# การออกแบบและพัฒนาหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี
# Design and development of a radial-flow desiccant tower

นางสาวจิวนันท์ สังสุมาตร
นายเจตนิพัทธ์ อัศวเดชเมธากุล
นางสาวสุติกาญจน์ ศรีมุข

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

# การออกแบบและพัฒนาหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี
# Design and development of a radial-flow desiccant tower


นางสาวจิวนันท์ สังสุมาตร
นายเจตนิพัทธ์ อัศวเดชเมธากุล
นางสาวสุติกาญจน์ ศรีมุข


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Design and development of a radial-flow desiccant tower

Miss Jiwanan Sungsumart
Mr. Jednipat Assawadejmathakul
Miss Sutikarn Srimuk

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและพัฒนาหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี

Design and development of a radial-flow desiccant tower


นักศึกษาผู้จัดทำโครงการ

1. นางสาวจิวนันท์ สังสุมาตร รหัสนักศึกษา 56010211

2. นายเจตนิพัทธ์ อัศวเดชเมธากุล รหัสนักศึกษา 56010218

3. นางสาวสุติกาญจน์ ศรีมุข รหัสนักศึกษา 56011338




.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.เอกสิทธิ์ ศรีธรรม)


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|---|---|---|
| หัวข้อโครงงาน | การออกแบบและพัฒนาหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี | |
| นักศึกษา | นางสาวจิวนันท์ | สังสุมาตร |
| | นายเจตนิพัทธ์ | อัศวเดชเมธากุล |
| | นางสาวสุติกาญจน์ | ศรีมุข |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ดร.เอกสิทธิ์ | ศรีธรรม |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต | |
| ภาควิชา | วิศวกรรมอาหาร | |
| ปีการศึกษา | 2559 | |

## บทคัดย่อ


โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีสำหรับระบบอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้น ทำการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความชื้นภายในหอดูดความชื้น จากอิทธิพลของ 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ลักษณะการบรรจุสารดูดความชื้น ซึ่งแบ่งเป็นแบบบรรจุเต็ม (Full packing) และแบบแบ่งชั้น (Layered packing) และ 2) ระยะเวลาที่อากาศสัมผัสสารดูดความชื้น (Residence time, $t_R$) 3 ระดับ ได้แก่ 0.021 0.032 และ 0.044 วินาที จากการทดลองพบว่าการถ่ายเทความชื้นเกิดขึ้นสูงสุดในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร ($ka$) อยู่ในช่วง 11.81-15.15 กก./ลบ.ม.-วินาที หลังจากนั้นอัตราการถ่ายเทความชื้นจะค่อย ๆ ลดลงโดยค่า $ka$ อยู่ในช่วง 2.05-3.16 กก./ลบ.ม.-วินาที การบรรจุซิลิกาเจลแบบบรรจุเต็มทำให้อัตราการดูดความชื้นของหอดูดความชื้นสูงกว่าการบรรจุแบบแบ่งชั้นในช่วงเริ่มต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาโดยตลอดทั้งกระบวนการแล้ว การบรรจุแบบแบ่งชั้นสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้มากกว่า หอดูดความชื้นสามารถดูดความชื้นได้มากที่สุดเมื่อออกแบบให้ค่า $t_R$ น้อยที่สุด (0.021 วินาที) โดยปริมาณความชื้นที่ดูดซับได้ในช่วงเวลา 2 ช.ม. มีค่าเป็น 0.17 และ 0.19 กก.$_{น้ำ}$/กก.$_{ซิลิกาเจล}$ สำหรับกรณีบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้นตามลำดับ ในส่วนของการคายความชื้นพบว่า อัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่มีการบรรจุแบบแบ่งชั้นสูงกว่าแบบบรรจุเต็มสำหรับทุก ๆ ค่า $t_R$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| Project Title | Design and development of a radial-flow desiccant tower |
| Students | Miss Jiwanan Sungsumart |
| | Mr. Jednipat Assawadejmathakul |
| | Miss Sutikarn Srimuk |
| Project advisor | Dr.Eakasit Sritham |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Program | Food Engineering |
| Academic year | 2016 |


## Abstract

This project was aimed at the design and development of a radial-flow desiccant tower for a hot-air drying process using silica gel as a desiccant. The characteristics of moisture transfer within the tower were studied. The two main factors included 1) packing styles: full packing and layered packing, and 2) residence times ($t_R$): 0.021, 0.032, and 0.044 s. The highest moisture adsorption rate was found at the beginning of the process with the volumetric mass transfer coefficient (*ka*) values in a range of 11.81-15.15 kg/m$^3$•s. The adsorption rate then gradually decreased until *ka* values fall within the range of 2.05-3.16 kg/m$^3$•s. At the beginning of the process, the full packing configuration could provide a higher adsorption rates than that of the layered packing. However, when considered throughout the process, the layered packing could adsorb more moisture.

