื้นสามารถดูดและคืนสภาพสารดูดความชื้นออกได้ในเวลาเดียวกันอย่างทันที่



ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในระบบวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 90°C



ภาพที่ 4.35 แผนผังแสดงสมบัติอากาศในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้น

4.3.1.4 ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสถานะห้องอบแห้งเปล่า

ตารางที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพของระบบวงล้อดูดความชื้น โดยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นทั้งระบบ กำหนดใหม่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิของลมร้อนในเครื่องอบแห้ง เป็น 90°C จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพทางการถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพทางการคืนสภาพสารดูดความชื้น ประสิทธิภาพทางการดูดความชื้น และประสิทธิภาพกระบวนการอะเดียแบติกมีค่าที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการลดความชื้นอย่างสมบูรณ์ภายในห้องอบแห้ง ค่าประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นมีค่าอยู่ในช่วง 44.39-98.49% และเมื่ออิงตามทฤษฎีกระบวนการแบบอะเดียแบติก ได้ประสิทธิภาพถึง 98.49% โดยค่าประสิทธิภาพกระบวนการอะเดียแบติกนั้นจะมีค่าเหมาะสมหรือไม่ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพทางการคืนสภาพสารดูดความชื้น และประสิทธิภาพทางการดูดความชื้นเป็นสำคัญ (Misha and Mat, 2012) ค่าอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลในกระบวนการดูดความชื้นคือ $2.64 \text{ g water/kg dry air}\cdot\text{kg silica gel}\cdot\text{min}$

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้น

Effectiveness	Percentage (%)
Thermal effectiveness	69.28
Regeneration effectiveness	61.42
Dehumidification effectiveness	44.39
Adiabatic DW's effectiveness	98.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อลักษณะการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ก่อนการทดลองทำการบรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสมภายในวงล้อดูดความชื้น เมื่อเปิดทำงานในอุปกรณ์ทุกส่วนของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น กำหนดความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้นที่ 1.5 rpm อัตราการไหลของอากาศของสวนคีนสภาพที่ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิของสวนคีนสภาพที่ 90°C ในระหว่างกระบวนการอบแห้งทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในส่วนการดูดความชื้นและส่วนการคีนสภาพสารดูดความชื้นจนถึงสุดกระบวนการจากตารางที่ 4.2 แสดงอัตราการอบแห้งเฉลี่ยและเวลาในการอบแห้งข้าวกล้องงอกโดยใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น การทดลองกำหนดอัตราการไหลของอากาศของสวนดูดความชื้นคือ 0.04, 0.06 และ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิในห้องอบแห้ง 80, 100 และ 120°C พบว่าถ้าพิจารณาที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ เมื่ออัตราการไหลของอากาศมีค่ามากขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งที่แตกต่างกันที่อัตราการไหลของอากาศเดียวกัน พบว่าที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ต่ำกว่า และจากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในห้องอบแห้งเป็น $0.04\text{-}0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $80\text{-}120^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงสุดและเวลาในการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง $0.0039\text{-}0.0125 \text{ g water/g dry matter}\cdot\text{min}$ และ 45-130 นาทีตามลำดับ โดยที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 120°C ส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงสุดและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ในขณะที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่ำสุดคือ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 80°C ส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าต่ำสุดและใช้เวลาในการอบแห้งมากที่สุดเช่นกัน จึงกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในห้องอบแห้ง จะทำให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วและใช้เวลาในการอบแห้งลดลง

จากภาพที่ 4.36 และ 4.37 แสดงค่าพลังงานและค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่าง ๆ พบว่า เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของอากาศเดียวกัน เมื่อลดอุณหภูมิในห้องอบแห้ง ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสังเกตได้ว่า การใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ต่ำลงส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งข้าวกล้องงอกที่นานขึ้น และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งเดียวกันที่อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน จะพบว่า เมื่อลดอัตราการไหลของอากาศในส่วนดูดความชื้นส่งผลให้ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเวลาในการอบแห้งมีผลโดยตรงต่อค่าพลังงานที่ใช้ในระบบอบแห้ง โดยที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงสุดคือ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 120°C ส่งผลให้ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกมีค่าต่ำสุดคือ 0.173 kWh

จากภาพที่ 4.38 แสดงเส้นโค้งการอบแห้งที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งต่างๆ สำหรับอัตราการไหลของอากาศสวนดูตความชื้น 0.04, 0.06 และ 0.08 m³/s ตามลำดับ จากกราฟทุกเส้นพบว่า ความชื้นลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป อัตราส่วนความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากข้าวกล้องงอกมีความชื้นอยู่มาก และความชื้นนั้นลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อเวลาผ่านไป การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นมีค่าน้อยลงในช่วงท้ายของกระบวนการ โดยอุณหภูมิในห้องอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศที่ต่ำ จะใช้เวลานานกว่าในการลดความชื้นจนเหลือความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องงอกที่ต้องการ

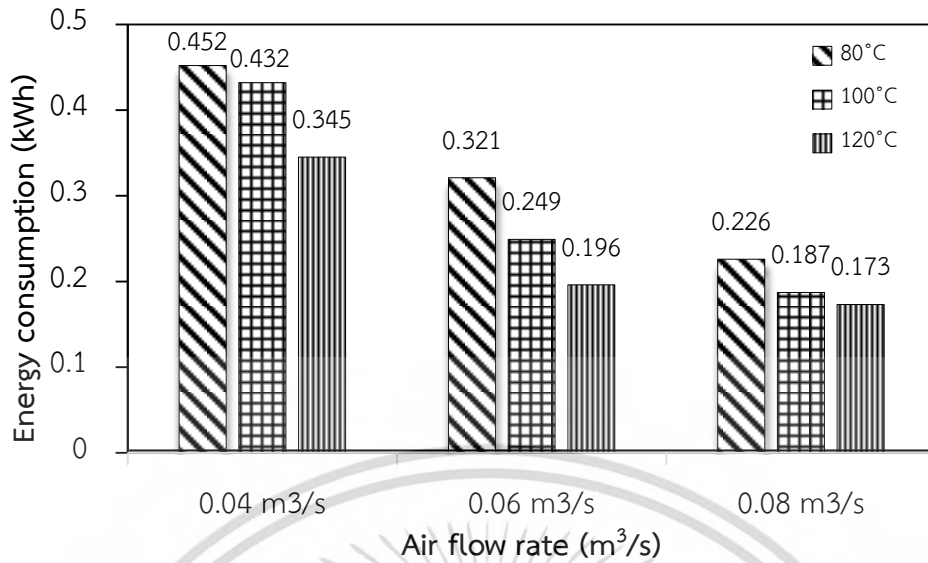
จากภาพที่ 4.39 แสดงเส้นโค้งอัตราการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูตความชื้นในทุกอัตราการไหลของอากาศและทุกอุณหภูมิลมร้อน จะพบเพียง 2 ช่วงการอบแห้งหลักคือ ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Heating up) และ ช่วง อัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate) เท่านั้น

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนเป็น 0.08 m³/s และ 120 °C ตามลำดับ จะส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงสุดและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 0.0125 g water/g dry matter·min และ 45 นาทีตามลำดับ นอกจากนี้ในด้านพลังงานการอบแห้งพบว่าการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูตความชื้นด้วยเงื่อนไขดังกล่าวจะใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยที่สุดเช่นกัน

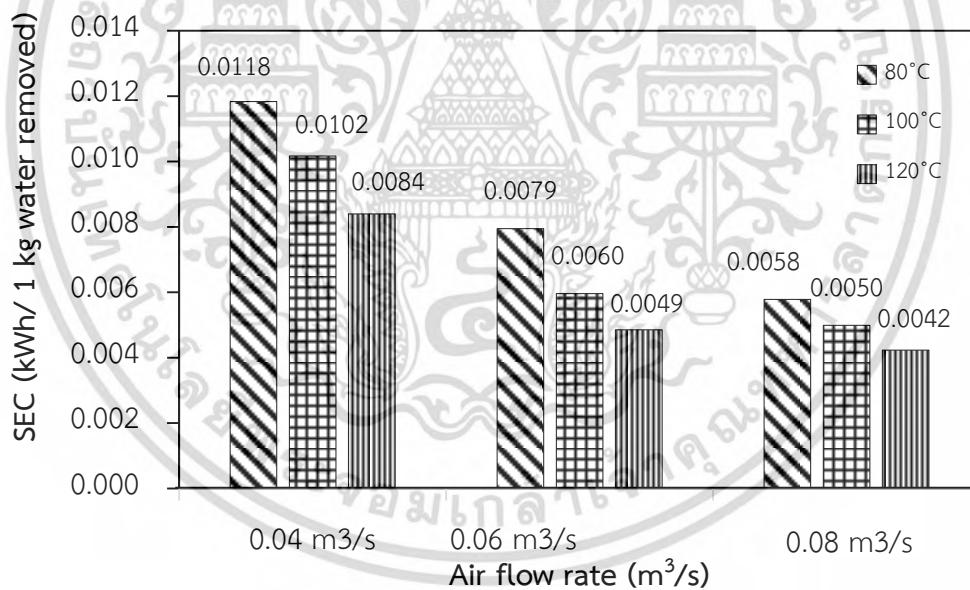
ตารางที่ 4.10 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูตความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศสวนดูตความชื้นและอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่าง ๆ

Drying condition		Drying time (min)	Maximum DR (g water/g dry matter ·min)	Energy consumption (kWh)	SEC (kWh/1 kg water removed)
Q (m ³ /s)	T (°C)				
0.04	80	130	0.0039	0.452	0.0118
	100	120	0.0043	0.432	0.0102
	120	95	0.0047	0.345	0.0084
0.06	80	95	0.0055	0.321	0.0079
	100	70	0.0083	0.249	0.0060
	120	50	0.0087	0.196	0.0049
0.08	80	70	0.0074	0.226	0.0058
	100	50	0.0100	0.187	0.0050
	120	45	0.0125	0.173	0.0042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

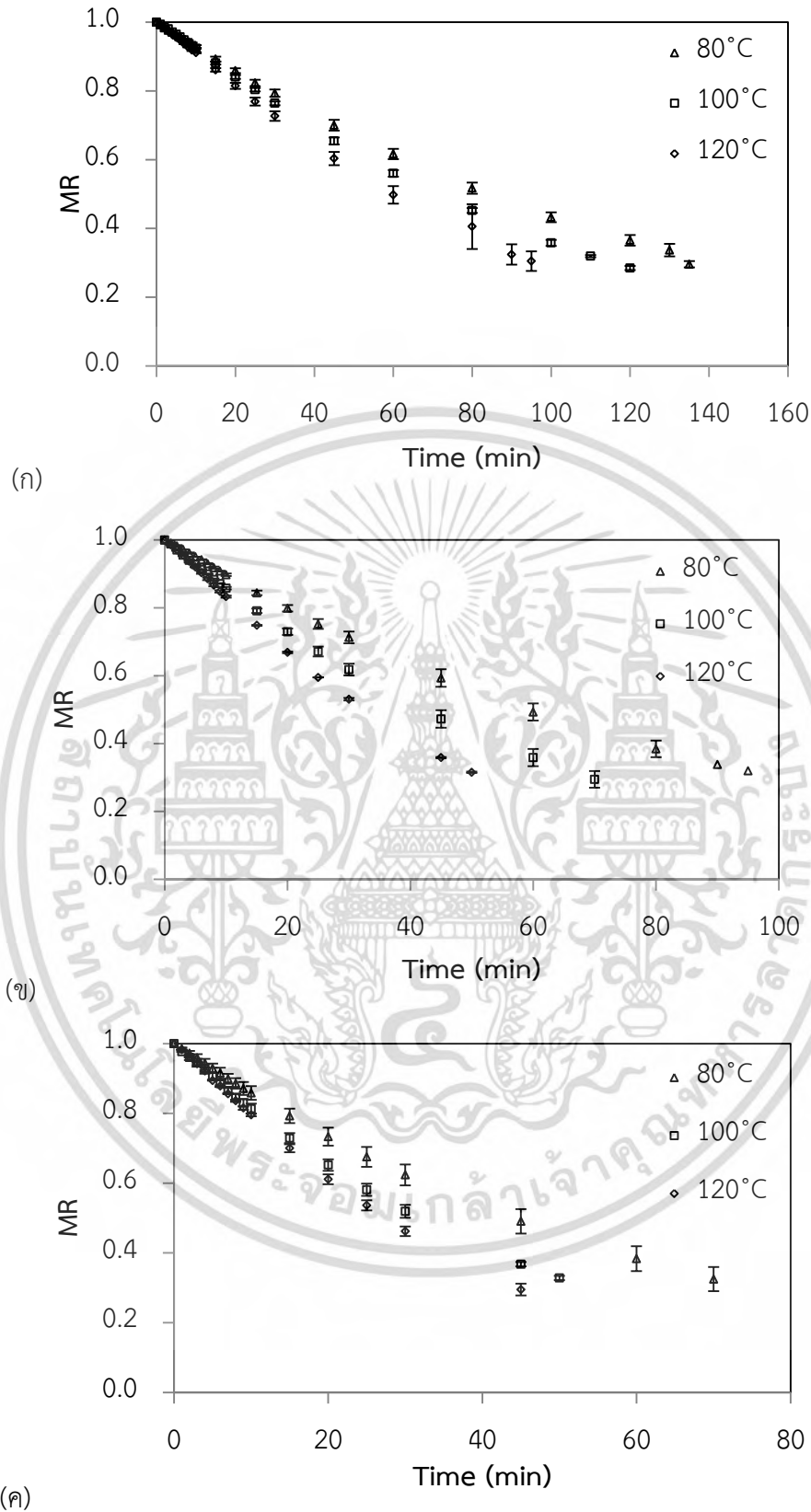


ภาพที่ 4.36 ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับ วงลวดดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศสวนดูด ความชื้นเป็น 0.04 m³/s 0.06 m³/s และ 0.08 m³/s ตามลำดับ



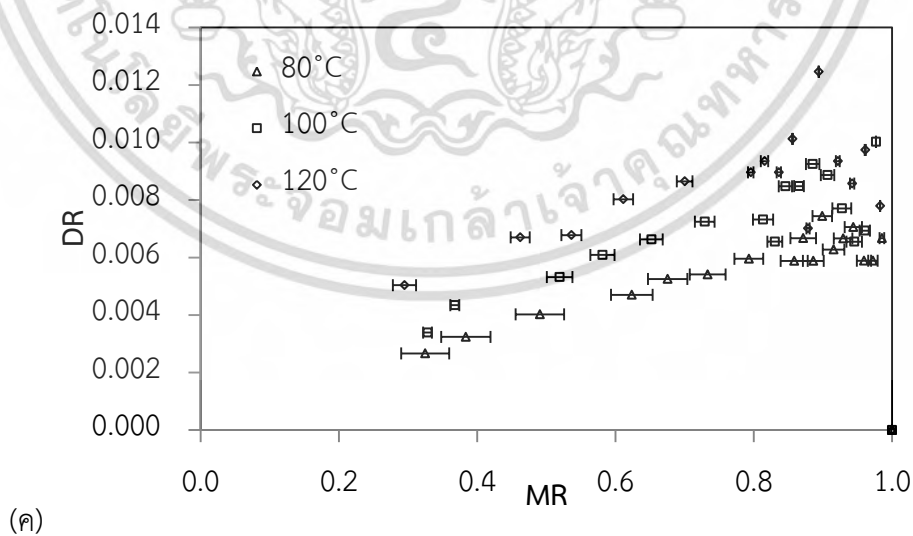
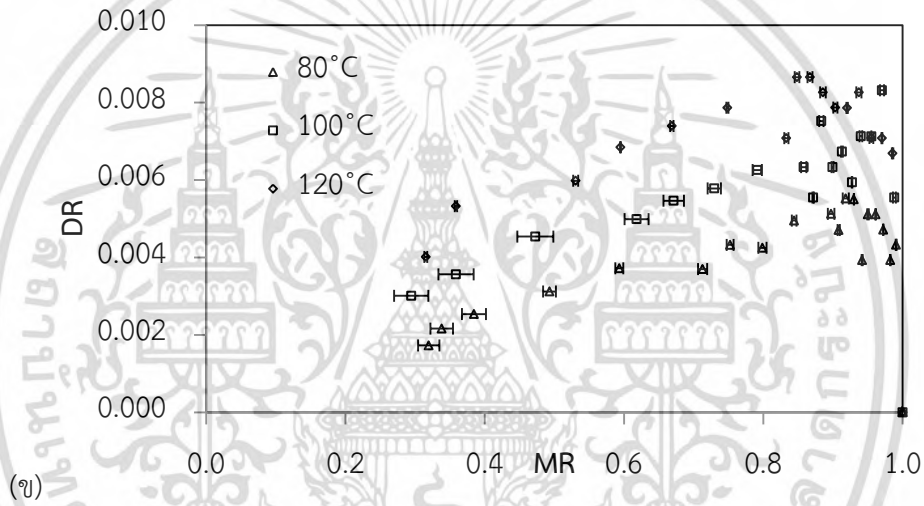
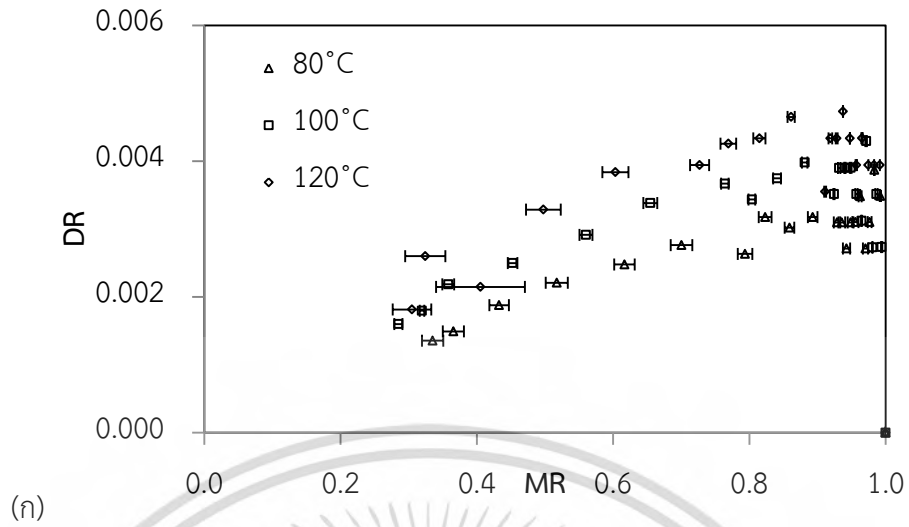
ภาพที่ 4.37 ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับ วงลวดดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศสวนดูด ความชื้นเป็น 0.04 m³/s 0.06 m³/s และ 0.08 m³/s ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.38 เสนอโคจรอบแหงของข้าวกล้องงอกดวาระบบอบแหงแบบลมรอนรวมกับวงลวดคความ ชื้น ที่ อุณหภูมิอบแหงต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศสวนดวดความชื้นเปน (ก) $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ (ข) $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และ (ค) $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



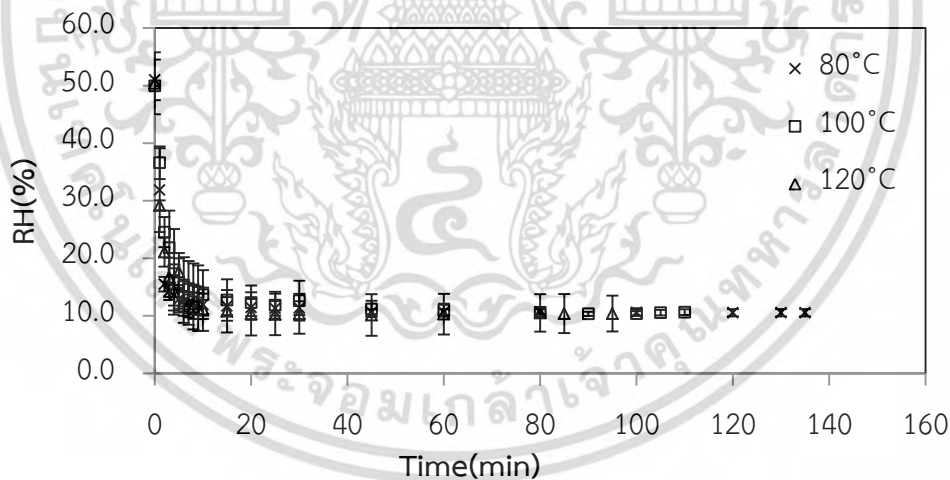
ภาพที่ 4.39 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนรวมกับวงล้อ
 ดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศสวนดูดความชื้นเป็น (ก)
 0.04 m³/s (ข) 0.06 m³/s และ (ค) 0.08 m³/s ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อสมบัติของอากาศในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

เมื่อเปิดทำงานเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบ จากภาพที่ 4.40 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในสวนดูดความชื้นหลังออกจากวงล้อดูดความชื้นตลอดระยะเวลาของการอบแห้ง การทดลองกำหนดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกเริ่มต้นมีค่าอยู่ในช่วง 45-55% ทั้งนี้พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรกของกระบวนการดูดความชื้นในทุกเงื่อนไขของการอบแห้งข้าวกล้องงอก คือที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.04 m^3/s , 0.06 m^3/s และ 0.08 m^3/s และอุณหภูมิในห้องอบแห้งเป็น 80, 100 และ 120°C ตามลำดับ จากนั้นจะสังเกตได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไปความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลงจนเกือบคงที่ในช่วงท้ายของกระบวนการ โดยในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในสวนดูดความชื้นในช่วงท้ายของกระบวนการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 9-15%

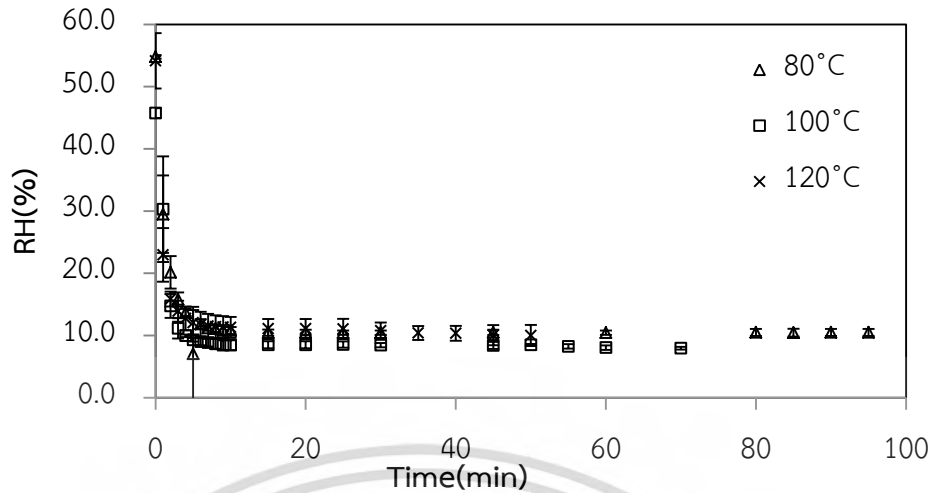
เมื่อพิจารณาที่อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในห้องอบแห้งจะเห็นได้ว่า ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่วัดได้หลังจากออกจากวงล้อดูดความชื้นให้ผลไม่แตกต่างกันในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะเริ่มค่อนข้างคงที่ในนาทีที่ 10 ของกระบวนการอบแห้ง และมีค่าอยู่ในช่วง 9-15% RH ตลอดจนถึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง



(ก)

ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในสวนดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้นในกระบวนการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูด ความชื้นกับเวลาที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่ออัตราการไหลของอากาศเป็น (ก) 0.04 m^3/s (ข) 0.06 m^3/s และ (ค) 0.08 m^3/s ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.40 (ต่อ) ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในสวนอุตสาหกรรมของวงล้ออุตสาหกรรมขึ้นในกระบวนการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้ออุตสาหกรรม ความชื้นกับเวลาที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่ออัตราการไหลของอากาศเป็น (ก) $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ (ข) $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และ (ค) $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ตามลำดับ

4.3.4 การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบชั้นบางด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้ออุตสาหกรรม

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้ออุตสาหกรรมแบบชั้นบาง สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และ ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) ได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจากตารางที่ทำการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดจำนวน 4 โมเดลที่มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจมากกว่า 0.998 ได้แก่ แบบจำลองของ Page, Logarithmic, Midilli et al. และ Wang and Singh และเมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองต่าง ๆ เพื่อหาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองที่ดีที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ถือเป็นค่าพารามิเตอร์ในทางสถิติที่บ่งบอกความแตกต่างระหว่างข้อมูลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่ดีควรมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจสูง และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งภาพแบบนี้ มีประสิทธิภาพสูงในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำ และมีค่าความผิดพลาดต่ำ

เมื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 4 แบบจำลองจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจและค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย พบว่าแบบจำลองของ Midilli et al. ($MR = a \exp(-kt^n) + bt$) มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อน ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจสูงสุดและค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด คือ 0.9991 และ 0.0045 ตามลำดับ โดยจากภาพที่ 4.41 เมื่อทำการเปรียบเทียบเส้นโค้งอบแห้งระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลจากการอบแห้งที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง Midilli et al. พบว่าข้อมูลเส้นโค้งการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้กันในทุกอัตราการไหลอากาศและทุกอุณหภูมิลมร้อนในทุกช่วงเวลาของการอบแห้ง ภาพแบบของสมการ Midilli et al. มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจอยู่ระหว่าง 0.99298 - 0.99998 เมื่อเทียบกับผลการทดลอง

จากภาพที่ 4.41 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง Midilli et al. ทุกจุดข้อมูลมีค่าเข้าใกล้แนวแกนเส้นแบ่ง 1:1 ในทุกสภาวะการอบแห้ง นอกจากนี้เมื่อนำจุดข้อมูลมาสร้างสมการเส้นตรง พบว่า ค่าความชันของกราฟมีค่าเข้าใกล้ 1 และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมีค่าสูง ซึ่งแสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันสูงของข้อมูล เป็นไปตามลักษณะของแบบจำลองที่ดีในการใช้ทำนายข้อมูลการอบแห้ง

ตารางที่ 4.11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบลมร้อน ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นแบบชั้นบางที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ

Model.	Condition		Constant and coefficient			R ²	RMSE	
	Q (m ³ /s)	T (°C)						
1	0.04	80	k=	0.0083		0.99840	0.00964	
		100	k=	0.0096		0.98489	0.03023	
		120	k=	0.0114		0.99498	0.01660	
	0.06	80	k=	0.0117		0.99901	0.00729	
		100	k=	0.0165		0.99822	0.00923	
		120	k=	0.0209		0.99164	0.01977	
	0.08	80	k=	0.0158		0.99961	0.00417	
		100	k=	0.0216		0.99891	0.00697	
		120	k=	0.0251		0.99440	0.01536	
2	0.04	80	k=	0.0063	n= 1.0620	0.99957	0.00500	
		100	k=	0.0047	n= 1.1700	0.99273	0.02097	
		120	k=	0.0072	n= 1.1150	0.99934	0.00601	
	0.06	80	k=	0.0096	n= 1.0500	0.99995	0.00164	
		100	k=	0.0132	n= 1.0620	0.99983	0.00281	
		120	k=	0.0131	n= 1.1450	0.99994	0.00164	
	0.08	80	k=	0.0143	n= 1.0280	0.99997	0.00113	
		100	k=	0.0186	n= 1.0460	0.99991	0.00204	
		120	k=	0.0179	n= 1.1070	0.99990	0.00208	
3	0.04	80	k=	0.0084	a= 1.0070	0.99883	0.00824	
		100	k=	0.0100	a= 1.0200	0.98814	0.02679	
		120	k=	0.0119	a= 1.0170	0.99729	0.01219	
	0.06	80	k=	0.0119	a= 1.0090	0.99967	0.00419	
		100	k=	0.0168	a= 1.0090	0.99896	0.00704	
		120	k=	0.0221	a= 1.0240	0.99638	0.01301	
	0.08	80	k=	0.0160	a= 1.0050	0.99988	0.00234	
		100	k=	0.0221	a= 1.0080	0.99948	0.00482	
		120	k=	0.0262	a= 1.0200	0.99754	0.01019	
4	0.04	80	k=	0.0065	a= 1.1900	c= -0.1895	0.99967	0.00435
		100	k=	0.0055	a= 1.5130	c= -0.5057	0.99186	0.02219
		120	k=	0.0078	a= 1.3390	c= -0.3324	0.99931	0.00615
	0.06	80	k=	0.0105	a= 1.0900	c= -0.0844	0.99991	0.00215
		100	k=	0.0132	a= 1.1750	c= -0.1734	0.99996	0.00131
		120	k=	0.0137	a= 1.4160	c= -0.4056	0.99952	0.00472
	0.08	80	k=	0.0150	a= 1.0460	c= -0.0431	0.99995	0.00147
		100	k=	0.0193	a= 1.0950	c= -0.0917	0.99980	0.00298
		120	k=	0.0186	a= 1.2640	c= -0.2560	0.99968	0.00364

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

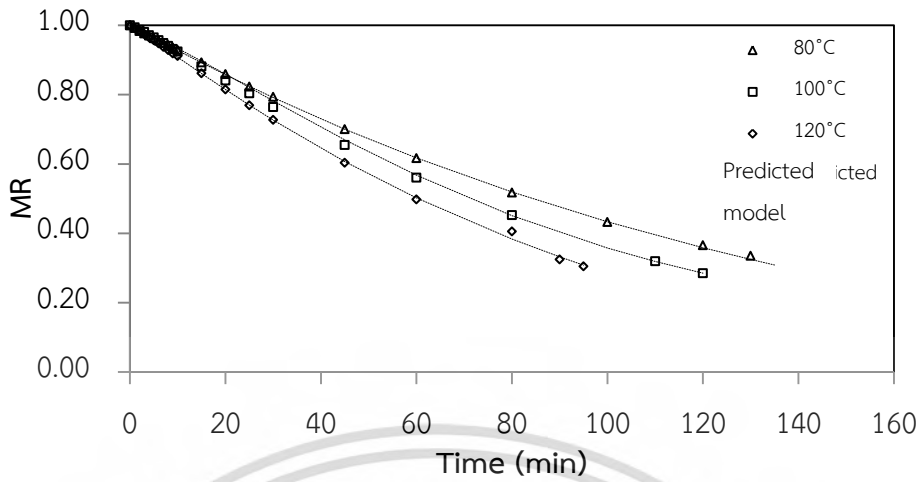
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11(ต่อ) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นแบบชั้นบางที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ

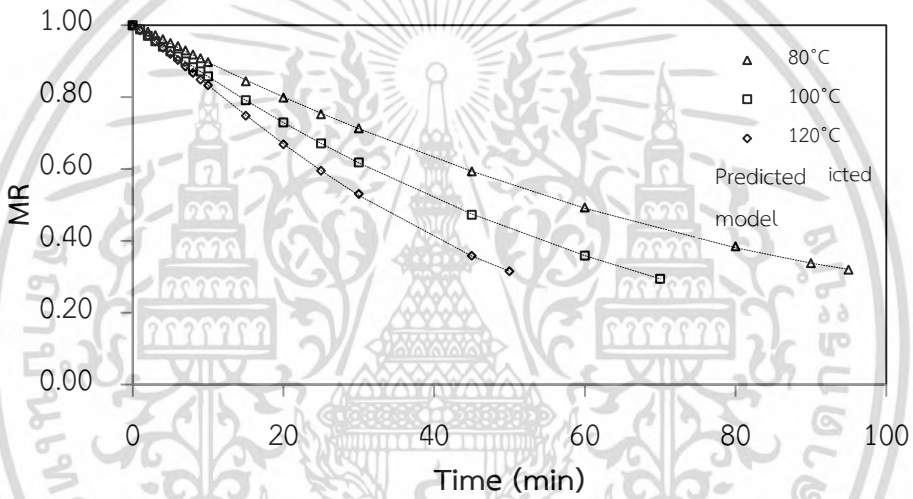
Model.	Condition		Constant and coefficient						R ²	RMSE
	Q (m ³ /s)	T (°C)								
5	0.04	80	k ₀ = 0.0111	k ₁ = 0.0137	a= 2.3630	b= -1.3620	0.99963	0.00461		
		100	k ₀ = 0.0121	k ₁ = 0.0438	a= 1.2050	b= -0.2106	0.99310	0.02043		
		120	k ₀ = 0.0166	k ₁ = 0.0226	a= 2.1880	b= -1.1850	0.99934	0.00603		
	0.06	80	k ₀ = 0.0547	k ₁ = 0.0125	a= -0.0420	b= 1.0450	0.99995	0.00165		
		100	k ₀ = 0.0221	k ₁ = 0.0267	a= 2.4840	b= -1.4800	0.99988	0.00242		
		120	k ₀ = 0.0205	k ₁ = 0.0206	a= -6.0790	b= 7.0850	0.99375	0.01709		
	0.08	80	k ₀ = 0.0102	k ₁ = 0.0103	a= -22.7800	b= 23.7300	0.97115	0.03569		
		100	k ₀ = 0.0229	k ₁ = 0.1524	a= 1.0310	b= -0.0323	0.99991	0.00197		
		120	k ₀ = 0.0327	k ₁ = 0.0627	a= 1.3950	b= -0.3922	0.99991	0.00193		
6	0.04	80	k= 0.0084	a= 0.4612	b= 0.9670	0.99840	0.00965			
		100	k= 0.0096	a= 1.0000	b= 0.5931	0.98489	0.03023			
		120	k= 0.0370	a= -0.2358	b= 0.3852	0.99932	0.00609			
	0.06	80	k= 0.0997	a= -0.0279	b= 0.1232	0.99993	0.00187			
		100	k= 0.0298	a= -0.8494	b= 0.7307	0.99996	0.00145			
		120	k= 0.0218	a= 0.2598	b= 0.9418	0.99162	0.01979			
	0.08	80	k= 0.0146	a= 1.7790	b= 0.9076	0.99967	0.00384			
		100	k= 0.0213	a= 1.3170	b= 0.9451	0.99892	0.00693			
		120	k= 0.0199	a= 2.0280	b= 0.7764	0.99629	0.01250			
7	0.04	80	k= 0.0066	n= 1.0320	a= 0.9989	b= -0.0003	0.99969	0.00423		
		100	k= 0.0036	n= 1.2510	a= 0.9907	b= 0.0004	0.99298	0.02061		
		120	k= 0.0077	n= 1.0760	a= 1.0010	b= -0.0005	0.99941	0.00567		
	0.06	80	k= -0.0004	n= 1.5260	a= 1.0040	b= -0.0119	0.99990	0.00234		
		100	k= 0.0138	n= 1.0250	a= 1.0000	b= -0.0007	0.99998	0.00108		
		120	k= -0.0219	n= 0.9003	a= 1.0000	b= -0.0358	0.99992	0.00187		
	0.08	80	k= 0.0144	n= 1.0270	a= 1.0010	b= 4.951x10 ⁻⁵	0.99998	0.00102		
		100	k= 0.0181	n= 1.0600	a= 0.9985	b= 0.0002	0.99991	0.00197		
		120	k= 0.0183	n= 1.0870	a= 1.001	b= -0.0005	0.99994	0.00161		
8	0.04	80	a= -0.0074	b= 1.691x10 ⁻⁵	0.99964	0.00460				
		100	a= -0.0079	b= 1.561x10 ⁻⁵	0.99182	0.02224				
		120	a= -0.0098	b= 2.643x10 ⁻⁵	0.99916	0.00681				
	0.06	80	a= -0.0107	b= 3.726x10 ⁻⁵	0.99988	0.00256				
		100	a= -0.0148	b= 6.849x10 ⁻⁵	0.99995	0.00151				
		120	a= -0.0179	b= 8.149x10 ⁻⁵	0.99914	0.00634				
	0.08	80	a= -0.0147	b= 7.338x10 ⁻⁵	0.99988	0.00228				
		100	a= -0.0200	b= 1.312x10 ⁻⁴	0.99989	0.00226				
		120	a= -0.0219	b= 1.380x10 ⁻⁴	0.99961	0.00403				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ตามการค้า

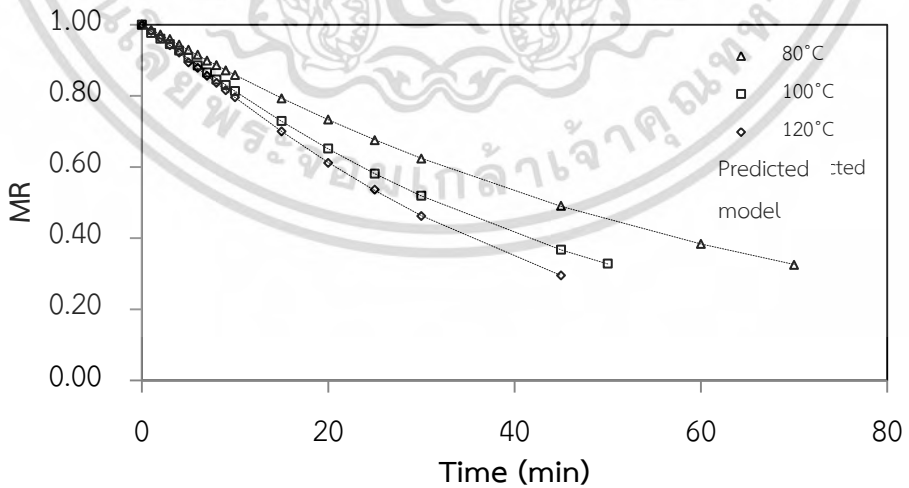
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

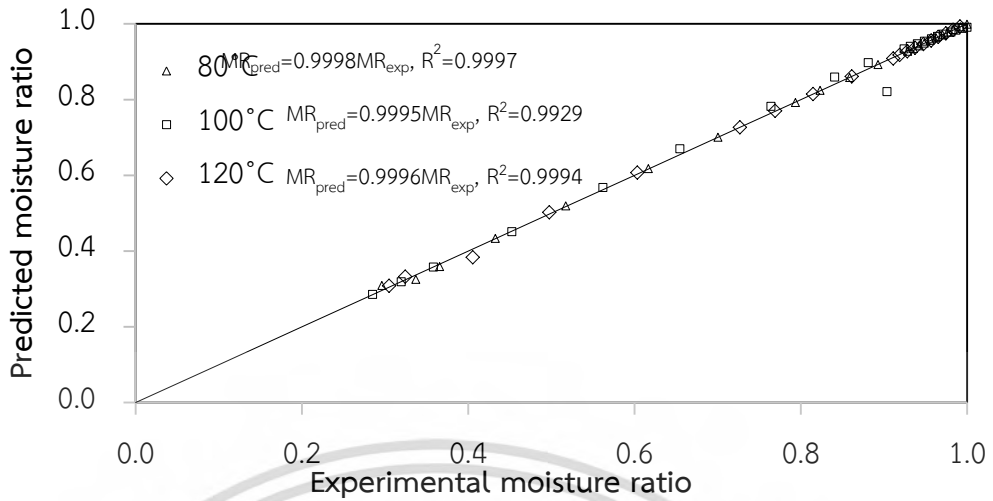


(ข)

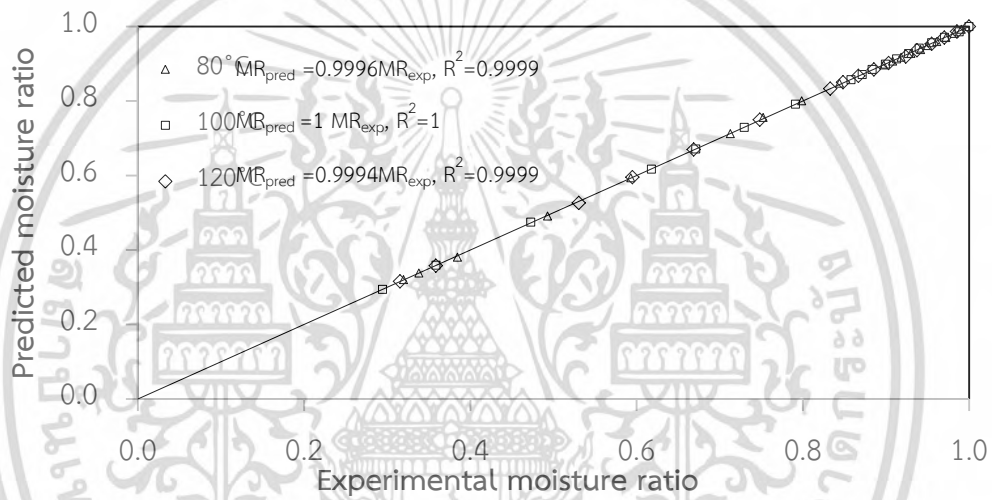


(ค)

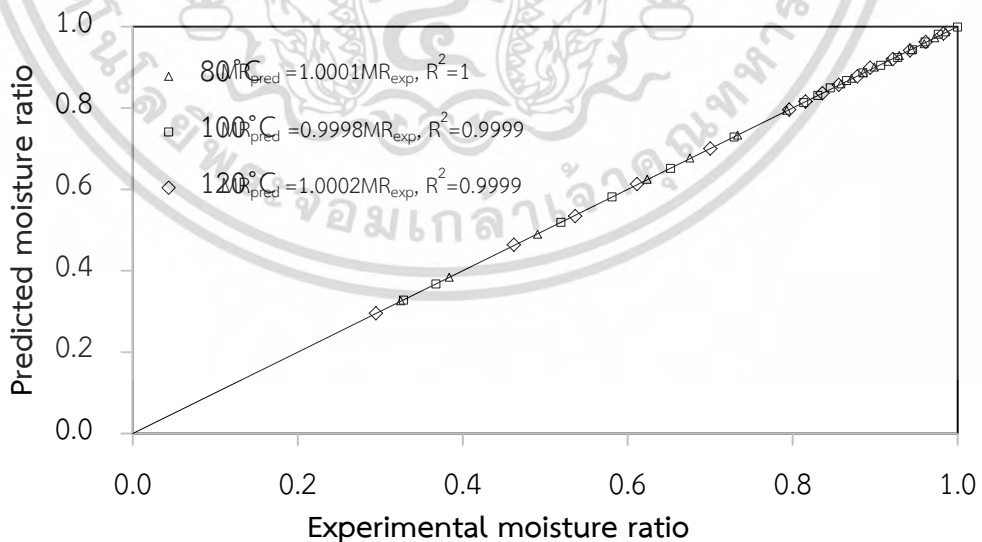
ภาพที่ 4.41 การเปรียบเทียบเส้นโค้งบ่งชี้ระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลจากการอบแห้ง ที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลอง Midilli et al. ที่อัตราการไหลของอากาศ (ก) $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ (ข) $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และ (ค) $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ตามลำดับ ในแต่ละอุณหภูมิ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.42 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลจากการอบแห้งที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลอง Midilli et al. ที่อัตราการไหลของอากาศ (ก) $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ (ข) $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และ (ค) $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ตามลำดับ ในแต่ละอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในอบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

4.3.5.1 สารกาบา

การทดลองอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิห้องอบแห้งที่ส่งผลต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอก จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกหลังกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยวางแผนการทดลองแบบการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสองปัจจัย (Two-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีการวิเคราะห์แบบ LSD ($p < 0.05$) พบว่าอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอก หรือกล่าวได้ว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกหลังกระบวนการอบแห้งจากอุณหภูมิห้องอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ให้ผลที่แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ค่าต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ทั้งนี้เมื่อมาพิจารณาที่ค่าปริมาณสารกาบาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว One-way ANOVA (Duncan's multiple range) ดังตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกในแต่ละสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 100 และ 120°C เห็นแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนที่จะพบปริมาณสารกาบาสูงสุด ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่ค่าปริมาณสารกาบาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศ พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.04 m³/s เห็นแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนที่จะพบปริมาณสารกาบาสูงสุดเมื่อเทียบกับที่ในระดับอื่น

ตารางที่ 4.12 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอก

Drying condition		GABA (mg/100 g)
Q (m ³ /s)	T (°C)	
0.04	80	12.25±0.21 ^e
	100	14.98±0.18 ^a
	120	14.32±0.37 ^{ab}
0.06	80	12.56±0.50 ^{de}
	100	13.48±0.40 ^{bcd}
	120	13.74±0.44 ^{bc}
0.08	80	10.78±0.65 ^f
	100	13.88±0.74 ^{bc}
	120	13.01±0.16 ^{cde}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5.2 ความแข็งและความเหนียว

จากผลการวิเคราะห์ความแข็งและความเหนียวดังตารางที่ 4.5 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสองปัจจัย (Two-way ANOVA) พบว่าอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศมีปฏิสัมพันธ์ต่อกัน และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งและความเหนียวด้วยวิธีทดสอบแบบ Simple main effect เพื่อหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศที่ส่งผลต่อค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก ทั้งนี้มีแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนว่าอัตราการไหลของอากาศที่ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ส่งผลให้ข้าวกล้องงอกหุงสุกมีความแข็งน้อยกว่าอัตราการไหลของอากาศที่ระดับอื่น ขณะที่เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบแห้ง พบว่าผลการเปรียบเทียบทางสถิติส่วนใหญ่ ไม่พบความแตกต่างต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก

ตารางที่ 4.13 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก

Drying condition	Hardness (kgf)			Stickiness (kgf)		
	T (°C)					
Q (m ³ /s)	80	100	120	80	100	120
0.04	93.04±2.73 ^{A,b}	75.62±1.36 ^{B,b}	89.29±1.21 ^{A,c}	12.24±0.14 ^{NS,ns}	12.67±0.41 ^{NS,a}	12.50±0.22 ^{NS,ns}
0.06	103.67±2.87 ^{B,a}	111.57±3.00 ^{A,a}	114.58±1.53 ^{A,a}	12.77±0.23 ^{NS,ns}	13.27±0.54 ^{NS,a}	12.48±1.49 ^{NS,ns}
0.08	108.69±9.52 ^{AB,a}	113.23±3.75 ^{A,a}	105.77±3.49 ^{B,b}	12.96±0.07 ^{A,ns}	10.40±0.24 ^{B,b}	13.20±1.16 ^{A,ns}

ตัวพิมพ์ใหญ่แสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในแถวเดียวกัน (การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง, $p=0.05$)

ตัวพิมพ์เล็กแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในคอลัมน์เดียวกัน (การเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ, $p=0.05$)

4.3.5.3 ค่าสีและความขาว

จากตารางที่ 4.14 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดงกับสีเขียว (a^*) ค่าสีเหลืองกับสีน้ำเงิน (b^*) และค่าความขาว (Whiteness) ของข้าวกล้องงอก และจากผลการวิเคราะห์ค่าสีและความขาวด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสองปัจจัย (Two-way ANOVA) พบว่ามีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอก โดยเมื่อพิจารณาค่าสีและความขาวด้วยวิธีทดสอบแบบ Simple main effect เพื่อหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศที่ส่งผลต่อค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอก โดยผลการเปรียบเทียบทางสถิติส่วนใหญ่ ไม่พบความแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพสีและความขาวที่ชัดเจน