The experiment was found that, the layered packing absorb water high as compared to designed desiccant tower at the minimum resident time (0.021 second) . For this reason, renders the layered packing worth higher rate as compared to the full packing, moisture at the full packing could absorb is 0.17 $kg_{water}/kg_{dry\ silicagel}$ and



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the layered packing could absorb is 0.19 $kg_{water}/kg_{dry\ silicagel}$. In desorption experiment it was found that the rate of the layered packing have higher value than the full packing for every residence time. It was found all that the rate of moisture transfer primarily depended on the difference of partial pressure of water vapor in the surrounding and in silica gel. The tower could adsorb highest amount of moisture when the $t_R$ value was lowest (0.021 s). The total amount of moisture that the tower could adsorb during the 2-hr period of experiment was 0.17 and 0.19 $kg_{water}/kg_{silica\ gel}$ for the full packing and the layered packing, respectively. In terms of moisture desorption, the layered packing configuration provided higher rates than that of the full packing for every $t_R$ values.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เอกสิทธิ์ ศรีธรรม และ รศ.สาทิป รัตนภาสกร ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทดลอง การเรียบเรียงเนื้อหา และตรวจแก้ไขรายงาน ตลอดจนสนับสนุนผู้วิจัยตลอดมาจนรายงานฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกพงศ์ ชีวิตโสภณ ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อชุดทดลองในการทำวิจัย และขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร นายอำนาจ คูตะคุ และนางสาววราภรณ์ มาไพศาลทรัพย์ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและคอยจัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยตลอดมา

ตลอดระยะเวลาในการจัดทำโครงงานวิจัยเล่มนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งให้ความรัก ความเมตตา ความห่วงใย ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาร่วมสถาบันและตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยโครงงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | IV |
| สารบัญ | V |
| สารบัญตาราง | VIII |
| สารบัญรูป | IX |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| 1.4 ขอบเขตการศึกษา | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 การอบแห้ง | 4 |
| 2.1.1 ความชื้น (Moisture Content) | 4 |
| 2.1.2 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) | 5 |
| 2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการทำแห้ง | 6 |
| 2.2 การถ่ายเทมวล (Mass Transfer) | 7 |
| 2.2.1 การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล (Molecular diffusion) | 7 |
| 2.2.2 การถ่ายเทมวลสารโดยการพา (Convective Mass Transfer) | 10 |
| 2.2.3 การถ่ายเทมวลระหว่างเฟส | 11 |
| 2.3 สารดูดความชื้น (Desiccant) | 12 |
| 2.3.1 ประเภทสารดูดความชื้น | 12 |




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| 2.3.2 วัฏจักรสารดูดความชื้นในกระบวนการถ่ายเทความชื้น | 16 |
| 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการถ่ายเทความชื้นของสารดูดความชื้น | 19 |
| 2.4 การประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นร่วมกับกระบวนการอบแห้ง | 23 |
| 2.4.1 การประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นประเภทของแข็ง | 23 |
| 2.4.2 การประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นประเภทของเหลว | 27 |
| 2.4.3 แหล่งพลังงานสำหรับการคายความชื้นของสารดูดความชื้น | 29 |
| 2.5 รูปแบบการจัดเรียงสารดูดความชื้นประเภทของแข็ง | 32 |
| 2.5.1 แบบ Vertical packed bed | 32 |
| 2.5.2 แบบ Radial bed | 35 |
| บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย | 39 |
| 3.1 การทดลองเบื้องต้น | 39 |
| 3.1.1 อุปกรณ์ | 39 |
| 3.1.2 วิธีการทดลอง | 40 |
| 3.2 การออกแบบและสร้างหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี | 40 |
| 3.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่ออัตราการการถ่ายเทความชื้นภายในหอดูดความชื้น | 43 |
| 3.3.1 อุปกรณ์ | 43 |
| 3.3.2 การทดลองดูดความชื้น | 45 |
| 3.3.3 การทดลองคายความชื้น | 46 |
| 3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (ka) | 46 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| 3.4.1 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ | 46 |
| 3.4.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (ka) | 47 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง | 49 |
| 4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น | 49 |
| 4.2 ผลของรูปแบบการจัดเรียงซิลิกาเจล | 54 |
| 4.2.1 ความดันตกคร่อม(Pressure drop) | 54 |
| 4.2.2 การดูดความชื้น | 56 |
| 4.2.3 การคายความชื้น | 62 |
| 4.2.4 แบบจำลองรูปแบบการไหลของอากาศในหอดูดความชื้น | 66 |
| 4.3. ผลของระยะเวลาที่อากาศสัมผัสสารดูดความชื้น (Residence times, $t_R$) | 69 |
| 4.3.1 การดูดความชื้น | 69 |
| 4.3.2 การคายความชื้น | 72 |
| 4.3.3 วิเคราะห์ผลของระยะเวลาที่อากาศสัมผัสสารดูดความชื้น | 75 |
| 4.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร ($ka$) | 75 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 80 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 80 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 81 |
| บรรณานุกรม | 82 |
| ภาคผนวก ก. ข้อมูลจากการทดลอง | 84 |
| ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ | 97 |
| ภาคผนวก ค. ภาพการทดลอง | 99 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 3.1 | ขนาดชุดบรรจุซิลิกาเจล 2 กิโลกรัม | 41 |
| 3.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดชุดบรรจุซิลิกาเจลกับระยะเวลาที่อากาศสัมผัสซิลิกาเจล | 45 |
| ก.1 | ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที | 85 |
| ก.2 | ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที | 86 |
| ก.3 | ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที | 87 |
| ก.4 | ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที | 88 |
| ก.5 | ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที | 89 |
| ก.6 | ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที | 90 |
| ก.7 | ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที | 91 |
| ก.8 | ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที | 92 |
| ก.9 | ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที | 93 |
| ก.10 | ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที | 94 |
| ก.11 | ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที | 95 |
| ก.12 | ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที | 96 |
| ข.1 | Two-Way ANOVA | 98 |
| ข.2 | LSD | 98 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป


| รูปที่ | หน้า |
|---|---|
| 2.1 ความชื้นระหว่างการอบแห้งเชิงทฤษฎี | 5 |
| 2.2 อัตราการอบแห้งเชิงทฤษฎี | 5 |
| 2.3 Equilibrium Capacity ของสารดูดความชื้นชนิดต่างๆ | 15 |
| 2.4 อัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดต่างๆ | 15 |
| 2.5 ความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้น | 18 |
| 2.6 วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น | 18 |
| 2.7 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล | 19 |
| 2.8 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล | 20 |
| 2.9 อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล | 21 |
| 2.10 อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล | 21 |
| 2.11 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล | 22 |
| 2.12 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล | 22 |
| 2.13 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับสารทำความเย็นและสารดูดความชื้น | 23 |
| 2.14 เครื่องอบแห้งแบบใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับสารดูดความชื้น | 24 |
| 2.15 Desiccant-rotor dehumidifier | 25 |
| 2.16 ระบบอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับ Rotary desiccant wheel | 26 |
| 2.17 ระบบอบแห้งแบบใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับสารดูดความชื้น | 27 |
| 2.18 รูปแบบการจัดเรียงสารดูดความชื้น | 27 |
| 2.19 ระบบการทำงานสารดูดความชื้นประเภทของเหลว | 28 |
| 2.20 ระบบอบแห้งร่วมกับสารดูดความชื้นประเภทของเหลว | 29 |
| 2.21 ปั๊มความร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้น | 30 |
| 2.22 การคายความชื้นจากสารดูดความชื้นเหลวด้วยระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ | 31 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.23 จัดเรียงสารดูดความชื้นแบบ Vertical bed 33
2.24 ชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบ Vertical bed 33
2.25 ปริมาณน้ำที่สะสมในสารดูดความชื้นแต่ละชั้นต่อเวลา 33
2.26 อัตราการดูดความชื้นแต่ละชั้นต่อเวลา 33
2.27 ทฤษฎีและการทดลองผลของสัดส่วนความเข้มข้นในของไหลต่อเวลา 35
2.28 ลักษณะการจัดเรียงสารดูดความชื้น Radial bed 36
2.29 ชุดทดลองหอดูดความชื้น Radial bed 36
2.30 ปริมาณน้ำที่สะสมในสารดูดความชื้นต่อเวลา 37
2.31 อัตราการดูดความชื้นต่อเวลา 37
2.32 ปริมาณน้ำที่สะสมในสารดูดความชื้นกับอัตราส่วน $D_0/D_i$ 38
2.33 ผลของความดันตกคร่อมกับรูปแบบการจัดเรียงสารดูดความชื้น 38
2.34 ค่า ka ของกระบวนการดูดความชื้นการจัดเรียงสารดูดความชื้น 38
3.1 การจัดเรียงซิลิกาเจลแบบบรรจุเต็ม 42
3.2 การจัดเรียงซิลิกาเจลแบบแบ่งชั้น 42
3.3 อุปกรณ์ในการทดลอง 44
3.4 ภาพชุดทดลอง 44
3.5 แผนภูมิไซโครเมตริก 48
4.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ในสภาวะบรรยากาศที่มีความชื้นที่ 54%RH 50
4.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ในสภาวะบรรยากาศที่มีความชื้นที่ 63%RH 51
4.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ในสภาวะบรรยากาศที่มีความชื้นที่ 75%RH 52
4.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่อุณหภูมิ 60°C 53
4.5 ความดันตกคร่อมแบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ 55
4.6 ปริมาณน้ำสะสมในซิลิกาเจลแบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที 59

4.8 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที 60

4.9 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที 61

4.10 การเปลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที 63

4.11 การเลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที 64

4.12 การเปลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที 65

4.13 การไหลของอากาศสัมผัสซิลิกาเจล ที่รูปแบบการบรรจุต่างกัน (A) แบบบรรจุเต็ม (B) แบบแบ่งชั้นไม่ติดครีบ (C) แบบแบ่งชั้นติดครีบ 67

4.14 สีของซิลิกาเจลหลังผ่านกระบวนการดูดความชื้น สำหรับการบรรจุแบบแบ่งชั้น (A) ไม่ติดครีบ (B) ติดครีบ 68

4.15 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ สำหรับการบรรจุแบบบรรจุเต็ม 70

4.16 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ สำหรับการบรรจุแบบแบ่งชั้น 71

4.17 การเปลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ สำหรับการบรรจุแบบบรรจุเต็ม 73

4.18 การเปลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ สำหรับการบรรจุแบบแบ่งชั้น 74

4.19 แบบจำลองการไหลของอากาศผ่านชั้นซิลิกาเจลที่ $t_R$ ต่างกัน (A) $t_R$ มาก (B) $t_R$ น้อย 75

4.20 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร ($ka$) ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที 76

4.21 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (ka) ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที 77

ค.1 ชุดบรรจุซิลิกาเจลแบบบรรจุเต็ม 100

ค.2 ชุดบรรจุซิลิกาเจลแบบแบ่งชั้น 100

ค.3 การทดลองดูดความชื้น แบบบรรจุเต็ม, $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที ($D_o/D_i$ =3) 101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.4 การทดลองดูดความชื้น แบบบรรจุเต็ม, $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที ($D_o/D_i$ =2.5) 101

ค.5 การทดลองดูดความชื้น แบบบรรจุเต็ม, $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที ($D_o/D_i$ =2) 101

ค.6 การทดลองดูดความชื้น แบบแบ่งชั้น, $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที ($D_o/D_i$ =3) 102

ค.7 การทดลองดูดความชื้น แบบแบ่งชั้น, $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที ($D_o/D_i$ =2) 102

ค.8 การทดลองคายความชื้น แบบบรรจุเต็ม, $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที ($D_o/D_i$ =2.5) 103

ค.9 การทดลองคายความชื้น แบบแบ่งชั้น, $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที ($D_o/D_i$ =2.5) 103

ค.10 การทดลองคายความชื้น แบบแบ่งชั้น, $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที ($D_o/D_i$ =2) 104

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากผลผลิตทางการเกษตรซึ่งมักจะเกิดการเน่าเสียอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีความชื้นสูง เหตุผลดังกล่าวทำให้ไม่สามารถเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรได้นานเท่าที่ควรทำให้การส่งออกผลิตภัณฑ์มีข้อจำกัดหลายอย่างและเนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรเป็นสินค้าที่ทำรายได้ให้กับประเทศ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องผ่านกรรมวิธีและการเก็บรักษาด้วยวิธีที่เหมาะสม การทำแห้งเป็นวิธีที่ช่วยลดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์โดยการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ให้เกิดความหลากหลายและรายได้ที่มากขึ้น แต่ผลิตภัณฑ์บางประเภทเสียสภาพได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนไม่สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิสูงได้เพราะจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ สี กลิ่น รส เนื้อสัมผัส รวมถึงสารอาหาร (Sato et al., 1996)