ตารางที่ 4.14 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอก

Drying condition	L*			a*		
	T (°C)					
Q (m ³ /s)	80	100	120	80	100	120
0.04	66.82±0.49 ^{B,b}	68.16±0.56 ^{A,b}	67.91±0.32 ^{A,b}	4.73±0.16 ^{B,ns}	4.54±0.17 ^{B,ns}	5.06±0.19 ^{A,a}
0.06	68.50±0.49 ^{B,a}	69.46±0.03 ^{A,a}	69.10±0.04 ^{AB,a}	4.72±0.06 ^{A,ns}	4.36±0.11 ^{B,ns}	4.38±0.09 ^{B,b}
0.08	67.58±0.16 ^{B,b}	68.03±0.26 ^{B,b}	69.33±1.02 ^{A,a}	4.99±0.14 ^{A,ns}	4.51±0.08 ^{B,ns}	5.05±0.37 ^{A,a}

Drying condition	b*			Whiteness (%)		
	T (°C)					
Q (m ³ /s)	80	100	120	80	100	120
0.04	23.54±0.15 ^{B,b}	24.41±0.48 ^{A,a}	24.35±0.20 ^{A,b}	59.04±0.47 ^{NS,b}	59.62±0.69 ^{NS,b}	59.40±0.39 ^{NS,b}
0.06	23.28±0.02 ^{B,b}	23.38±0.19 ^{B,b}	23.92±0.25 ^{A,b}	60.55±0.38 ^{NS,a}	61.29±0.15 ^{NS,a}	60.68±0.16 ^{NS,a}
0.08	24.41±0.46 ^{B,a}	23.79±0.04 ^{C,b}	25.20±0.07 ^{A,a}	59.11±0.39 ^{B,b}	59.90±0.19 ^{A,b}	59.98±0.79 ^{A,ab}

ตัวพิมพ์ใหญ่แสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในแถวเดียวกัน (การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง, p=0.05)

ตัวพิมพ์เล็กแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในคอลัมน์เดียวกัน (การเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ, p=0.05)

4.3.6 การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ

4.3.6.1. การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้ง แบบลมร้อนรวมกับวงล้อดูดความชื้นและระบบอบแห้งแบบลมร้อน จากทดลองทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิในท้องอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 100 และ 120 °C สวนสภาวะอื่น ๆ ในระบบทำการกำหนดให้มีค่าคงที่ โดยทำการกำหนดให้ความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้นและอัตราการไหลของอากาศสวนดูดความชื้นมีค่าเป็น 1.5 rpm 0.08 m³/s ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในสวนคืนสภาพสารดูดความชื้นมีค่าเป็น 0.04 m³/s และ 90 °C ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนรวมกับวงล้อดูดความชื้นจะพบอัตราการอบแห้งสูงสุดมีค่าสูงกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนในทุกช่วงอุณหภูมิ โดยระบบอบแห้งแบบลมร้อนรวมกับวงล้อดูดความชื้นพบค่าอัตราการอบแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 0.0063-0.0093 g water/g dry matter·min ในขณะที่ระบบ

อบแห้งแบบลมร้อนพบค่าอัตราการอบแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 0.0074-0.0125 g water/g dry matter·min หรืออาจกล่าวได้ว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนรวมกับวงล้อดูดความชื้นทำให้อัตราการอบแห้งสูงสุดใน การอบแห้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 17-35% ของระบบอบแห้งแบบลมร้อน และเมื่อเปรียบเทียบในด้านของเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่า ระบบอบแห้งแบบลมร้อนรวมกับวงล้อดูดความชื้นใช้เวลาในการอบแห้งมีค่าน้อยกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนเช่นกัน ระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ลดลงถึง 10-23% ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

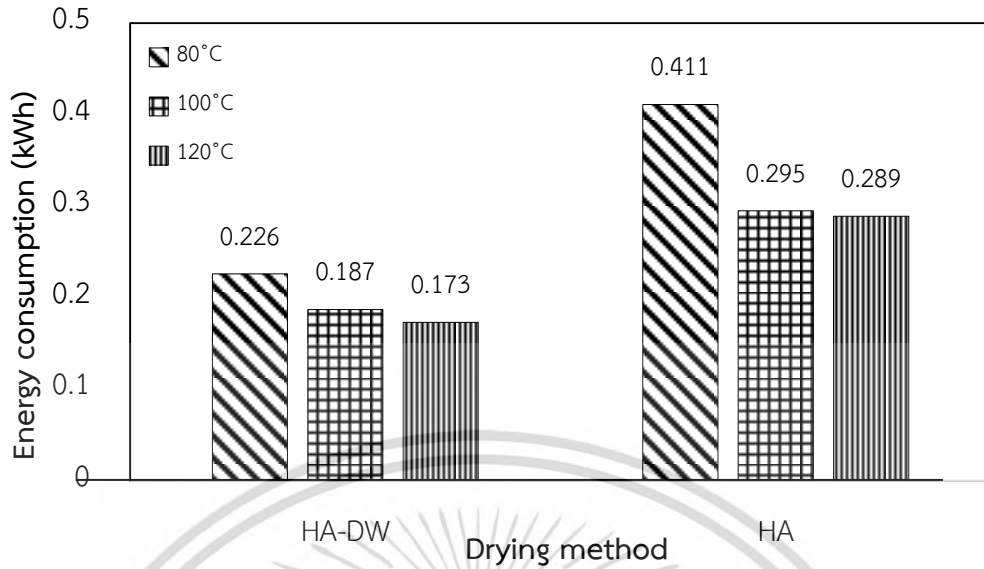
ระบบอบแห้งแบบลมร้อน โดยจากงานวิจัย (Madhiyanon and Adirekrut, 2007) พบว่าการใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นทำให้สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ลดลงถึง 25% ของระบบที่ไม่ใช้วงล้อดูดความชื้น และเมื่อพิจารณาที่อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งจากระบบอบแห้งชนิดเดียวกัน พบว่าที่อุณหภูมิในการอบแห้งสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าอุณหภูมิในการอบแห้งที่ต่ำกว่า โดยที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนคือ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $120 \text{ }^\circ\text{C}$ จะพบอัตราการอบแห้งมีค่าสูงสุดและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดในทั้งสองระบบการอบแห้ง

จากภาพที่ 4.42 และ 4.43 แสดงค่าพลังงานและพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ เมื่อพิจารณาที่ระบบอบแห้งทั้ง 2 ระบบ ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น พบค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกมีค่าต่ำกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนในทุกช่วงอุณหภูมิ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งส่งผลให้ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนให้กับห้องอบแห้งส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง จึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิในห้องอบแห้งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอก โดยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นพบค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งอยู่ในช่วง $0.173\text{-}0.226 \text{ g water/g dry matter}\cdot\text{min}$ ในขณะที่ระบบอบแห้งแบบลมร้อนพบค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งอยู่ในช่วง $0.289\text{-}0.411 \text{ g water/g dry matter}\cdot\text{min}$

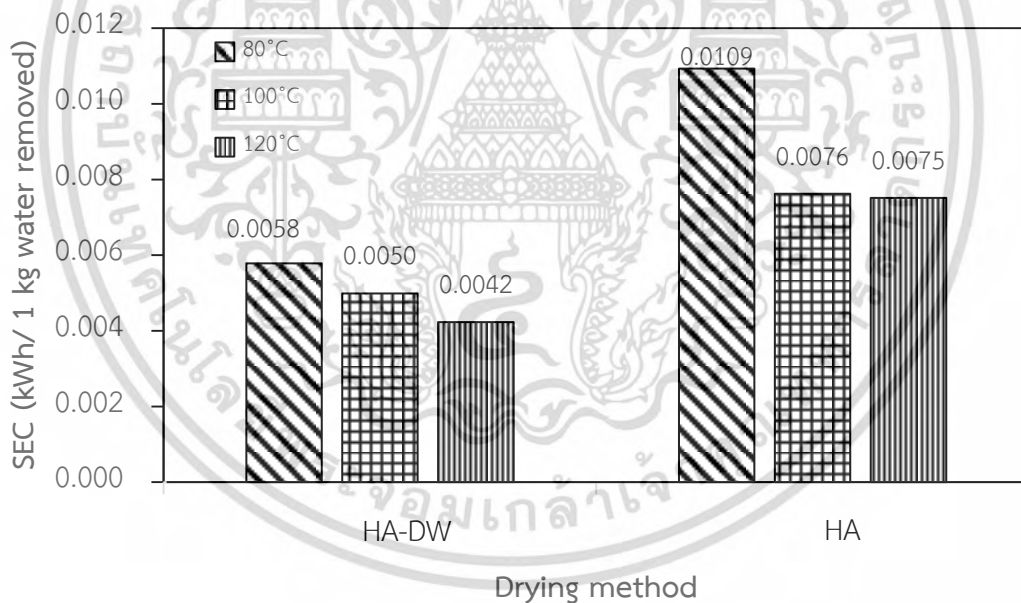
ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติที่อัตราการอบแห้งสูงสุดและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ มีอัตราการไหลของอากาศสวนดูดความชื้นเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$

Treatment	Drying condition		Drying time (min)	Maximum DR (g water/g dry matter min)	Energy consumption (kWh)	SEC (kWh/1 kg water removed)
	Q (m^3/s)	T ($^\circ\text{C}$)				
HA-DW	0.08	80	70	0.0074	0.226	0.0058
		100	50	0.0100	0.187	0.0050
		120	45	0.0125	0.173	0.0042
HA	0.08	80	80	0.0063	0.411	0.0109
		100	65	0.0074	0.295	0.0076
		120	50	0.0093	0.289	0.0075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



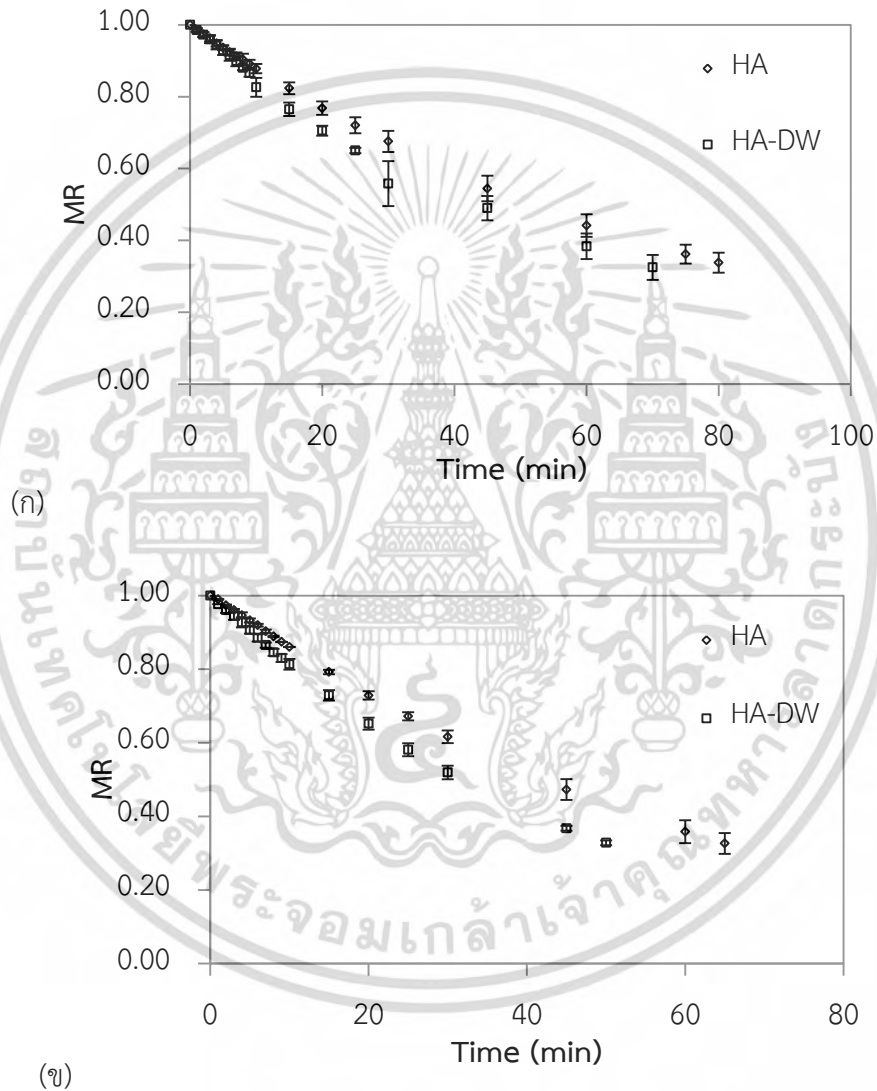
ภาพที่ 4.43 การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอระหว่างระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศสวนดูดความชื้นเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$



ภาพที่ 4.44 การเปรียบเทียบค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอระหว่างระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมี อัตราการไหลของอากาศสวนดูดความชื้นเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$

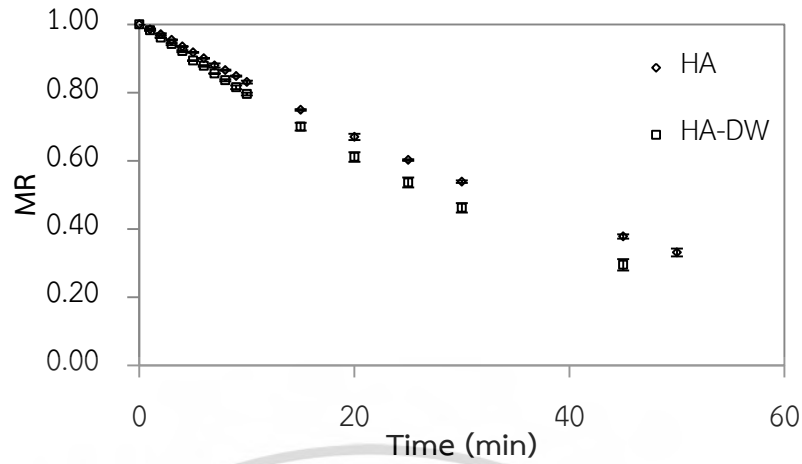
จากภาพที่ 4.44 เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งทั้ง 2 ระบบ คือ ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น และระบบอบแห้งแบบลมร้อนที่อัตราการไหลของอากาศคือ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิในห้องอบแห้งเป็น 80, 100 และ 120°C พบว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นสามารถระเหยน้ำออกจากวัสดุได้ดีกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนในทุกสภาวะการอบแห้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.45 แสดงเส้นโค้งอัตราการอบแห้งของข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น และระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ พบว่า ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกจากทั้งสองระบบอบแห้งจะพบเพียง 2 ช่วงการอบแห้งหลักคือ ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Heating up) และ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate) เท่านั้น ซึ่งระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น จะส่งผลให้อัตราการอบแห้งของข้าวกล้องงอกมีค่าสูงกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนในทุกสภาวะการอบแห้ง



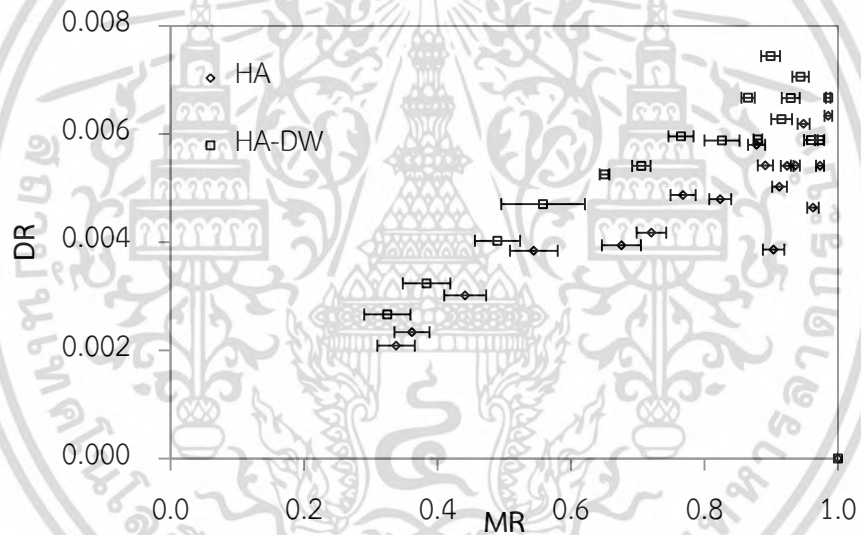
ภาพที่ 4.45 เส้นโค้งการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิลมร้อนอากาศ (ก) 80°C (ข) 100°C และ (ค) 120°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

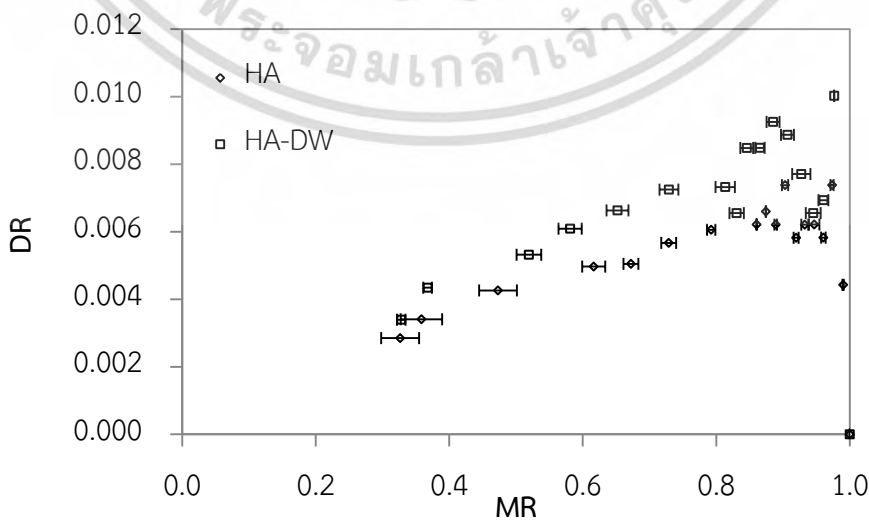


(ค)

ภาพที่ 4.45 (ต่อ) เส้นโค้งการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.08 m³/s และอุณหภูมิลมร้อนอากาศ (ก) 80°C (ข) 100°C และ (ค) 120°C ตามลำดับ

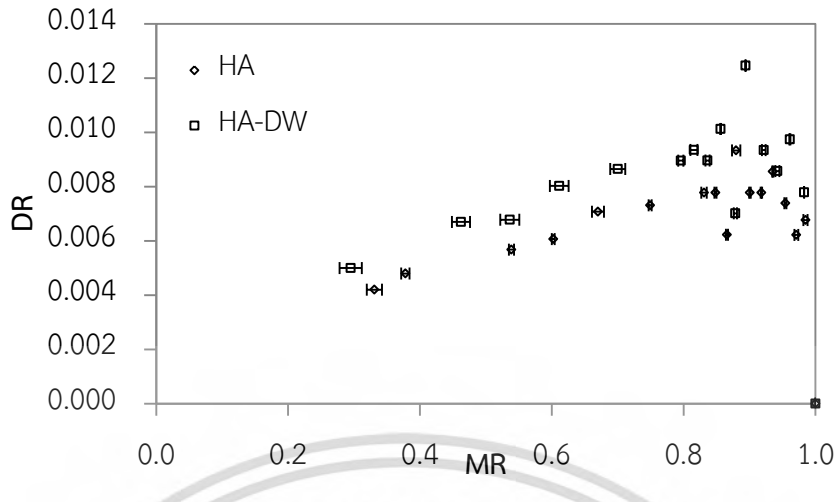


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

ภาพที่ 4.46 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิลมร้อน (ก) 80°C (ข) 100°C และ (ค) 120°C ตามลำดับ

4.3.6.2 การเปรียบเทียบคุณภาพของข้าวกล้องงอก

1) สารกาบา

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นและระบบอบแห้งแบบลมร้อน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.8 และจากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบาศูนย์วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว One-way ANOVA (Duncan's multiple range) ที่ $p < 0.05$ พบว่าค่าปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกในแต่ละสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนคือ ข้าวกล้องงอกทุกตัวอย่างที่ได้จากการอบแห้งแบบต่าง ๆ มีปริมาณสารกาบามากกว่าข้าวกล้องปกติที่ไม่ผ่านการเพาะงอก (ตัวอย่างควบคุม) ซึ่งบ่งชี้ได้ดีถึงคุณค่าทางโภชนาการที่ดีขึ้นของข้าวกล้องงอกเมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกจากวิธีการอบแห้งทั้งสองระบบ ผลการเปรียบเทียบทางสถิติส่วนใหญ่ ไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารกาบาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้ง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกจากอิทธิพลของวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันสำหรับระบบอบแห้งทั้งสองระบบ พบแนวโน้มชัดเจนที่จะพบปริมาณสารกาบาสูงสุดที่การอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ตารางที่ 4.16 ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกที่วิธีการอบแห้งต่าง ๆ

Drying method	Drying condition		Drying time (min)	GABA (mg/100 g)
	Q (m ³ /s)	T (°C)		
HA-DW	0.08	80	70	10.78±0.65 ^d
		100	50	13.88±0.74 ^a
		120	45	13.01±0.16 ^{ab}
HA	0.08	80	80	12.46±0.30 ^{bc}
		100	65	12.72±0.48 ^b
		120	50	11.39±0.34 ^{cd}
Brown rice	-	-	-	1.34±0.04 ^e

2) ความแข็งและความเหนียว

จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.17 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว One-way ANOVA (Duncan's multiple range) พบว่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกในแต่ละสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และจะเห็นได้ว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกทุกตัวอย่างมีความแข็งน้อยกว่าและมีความเหนียวมากกว่าข้าวกล้องปกติหุงสุกที่ไม่ผ่านการเพาะงอก (ตัวอย่างควบคุม) ซึ่งบ่งชี้ได้ดีถึงคุณภาพในการรับประทานที่ดีขึ้นของข้าวกล้องงอกเมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน ผลการเปรียบเทียบทางสถิติส่วนใหญ่ ไม่พบความแตกต่างต่อค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกจากการเปลี่ยนแปลงวิธีการอบแห้งข้าวกล้องงอก

ตารางที่ 4.17 ความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกที่วิธีการอบแห้งต่าง ๆ

Drying method	Drying condition		Hardness (kfg)	Stickiness (kfg)
	Q (m ³ /s)	T (°C)		
HA-DW	0.08	80	108.69±9.52 ^{bc}	12.96±0.07 ^a
		100	113.23±3.75 ^b	10.40±0.24 ^b
		120	105.77±3.49 ^{bc}	13.20±1.16 ^a
HA	0.08	80	110.46±2.94 ^{bc}	12.99±1.13 ^a
		100	104.80±2.91 ^{bc}	13.50±0.77 ^a
		120	103.73±2.91 ^c	12.98±0.74 ^a
Brown rice	-	-	164.70±2.04 ^a	8.66±0.07 ^c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ค่าสีและค่าความขาว

จากผลการวิเคราะห์ค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว One-way ANOVA (Duncan's multiple range) สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.18 โดยพบว่าในแต่ละสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สำหรับค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอก แสดงให้เห็นได้ว่าข้าวกล้องงอกทุกตัวอย่างมีความสว่างและความขาวมากกว่าข้าวกล้องปกติที่ไม่ผ่านการเพาะงอก (ตัวอย่างควบคุม) ซึ่งบ่งชี้ได้ดีถึงลักษณะปรากฏที่ดีขึ้นของข้าวกล้องงอกเมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ และเมื่อทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อค่าความสว่าง ค่าสีแดงกับสีเขียว ค่าสีเหลืองกับสีน้ำเงิน และค่าความขาวของข้าวกล้องงอก ผลการเปรียบเทียบส่วนใหญ่ ไม่พบความแตกต่างจากอิทธิพลของวิธีการอบแห้งข้าวกล้องงอกต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีแดงกับสีเขียว ค่าสีเหลืองกับสีน้ำเงิน และค่าความขาวของข้าวกล้องงอกในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง

ตารางที่ 4.18 ค่าสีและความสว่างของข้าวกล้องงอกที่วิธีการอบแห้งต่างๆ

Drying method	Drying condition		L*	a*	b*	Whiteness (%)
	Q (m ³ /s)	T (°C)				
HA-DW	0.08	80	67.58±0.16 ^{bc}	4.99±0.14 ^{ab}	24.41±0.46 ^b	59.11±0.39 ^b
		100	68.03±0.26 ^{bc}	4.51±0.08 ^c	23.79±0.04 ^c	59.90±0.19 ^{ab}
		120	69.33±1.02 ^a	5.05±0.37 ^a	25.20±0.07 ^a	59.98±0.79 ^{ab}
HA	0.08	80	67.22±0.14 ^c	4.90±0.10 ^{ab}	23.75±0.24 ^c	59.22±0.21 ^{ab}
		100	68.02±0.44 ^{bc}	4.91±0.07 ^{ab}	24.26±0.26 ^b	59.56±0.50 ^{ab}
		120	68.35±0.72 ^b	4.75±0.06 ^{abc}	23.78±0.07 ^c	60.13±0.55 ^a
Brown rice	-	-	62.83±0.54 ^d	4.72±0.05 ^{bc}	24.92±0.18 ^a	55.00±0.52 ^c

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น

5.1.1 สรุปผลการทดลอง

- 1) อัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศ และอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลลดลงตามระยะเวลาที่สัมผัสกับอากาศ และลดลงตามความหนาของชั้นซิลิกาเจล
- 2) อัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของอากาศ และอัตราการไหลของอากาศ ในขณะที่อัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลลดลงตามความหนาของชั้นซิลิกาเจล
- 3) ความดันตกคร่อมของอากาศเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นซิลิกาเจล และอัตราการไหลของอากาศ
- 4) อุณหภูมิอุ่นอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 78.6 %
- 5) สภาวะอากาศที่ไหลผ่านหอดูดความชื้นมาค่าความชื้นสัมพัทธ์ลดลงและมีค่าอุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้นเป็นไปตามกระบวนการอะเดียเบติก
- 6) อากาศร้อนไหลผ่านหอดูดความชื้นมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นและมีค่าอุณหภูมิอากาศลดลงเป็นไปตามกระบวนการอะเดียเบติก
- 7) จากการทดสอบระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น พบว่าความแตกต่างของอัตราส่วนความชื้นของการคายความชื้นของซิลิกาเจล มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความแตกต่างของอัตราส่วนความชื้นของการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถลดปริมาณความชื้นในอากาศลงได้ และระบบสามารถกำจัดความชื้นออกจากซิลิกาเจลได้

5.1.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบกับตัวอย่างอบแห้ง
- 2) ทุกตำแหน่งในระบบที่มีการวัดค่าอุณหภูมิของอากาศควรติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สามารถใช้งานช่วงอุณหภูมิสูงได้

5.2 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวง

5.2.1 สรุปผลการทดลองการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

- 1) การเปรียบเทียบสมบัติการดูดและการคายความชื้นระหว่างซิลิกาเจล และโมเลกุลลาร์ซีฟ ซิลิกาเจลมีสมบัติในการดูดความชื้นต่ำกว่าโมเลกุลลาร์ซีฟ แต่มีสมบัติในการคายความชื้นดีกว่าโมเลกุลลาร์ซีฟมาก จากสภาวะที่ใช้ในการทดลองจึงคัดเลือกซิลิกาเจลสำหรับเป็นสารดูดความชื้นบรรจุในวงล้อดูดความชื้น
- 2) การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ และลดความหนาของชั้นสารดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิลมร้อน และความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลสามารถคายความชื้นได้เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อน และลดความหนาของชั้นสารดูดความชื้น

4) การศึกษาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้น

สมรรถนะในการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น คือ 22.52% ในขณะที่สมรรถนะในการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้น คือ 45.91% และ 60% ที่อุณหภูมิ 50°C และ 60°C ตามลำดับ

5) การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

ในส่วนการดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงจาก 46.3% เป็น 20.4% โดยอากาศร้อนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการอบแห้งจะถูกนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศปกติ ซึ่งส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านวงล้อดูดความชื้นในส่วนการคายความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น 7.5%

5.2.2 ข้อเสนอแนะ

1) จากการทดลองระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ในการดูดความชื้น ระบบอาจมีอากาศภายนอกผสมในระหว่างกระบวนการ ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนภายในระบบ จึงทำให้เส้นกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (A3 ไป A4) ไม่ตรงตามแผนภูมิไซโครเมตริก จึงควรหุ้มฉนวนเครื่องทั้งระบบเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

2) เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์วัดได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ควรใช้เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ที่สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิสูง จึงจะเหมาะสมกับสถานะในการอบแห้งมากกว่า และน่าจะเพิ่มความสามารถในการคายความชื้นสารดูดความชื้นที่อยู่ในวงล้อดูดความชื้นได้

5.3 การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบลดความชื้นในอากาศสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอก

5.3.1 สรุปผลการวิจัย

1) ผลการศึกษาการทำงานของวงล้อและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบ ในสภาวะห้องอบแห้งเปล่า

วงล้อดูดความชื้นสามารถลดความชื้นสัมพัทธ์และอัตราส่วนความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของอากาศจาก 50.2%, 19 g water/kg dry air และ 35.9°C เป็น 33.9%, 16 g water/kg dry air และ 41.1°C ตามลำดับ ตั้งแต่เริ่มให้ระบบลดความชื้นในอากาศทำงานในนาที่แรก และวงล้อสามารถรักษาการทำงานดูดความชื้นในอากาศได้อย่างต่อเนื่องจนถึงนาที่ที่ 30 ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์เป็น 37.9% กระบวนการลดความชื้นในอากาศนั้นแสดงการลดความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของอากาศตรงตามกระบวนการอะเดียแบติก อากาศร้อนที่นำมาใช้คืนสภาพสารดูดความชื้นแสดงการรับความชื้นจากสารดูดความชื้นได้ โดยมีการเปลี่ยนแปลงอากาศจากความชื้นสัมพัทธ์ อัตราส่วนความชื้น และอุณหภูมิ 15.5%, 19 g water/kg dry air และ 60°C เป็น 42.6%, 26 g water/kg dry air และ 44.8°C ตามลำดับ

เมื่อนำระบบวงล้อดูดความชื้นมาใช้ร่วมกับระบบอบแห้ง โดยกำหนดอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านวงล้อดูดความชื้นเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งเป็น 90°C วงล้อดูดความชื้นสามารถลดอัตราส่วนความชื้นในอากาศลงประมาณ $7.5 \text{ g water/kg dry air}$ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนความชื้นที่เพิ่มขึ้น $7.5 \text{ g water/kg dry air}$ ของอากาศที่ผ่านการคืนสภาพสารดูดความชื้น แสดงให้เห็นว่าซิลิกาเจลภายในวงล้อดูดความชื้นสามารถดูดและคายความชื้นออกได้ในเวลาเดียวกันในสัดส่วนที่เท่ากัน

ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นอยู่ในช่วง 44.39-98.49% ขึ้นอยู่กับทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ เมื่ออิงตามทฤษฎีกระบวนการแบบอะเดียแบติก ได้ประสิทธิภาพถึง 98.49% แสดงว่าวงล้อดูดความชื้นนี้มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการลดความชื้นในอากาศ

2) ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อลักษณะการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้ง $0.04\text{-}0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $80\text{-}120^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ให้อัตราการอบแห้งสูงสุด เวลาในการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง $0.0039\text{-}0.0125 \text{ g water/g dry matter-min}$, 45-130 นาที และ $0.173\text{-}0.452 \text{ kWh}$ ตามลำดับ ยิ่งอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งสูง อัตราการอบแห้งยิ่งสูง เวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยิ่งต่ำ ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิอบแห้ง 120°C จึงเป็นสภาวะการอบแห้งที่ดีที่สุด

3) ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อสมบัติของอากาศในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบที่ใช้ในการเริ่มต้นการทดลองอยู่ในช่วง 45-55% เมื่อทำการทดลองอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงอย่างรวดเร็วและค่อนข้างเข้าสู่ค่าคงที่ในนาทีที่ 10 ของกระบวนการอบแห้ง โดยมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 9-15% ตลอดจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ

4) ผลการศึกษาการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบชั้นบางด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. ($MR = a \exp(-kt^n) + bt$) คือ แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถทำนายเส้นโค้งการอบแห้งสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้ง $0.04\text{-}0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $80\text{-}120^\circ\text{C}$ ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจและค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.99298-0.99998 และ 0.00102-0.02061 ตามลำดับ

5) ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในห้องอบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกอยู่ในช่วง 10.78-14.98 mg/100 g ความแข็งและความเหนียวอยู่ในช่วง 75.62-113.23 kgf และ 10.40-13.27 kgf ตามลำดับ ความขาวอยู่ในช่วง 59.04-61.29% อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนมีอิทธิพลต่อปริมาณสารกาบา ความแข็งและความเหนียว และค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น อุณหภูมิอบแห้งสูง 100 และ 120°C และอัตราการไหลของอากาศต่ำ 0.04 m³/s ให้สารกาบาสูงกว่าสภาวะการอบแห้งอื่น ๆ อัตราการไหลของอากาศ 0.04 m³/s ยังส่งผลให้ข้าวกล้องงอกหุงสุกมีความแข็งน้อยกว่าอัตราการไหลของอากาศที่ระดับอื่น ๆ ความขาวของข้าวกล้องงอกมีความแตกต่างกันทางสถิติแต่ไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจนมากนัก

6) ผลการศึกษาการเปรียบเทียบระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ

ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นให้อัตราการอบแห้งสูงสุด เวลาในการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.0074-0.0125 g water/g dry matter-min, 45-70 นาที และ 0.173-0.226 kWh ตามลำดับ ซึ่งดีกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติที่มีค่าเหล่านี้อยู่ในช่วง 0.0063-0.0093g water/g dry matter-min, 50-80 นาที และ 0.289-0.411kWh ตามลำดับ ข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น แบบลมร้อนปกติ และข้าวกล้องงอกมีปริมาณสารกาบาโดยเฉลี่ย คือ 12.56, 12.19 และ 1.34 mg/100 g ตามลำดับ ความแข็งโดยเฉลี่ย คือ 109.23, 106.33 และ 164.70 kgf ตามลำดับ ความเหนียวโดยเฉลี่ย คือ 12.19, 13.16 และ 8.66 kgf ตามลำดับ และความขาวโดยเฉลี่ย คือ 59.66, 59.64 และ 55.00% ตามลำดับ

7) สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบลดความชื้นในอากาศ

ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นให้อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งเป็น 0.08 m³/s และ 120°C ตามลำดับ เป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งข้าวกล้องงอก โดยให้อัตราการอบแห้งสูงสุด 0.0125 g water/g dry matter-min เวลาในการอบแห้งสั้นสุด 45 นาที พลังงานที่ใช้การอบแห้งต่ำสุด 0.173 kWh ปริมาณสารกาบาสูง 13.01 mg/100 g ความแข็ง ความเหนียว และความขาวปานกลาง 105.77 kgf, 13.20 kgf และ 59.98% ตามลำดับ

5.3.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น พบว่าระบบอบแห้งที่ได้ทำการศึกษามีการลดความชื้นในอากาศได้เป็นที่น่าพึงพอใจ ในการศึกษาต่อไปในอนาคตควรมีการศึกษาการอบแห้งที่มีการลดความชื้นในอากาศแบบอื่นเพิ่มเติมด้วยเช่นกัน เช่น ระบบการลดความชื้นในห้องอบแห้งแบบคอลัมน์ เพื่อหาวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดและมีประสิทธิภาพสูงสุดต่อการอบแห้งข้าวกล้องงอก

สำหรับการศึกษาการทำงานของวงล้อดูดความชื้น อาจปรับสภาวะการทดลองในภาพแบบอื่น ๆ เช่น การเพิ่มความหนาของซิลิกาเจล เพื่อให้ได้ผลการทำงานของวงล้อดูดความชื้นที่ดีขึ้น ในการเพิ่มความหนาของซิลิกาเจล ควรมีการปรับขนาดพัฒนาให้มีแรงม้ามากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย

6.1 สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้

6.1.1 ตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ จำนวน 1 เรื่อง

1) Suvanvisan, P., Cheevitsopon, E., and Jongyingcharoen, J. S. 2018. Study on psychrometric properties of air in a hot air drying system combined with a desiccant wheel. Thai Society of Agricultural Engineering Journal, 24, 6-12.

6.1.2 การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 2 เรื่อง

1) Suvanvisan, P., Cheevitsopon, E., and Jongyingcharoen, J. S. 2017. Thin-layer drying model for dehumidified hot air drying of germinated brown rice, pp. 9. In The 18th TSAE National Conference and the 10th TSAE International Conference. Bangkok, Thailand.

2) Sawardsuk, P., Cheevitsopon, E., Jongyingcharoen, J.S. 2018. Experimental investigation of air characteristics during dehumidification in the multilayer desiccant bed column system, In The 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology. Phuket, Thailand.

เอกสารอ้างอิง

- AIR XCHANG E.Silica gel Desiccant, [Online], Available: <http://www.airxchange.com/resource-center-application-design.htm>.2016
- AOAC. Official Methods of Analysis. Ed 18th. Washington DC : Association of Official Analytical Chemists Methods of Analysis, Inc 2005.
- Chang, K.S., Wang, H.C., & T.W. Chung. (2004). Effect of regeneration conditions on the adsorption dehumidification process in packed silica gel beds. *Applied Thermal Engineering*, 24, 735-742.
- Dina S.F., Ambarita H., Napitupulu F.H. and Kawai H. “Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol.5, 2015. pp.32–40.
- Food Network Solution.การทำแห้งชาสมุนไพรด้วยเครื่องอบลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดความชื้น, [Online], Available http://www.foodnetworksolution.com/news_and_articles/article/0246/การทำแห้งชาสมุนไพรด้วยลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดซับความชื้น/.2016
- Giri S.K. and Prasad S. “Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave vacuum and convective-hot air-dried mushrooms” *Journal of Food Engineering*, vol.78, 2007. pp.512–521.
- H2OUT FOREVER, [Online], Available : <https://h2outforever.wordpress.com/7-faq/>.2016
- Ismail, M.Z., Angus, D.F. & G.R. Thorpe. (1991). The performance of a solar-regenerated open-cycle desiccant bed grain cooling system. *Solar Energy*, volume 46, 63-70.
- Jones A.Z. "What is an Isothermal Process in Physics?." [Online] . Available : <https://www.thoughtco.com/isothermal-process-2698986>. 2017
- Jones A.Z. "Thermodynamics: Adiabatic Process." [Online]. Available: <https://www.thoughtco.com/adiabatic-process-2698961>. 2017
- Jongyingcharoen J.S. and Cheevitsopon E. “Development of UV-treated cooked germinated brown rice and effect of UV-C treatment on its storability, GABA content, and quality.” *LWT - Food Science and Technology*, vol.71, 2016. pp.243-248.
- Kaosa-ard, T. and Songsermpong, S. “Influence of germination time on the GABA content and

- physical properties of germinated brown rice.” *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, vol.5, 2012. pp.270-283.
- Kiatsiroat, T. & W., Tachajapong. (2002). Analysis of a heat pump with solid desiccant tube bank. *Energy Research*, volume 26, 527-542.
- Liao W.C., Wang C.Y., Shyu Y.T. and Yu R.C. “Influence of pre-processing methods and fermentation of adzuki beans on gamma-aminobutyric acid (GABA) accumulation by lactic acid bacteria.” *Journal of Functional Foods*, vol.5, 2013. pp.1108-1115.
- M. MadhavaNaidu , M. Vedashree , PankajSatapathy , HafeezaKhanum, Ravi Ramsamy and H. UmeshHebbar.(2015). Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethumgraveolens*) greens, *Food Chemistry*, 192,pp. 849–856
- Madhiyanon T., Adirekrut S., Sathitruangsak P. and Soponronnarit S. “Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies” *Chemical Engineering and Processing*, vol.46, 2007. pp.282–290
- Mandegari M.A. and Pahlavanzadeh H. “Introduction of a new definition for effectiveness of desiccant wheels.” *Journal of Chemical Engineering*, vol.34, 2009. pp.797–803.
- Ming, F.Y., Zhang, H.J., & Chang, T.P. (1994). Agricultural application of drying technology. *ASEAN Conference on Energy Technology*.
- Misha S., Mat S., Ruslan M.H. and Sopian K. “Review of solid/liquid desiccant in the drying application and its regeneration methods.” *Journal of renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.16, 2012. pp.4686–4707.
- Miura D, Ito Y., Mizukuchi A., Kise M., Aoto H. and Yagasaki K.. “ Hypocholesterolemic action of pre-germinated brown rice in hepatoma-bearing rats.” *Journal of Life Science*, vol.76, 2006. pp.259-264.
- Naidu M.M., Vedashree M., Satapathy P., Khanum H., Ramsamy R., and Hebbar H.U. “Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethum graveolens*) greens” *Journal of Food Chemistry*, vol.192, 2016. pp.849–856.
- Oh S.H, Soh J.R. and Cha Y.S. “Germinated brown rice extract shows a nutraceutical effect in the recovery of chronic alcohol-related symptoms.” *Journal of Medicinal Food*, vol.6, 2003. pp.115-121

POWER DRY. ข้อมูลผลิตภัณฑ์ : ซิลิกาเจล (Silica gel) , [Online], Available: <http://>

www.powerdry.co.th/giggs_products_silica_gel_th.php/.2016

S. Misha, S.Mat, M.H.Ruslan, K.Sopian.(2012). Review of solid/liquid desiccant in the drying

applications and its regeneration methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, September2012, pp. 4686–4707.

Seiki T., Nagase R., Torimitsu M., Yanagi M., Ito Y., Kise M., Mizukuchi A., Fujimura N ,Hayamizu K. and Ariga T. “ Insoluble fiber is a major constituent responsible for lowering the post-prandial blood glucose concentration in the pre-germinated brown rice.” *Journal of Biological and Pharmaceutical Bulletin*, vol.28, 2005. pp.1539-1541.

Singh, S. & P.P., Singh. (1998). Regeneration of silica gel in multi-shelf regenerator. *Renewable Energy*, volume 13. 105-119.

Sripinyowanich J. and Noomhorm A. “A new model and quality of unfrozen and frozen cooked rice dried in a microwave vibro-fluidized bed dryer.” *Drying Technology*, vol.29, 2011. pp.735-748

Stonecypher L. "Psychrometric Chart Use." [Online]. Available : http://www.brightubengineering.com/hvac/4_1_2_6_2_what-is-psychrometric-chart-components-of-psychrometric-chart/. 2017

Tea institute Mae Fah Luang University. “GABA IN TEA” [Online]. Available : <http://www.teainstitutemfu.com/document/GABATea.pdf>. 2017

ThanidMadhiyanon, SermpongAdirekrut, PrasanSathitruangsak, Somchart Soponronnarit. (2007). Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 46, April2007, pp. 282–290.

Thanimkarn S. and Jongyingcharoen J.S. "Thin-layer drying characteristics of *Cissus Quadrangularis* Linn. and selection of suitable drying models". The TSAE international conference , vol.7, 2 – 4 April 2014.

Thoruwa, T.F.N., Smith, J.E., Grant, A.D.,& Johnstone, C.M. (1996). Developments in solar drying

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

using forced ventilation and solar regenerated desiccant materials. *Appropriate Technology Centre*.

Yadollahinia A.R., Omid, M. and Rafiee S. "Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products" *International Journal of Agriculture and Biology*, vol.10, 2008. pp.61-65.

กรณีการ์ ห้วยแสน, จิระพันธ์ ห้วยแสน, ชาญณรงค์ ชมนาวัง, หนูเดือน สารบุตร และพัฒนา ฟิ่งพันธุ์. "วิธีการเตรียมและการอบแห้งต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวฮางงอกจากข้าวพันธุ์ขาวดอก105" วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5, ปีที่5, 2556. หน้า 376-383.

กระทรวงพลังงาน. การลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นเหลว, [Online], Available: http://www2.dede.go.th/km_berc/downloads/menu4/เทคโนโลยี/โรงงาน/05%20การลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นเหลว.pdf/.2016

กระทรวงพลังงาน. การอบแห้งและลดความชื้นในอุตสาหกรรม, [Online], Available:

www2.dede.go.th/bhrd/.../Bay18%20Desiccant%20Dehumidification.pdf/.2017

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "การอบแห้งและลดความชื้นในอุตสาหกรรม." [Online]. Available: [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial\(PDF\)/Bay18%20Desiccant%20Dehumidification.pdf.2017](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial(PDF)/Bay18%20Desiccant%20Dehumidification.pdf.2017)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "คู่มือฝึกอบรม การประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน" [Online]. Available : http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_hanbook/M_T_Building/assen_latency_Handbook.pdf.2017

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "เครื่องลดความชื้นแบบใช้สารดูดความชื้น." [Online]. Available : http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/swf_ind33/33_thai.swf.2560

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2553). บทที่ 6 การนำความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่. *คู่มือรับผิดชอบ(ด้านพลังงานโรงงาน)*.

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. "คุณสมบัติไซโครเมตริกของอากาศ." [Online]. Available : http://mte.kmutt.ac.th/elearning/refrigeration_and_airconditioning/elearning/lesson1.html.2017

คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน. "อุณหพลศาสตร์ Thermodynamics." [Online]. Available : <http://chem.flas.kps.ku.ac.th/SLIDE/SLIDE-01403111-CH09-THERMODYNAMICS.pdf.2017>

จิรวัดน์ ลักษณะม้าย, ไตรรงค์ มูลขารี และศิริมาศ โทหารรัตน์. "การผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุกปลอดเชื้อด้วยรังสีเอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

- อัตร้าโอเลต.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556
- จุฑามาส ภควัตบิรริภักษ.การวิเคราะห์สมรรถนะปั้มความร้อนทำงานร่วมกับสารดูดความชื้นชนิดแข็งในกระบวนการอบแห้ง, [Online], Available http://www.phtnet.org/research/view-abstract.asp?research_id=ag090/.2015
- ชนากานต์ คำมี, สุภาพร ปานแก้ว ,จุฬาลักษณ์ วิใจยา, พิมพาพรรณ ปฎิมา, จิตรราภัทรณ์ กัณธพงษ์ และ นพพล เล็กสวัสดิ์. "กรดแอมิโนบิวทริกในข้าวกล้องงอกมบืทบาทในการบำรุงระบบประสาทได้ จริงหรือ." [Online]. Available: <http://www.agro.cmu.ac.th/absc /data/57/57-015.pdf>. 2017
- ชาติรี เกียรติจรูญศิริ, สุตาภรณ์ ฉิ่งลู่, พรรณจิรา ทิศาวิภาต และบัณฑิต ลิ้มมีโชคชัย. "การลดภาระการทำคามเย็นของระบบปรับอากาศโดยใช้สารดูดความชื้น เพื่อการประหยัดพลังงาน ."วารสารวิจัยพลังงาน, ปีที่ 7, ฉบับที่ 1, 2553. หน้า 25-43
- ชาญวิทย์ รัตนราศรี. “ข้าวกล้องงอก กาบาริไซ (GABA-rice)นวัตกรรมผลิตภัณฑ์ข้าวไทยในตลาดโลก” [Online]. Available : <http://www.nia.or.th /innolinks /200701/ innovtrend.htm>. 2017
- เชียงใหม่แอร์แคร์ เอ็นจิเนียริง. "แผนภาพไซโครเมตริกมีประโยชน์อย่างไร." [Online]. Available : <http://www.chiangmaiaircare.com/แผนภาพไซโครเมตริกมีประโยชน์อย่างไร/>. 2017
- ชอบธรรม. "คู่มือการใช้ ซิลิกา เจล (วัตถุดูดความชื้น)." [Online]. Available :http://www.chobtham.com/attachments/view/?attach_id=24728. 2017
- ตรีรัตน์ เจียมรัตนประทีป, รัตนภรณ์ วัชรพลสกุล และลดารัตน์ บัวเพชร. (2553). *การลดความชื้นในอากาศด้วยตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธนพลวานิช. " สารดูดความชื้นมีอะไรบ้าง?." [Online]. Available : http://www .tanapolvanich .com/dry-bag/html /Type_of_Desiccant_Packaging _th.htm. 2017
- ธวัชชัย จอมใจ, อภิชัย จิตอารีรัตน์, เอกพงศ์ เดชกล้าหาญ และธานีตย์ เมธิยานนท์. (มปป). *การศึกษาความเป็นไปได้ในการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- บัณฑิต กฤตาคม, ปฎิวัติ วรามิตร, นันทวัฒน์ วีระยุทธ, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และโสภณ สิ้นสร้าง. "แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน” [Online]. Available :<http://web.eng.ubu.ac.th/~seminar/research/Journal/Publication%20vol% 206.1.2556 /1.Paper% 20No.1.pdf>. 2017
- บุษยา รัตนสุภา. “ข้าวกล้องงอก” [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com /varticle /39050>. 2017
- บริษัทธนพลวานิช. สารดูดความชื้นมีอะไรบ้าง, [Online], Available: <http://www.>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

tanapolvanich.com/dry-bag/html/Type_of_Desiccant_Packaging_th.htm.accessed date:

18 กุมภาพันธ์ 2559

ประทีป ไคว่นฤมิตร. การศึกษาสมรรถนะการควบคุมความชื้นโดยซิลิกาเจลสำหรับระบบการ

อบแห้ง, [Online], Available: <http://www.thaithesis.org/detail.php?id=920/> .2015

ประสิทธิ์ เกี้ยวสุนทร. (2555). *การศึกษาและออกแบบอีโคโนไมเซอร์โดยใช้ความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำ*.

กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทีมงานครอบครัวครุบ้านนอกดอทคอม. "น้ำข้าวกล็องงอก ของดีทำง่าย" [Online]. Available

: <http://www.kroobannok.com/article-4561-น้ำข้าวกล็องงอก-ของดีทำง่าย-.html>. 2017

เทวีภา กิรติบุรณะ และวรนุช ศรีเจษฎารักษ์. "ผลของการอบแห้งแบบลาดของข้าวกล็องงอกขาวดอกมะลิ 105

งอกต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ" วารสารวิจัยมหาวิทยาลัย ขอนแก่น, ปีที่12, 2554. หน้า 729-734.

เทคโนโลยีชาวบ้าน. "กลิ่นหอมละมุน เปี่ยมคุณค่า ของข้าวพันธุ์พื้นเมืองจากภูมิปัญญาไทย" [Online].

Available: http://siweb.dss.go.th/QA/search/search_description.asp?QA_ID=980.

2017

ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. นิธิยา รัตนานนท์. Drying rate /

อัตราการทำให้แห้ง Drying rate / อัตราการทำให้แห้ง, [Online], Available:

<http://www.fao.org/docrep/X5036E/x5036E0x.htm>. 2015

พิชิต สอนทวย, วิโรจน์ ไช้มุขเลิศฤทธิ์ และฤทธิชัย อัครราชันย์. "จลนพลศาสตร์การอบแห้งขม้นชั้นด้วยคลื่น

ไมโครเวฟ" การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจล., ปีที่ 2, ฉบับที่2, สิงหาคม 2556. หน้า 37-44

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. "Gamma aminobutyric acid / GABA" [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1269/gamma-aminobutyric-acid-gaba>. 2017

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, เกียรติคุณ รัตนานนท์ และนิธิยา รัตนานนท์. "Drying rate / อัตราการทำให้แห้ง

Drying rate / อัตราการทำให้แห้ง." [Online]. Available : <http://www.fao.org/docrep/X5036E/x5036E0x.htm>. 2017

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนานนท์ และสมศรี รักแม่. " Psychrometric chart / แผนภูมิไซโคร

เมตริก." [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0573/psychrometric-chart-%>. 2017

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนานนท์ และสมศรี รักแม่. " Psychrometric chart / แผนภูมิไซโคร

เมตริก." [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0573/psychrometric-chart-%>. 2017

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนานนท์ และสมศรี รักแม่. " Psychrometric chart / แผนภูมิไซโคร

เมตริก." [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0573/psychrometric-chart-%>. 2017

พุดฉันทน์ จารุวัฒน์, พิมพ์ วุฒิสินธ์, ชุติศักดิ์ ชีวประดิษฐ์ และยงยุทธ คงชาน. (2551). *ศึกษาวิจัยเครื่องอบแห้ง*

ลำไยแบบต่อเนื่อง. กรุงเทพมหานคร: กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว, สถาบันวิจัยเกษตร

วิศวกรรม, กรมวิชาการเกษตร.

เพาเวอร์ ดราย. "ซิลิกา เจล (Silica Gel)." [Online]. Available: http://www.powerdry.co.th/giggs_products_silica_gel_th.php. 2017

เพาเวอร์ ดราย. "ซิลิกา เจล (Silica Gel)." [Online]. Available: http://www.powerdry.co.th/giggs_products_silica_gel_th.php. 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพาเวอร์ ทราย. "สารดูดความชื้นที่องค์การอาหารและยาประเทศไทยรับรอง (Thailand FDA)." [Online]. Available : http://www.powerdry.co.th/index_th.php.

วรัมพร วงศ์สุทิน, พัทธภรณ์ รัตนธรรม, ณิชฎา เลาทกุลจิตต์ และ อรพิน เกิดชูชื่น. "การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารสำคัญในข้าวกล้องงอก" [Online]. Available: <http://www.crdc.kmutt.ac.th/Data%202012/CRDC6/data/553-556.pdf>. 2017

วิชรียา วงษาหาญ, .คณิต วิชิตพันธ์ และสุกานดา วิชิตพันธ์. "การผลิตไส้กรอกอกसानเสริมแกมมาอะมิโนบิวทีริกแอสิด (ภาษา)โดยใช้เชื้อบริสุทธิ์" [Online]. Available : <http://gsbooks.gs.kku.ac.th/58/the34th%20pdf/BMP22.pdf>. 2017

วรรณิ อุไพบุรณ. การรักษาคุณภาพสินค้าด้วยสารดูดความชื้น, [Online], Available: http://siweb.dss.go.th/dss_doc/fulltext/radio/T53.pdf/.2016

วิเชียร ดวงสีเสน, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, และวีรชัย อาจหาญ. (2555). *การศึกษาการอบแห้งจากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน*. นครราชสีมา: คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วิรัชพัชร อินยาวิเลิศ. "ข้าวกล้องงอก" [Online]. Available : <https://beerlly.wordpress.com/2012/05/26/> . 2017

วิบูลย์ เทเพนทร์. การวัดความชื้นเมล็ดพืช, [Online], Available: <http://www.doa.go.th/aeri/files/KM/moisture%202.pdf> 2015

เว็ลด์ เคมีคอล ฟาร์อีสท์. "ซิลิกาเจล." [Online]. Available : <http://www.worldchemical.co.th/th/product-detail-21-ซิลิกาเจล.html>. 2017

สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. "ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamics systems)." [Online]. Available : http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-physics2/lesson10_1.html. 2017

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. "ข้าวกล้องงอกทำง่ายได้ประโยชน์สูง" [Online]. Available : http://www.ird.rmutt.ac.th/?wpfb_dl=520. 2017

รตินันท์ เหลือมพล. "สมการอบแห้งแบบชั้นบางของแครอทโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับป้มความร้อน." [Online]. Available : <http://ojs.kmutnb.ac.th/files/journals/7/articles/1044/submission/editor/1044-2580-1-ED.pdf>. 2017

สุกัญญา แซ่เตียว. "อิทธิพลของการทำแห้งต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและคุณภาพของข้าวหอมนิลทางงอก." วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2559.

สมชาติ โสภณธฤทธิ์. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืช และอาหารบางประเภท (ครั้งที่ 7)*. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมชาย กลัดสุข. "การประเมินสมบัติเชิงความแข็งของข้าวในโรงงานปรับปรุงคุณภาพข้าว โดยใช้เนียร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

- อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556
- สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร. “GABA สารอาหารมหัศจรรย์ในเมล็ดข้าว” [Online]. Available : [http://actech.agritech.doae.go.th/techno/other/GABA% 20.pdf](http://actech.agritech.doae.go.th/techno/other/GABA%20.pdf). 2017
- ศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี. “ข้าวกล้องงอก (Gaba Rice)” [Online]. Available : http://www.recovery.ac.th/article/gaba_rice.htm. 2017
- หน่วยส่งเสริมและพัฒนาสหกรณ์ สำนักงานสหกรณ์จังหวัดปทุมธานี. "การลดความข้าวเปลือก." [Online]. Available : [http://webhost.cpd.go.th/plancpd/download/KM _province/14/pratumtani.pdf](http://webhost.cpd.go.th/plancpd/download/KM_province/14/pratumtani.pdf). 2017
- อดิพงษ์ นันทพันธุ์, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และณัฐวุฒิ ดุษฎี. (2005). การทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย. *วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร*, 13, 25-36.
- อินทาวุธ สรรพสวัสดิ์, กรุณาพร ปานวรรณ, ชุตติกา เกียรติเรืองไกร และสายวรุฬ ชัยวานิชศิริ “ผลของวิธีการหุงต่อปริมาณกรดแกมมาอะมิโนบิวทีริก (กาบา) และสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก” *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, ตุลาคม 2557 - กันยายน 2558. หน้า 31-41



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

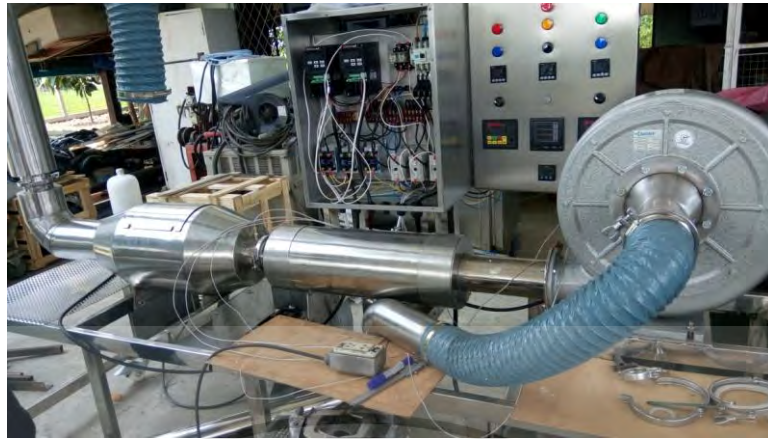
ภาคผนวก ก

ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น



ภาพที่ ก.1 วงล้อดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.2 เครื่องเป่าลมร้อนตัวที่ 1



ภาพที่ ก.3 เครื่องทำความร้อน 1



ภาพที่ ก.4 ห้องอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.5 เครื่องเป่าลมร้อนตัวที่ 2



ภาพที่ ก.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.7 เครื่องทำความร้อน 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
เอกสารผลผลิต

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (2561), 6-12



วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

บทความวิจัย

ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (2561) 6-12

ISSN 1685-408X

Available online at www.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ

Study on psychrometric properties of air in a hot air drying system combined with a desiccant wheel

Palida Suvanvisan¹, Ekkapong Cheevitsopon², Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen^{1*}

¹Curriculum of Agricultural Engineering, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

²Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

*Corresponding author. Tel: +66-2329-8337, Fax: +66-2329-8336, E-mail: jiraporn.jo@kmitl.ac.th

Abstract

A hot air drying system combined with a desiccant wheel (HA-DW) was developed in this study to provide dehumidified air in the system. The rotary desiccant wheel (DW) with silica gel could reduce humidity of fresh air as shown by its lower relative humidity (RH) and humidity ratio of 33.9% and 16 g water/kg dry air, respectively. The RH and humidity ratio of regenerative air at the temperature of 60°C exiting the DW were increased from 15.5% to 42.6% and from 19 g water/kg dry air to 26 g water/kg dry air, respectively. In the HA-DW system with a given drying temperature of 90°C, the RH of 42.6% (17.5 g water/kg dry air) at the inlet decreased to 9% (7.5 g water/kg dry air) at the outlet of the DW during dehumidification. In the section of DW regeneration, the RH increased by 13.8% (7.5 g water/kg dry air added) after passing through the DW. The HA-DW system was proved to provide this drying system with lower humidity following the theoretical dehumidification and regeneration process in a psychrometric chart.

Keywords: Desiccant wheel, Hot air drying, Desiccant, Silica gel, Psychrometric properties

1 Introduction

Using a dehumidification process in hot air drying is advantageous for improvement of drying characteristics and dried product quality. Low RH which promotes the efficient water removal could be observed in this drying system. Naidu et al. (2016) has shown that lightness, greenness, and yellowness of dill greens dried by low humidity hot air were higher than those of the samples dried by hot air. The low humidity air drying of dill greens (50°C, 28-30%RH) also contributed to its higher anti-oxidant activity as compared to conventional hot air drying at the same temperature (50°C, 58-63%RH).

A rotary DW is one of the most promising dehumidification of air conditioning system. It could be incorporated into a hot air drying system as an alternative way of drying. Regarding to process development, desiccant dehumidification system may offer several advantages such as low initial costs, environmental friendliness, and energy saving (Madhiyanon et al, 2007).

Therefore, this study was focused on development of a HA-DW system and determination of psychrometric properties of air in the system.

2 Materials and Methods

2.1 A hot air drying system with a DW

Figure 1 shows the experimental set-up of the HA-DW system. This system is composed of three main components including a rotary DW, a dryer, and an air-to-air heat exchanger.

The rotary DW with silica gel (desiccant material) was equipped with a hot air drying system. The stainless steel DW was 700 mm diameter x 50 mm thickness. It was divided into two equal sections, i.e. adsorption and regeneration sections. These sections were run simultaneously by means of continuous rotation between the ambient humid air through the adsorption section and the heated regenerative air through the regeneration section. It was driven by a motor (RS Motor Industry, Taiwan) at 0.5 rpm.

Thai Society of Agricultural Engineering Journal Vol. 24 No. 1 (2018), 6-12

The cylindrical drying chamber was 200 mm inner diameter x 300 mm length. The blowers (1 HP, MA40B, EuroVent, Thailand) were used to supply air for drying and regeneration, respectively. The air was heated to required temperatures by 3.74-kW electrical heaters (Technology Instruments, Thailand).

The heat exchanger was made of aluminium with a heat exchanging area of 50 m². It was designed to transfer receive the inlet heated air from the drying unit and exchange the heat to the inlet ambient air for regenerating the DW.

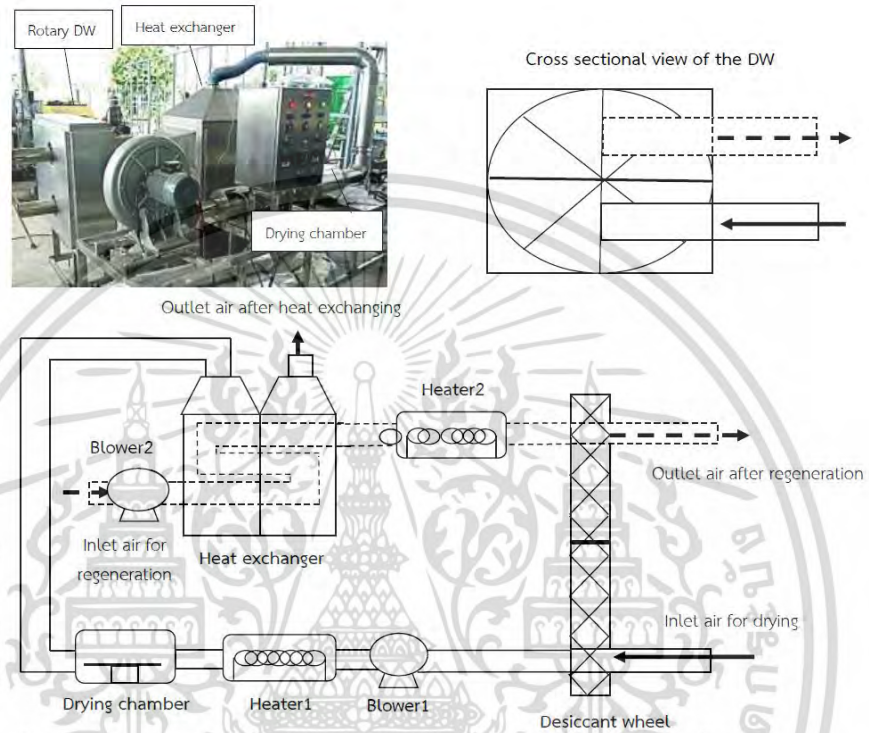


Figure 1 A schematic diagram of a HA-DW system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Performance of a DW dehumidification system

2.2.1 Dehumidification process

Figure 2 shows the schematic diagram of the dehumidification process unit. The DW contained 3-kg fresh silica gel with the thickness of 1 cm. The ambient humid air (daytime, 35.9°C, 50.2%RH and 19 g water/kg dry air) passed through the DW at the flow rate of 0.04 m³/s (0.044 kg dry air/s). During the process, a temperature/ hygrometer (KT320, Kimo, France) was used to measure RH and temperature of the processed air. The experiment was conducted for 30 min with the measuring intervals of every 1 min for the first 10 min and every 5 min for the last 20 min.

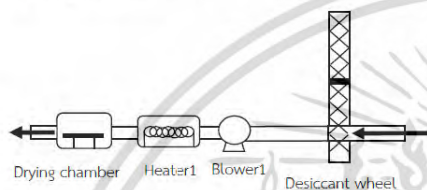


Figure 2 A schematic diagram of the dehumidification process unit.

2.2.2 Regeneration process

Figure 3 shows the schematic diagram of the regeneration process unit. The silica gel inside the DW was allowed to absorb moisture at the ambient condition for 5 hrs until it became pink prior to experiment. The heated air with the temperatures of 60°C and the flow rate of 0.04 m³/s (0.041 kg dry air/s) was used to regenerate the silica gel. The air supplied in this process was heated up by a supplement heater 2. The RH and temperature of this process were measured at the same intervals as stated in 2.2.1

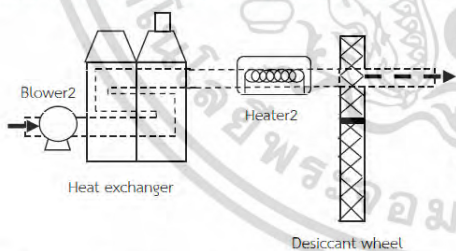


Figure 3 A schematic diagram of the regeneration process unit.

2.3 Psychrometric properties of air in a hot air drying system with a DW

Figure 4 shows the schematic diagram of a HA-DW system. There are two simultaneous process including the dehumidification process (line A) and the regeneration process (line B). In the dehumidification process, the ambient air was introduced to the process at A1, reduced its moisture by the DW, heated by the heater, used for drying, and then passed through the heat exchanger for exchanging its heat with the ambient air from line B. In the regeneration process, the ambient air was inlitted at B1, increased it temperature using the heat exchanger and passed through the DW for regenerating the silica gel. The heater 2 was closed during this experiment. The experiment was conducted at the temperature in a drying chamber of 90°C and the flow rate of 0.04 m³/s for both lines (0.044 kg dry air/s for line A and 0.040 kg dry air/s for line B). During the process, the RH and temperature of this process were measured at every 5 min for 30 min.

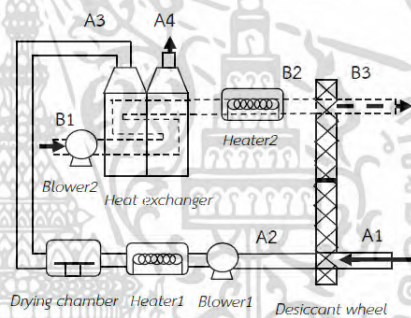


Figure 4 A schematic diagram of a HA-DW system with points of air condition assessment.

2.4 Desiccant wheel effectiveness

Effectiveness of the DW was determined using four equations, which were introduced by Mandegari and Pahlavanzadeh (2009). The DW effectiveness could be defined in terms of heat and mass transfer processes. The first equation is considered as thermal effectiveness as follows:

$$\epsilon = \frac{T_{A2} - T_{A1}}{T_{B2} - T_{A1}} \quad (1)$$

where T_{A1} , T_{A2} and T_{B2} are inlet and outlet dehumidification process air and inlet regenerative air temperature, respectively.

Assuming DW as a heat exchanger, the DW effectiveness could be derived from the heat exchanger effectiveness as given by Eq. (2):

$$\epsilon = \frac{(w_{A1}-w_{A2}) h_{fg}}{h_{B2}-h_{B1}} \quad (2)$$

where w and h are the specific humidity and the vaporization latent heat of water, respectively.

Based on the ideal dehumidification of DW in which the air is completely dehumidified and the humidity ratio of the outlet air of DW ($w_{A2,ideal}$) is zero, the expression of DW effectiveness could be:

$$\epsilon = \frac{w_{A1}-w_{A2}}{w_{A1}-w_{A2,ideal}} \quad (3)$$

where w_{A1} and w_{A2} was the specific humidity of the inlet and outlet air of DW.

As the theoretical operation of DW would be adiabatic, the following equation expresses the DW effectiveness with respect to the enthalpy deviation from the adiabatic condition, in which the effectiveness value reaches to 100% (Figure 5).

$$\epsilon = 1 - \frac{(h_{A2} - h_{A1})}{h_{A1}} \quad (4)$$

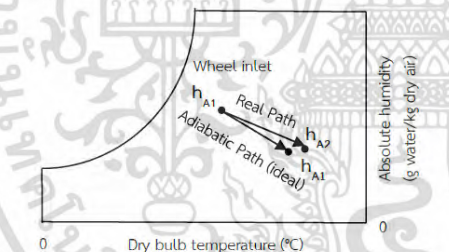


Figure 5 Adiabatic and real DW processes on psychrometric chart. (Modified from Mandegari and Pahlavanzadeh, 2009).

During the dehumidification process, DW could reduce RH and humidity ratio from 50.2% and 19 g water/kg dry air to 33.9% and 16 g water/kg dry air after running the process for 1 min, respectively. The temperature dramatically rose about 5% from 35.9°C to 41.1°C for the first 1-min process as well. As can be seen in Figure 6, the experimental dehumidification process aligned well with the theoretical adiabatic dehumidification process.

Figure 7 shows the relationship of RH and temperature of DW outlet air with dehumidification time. It was found that the RH tended to reduce throughout the process. The RH was decreased by 16% approximately after running the process for only first min, which was correspondent to the reduction of humidity ratio by 3 g water/kg dry air. The RH was slightly increased and its value was 37.9% at 30 min, which was reduced by about 12% from the ambient RH of 50.2%. It is obvious that the DW successfully dehumidified air condition in the system. These results were agreed with Dina et al. (2015). They reported that solar drying with desiccant thermal energy storage, which provided lower humidity inside the drying chamber and hence contributed to decrease in drying time. However, the temperature tended to be stable for the whole process operation. After 30 min, the temperature was 40.3°C, which was increased by about 4.4% from the ambient temperature.