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้สารดูดความความชื้นร่วมกับกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อลดปัญหาของการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเกินไป คือการลดความชื้นของอากาศก่อนที่จะนำไปเข้าสู่กระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยให้อากาศไหลผ่านสารดูดความชื้นเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความชื้นไปยังสารดูดความชื้นสารดูดทำให้ความชื้นของอากาศลดลงก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการอบแห้ง รูปแบบของเครื่องลดความชื้นที่นิยมใช้ร่วมกับกระบวนการอบแห้ง ได้แก่ วงล้อดูดความชื้น (Desiccant Wheel) และชุดลดความชื้นชนิดคอลัมน์ (Miller, 1983) นอกจากนี้สารดูดความชื้นสามารถนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้งแบบต่อเนื่องได้ เช่น การใช้สารดูดความชื้นประเภทของแข็งในชุดลดความชื้นแบบคอลัมน์คู่ หลักการทำงาน คือ ในขณะที่คอลัมน์หนึ่งดูดความชื้นในอากาศไว้อีกคอลัมน์จะถูกกำจัดความชื้นออกสู่อากาศโดยลมที่ผ่านเครื่องทำความร้อนมาก่อนหน้าเพื่อทำให้เป็นลมร้อน ซึ่งหลักการสำคัญ คือ เวลาที่ใช้ในการกำจัดความชื้นจะต้องน้อยกว่าเวลาที่ใช้ดูดความชื้นเพื่อให้ระบบอบแห้งทำงานได้อย่างต่อเนื่องทั้งนี้อัตราการดูดและคายความชื้นขึ้นอยู่กับลักษณะการบรรจุสารดูดความชื้น อัตราการไหล ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของอากาศ (Hamed, 2002)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของสารดูดความชื้นที่ใช้ในกระบวนมีทั้งประเภทของแข็งและของเหลว ในการใช้สารดูดความชื้นประเภทของแข็งระบบจะซับซ้อนน้อยกว่าประเภทของเหลว แต่ต้องคำนึงถึงความดันตกคร่อมของอากาศขณะผ่านสารดูดความชื้น เพราะการใช้สารดูดความชื้นประเภทของแข็งจะเกิดการต้านทานการไหลของอากาศมากเนื่องจากการจัดวางสารดูดความชื้นในระบบจะจัดวางซ้อนทับกันทำให้มีช่องว่างที่จะให้อากาศไหลผ่านขณะถ่ายเทความชื้นได้น้อย แตกต่างกับระบบที่ใช้สารดูดความชื้นประเภทของเหลวความต้านทานการไหลของอากาศที่จะเกิดที่ผิววัสดุหรือผิวท่อเท่านั้น ดังนั้นถ้าระบบใช้สารดูดความชื้นประเภทของแข็งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการที่ต้องปั๊มอากาศเพิ่ม เพื่อลดผลกระทบด้านความดันตกคร่อม (Gandhidasan, 2002) จากปัญหาการเกิดความดันตกคร่อมของอากาศในการไหลผ่านสารดูดความชื้นประเภทของแข็งที่มีการบรรจุซ้อนทับกันไปตามความสูงของหอดูดความชื้น จึงได้มีการพัฒนาหอดูดความชื้นโดยการบรรจุสารดูดความชื้นตามความหนาของทรงกระบอกกลวง ให้อากาศไหลเข้ามาบริเวณช่องว่างตรงกลางและไหลผ่านสารดูดความชื้นไปตามแนวรัศมีของทรงกระบอกกลวง ซึ่งทิศทางการไหลของอากาศไปตามแนวรัศมีจะลดระยะทางที่อากาศไหลผ่านสารดูดความชื้นทำให้ช่วยลดความดันตกคร่อมของอากาศลงได้

**1.2 วัตถุประสงค์**

1) เพื่อสร้างชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี

2) เพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความชื้นภายในหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี

3) เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้นและระยะเวลาที่อากาศสัมผัสสารดูดความชื้นของหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี

**1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1) ทราบพฤติกรรมการถ่ายเทความชื้นภายในหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี

2) ทราบรูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้นและระยะเวลาที่อากาศสัมผัสสารดูดความชื้นที่เหมาะสมทำให้หอดูดความชื้นมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความชื้นสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) สามารถนำผลที่ได้ไปเป็นแนวทางในการออกแบบหอดูดความชื้นสำหรับระบบอบแห้งแบบลมร้อน

**1.4 ขอบเขตการศึกษา**

1) ใช้ซิลิกาเจลชนิดสีน้ำเงินเป็นสารดูดความชื้น

2) ให้อากาศไหลผ่านหอดูดความชื้นตามแนวรัศมี

3) ให้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.08 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

4) อุณหภูมิอากาศร้อนที่นำมาให้ความร้อนแก่สารดูดความชื้นเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

5) บรรจุสารดูดความชื้น 2 แบบ แก่ แบบบรรจุเต็ม (Full packing) และแบบแบ่งชั้น (Layered packing)

6) ระยะเวลาที่อากาศสัมผัสสารดูดความชื้น 3 ระดับ ได้แก่ 0.021, 0.032 และ 0.044 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 การอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying)เป็นกระบวนการลดความชื้นภายในวัสดุ โดยการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุเพื่อเป็นความร้อนแฝงของการระเหยไล่ความชื้นออกจากวัสดุ วัตถุประสงค์ของการอบแห้ง คือ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะผลผลิตทางการเกษตรซึ่งเน่าเสียได้ง่าย เนื่องจากการอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ซึ่งช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และชะลอการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นสาเหตุการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งมีน้ำหนักเบาและปริมาตรลดลง สะดวกต่อการขนส่ง,การบริโภค หรือการนำไปเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปด้วยวิธีอื่น ๆ

### 2.1.1 ความชื้น (Moisture content)

ความชื้น เป็นค่าที่แสดงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ปริมาณความชื้นนิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์มี 2 รูปแบบ คือความชื้นฐานเปียกและความชื้นฐานแห้ง

ความชื้นฐานเปียก (Wet basis) แสดงปริมาณน้ำที่มีในวัสดุเทียบกับน้ำหนักทั้งหมดของวัสดุ เป็นค่าความชื้นที่ใช้โดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน

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

ความชื้นฐานแห้ง (Dry basis) แสดงปริมาณน้ำทีมีในวัสดุเทียบกับน้ำหนักแห้งของวัสดุ เป็นค่าที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง เพราะช่วยให้คำนวณได้สะดวก เนื่องจากน้ำหนักแห้งของวัสดุคงที่ตลอดการวัดความชื้นของอาหาร

$$M_w = \frac{w-d}{d} \times 100\% \qquad (2.2)$$

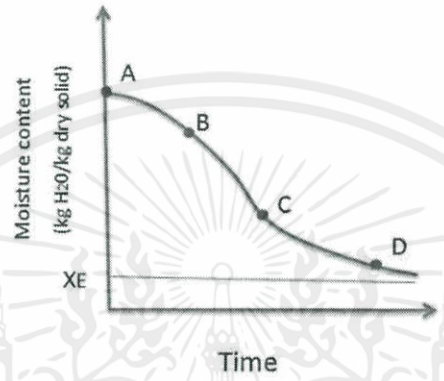
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $M_w$ คือ ความชื้นฐานเปียก, %

$M_d$ คือ ความชื้นฐานแห้ง, %

$w$ คือ มวลของวัสดุเปียก, kg

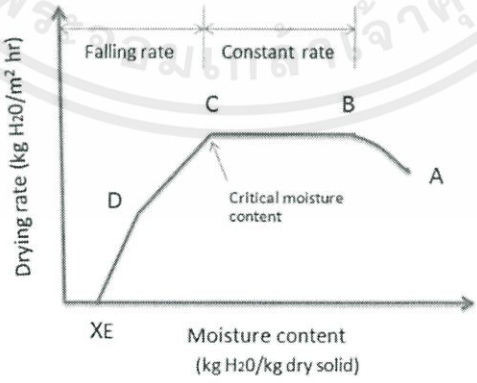
$d$ คือ มวลของวัสดุแห้งที่ไม่มีความชื้น, kg




**รูปที่** 2.1 ความชื้นระหว่างการอบแห้งเชิงทฤษฎี (พิมพ์เพ็ญและนิธิยา, 2560)

### 2.1.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

อัตราการทำแห้ง คือ อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อหน่วยเวลา ระหว่างการทำแห้งแบ่งเป็น 3 ช่วง คือช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง




**รูปที่** 2.2 อัตราการอบแห้งเชิงทฤษฎี (พิมพ์เพ็ญและนิธิยา, 2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period -AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่วัสดุใช้ในการอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้น (A) ของวัสดุสูง เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางกับวัสดุ ทำให้อุณหภูมิพื้นผิววัสดุ มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของตัวกลาง และอัตราการทำแห้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (Constant rate)

2) ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (Constant rate period-BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุ ณ เวลานี้ เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content

$$R_C = \frac{h}{\lambda}(T_v - T_i) \qquad (2.3)$$

โดย $R_C$ คือ อัตราการอบแห้งในช่วงความเร็วคงที่

$h$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient), $w/m^2\,^{\circ}C$

$\lambda$ คือ ความร้อนแฝงของการระเหย, $J/kg_{water}$

$T_v$ คือ อุณหภูมิของลมร้อน, $^{\circ}C$

$T_i$ คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ, $^{\circ}C$

3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในวัสดุเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการอบแห้งจะลดลงจนถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ที่ความชื้นนี้อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

### 2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

สภาพธรรมชาติของวัตถุดิบเริ่มต้นก่อนการทำแห้ง ได้แก่ ขนาด รูปร่าง และการบรรจุวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะแวดล้อมระหว่างการทำแห้ง ได้แก่ ชนิดของเครื่องทำแห้ง (Drier) อุณหภูมิ เวลา ความดันบรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ความเร็วลมและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient)