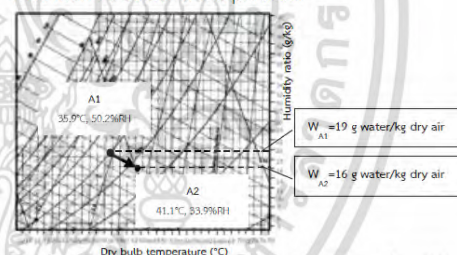


Figure 6 A psychrometric process of DW dehumidification.

3 Results and discussion

3.1 Performance of a DW dehumidification system

3.1.1 Dehumidification process

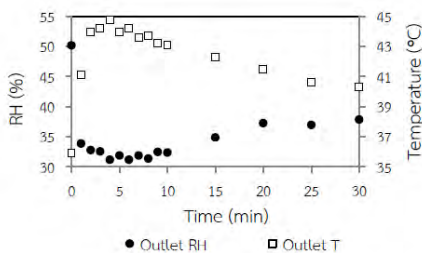


Figure 7 Relationship of RH and temperature at the outlet of the DW with adsorption time

3.1.2 Regeneration process

The psychrometric process of DW regeneration is shown in Figure 8. The changes of RH and temperature of DW outlet air during the regeneration process at 60°C are presented in Figure 9. An increase in RH of about 27% was observed when regenerating the silica gel for first 1 min from hot air of 60°C (15.5% and 19 g water/kg dry air). At this time, the corresponding humidity ratio was 7 g water/kg dry air for exiting DW of 42.6% (26 g water/kg dry air). After 30-min operation, the RH was 19%, which was increased by about 3.5% from the ambient RH (51.7%). It is obvious that the DW could be regenerated under this regeneration condition.

As expected, the temperature decreased by about 15% from 60°C to 44.8°C after regeneration the DW for first 1 min. After 30 min, the temperature of the outlet air was almost equal to that of the heated air supplied to the DW.

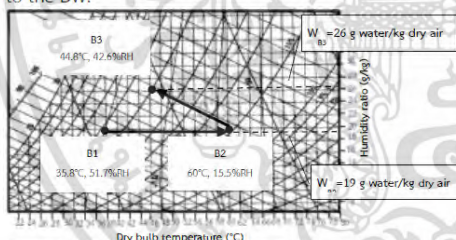


Figure 8 A psychrometric process of DW regeneration.

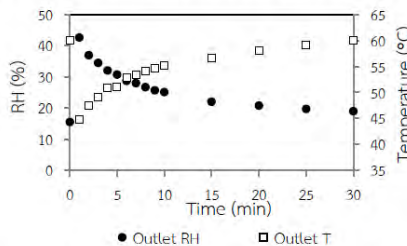


Figure 9 Relationship of RH and temperature at the outlet of the DW with desorption time at the regeneration temperature of 60°C.

3.2 Psychrometric properties of air in a hot air drying system with a DW

Figure 10 shows the relationship of RH and temperature of outlet air of the DW at the fixed drying temperature of 90°C. Similarly, dramatic decrease in RH was obtained at the five minute dehumidification. It is interesting that the desirable low RH was constantly observed for the whole period of dehumidification. The corresponding humidity ratios were in the range of 9 and 10 g water/kg dry air, which was reduced by about 7.5 g water/kg dry air from the ambient humid air. The RH changes during the regeneration process was obvious at the first five minutes as well. Dramatic increase and decrease in temperature of the outlet air were also observed at the first five minutes for the dehumidification and regeneration process.

The air condition at each point in the HA-DW system is shown in Figure 11. Humidity of air was reduced after passing through the DW from A1 to A2. The air was then heated to the temperature of 90°C and introduced to the heat exchanger at A3. After exchanging its heat, the air condition was determined at A4 to be 53.7°C and 27%RH. For the regeneration process, the inlet ambient air was supplied to B1, passed through the heat exchanger at B2 to increase its temperature, and then used to remove moisture from silica gel in the DW. It was observed that the outlet air condition of this process (B3) was 56.5°C and 22.9%RH.

The air properties observed in Figure 11 could be plotted in the psychrometric chart. The psychrometric process of air passing through the DW for both dehumidification and regeneration sides followed typical adiabatic process. The heater is used to

regenerate the DW and to control the process of air conditioning. The adiabatic efficiency will have an optimum value that depends on dehumidification and regeneration efficiency (Misha et al. 2012).

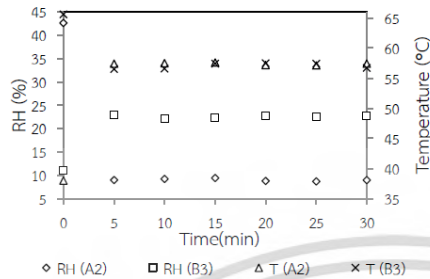


Figure 10 Relationship of RH and temperature at the outlet of DW during dehumidification (A2) and regeneration (B3) with processing time at the drying temperature of 90°C.

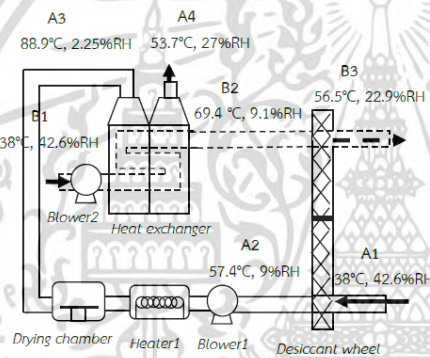


Figure 11 Schematic diagram of a HA-DW system with the air condition at each point after running the process for 30 min.

3.3 Desiccant wheel effectiveness

DW's effectiveness are shown in Table3. The properties of air in a hot air drying used in this study at 90°C. The effectiveness results showed that thermal, regeneration, dehumidification and adiabatic DW's would be gained by an optimum value operation which provided completely lower humidity inside the drying chamber. The specific absorption of silica gel for dehumidification process was 2.64 g water/kg dry air-kg silica gel-min

Table 1 Effectiveness of DW.

Effectiveness	Percentage (%)
Thermal effectiveness	69.28
Regeneration effectiveness	61.42
Dehumidification effectiveness	44.39
Adiabatic DW's effectiveness	98.49

4 Conclusions

The RH and humidity ratio decreased from 50.2 to 33.9% and from 19 to 16 g water/kg dry air during moisture adsorption by the DW, respectively. The temperature increased from 35.9 to 40.3°C

In the regeneration process at 60°C, the RH and humidity ratio increased from 15.5 to 42.6% and from 19 to 26 g water/kg dry air, respectively. The temperature decreased in the first period to 50°C and kept constant at 60°C in the last period.

In the HA-DW system, the RH and humidity ratio of the dehumidification process decreased from 42.6 to 9% and from 17.5 to 10 g water/kg dry air, respectively. The RH and humidity ratio of the regeneration process increased from 11 to 22.9% and from 17.5 to 25 g water/kg dry air, respectively.

The performance of the HA-DW system that thermal, regeneration, dehumidification and adiabatic desiccant wheel's effectiveness were 69.28, 61.42, 44.39 and 98.49%, respectively.

5 Acknowledgements

This research project was supported by the National Research Council of Thailand, fiscal year of 2016.

6 References

Dina, S.F., Ambarita, H., H. Napitupulu, F.H., Kawai, H. 2015. Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. Case Studies in Thermal Engineering 5, 32-40.

Madhiyanon, T., Adirekrut, S., Sathitruangsak, P., Soponronnarit, S. 2007. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies. Journal of Chemical Engineering and Processing 46, 282-290.

Mandegari, M.A., Pahlavanzadeh, H. 2009. Introduction of a new definition for effectiveness of desiccant

wheels. *Journal of Chemical Engineering* 34, 797–803.

Misha, S., Mat, S., Ruslan, M.H., Sopian, K. 2012. Review of solid/liquid desiccant in the drying application and its regeneration methods. *Journal of renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 4686–4707.

Naidu, M.M., Vedashree, M., Satapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R., Hebbar, H.U. 2016. Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethumgraveolens*) greens. *Journal of Food Chemistry* 192, 849–856.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TSAE
2017

การประชุมวิชาการ
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ระดับชาติ ครั้งที่ 18 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 10
ประจำปี 2560
The 18th TSAE National Conference and
The 10th TSAE International Conference
(TSAE 2017)

ณ อิมแพค เมืองรังสิต
กรุงเทพมหานคร
7-9 กันยายน 2560
ร่วมกับวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ร่วมกับกรมส่งเสริมการเกษตร

Logos of participating organizations and countries are displayed at the bottom of the poster.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Thin-Layer Drying Models for Dehumidified Hot Air Drying of Germinated Brown Rice

Palida Suwanvisan¹, Ekkapong Cheevitsopon², Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen^{1*}

¹Curriculum of Agricultural Engineering, Department of Mechanical Engineering,

²Department of Food Engineering Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

Corresponding author: Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen. E-mail jiraporn.jo@kmitl.ac.th

Abstract

This study aimed to evaluate suitable thin-layer drying models for germinated brown rice (GBR) undergoing dehumidified hot air drying. Dehumidified hot air drying of GBR to the final moisture content of 12% wet basis was conducted in a hot air drying system with a desiccant wheel (HA-DW). Drying curves as influenced by drying temperature (80, 100, and 120°C) and air flow rate (0.04, 0.06, and 0.08 m³/s) were plotted. The shortest drying time of 45 min was achieved by drying GBR at the highest drying temperature of 120°C and the greatest air flow rate of 0.08 m³/s. Comparison of R² and RMSE values of selected 8 drying models showed that the Midilli et al. model gave better fit. The average R² and RMSE of 0.9991 and 0.0045 were achieved respectively.

Keywords: Drying modeling, Desiccant wheel, Hot air drying, Germinated brown rice.

1. Introduction

Thin-layer drying is the process of removal of water from a material by passing drying air through a thin layer of the material until reaching the desirable moisture content. Moisture removal from agricultural products typically presents direct relationship among drying temperature, drying air velocity, relative air humidity, and variety and maturity (Yadollahinia et al., 2008). One of the most important studies on thin-layer drying of materials is the study on mathematical modeling of the drying process. Drying model is significantly useful in selection of the ideal drying conditions. It can be used to estimate a drying curve and predict drying behavior of materials such as moisture content, drying time, and heat and mass transfer. It also provides important parameters of drying optimization and product quality improvement (Giri and Prasad, 2007).

Although thin-layer drying modeling has been reported in numerous research, there is no study on modeling of drying process of hot air drying system with a desiccant wheel (HA-DW). The HA-DW system was developed to provide dehumidified air in the drying system. Low relative humidity in the drying chamber could contribute to higher drying rate, shorter drying time and moisture homogeneity inside the drying material (Dina et al., 2015; Naidu et al., 2016). Moreover, the dehumidification system may offer

several advantages such as low initial costs, environmental friendliness, and energy saving (Madhiyanon et al., 2007).

Regarding to the drying material of this study, i.e. germinated brown rice (GBR), it is promoted for high nutrients such as γ -aminobutyric acid (GABA), dietary fibre, oryzanol, vitamin E and vitamin B (Kaosa-ard and Songsermpong, 2012). GABA has several physiological advantages such as being an inhibitory neurotransmitter in the cerebrospinal fluid of mammals (Liao et al., 2003), reducing plasma cholesterol level (Miura et al., 2006), improving blood glucose level (Seiki et al., 2005), and preventing chronic alcohol-related diseases (Oh et al., 2003).

Therefore, the present study was focused on developing thin-layer drying models of drying of GBR using the HA-DW system. Drying characteristics of GBR drying using the HA-DW system were also discussed.

2. Materials and Methods

2.1 Experimental Material

Brown rice of khao Dawk Mali 105 variety was used as a sample of this study. The sample was vacuum-packed and stored at 4°C. Before using in each experiment, it was brought to room temperature.

To prepare GBR, the brown rice sample was soaked at 35°C for 4 h and germinated at the same temperature for



20 h. The GBR has a moisture content up to 30-33% (w.b). The final moisture content required for dried GBR is 10-13% w.b. for safe storage (Jongyingcharoen and Cheevitsopon, 2016).

2.2 Experimental Dryer

Figure 1 shows an experimental set-up of the HA-DW system. The system is composed of three main components including a rotary DW, a dryer, and an air-to-air heat exchanger.

The rotary DW with silica gel (a desiccant material) was combined to a hot air drying system. The stainless steel DW was 700 mm diameter x 50 mm thickness. It was divided into two equal sections, i.e. adsorption and regeneration sections. These sections were run simultaneously by means of continuous rotation between the ambient humid air through the adsorption section and the heated regenerative air through the regeneration section. It was driven by a motor (RS Motor Industry, Taiwan) at 0.5 rpm. Lower relative humidity of 8-13% was achieved in this system.

The cylindrical drying chamber was 200 mm inner diameter x 300 mm length. The blowers (1 HP, MA40B, EuroVent, Thailand) were used to supply air for drying and regeneration, respectively. The air was heated to required temperatures by 3.74-kW electrical heaters (Technology Instruments, Thailand).

The heat exchanger was made of aluminium with a heat exchanging area of 50 m². It was designed to receive the inlet heated air from the drying unit and exchange the heat to the inlet ambient air for regenerating the DW.

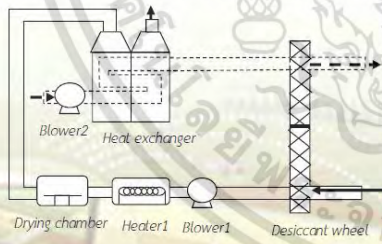


Figure 1 A schematic diagram of a HA-DW system

2.3 Experimental Procedure

The drying experiments were conducted at the drying temperatures of 80, 100 and 120°C and the flow rate of

0.04, 0.06 and 0.08 m³/s. The fixed temperature of 90°C and flow rate of 0.04 m³/s was used for the regeneration process. GBR of 1-cm grain bed depth (180 g) was fed into the drying chamber and dried until reaching the final moisture content of 12% w.b. During the process of drying, the sample was weighed at each predetermined interval for moisture content measurement. To determine its dry matter content, the sample was dried in a hot air oven at 105°C for 24 h (AOAC, 2005). The experiments were duplicated.

2.4 Theoretical Considerations

2.4.1 Calculation of Moisture Ratio and Drying Rate

The moisture ratio (MR) and drying rate (DR) were calculated as follows:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \tag{1}$$

$$DR = \frac{M_i - M_t}{dt} \tag{2}$$

where M_i , M_t , M_e and $M_i + dt$ are moisture content (g water/g dry matter) at initial, specific time, equilibrium and $t + dt$, respectively and t is drying time (min). However, M_e was assumed to be zero for drying at high temperature (Sripinyowanich and Noomhorm, 2011).

2.4.2 Mathematical Modeling of Drying Curves

The drying characteristics of GBR drying using HA-DW were modeled based on 8 thin-layer drying models as shown in Table 1.

Table 1 Thin layer drying models applied for HA-DW drying of GBR

Model No	Model name	Model
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and	$MR = a \exp(-kt)$
4	Pabis	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Logarithmic Two term	$MR = a \exp(-kt_0) + b \exp(-kt_1)$
		$MR = (a \exp(-kt)) + b$
6	Approximation of	$(1-a) \exp(-kt)$
7	diffusion	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
8	Midilli et al.	$MR = 1 + at + bt^2$
	Wang and Singh	

Coefficient of determination (R²) and root mean square error (RMSE) were used to evaluate goodness of fit of the models to the experimental data. The higher the R² and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the lower the RMSE were indicated the best the model fit. These statistical criteria were calculated as follows:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n MR_{pre,i} \times MR_{exp,i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i})^2 \times \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i})^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

where $MR_{exp,i}$ and $MR_{pre,i}$ are the i th experimental and predicted moisture ratio, respectively. N is the number of observations.

3. Results and Discussion

3.1 Drying Characteristics

Drying curves of HA-DW drying of GBR at different drying temperatures are shown in Figures 2-4 for the air flow rates of 0.04-0.08 m³/s, respectively. The results show that increasing drying temperature and air flow rate increased the drying rate and consequently decreased the drying time. As shown in Table 2, the shortest drying time of 45 min was achieved by drying GBR at the highest drying temperature of 120°C and the greatest air flow rate of 0.08 m³/s. The greatest maximum drying rate of 0.0125 g water/g dry matter-min was achieved at this condition as well.

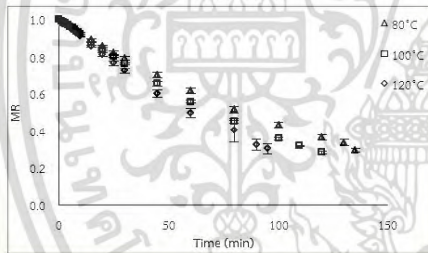


Figure 2 Drying curves of HA-DW drying of GBR at 0.04 m³/s and different drying temperatures.

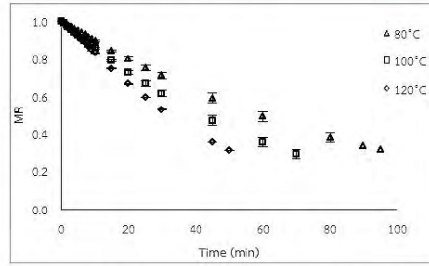


Figure 3 Drying curves of HA-DW drying of GBR at 0.06 m³/s and different drying temperatures.

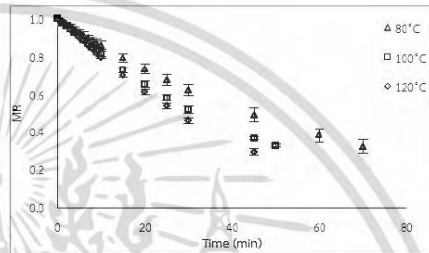
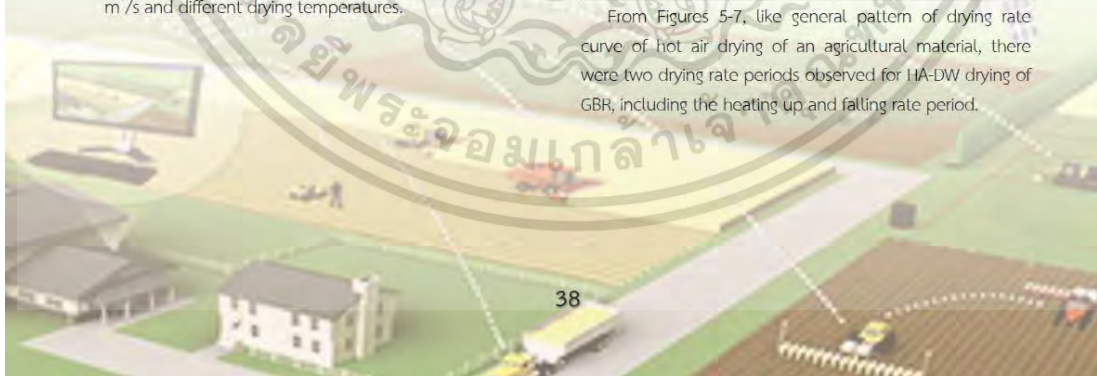


Figure 4 Drying curves of HA-DW drying of GBR at 0.08 m³/s and different drying temperatures.

Table 2 Drying time and maximum DR for HA-DW system of GBR.

Drying condition		Drying time (min)	Maximum DR (g water/g dry matter min)
Q (m ³ /s)	T (°C)		
0.04	80	130	0.0039
	100	120	0.0043
	120	95	0.0047
0.06	80	95	0.0055
	100	70	0.0083
	120	50	0.0087
0.08	80	70	0.0074
	100	50	0.0100
	120	45	0.0125

From Figures 5-7, like general pattern of drying rate curve of hot air drying of an agricultural material, there were two drying rate periods observed for HA-DW drying of GBR, including the heating up and falling rate period.



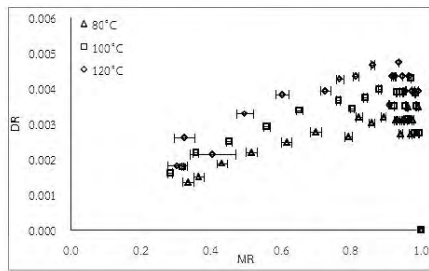


Figure 5 Drying rate curves of HA-DW drying of GBR at 0.04 m³/s and different drying temperatures.

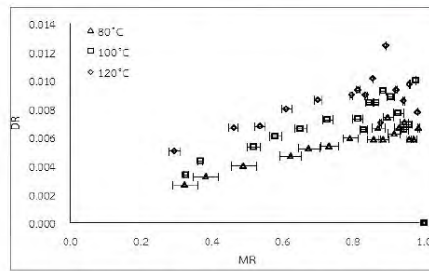


Figure 7 Drying rate curves of HA-DW drying of GBR at 0.08 m³/s and different drying temperatures.

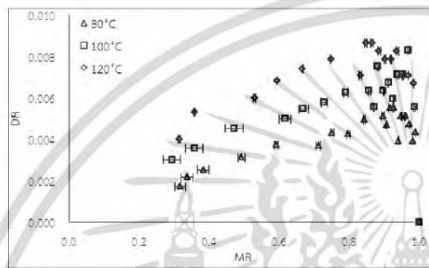


Figure 6 Drying rate curves of HA-DW drying of GBR at 0.06 m³/s and different drying temperatures.

3.2 Mathematical drying method

The results of drying model constant and coefficients and statistical criteria (R^2 and RMSE) expressing goodness to fit of the models are shown in Table 3. This table shows only four models having the R^2 values greater than 0.998 (Page, Logarithmic, Midilli et al. and Wang and Singh models, respectively). Comparison of R^2 and RMSE values of the selected drying models showed that the Midilli et al. model gave better fit. The average values of two parameters (R^2 and RMSE) were 0.9991 and 0.0045, respectively. Figures 8-10 present the comparison between the experimental data of HA-DW drying of GBR to the predicted data given by the Midilli et al. model at each air flow rate and different drying temperatures. It can be seen that there was a very good agreement between the experimental and predicted moisture ratios at each drying time.

Table 3 Constants, coefficients and statistical criteria (R^2 and RMSE) for HA-DW drying of GBR.

Model No.	Condition		Constant and coefficient		R^2	RMSE
	Q (m ³ /s)	T (°C)	k	n		
2	0.04	80	k=0.0063	n=1.0620	0.99957	0.00500
		100	k=0.0047	n=1.1700	0.99273	0.02097
		120	k=0.0072	n=1.1150	0.99934	0.00601
	0.06	80	k=0.0096	n=1.0500	0.99995	0.00164
		100	k=0.0132	n=1.0620	0.99983	0.00281
		120	k=0.0131	n=1.1450	0.99994	0.00164
0.08	80	k=0.0143	n=1.0280	0.99997	0.00113	
	100	k=0.0186	n=1.1046	0.99991	0.00204	
	120	k=0.0179	n=1.1070	0.99990	0.00208	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model No.	Condition		Constant and coefficient			R ²	RMSE		
	Q (m ³ /s)	T (°C)							
4	0.04	80	k=0.0065	a=1.1900	c=-0.1895	0.99967	0.00435		
		100	k=0.0055	a=1.5130	c=-0.5057	0.99186	0.02219		
		120	k=0.0078	a=1.3390	c=-0.3324	0.99931	0.00615		
	0.06	80	k=0.0105	a=1.0900	c=-0.0844	0.99991	0.00215		
		100	k=0.0132	a=1.1750	c=-0.1734	0.99996	0.00131		
		120	k=0.0137	a=1.4160	c=-0.4056	0.99952	0.00472		
	0.08	80	k=0.0150	a=1.0460	c=-0.0431	0.99995	0.00147		
		100	k=0.0193	a=1.0950	c=-0.0916	0.99980	0.00298		
		120	k=0.0186	a=1.2640	c=-0.2560	0.99968	0.00364		
	7	0.04	80	k=0.0066	n=1.0320	a=0.9989	b=-0.0003	0.99969	0.00423
			100	k=0.0036	n=1.2510	a=0.9907	b=0.0004	0.99298	0.02061
			120	k=0.0077	n=1.0760	a=1.0010	b=-0.0005	0.99941	0.00567
0.06		80	k=-0.0004	n=1.5260	a=1.0040	b=-0.0119	0.99990	0.00234	
		100	k=0.0138	n=1.0250	a=1.0000	b=-0.0007	0.99998	0.00108	
		120	k=-0.0220	n=0.9003	a=1.0000	b=-0.0358	0.99992	0.00187	
0.08		80	k=0.0144	n=1.0270	a=1.0010	b=0.0000	0.99998	0.00102	
		100	k=0.0181	n=1.0600	a=0.9985	b=0.0002	0.99991	0.00197	
		120	k=0.0183	n=1.0870	a=1.0010	b=-0.0005	0.99994	0.00161	
8		0.04	80	a=-0.0074	b=0.000017		0.99964	0.00460	
			100	a=-0.0079	b=0.000016		0.99182	0.02224	
			120	a=-0.0098	b=0.000026		0.99916	0.00681	
	0.06	80	a=-0.0107	b=0.000037		0.99988	0.00256		
		100	a=-0.0148	b=0.000068		0.99925	0.00151		
		120	a=-0.0179	b=0.000081		0.99914	0.00634		
	0.08	80	a=-0.0147	b=0.000073		0.99988	0.00228		
		100	a=-0.0200	b=0.000131		0.99989	0.00226		
		120	a=-0.0219	b=0.000138		0.99961	0.00403		



Figure 8 Experimental and predicted drying curves of HA-LW drying of GBR at 0.04 m/s and different drying temperatures.