## 2.2 การถ่ายเทมวล (Mass transfer)

การถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer) เกิดจากการถ่ายเทมวลสารในระบบของสารตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไปที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่จากความเข้มข้นมากไปยังความเข้มข้นน้อย เพื่อให้เกิดความสมดุลของโมเลกุลในระบบ ซึ่งกลไกนี้ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนของมวลสาร นอกจากนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิ ความดันหรือแรงจากภายนอก ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้เช่นกัน การโอนมวลสารเกิดขึ้นได้ 2 แบบ ได้แก่ การถ่ายเทมวลสารโดยการแพร่ของโมเลกุล และการถ่ายเทมวลสารโดยการพา ซึ่งในหนึ่งกระบวนการอาจเกิดการถ่ายเทมวลทั้ง 2 แบบพร้อมกันได้

### 2.2.1 การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล (Molecular diffusion)

เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแต่ละโมเลกุลผ่านสสารด้วยพลังงานความร้อน (Thermal energy) ที่มีอยู่ในโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์ (Absolute zero) โดยที่โมเลกุลแต่ละโมเลกุลจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงแบบไม่เป็นระเบียบ (Random motion) ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อมีการชนกันของโมเลกุลความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไป ระยะทางเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลโดยที่ไม่มีการชนกับโมเลกุลอื่นเรียกว่าเส้นทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path) และความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่จะขึ้นกับอุณหภูมิ การถ่ายเทมวลสารแบบนี้จึงเป็นการแพร่อย่างช้า ๆ ถึงแม้จะมีการเพิ่มอัตราการแพร่ได้ถ้าความดันระบบลดลง(ลดอัตราการชนกันของโมเลกุล) และเพิ่มอุณหภูมิ (เพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเกิดในของไหลที่หยุดนิ่ง (Stagnant fluid) เมื่อเทียบกับการถ่ายเทความร้อนแล้ว การถ่ายเทมวลสารระดับโมเลกุลจะเปรียบเสมือนการนำความร้อน กระบวนการแพร่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์จากกฎของฟิค (Fick's law) ที่กล่าวไว้ว่า "ฟลักซ์เชิงมวลต่อหน่วยพื้นที่ขององค์ประกอบหนึ่ง เป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของความเข้มข้น" ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J^{*} = -D \frac{dc}{dx} \qquad (2.4)$$

โดย $J^{*}$ คือ การแพร่ในรูปของฟลักซ์เชิงมวล, kmol/$m^2$s

$D$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสารผ่านตัวกลาง, $m^2$/ s

$c$ คือ ความเข้มข้นของมวลสาร, kmol/$m^3$

$x$ คือ ระยะห่างระหว่างความเข้มข้น 2 จุดที่กำลังพิจารณา, m

**ลักษณะของการแพร่แบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ**

1. การแพร่ของโมเลกุลเดียว (Unimolecular diffusion) เป็นการแพร่ของโมเลกุล A ในของผสมเท่านั้นที่มีการเคลื่อนที่ไปสู่หรือเคลื่อนที่จากพื้นผิวทำให้การไหลสุทธิ (Total flow) ของของผสมมีค่าเท่ากับการไหลของโมเลกุล A ตัวอย่างเช่น การดูดซับก๊าซลงในของเหลว

2. การแพร่ของโมลที่เท่ากันในทิศตรงกันข้าม (Equimolar counter diffusion) เป็นการแพร่ของโมเลกุล A ที่เท่ากับและตรงกันข้ามกับการแพร่ของโมเลกุล B ทำให้การไหลสุทธิเป็นศูนย์ ตัวอย่างเช่น การกลั่นซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลโดยปริมาตรของก๊าซ แต่มีการเปลี่ยนแปลงในของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น

3. การแพร่ที่มีปฏิกิริยาเคมีเกี่ยวข้อง (Molecular diffusion with chemical reaction) เป็นการแพร่ของโมเลกุล A และโมเลกุล B ในทางตรงกันข้ามแต่ไม่เท่ากัน

**ตัวแปรที่ต้องคำนึง**

1. ความเข้มข้นเชิงมวลและเชิงโมล ซึ่งนิยามว่ามวลหรือโมลต่อปริมาตร ในระบบของผสมความเข้มข้นรวมจะเท่ากับผลรวมของความเข้มข้นของแต่ละสารในระบบ

2. ความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient)

3. ความเร็ว ในระบบของผสมความเร็วของสารแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน

4. ฟลักซ์ (Flux) ซึ่งนิยามว่าเป็นปริมาณเวคเตอร์ของมวลหรือโมลที่เคลื่อนผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่ง ๆ ที่ตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ในช่วงเวลาหนึ่ง