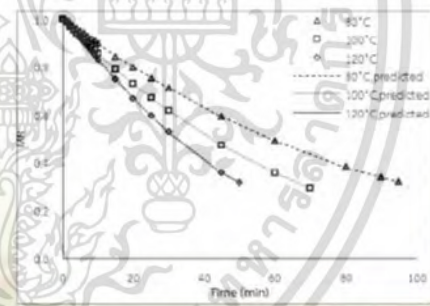


Figure 9 Experimental and predicted drying curves of HA-LW drying of GBR at 0.06 m/s and different drying temperatures.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

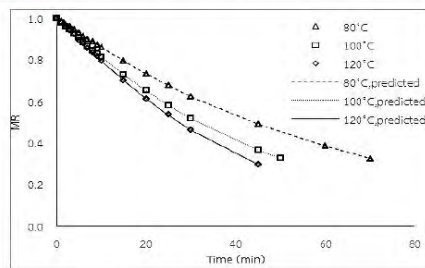


Figure 10 Experimental and predicted drying curves of HA-DW drying of GBR at 0.08 m³/s and different drying temperatures.

4. Conclusions

Drying characteristics of HA-DW drying of GBR were provided at the air flow rates of 0.04-0.08 m³/s and the drying temperatures of 80-120°C. Air flow rate and drying temperature had a considerable effect on drying time and drying rate. Increased air flow rate and drying temperature led to increased drying rate and short drying time. The shortest drying time of 45 min was achieved by drying GBR at the greatest air flow rate of 0.08 m³/s and the highest drying temperature of 120°C. The best fitted drying model for HA-DW drying of GBR was the Midilli et al. model ($MR = a \exp(-kt^b) + bt$). It resulted in the highest average R² of 0.9991 and the lowest RMSE of 0.0045.

5. Acknowledgements

This research project was supported by the National Research Council of Thailand, fiscal year of 2016.

6. References

- AOAC. 2005. Association of Official Analytical Chemists Methods of Analysis, 18th ed. AOAC: Washington, DC.
- Dina, S.F., Ambarita, H., Napitupulu, F.H., and Kawai, H. 2015. Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. *Case Studies in Thermal Engineering*, 5, 32-40.
- Giri, S.K. and Prasad, S. 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave vacuum and convective-hot air-dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78, 512-521.
- Jongyingcharoen, J.S. and Cheevitsopon, E. 2016. Development of UV-treated cooked germinated brown rice and effect of

UV-C treatment on its storability, GABA content, and quality. *LWT - Food Science and Technology*, 71, 243-248.

Kaosa-ard, T. and Songsermpong, S. 2012. Influence of germination time on the GABA content and physical properties of germinated brown rice. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 5, 270-283.

Liao, W.C., Wang, C.Y., Shyu, Y.T., and Yu, R.C. 2013. Influence of pre-processing methods and fermentation of adzuki beans on gamma-aminobutyric acid (GABA) accumulation by lactic acid bacteria. *Journal of Functional Foods*, 5, 1108-1115.

Madhiyanon, T., Adirekrut, S., Sathitruangsak, P., and Soponronnarit, S. 2007. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies. *Journal of Chemical Engineering and Processing*, 46, 282-290.

Miura, D., Ito, Y., Mizukuchi, A., Kise, M., Aoto, H., and Yagasaki, K. 2006. Hypocholesterolemic action of pre-germinated brown rice in hepatoma-bearing rats. *Journal of Life Science*, 76, 259-264.

Naidu, M.M., Vedashree, M., Satapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R., and Hebbar, H.U. 2016. Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethum graveolens*) greens. *Journal of Food Chemistry*, 192, 849-856.

Oh, S.H., Soh, J.R., and Cha, Y.S. 2003. Germinated brown rice extract shows a nutraceutical effect in the recovery of chronic alcohol-related symptoms. *Journal of Medicinal Food*, 6, 115-121.

Seiki, T., Nagase, R., Torimitsu, M., Yanagi, M., Ito, Y., Kise, M., Mizukuchi, A., Fujimura, N., Hayamizu, K., and Ariga, T. 2005. Insoluble fiber is a major constituent responsible for lowering the post-prandial blood glucose concentration in the pre-germinated brown rice. *Biol Pharm Bull.*, 28, 1539-1541.

Sripinyowanich, J. and Noomhorm, A. 2011. A new model and quality of unfrozen and frozen cooked rice dried in a microwave vibro-fluidized bed dryer. *Drying Technology*, 29, 735-748.

Yadollahinia, A.R., Omid, M., and Rafiee, S. 2008. Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products. *International Journal of Agriculture and Biology*, 10, 61-65.

Experimental investigation of air characteristics during dehumidification in the multilayer desiccant bed column system

Prueksa Sawardsuk¹, Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen² and Ekkapong Cheevitsopon^{1,*}

¹Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

²Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Abstract. The goal of this research is to investigate air characteristics during dehumidification process using the multilayer desiccant bed. Silica gel packing in the multilayer column was used as a desiccant material. Airflow direction in the column was designed in a zigzag path passing each desiccant layer. The changes in temperature and relative humidity of exit air were recorded after dehumidification at different airflow rates of 18, 36, and 72 m³/h. In the desiccant regeneration process, moisture in silica gel was removed by 85 °C of hot air at varied airflow rates. The characteristics of exit air after regeneration were also monitored. The result revealed that air humidity ratio was significantly decreased using multilayer desiccant bed column. The highest rates of air dehumidification and desiccant regeneration were observed in the first 5 min operation. The highest air dehumidification rate was 12.82 g/min at the airflow rate of 72 m³/h and the highest regeneration rate of desiccant was 6.70 g/min at the airflow rate of 72 m³/h. In addition, the dual column of multilayer desiccant bed can be successfully applied to cyclic operation of dehumidification and regeneration when the cycle time were 5 min and airflow rate 36 and 72 m³/h.

1 Introduction

The desiccant dehumidification of air is widely used in industrials and air conditioning. Either solid or liquid desiccant can be used. However, solid desiccant in forms of packed bed or rotary bed is preferable because of easy handling [1]. The packed bed system has less mechanical problems because its design is not complicate and higher amount of humidity is reduced as compared to the rotary bed system [2,3]. The commonly used solid desiccant is silica gel as it has high moisture adsorption capacity and great pore surface area to trap the water vapor. Adsorption and desorption of the packed bed of silica gel have been reported in several studies. Chang et al. [3] investigated the effect of regeneration conditions on the dehumidification process of modified silica gel and commercial silica gel packed bed. The adsorption of the silica gel was increased as the degree of regeneration increased. Awad et al. [4] fabricated a radial flow dehumidifier using silica gel as a desiccant. Hollow cylindrical bed patterns were designed and test at different diameter ratios. Low bed diameter ratio was appropriate for minimum pressure drop. On the other hand, higher bed diameter ratio caused greater air humidity drop. Dehumidifiers were applied in drying due to many benefits such as reducing drying time and retaining product qualities [5,6].

To date, limited reports are available in the literature on the performance of desiccant bed column. Therefore,

the objective of this study was to design the zigzag airflow direction in desiccant bed column, and study the humidity ratio and temperature characteristics of the exit air after dehumidification and regeneration of the air in the multilayer desiccant bed column system. The system was composed of two columns performing the switch task of dehumidification and regeneration, i.e. cyclic operation. The cyclic operation of the system was also carried out at different air flow rates to determine the system performance.

2 Experiment study

2.1 Experimental setup

A schematic diagram of the multilayer desiccant bed column system is illustrated in Fig. 1. The system consisted of a dual column; column A and column B. Each column was 20 cm inner diameter and 100 cm height. Fifteen layers with sieve containers were inside the column. Each layer contained 150 g of silica gel. The sieve container had an air duct with a diameter of 2.54 cm to allow the air to pass through. The air duct was changed from left side of one layer to right side of the next layer in order that a zigzag pathway of the air was generated. Outside of the column was covered by rock wool insulation.

* Corresponding author: ekkapong.ch@kmitl.ac.th

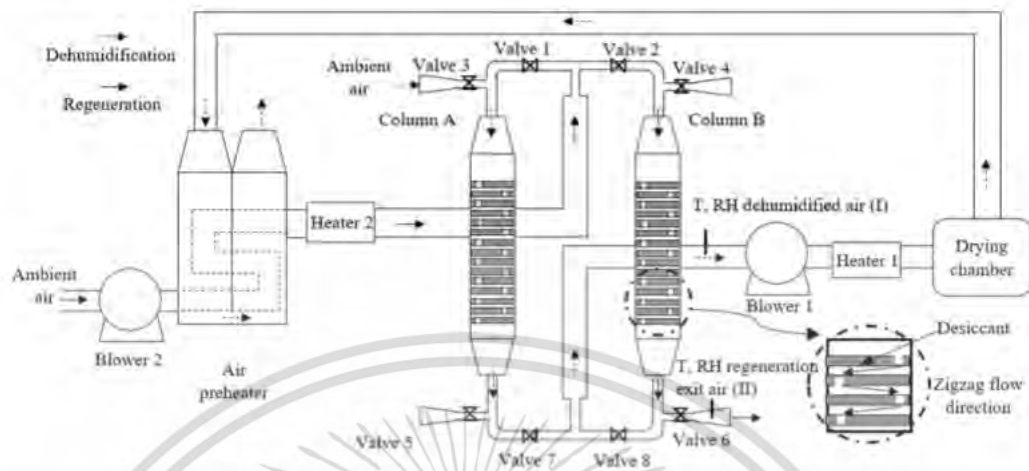


Fig. 1. A schematic diagram of the multilayer desiccant bed column system.

Dehumidification and regeneration operations of the system are shown in Fig. 1 as well. Column A and B were operated alternately between the process of dehumidification of air and regeneration of desiccant. Using column A for dehumidification, valves 3 and 7 were opened while valves 1 and 5 were closed. Ambient air was passed through valve 3, column A, and valve 7 respectively by blower 1. Dehumidified air was obtained prior to heating by heater 1 and supplying to a drying chamber. Simultaneously, the desiccant in column B was regenerate. Valves 2 and 6 were opened and valves 4 and 8 were closed. Ambient air was passed through blower 2, preheated by an air preheater, heated to the desirable temperature by heater 2, and used for desiccant regeneration in column B.

2.2 Instrumentation and experimental procedure

2.2.1 Dehumidification and regeneration process

To prepare fresh silica gel for the dehumidification process, commercial grade silica gel was dried in hot air oven at 90°C for 6 h and allowed to cool in a closed chamber. Saturated silica gel was required for the desiccant regeneration experiment. Silica gel was allowed to adsorb moisture in air at room temperature for 8 h until its maximum adsorption was reached.

The experiment on air dehumidification and desiccant regeneration were conducted individually. Air flow rates were set at 18, 36 and 72 m³/h for both experiments. For the regeneration process, air temperature was 85°C. Temperature and relative humidity of ambient and exit air were recorded every 30 s for the whole period of 30 min by temperature hygrometer with the response time of 25 s (KT320, Kimo, France) at point I and II as show in Fig. 1. The dehumidification rate and regeneration rate were calculated by equation (1) and (2), respectively.

$$\text{Dehumidification rate} = \dot{m}_d \times (w_{i,d} - w_{o,d}) \quad (1)$$

$$\text{Regeneration rate} = \dot{m}_r \times (w_{o,r} - w_{i,r}) \quad (2)$$

Where \dot{m} is mass flow rate of air (kg dry air/min), w_i and w_o were humidity ratio of inlet air and exit air (g water/kg dry air), respectively. The subscript letters of d and r are dehumidification and regeneration process, respectively.

Furthermore, specific dehumidification rate and specific regeneration rate were calculated and expressed as dehumidification rate per kilograms of silica gel and regeneration rate per kilograms of silica gel, respectively.

2.2.2 Cyclic operation process

To determine performance of the multilayer desiccant bed column system, cyclic operation was performed when alternating the air dehumidification and desiccant regeneration between columns A and B. Airflow rates varied at 18, 36 and 72 m³/h for both processes. The regeneration air temperature was 85°C. One cyclic operation included 5 min dehumidification and 5 min regeneration. If column A was used for the dehumidification process, column B was simultaneously used for the regeneration process. The temperature and relative humidity of the exit air from both processes were recorded at the specified interval for 30 min.

3 Results and discussion

3.1 Dehumidification process: Effect of air flow rate on characteristics of the dehumidified air

Humidity ratio is defined as the proportion of the mass of water vapour to the mass of dry air. It is determined using a psychrometric chart given the data of dry bulb temperature and relative humidity of air. Fig. 2 presents the changes in humidity ratio and temperature of exit air (Point I) after the dehumidification process at the varied airflow rates 18, 36 and 72 m³/h for 30 min. It can be seen

that humidity ratio of the exit air sharply decreased at the initial period of dehumidification when compared to humidity ratio of the inlet air (12.09-13.94 g water/g dry air). Thereafter humidity ratio of the exit air increased with increasing time. This was because of lower adsorption capacity of silica gel with longer process time. Similar trend have been observed in a thin multilayer of activated alumina and packed bed of silica gel [7,8,9]. At first 5 min of the process, the highest dehumidification rates were 2.93, 6.52 and 12.82 g water/min (corresponding to the specific dehumidification rates of 1.30, 2.90 and 5.70 g water/(min·kg silica gel)) at the airflow rates of 18, 36 and 72 m³/h, respectively. Regarding to temperature of the exit air, temperature slightly increased with increasing time because heat was released from the desiccant (heat of adsorption). It could be observed that in long term adsorption, humidity ratio and temperature of the exit air were the same as those of the inlet air. Fig. 3 shows a psychrometric process of air dehumidification at the represent airflow rate of 72 m³/h. Humidity ratios of the inlet air reduced by about 64%, 50% and 29% when the process times were 1, 5 and 30 min, respectively. It is interesting that psychrometric path of the dehumidification process at 30 min conformed to the adiabatic path.

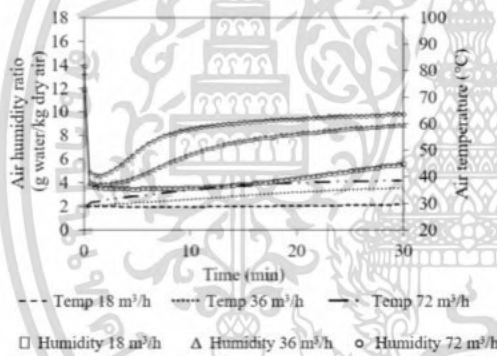


Fig. 2. Humidity ratio and temperature of exit air after the dehumidification process at various airflow rates.

3.2 Regeneration process: Effect of airflow rate on characteristics of the exit air

Saturated silica gel was regenerated using the air temperature of 85°C at the airflow rates 18-72 m³/h. The changes in humidity ratio and temperature of the exit air after the regeneration process (Point II) for 30 min are illustrated in Fig. 4. Humidity ratio of the exit air increased continuously with increasing time. It indicated that moisture in the silica gel was evaporated by the regeneration process. Moreover, the change in humidity ratio of the exit air was dependent on the airflow rate. Humidity ratio of the exit air gradually increased with time at low airflow rate. And the exit air humidity ratio sharply increased with time at high airflow rate. Therefore, the highest regeneration rate was 6.70 g water/min (corresponding to the specific dehumidification rates of 2.98 g water/(min·kg silica gel))

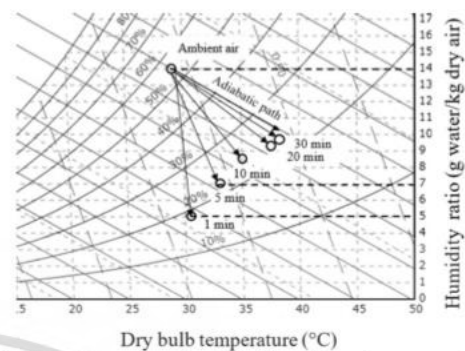
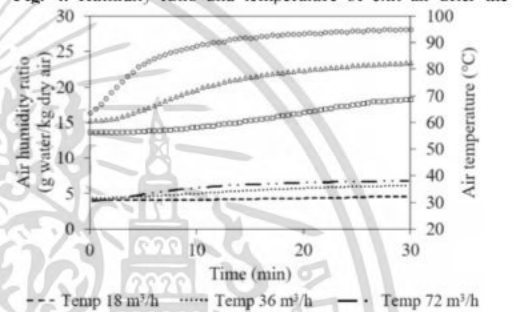


Fig. 3. Psychrometric paths of the dehumidification process with the airflow rate of 72 m³/h at various time.

Fig. 4. Humidity ratio and temperature of exit air after the



regeneration process at various air flow rates.

at the first 5 min when the airflow rate was 72 m³/h. As can be seen in Fig. 4, temperature of the exit air increased with time. Abou-Ziyan et al. [7] also reported increasing temperature of the exit air for long process period until the temperature was equal to the inlet air temperature.

3.3 Cyclic operation of the system

Behaviors of air during the cyclic operation between the dehumidification and regeneration process at the airflow rate 18, 36 and 72 m³/h are shown in Fig. 5, 6 and 7, respectively. Different characteristics of dehumidification process were found at airflow rate of 18 m³/h. Humidity ratio of the dehumidification process increased in every cycle. It indicated that moisture was accumulated in the silica gel after the regeneration process. The lowest flow rate of hot air for the regeneration process cannot be applied in this system. For the cyclic operation at the airflow rate of 36 and 72 m³/h, the humidity ratio of the exit air decreased during dehumidification and increased during regeneration. Similar characteristics were presented in previous research on cyclic operation [8,10]. At the airflow rate of 72 m³/h, humidity ratio of the exit air was the lowest during dehumidification and the highest during regeneration. It should be concluded that the regeneration airflow rate was an important control parameter for a successful cyclic operation. In addition, performance of the cyclic operation was dependent on the cycle duration and air temperature used in the

regeneration process [7]. When the airflow rate was 72 m³/h, the multilayer desiccant bed column system could reduce air humidity ratio from the ambient condition (approximately 17 g water/kg dry air) to about 15 g water/kg dry air, yielding 12% reduction. Therefore, the results indicated that the dual column of the multilayer desiccant bed system could be successfully applied to provide continuous supplied air with low humidity ratio for various industrial processes such as drying.

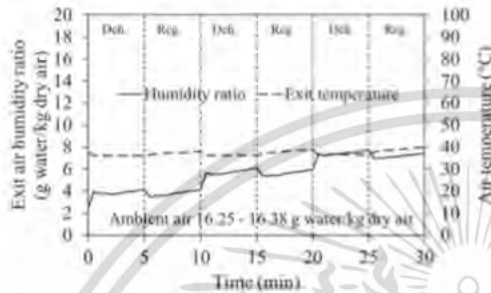


Fig. 5. Humidity ratio and temperature of the exit air during the cyclic operation at 18 m³/h.

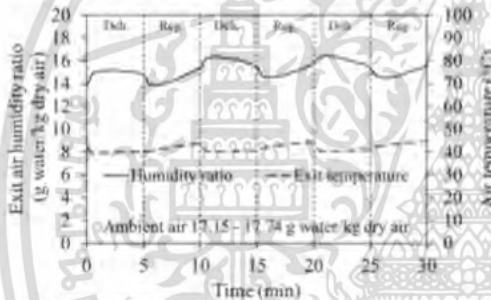


Fig. 6. Humidity ratio and temperature of the exit air during the cyclic operation at 36 m³/h.

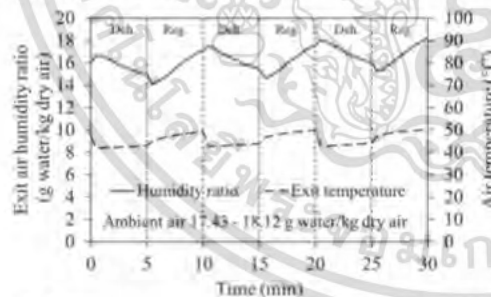


Fig. 7. Humidity ratio and temperature of the exit air during the cyclic operation at 72 m³/h.

4 Conclusion

Air dehumidification and desiccant regeneration of the multilayer desiccant bed column system were studied by observing humidity ratio and temperature of the exit air. Cyclic operation between dehumidification and regeneration was run to test ability of the system. From the study, the following observations can be drawn.

1. The highest dehumidification rate was observed at the beginning of the dehumidification process, and then the dehumidification rate decreased due to lower adsorption capacity of desiccant.

2. The regeneration rate significantly increased with the airflow rate of hot air.

3. The cyclic operation at the airflow rates of 36 and 72 m³/h presented continuous ability to conduct the dehumidification and regeneration process in the multilayer desiccant bed column system. Humidity ratio of the exit air reduced by about 12% (compared to humidity ratio of the inlet air) when the airflow rate was 72 m³/h.

References

1. S. Misha, S. Mat, M.H. Rustan, K. Sopian, Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods, *RENEW SUST ENERG REV* **16**, 4686 (2001).
2. S.K. Yeboah, J. Darkwa, A critical review of thermal enhancement of packed beds for water vapour adsorption *RENEW SUST ENERG REV* **58**, 1500 (2016).
3. K.S. Chang, H.C. Wang, T.W. Chung, Effect of regeneration condition on the adsorption dehumidification process in packed silica gel beds, *Appl. Therm. Eng* **24**, 735 (2014).
4. M.M. Awad, A. Ramzy K., A.M. Hamed, H.M. Bekheit, Theoretical and experimental investigation on the radial flow desiccant dehumidification bed, *Appl. Therm. Eng* **28**, 75 (2018).
5. K. Nagaya, Y. Li, Z. Jin, M. Fukumuro, Y. Ando, A. Akaishi, Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control, *J Food Eng* **75**, 71 (2006).
6. G. O. Ondier, T. J. Siebenmorgen, A. Mauromoustakos, Low-temperature, low-relative humidity drying rough rice, *J Food Eng* **100**, 545 (2010).
7. H. Abou-Ziyan, D. Abd El-Raheim, O. Mahmoud, M. Fatouh, Performance characteristics of thin-multilayer activated alumina bed, *APPL ENERG* **190**, 29 (2017).
8. A.K. Ramzy, R. Kadoli, A. Babu T.P., Experimental and theoretical investigation on the cyclic operation of TSA cycle for air dehumidification using packed beds of silica gel, *Energy* **56**, 8 (2013).
9. A.E. Kabeel, Adsorption operations of multilayer desiccant packed bed for dehumidification applications, *RENEW ENERG* **34**, 255 (2009).
10. A.K. Ramzy, A.M. Hamed, M.M. Awad, M.M. Bekheit, Theoretical investigation on the cyclic operation of radial flow desiccant bed dehumidifier, *JETR* **2**, 6 (2010).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ A118-59-001 ตั้งแต่วันที่ 1 ต.ค. 2558 วันที่ 30 ก.ย. 2560.

แหล่งทุน: งบประมาณแผ่นดิน

ชื่อโครงการ: การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของระบบแจ้งเตือนแบบร่วมมือกับสารคัดหลั่งเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน: กรณีศึกษากรอบแห้งข้าวกล้อง

ชื่อหัวหน้าโครงการ: ดร.เอกพงษ์ ชีวีโสภณ

ว/ศ/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รวมการรับ - จ่าย				รวมเงิน คดเบี่ยงรับ	รายจ่าย					รวม รายจ่าย
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	งบบุคลากร		งบดำเนินงาน			งบลงทุน		
								ค่าจ้างชั่วคราว	ค่าตอบแทน	ค่าใช้สอย		ค่าวัสดุ	
	งบประมาณที่ได้รับอนุมัติ (ตามแผน)		570,000.00	-	-	-							-
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 1 - 85%)		484,500.00			331.19							-
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 2 - 15%)		85,500.00			801.98							-
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 3)					172.15							-
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 4)					109.38							-
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 5)					111.47							-
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 6)					109.93							-
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 7)					31.05							-
	หัก ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 1)			582,721.09			100,000.00	-	-	482,721.09	-	-	582,721.09
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 2)												
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 3)												
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 4)												
	งบประมาณคงเหลือ		570,000.00	-	12,721.09	1667.15							
	รายละเอียดค่าใช้จ่าย												
ครั้งที่ 1													
31 ต.ค. 58	ค่าจ้างชั่วคราว	ใบสำคัญรับเงิน					10,000.00						10,000.00
29 ม.ค. 59	ค่าจ้างชั่วคราว	ใบสำคัญรับเงิน					10,000.00						10,000.00
26 ก.พ. 59	ค่าจ้างชั่วคราว	ใบสำคัญรับเงิน					10,000.00						10,000.00
31 มี.ค. 59	ค่าจ้างชั่วคราว	ใบสำคัญรับเงิน					10,000.00						10,000.00
29 เม.ย. 59	ค่าจ้างชั่วคราว	ใบสำคัญรับเงิน					10,000.00						10,000.00
31 พ.ค. 59	ค่าจ้างชั่วคราว	ใบสำคัญรับเงิน					10,000.00						10,000.00
30 มิ.ย. 59	ค่าจ้างชั่วคราว	ใบสำคัญรับเงิน					10,000.00						10,000.00
29 ก.ค. 59	ค่าจ้างชั่วคราว	ใบสำคัญรับเงิน					10,000.00						10,000.00

บันทึกการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ A118-59-001 ตั้งแต่วันที่ 1 ต.ค. 2558 วันที่ 30 ก.ย. 2560

แหล่งทุน: งบประมาณแผ่นดิน

ชื่อโครงการ : การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของระบบแพ้มแบบกรรอนร่วมกับสารดูดความชื้นเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน: กรณีศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องอก

ชื่อหัวหน้าโครงการ: ดร.เอกพงษ์ ชีวีดีโสภณ

ว/ศ/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายวัน	รายจ่าย				รวม รายจ่าย		
			รับ	จ่าย	คงเหลือ		คงเหลือรับ	งบกลาง	งบดำเนินงาน	งบลงทุน			
30 ต.ค. 59	ค่าจ้างชั่วคราว	ใบสำคัญรับเงิน					10,000.00					10,000.00	
30 ก.ย. 59	ค่าจ้างชั่วคราว	ใบสำคัญรับเงิน					10,000.00					10,000.00	
7 ก.ย. 59	ท่อสี่เหลี่ยมสแตนเลส/ท่อวงกลมสแตนเลส/ท่อกดลมสแตนเลส12mm/ท่อกดลมสแตนเลส1/8inch	59/59							10,340.48			10,340.48	
8 ก.ย. 59	แผ่นเรียบสแตนเลส/ท่อสแตนเลส/ท่อกลมสแตนเลส/ท่ออลูมิเนียม/แผ่นเรียบอลูมิเนียม/น๊อตสแตนเลส	60/59							246,416.51			246,416.51	
9 ก.ย. 59	อีตเตอร์/ไซท์น/มอเตอร์/สายไฟ/เครื่องชั่ง/สายเทอร์โมคัปเปิ้ล/บิลด์วรีจิ้น/ตาข่าย/ช้อนตัก	61/59							118,320.60			118,320.60	
12 ก.ย. 59	อุปกรณ์ไฟฟ้า/อินเวอร์เตอร์/แมกเนติก/โอเวอร์โวลต์/ตู้คอนโทรล	62/59							62,113.50			62,113.50	
18 ต.ค. 60	วงจรับันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์	INW6001017							23,000.00			23,000.00	
23 ต.ค. 60	ค่าบริการตรวจวิเคราะห์	602B41R03574							22,530.00			22,530.00	
	รวมทั้งสิ้น 1						100,000.00	-	-	482,721.09	-	-	582,721.09

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ดร.เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.บ.	วิศวกรรมอาหาร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบังปี	2545
วศ.ม.	วิศวกรรมอาหาร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2548
D.Eng.	Food Engineering and Bioprocess Technology	Asian Institute of Technology	2555

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) การออกแบบเครื่องจักรกลแปรรูปอาหาร
เทคโนโลยีการอบแห้ง

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปีพ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2552	The winner of AIT environmental photo category	Asian Institute of Technology
2552	The third place winner of AIT research and academic photo category	Asian Institute of Technology
2552	Grand prize in the Golden Jubilee Photo Competition	Asian Institute of Technology
2553	The winner in category of “technical expertise” in the second AIT v.research competition	Asian Institute of Technology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปีพ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2547	ทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท-เอก	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2548	ทุนอุดหนุนการศึกษาโครงการพัฒนาอาจารย์สาขาขาดแคลนเพื่อศึกษาในประเทศ	สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง
2549	AIT Fellowship	Asian Institute of Technology, Thailand

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Cheevitsopon, E. and Noomhorm, A. 2011. Kinetics of hydration and dimensional changes of brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(6), 840-849.
2. Cheevitsopon, E. and Noomhorm, A. 2011. Effects of parboiling and fluidized bed drying on the physicochemical properties of germinated brown rice. *International Journal of Food Science and Technology*, 46(12), 2498-2504.
3. Cheevitsopon, E. and Noomhorm, A. 2015. Effects of superheated steam fluidized bed drying on the quality of parboiled germinated brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(4), 349-356.
4. Jongyingcharoen, J.S. and Cheevitsopon, E. 2016. Development of UV-treated cooked germinated brown rice and effect of UV-C treatment on its storability, GABA content, and quality. *LWT-Food Science and Technology*, 71, 243-248.
5. เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ และเกียรติศักดิ์ รุ่งพระแสง. 2556. อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่สำเร็จรูปด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 44(2), 465-468.
6. Suvanvisan, P., Cheevitsopon, E., and Jongyingcharoen, J. S. 2018. Study on psychrometric properties of air in a hot air drying system combined with a desiccant wheel. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 24, 6-12.
7. Cheevitsopon, E., and Sirisomboon, P. 2018. Rapid evaluation of fat content in curry soup containing coconut milk by using near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 26(1), 16-25.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Cheevitsopon, E., and Sirisomboon, P. 2018. Evaluation of salt content of curry soup containing coconut milk by near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 26(3), 149-158.

การเสนอผลงานวิชาการ

1. เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ และอมรเดช พุทธิพิพัฒน์ขจร. 2548. การประมาณค่าน้ำหนักผลมั่งคุดบนระบบชั่งน้ำหนักแบบ ไดนามิกส์โดยใช้ Fuzzy C-Means. ใน การประชุมวิชาการและเสนอผลงานนักเรียนไทยในฝรั่งเศสและภาคพื้นยุโรป ครั้งที่ 3. สำนักงานที่ปรึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำกรุงบรัสเซลส์ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ร่วมกับสมาคมนักเรียนไทยในประเทศฝรั่งเศสในพระบรมราชูปถัมภ์, ฝรั่งเศส.
2. เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ และอมรเดช พุทธิพิพัฒน์ขจร. 2549. การประมาณค่าน้ำหนักผลมั่งคุดบนระบบชั่งน้ำหนักแบบ ไดนามิกส์โดยใช้ Fuzzy C-Means, น. 81. ใน รายงานการประชุมวิชาการและเสนอผลงานสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม.
3. เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ และเกียรติศักดิ์ รุ่งพระแสง. 2556. อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบด, น. 30. ใน รายงานการประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยพืชเขตร้อนและกึ่งร้อน ครั้งที่ 7. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
4. Cheevitsopon, E. and Noomhorm, A. 2009. Study of hydration kinetics and dimensional changes of brown rice during soaking by image analysis, pp. 25. In 4th International Conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering, Asian Institute of Technology, Thailand.
5. Cheevitsopon, E. and Noomhorm, A. 2010. Changes in physicochemical property of germinated brown rice and parboiled germinated brown rice dried in a fluidized bed dryer, pp. 24-25. In 5th International Conference on Innovations in Food and Bioprocess Technology, Asian Institute of Technology, Thailand.
6. Cheevitsopon, E., Noomhorm, A. and Roonprasang, K. 2012. Mathematical modeling of superheated-steam fluidized-bed drying of parboiled germinated brown rice, pp. 102. In International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology 2012, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.
7. Cheevitsopon, E., Noomhorm, A. and Roonprasang, K. 2013. Effects of processing parameters on the gamma-aminobutyric acid content in germinated brown rice, pp. 54. In 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Biotechnology, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Roonprasang, K., Cheevitsopon, E., and Supakiat, T. 2013. Determination of design parameters for continuous skewered food product grilling using heat source from wood charcoal, pp. 73. In 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Biotechnology, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.

9. Cheevitsopon, E., Roonprasang, K., Egkamol, D., Eamsa-ard, P., Roonprasang, N., and Wiboonrungson, N. 2013. The approach for the building energy design, pp. 39. In Architecture and Environment International Conference 2013, Office of the Higher Education Commission, Ministry of Education and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

10. Roonprasang, K., Egkamol, D., Eamsa-ard, P., Cheevitsopon, E., Roonprasang, N., and Athichoktanaparn, P. 2013. The feasibility of using ORC system in energy conservation in building, pp. 38. In Architecture and Environment International Conference 2013, Office of the Higher Education Commission, Ministry of Education and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

11. Roonprasang, K., Egkamol, D., Eamsa-ard, P., Cheevitsopon, E., Roonprasang, N., and Thongthub, S. 2013. Development of design tools for building energy conservation, pp. 40. In Architecture and Environment International Conference 2013, Office of the Higher Education Commission, Ministry of Education and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

12. เอกพงษ์ ชีวติโสภณ และเทพกร ยอดทอง. 2557. อิทธิพลของอุณหภูมิของการอบแห้งแบบถาดต่อคุณภาพข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป, น. 82. ใน รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15. โรงแรมกรุงศรีริเวอร์, อโยธยา.

13. เอกพงษ์ ชีวติโสภณ, เกียรติศักดิ์ รุ่งพระแสง และภูริวัฒน์ อธิโชคชนพันธ์. 2557. อิทธิพลของระยะห่างและเวลาของการย่างต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อหมู, น. 96. ใน รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15. โรงแรมกรุงศรีริเวอร์, อโยธยา.

14. Yanwaree, S., Salam, P.A., and Cheevitsopon, E. 2015. Assessment of energy potential of agricultural wastes in Nakhon Si Thammarat province, pp. 133-141. In The 16th TSAE National Conference and the 8th TSAE International Conference. Bangkok, Thailand.

15. สาทิป รัตนภาสกร และเอกพงษ์ ชีวติโสภณ. 2558. เครื่องปอกเปลือกและล้างเปลือกกว่านทางจระเข้, น. 209-216. ใน รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 12. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

16. ขวัญชัย ชอบสำราญ, เอกพงษ์ ชีวติโสภณ, ทวีพล ชื้อสัตย์ และนวกัทราน หนูนาถ. 2559. ผลของแสงสว่างที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสีของไส้กรอกหมูในระหว่างการจัดเก็บ, น. 319-326. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ. 2559. อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของการย่างของเครื่องอย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้, น. 327-334. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
18. ศุภเกียรติ ทองทับ, เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ, และเกียรติศักดิ์ รุ่งพระแสง. 2559. การออกแบบและพัฒนาเครื่องอย่างแบบต่อเนื่องด้วยอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้, น. 88. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่, สงขลา.
19. ชนาพร สรวงเทพ, และเอกพงษ์ ชีวดีโสภณ. 2559. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป, น. 124. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่, สงขลา.
20. อำนาจ คุตะคุ, เอกสิทธิ์ ศรีธรรม, เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ และสาทิป รัตนภาสกร. 2560. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของปลากระตักแห้งเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดขนาด, น. 68. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ
21. Suwanvisan, P., Cheevitsopon, E., and Jongyingcharoen, J. S. 2017. Thin-layer drying model for dehumidified hot air drying of germinated brown rice, pp. 9. In The 18th TSAE National Conference and the 10th TSAE International Conference. Bangkok, Thailand.
22. Thanimkarn, S., Cheevitsopon, E., Jongyingcharoen, J.S. 2018. Drying characteristics and quality evaluation in convective drying of *Cissus quadrangularis* Linn., In The 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology. Phuket, Thailand.
23. Sawardsuk, P., Cheevitsopon, E., Jongyingcharoen, J.S. 2018. Experimental investigation of air characteristics during dehumidification in the multilayer desiccant bed column system, In The 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology. Phuket, Thailand.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

1. เครื่องผ่าผลมะพร้าวอ่อนกึ่งอัตโนมัติ ลักษณะงานที่รับผิดชอบเป็นการออกแบบ และควบคุมการสร้าง ที่ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2545
2. ระบบชั่งน้ำหนักผลมังคุดแบบต่อเนื่อง ลักษณะงานที่รับผิดชอบเป็นการออกแบบ และควบคุมการสร้าง ที่ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2548
3. เครื่องอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบฟลูอิดไดซ์เบดด้วยไอน้ำยวดยิ่ง ลักษณะงานที่รับผิดชอบเป็นการออกแบบ และควบคุมการสร้าง ที่สาขาวิชาวิศวกรรมอาหารและเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ปี 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องอบแห้งข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยลมร้อน ลักษณะงานที่รับผิดชอบเป็นการออกแบบ และควบคุมการก่อสร้าง ที่สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2556
5. อนุสิทธิบัตรกับกรรมทรัพย์สินทางปัญญา เลขที่คำขอ: 1403000090 กรรมวิธีผลิตข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าว เลขที่อนุสิทธิบัตร 9020
6. สิทธิบัตรกับกรรมทรัพย์สินทางปัญญา เลขที่คำขอ: 1401003748 เครื่องอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสียบไม้ต่อเนื่องแบบหมุนวน (อยู่ในระหว่างการประกาศโฆษณาของกรรมทรัพย์สินทางปัญญา)
7. สิทธิบัตรกับกรรมทรัพย์สินทางปัญญา เลขที่คำขอ: 1601004695 เครื่องอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสียบไม้ด้วยถ่านไม้แบบต่อเนื่อง (อยู่ในระหว่างการพิจารณา)
8. อนุสิทธิบัตรกับกรรมทรัพย์สินทางปัญญา เลขที่คำขอ: 1603001609 เครื่องคัดแยกและคัดขนาดปลาแห้ง เลขที่อนุสิทธิบัตร 12445
9. อนุสิทธิบัตรกับกรรมทรัพย์สินทางปัญญา เลขที่คำขอ: 1603001610 เครื่องจำหน่ายไข่แบบหยอดเหรียญ เลขที่อนุสิทธิบัตร 12906
10. อนุสิทธิบัตรกับกรรมทรัพย์สินทางปัญญา เลขที่คำขอ: 1703000140 กรรมวิธีการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน เลขที่อนุสิทธิบัตร 14037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
Ph.D.	Food Engineering and Bioprocess Technology	Asian Institute of Technology	2554
M.Sc.	Food Engineering and Bioprocess Technology	Asian Institute of Technology	2549
วท.บ.	พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2547

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

- Processing of Food and Agricultural Products
- Drying Technology and Drying Modeling
- Rice Research and Development
- Statistics for Agricultural Research

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2561	Best paper award งานวิจัยเรื่อง Drying characteristics and quality evaluation in convective drying of <i>Cissus quadrangularis</i> Linn.	งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The 4 th International Conference on Engineering, Applied Science and Technology, July 4-7, 2018, Phuket Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2557	ทุนวิจัยเรื่อง การผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุกปลอดเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2558	ทุนวิจัยเรื่อง การอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบตสัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
2559	ทุนวิจัยเรื่อง เครื่องอบแห้งสมุนไพรสังฆาตแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
2560	ทุนวิจัยเรื่อง เครื่องอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดโดยใช้รังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่องเพื่อใช้ในการสกัดน้ำมันรำข้าว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
2560	ทุนวิจัยเรื่อง การศึกษาเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับไอน้ำร้อนยวดยิ่งสำหรับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

Sawardsuk, P., **Jongyingcharoen, J.S.** and Cheevitsopon, E. (2018). Experimental investigation of air characteristics during dehumidification in the multilayer desiccant bed column system. *MATEC Web of Conferences*, 192, 03012.

Sansak, S. and **Jongyingcharoen, J.S.** (2018). Effect of hot air assisted infrared drying on drying characteristics and quality of rice bran pellets. *MATEC Web of Conferences*, 192, 03040.

Thanimkarn, S., Cheevitsopon, E. and **Jongyingcharoen, J.S.** (2018). Drying characteristics and quality evaluation in convective drying of *Cissus quadrangularis* Linn. *MATEC Web of Conferences*, 192, 03041.

Vichaiya, P. and **Jongyingcharoen, J.S.** (2018). Vibratory bed assisted infrared drying of parboiled rice and its rice bran stability. *MATEC Web of Conferences*, 192, 03060.

Wutthigarn, P., Hongwiangjan, J. and **Jongyingcharoen, J.S.** (2018). Modeling of hot air drying of coconut residue. *MATEC Web of Conferences*, 192, 03061.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Suvanvisan, P., Cheevitsopon, E. and **Jongyingcharoen, J.S.** (2561). Study on psychrometric properties of air in a hot air drying system combined with a desiccant wheel. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย*, 1 (2561), 6-12.

Jongyingcharoen, J.S. and Cheevitsopon, E. (2016). Development of UV-treated cooked germinated brown rice and effect of UV-C treatment on its storability, GABA content, and quality. *LWT – Food Science and Technology*, 71, 243-248.

Sripinyowanich, J. and Noomhorm, A. (2012). Effects of freezing pretreatment, microwave-assisted vibro-fluidized bed drying, and drying temperature on instant rice production and quality. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37, 314-324.

Assawarachan, R., **Sripinyowanich, J.**, Theppadungporn, K. and Noomhorm, A. (2011). Drying paddy by microwave vibro-fluidized bed drying using single mode applicator. *Journal of Food, Agriculture, & Environment*, 9 (2), 50-54.

Sripinyowanich, J. and Noomhorm, A. (2011). A new model and quality of unfrozen and frozen cooked rice dried in a microwave vibro-fluidized bed dryer. *Drying Technology*, 29 (7), 735-748.

การเสนอผลงานวิชาการ

Suvanvisan, P., Cheevitsopon, E. and **Jongyingcharoen, J.S.** (2017). Thin-layer drying models for dehumidified hot air drying of germinated brown rice. In *the 10th TSAE International Conference*, 7-9 September 2017. Bangkok, Thailand.

Vichaiya, P. and **Jongyingcharoen, J.S.** (2017). Temperature profile and moisture content during infrared drying of pelletized rice bran. In *the 10th TSAE International Conference*, 7-9 September 2017. Bangkok, Thailand.

Jongyingcharoen, J.S., Thanimkarn, S. and Vichaiya, P. (2015). Paddy drying in a vibration-assisted vacuum infrared dryer. In *the 8th TSAE International Conference*, 17-19 March 2015. Bangkok, Thailand.

Thanimkarn, S. and **Jongyingcharoen, J.S.** (2014). Thin-layer drying characteristics of *Cissus Quadrangularis* Linn. and selection of suitable drying models. In *the 7th TSAE International Conference*, 2 – 4 April 2014. Krungsri River Hotel, Ayuthaya, Thailand.

Sonsanguan, N., Sirisomboon, P. and **Jongyingcharoen, J.S.** (2012). Selection of objective test for cooked rice texture determination in research and industrial work. In the 2nd International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2012), 21-24 November 2012. Swissôtel Le Concorde, Bangkok, Thailand.

Sripinyowanich, J., Sopanattayanon, O., Assawarachan, R., Theppadungporn, K. and Noomhorm, A. (2012). Effect of moisture content of dried coconut residue on its shelf life, quality, and sorption isotherm. In *the International Congress on Food Engineering and Technology 2012*, 28 – 30 March 2012. Impact Convention Center, Bangkok, Thailand.

Sopanattayanon, O., **Sripinyowanich, J.**, Assawarachan, R. and Noomhorm, A. (2011). Effects of temperature and thin layer on quality change of coconut residue. In *the 12th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering*, 31 March – 1 April 2011. Cholchan Pattaya Resort, Chonburi, Thailand.

Sripinyowanich, J., Assawarachan, R. and Noomhorm, A. (2010). Microwave vibro-fluidized bed drying in a single mode applicator. In *the National Science and Technology Fair 2010*, 7-22 August 2010. BITEC, Bangkok, Thailand.

Sripinyowanich, J. and Noomhorm, A. (2009). Effects of heat moisture treatments using microwaves on properties of rice flour products. In *the 4th International Conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering*, 19-20 January 2009. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

Sripinyowanich, J. and Noomhorm, A. (2007). Identification of a non-aromatic rice (Chainat 1) in mixing with an aromatic rice (Khao Dawk Mali 105). In V.M. Salokhe, H.P.W. Jayasuriya and P. Soni (Eds.), *International Agricultural Engineering Conference*, 3-6 December 2007. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

Sripinyowanich, J. and Noomhorm, A. (2007). Study on quality of Thai aromatic rice. In *International Workshop on Food Safety and Processing Technology*, 29-30 November 2007. Nong Lam University, Ho Chi Minh City, Vietnam.

Sripinyowanich, J. and Noomhorm, A. (2006). Identification of a mixture in a Thai aromatic rice (Khao Dawk Mali 105). In *International Conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies*, 12-14 December 2006. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

อนุสิทธิบัตร เรื่อง กรรมวิธีการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน วันประกาศโฆษณาและวันออกอนุสิทธิบัตร 21 มิถุนายน 2561

อื่นๆ

ผลงานเขียนหนังสือ

Jongyingcharoen, J.S. (2014). Thermal and non-thermal processing of functional foods. In Noomhorm, A., Ahmad, I. and Anal, A.K. (Eds.), *Functional foods and dietary supplements*. Wiley-Blackwell.

Anal, A. K., Ahmad, I., Sripinyowanich, J., & Noomhorm, A. (2013). Sustainable Food Grain Processing. In B. Tiwari, T. Norton, N.M. Holden (Eds.), *Sustainable Food Processing*, John, & Wiley Publisher, 269.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้