5. ฟลักซ์ (Flux) เมื่อเทียบกับระนาบที่เคลื่อนที่ ตามทฤษฎีของฟิคของสารนั้น ๆ จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วสัมพัทธ์กับความเร็วเฉลี่ยเชิงมวลหรือเชิงโมลได้ก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของความเข้มข้นเท่านั้น

**สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity or Diffusion coefficient)**

สัมประสิทธิ์การแพร่ คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการแพร่ของสารนั้น ๆ ในตัวกลาง ซึ่งมีหน่วยเป็น ($m^2/s$) ค่านี้สามารถเปรียบเทียบได้กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal diffusivity) โดยขึ้นกับชนิดและส่วนผสมของระบบ รวมทั้งสภาพแวดล้อม เช่น ความดันและอุณหภูมิ โมเลกุลของก๊าซสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายเมื่อเทียบกับของเหลวซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าของแข็ง ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซจึงมีค่าสูงสุด โดยทั่วไปอยู่ในช่วง $5\times10^{-6}$ ถึง $10^{-5}$ $m^2/s$ สัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลวอยู่ในช่วงปานกลาง คือ $10^{-10}$ ถึง $10^{-9}$ $m^2/s$ ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ $10^{-14}$ ถึง $10^{-10}$ $m^2/s$ โดยทั่วไปแล้วสำหรับระบบที่ความเข้มข้นหรือความหนาแน่นน้อย ๆ สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากพลังงานความร้อนของโมเลกุลสูงขึ้น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

1. สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซ (Diffusivity of gases) สมการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซที่มีความหนาแน่นต่ำ ถูกค้นคว้าโดยใช้หลักทฤษฎีจลนศาสตร์ที่คำนึงถึงคุณสมบัติของก๊าซผสมและแรงดึงดูด (Attraction force) และแรงผลัก (Repulsion force) ระหว่างโมเลกุล

2. สัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลว (Diffusivity of liquids) การแพร่ของของเหลวเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบของโมเลกุล (Random motion) แต่ระยะทางเฉลี่ยระหว่างการชน (Average distance traveled between collisions) จะน้อยกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลซึ่งตรงกันข้ามกับก๊าซซึ่งมีระยะทางเดินอิสระ (Mean free path) มากกว่าขนาดโมเลกุลมาก สัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลวขึ้นอยู่กับความเข้มข้น เนื่องจากความหนืดที่เปลี่ยนแปลงและพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจากสารละลายอุดมคติ (Ideal solution)

3. สัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็ง (Diffusivity of solids) การแพร่ของของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การแพร่ของก๊าซหรือของเหลวเข้าไปในรูพรุนของของแข็ง ซึ่งการแพร่ในลักษณะนี้มีความสำคัญต่อตัวเร่งปฏิกิริยาและวิศวกรรมเคมี และการแพร่ภายใน (Inter diffusion) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอะตอม ซึ่งเกิดได้จากหลายกรณี เช่น เกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่าง หรือการเสียรูปของโครงสร้างผลึก ทำให้เกิดการแพร่ชนิดต่าง ๆ เช่น Vacancy diffusion, Interstitial diffusion เป็นต้น

### 2.2.2 การถ่ายเทมวลสารโดยการพา (Convective mass transfer)

การถ่ายเทมวลสารโดยการพา เป็นกระบวนการถ่ายเทมวลสารที่ต้องอาศัยตัวกลางของสารในการเคลื่อนที่ และเกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล เช่นการไหลของของไหลผ่านพื้นผิว หรือระหว่างการไหลของของไหล 2 ชนิดที่ไม่ละลายกัน (Immiscible moving fluids) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการรบกวนหรือการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ที่เรียกว่าการแพร่แบบคลื่น (Eddy diffusion) หรือการแพร่แบบปั่นป่วน (Turbulent diffusion) เช่นเดียวกับการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการถ่ายเทมวลสารโดยการพา (Convective mass transfer) แบ่งได้เป็น 2 ประเภท

1. การพามวลแบบบังคับ (Force convection) เป็นกระบวนการการเคลื่อนที่ของมวลโดยมีกลไกการใช้แรงภายนอกมาควบคุมการเคลื่อนที่ของมวลสารหรือทำให้เกิดการพา เช่น ปั๊มขับเคลื่อนของเหลว เครื่องดันอากาศ หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ

2. การพามวลแบบธรรมชาติ (Natural convection) หรือการพามวลแบบอิสระ (Free convection) เป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของมวลโดยไม่อาศัยกลไกใด ๆ ในการเคลื่อนที่ แต่การเคลื่อนที่ของสารจะเกิดขึ้นโดยความแตกต่างของอุณหภูมิ ความแตกต่างของความหนาแน่น หรือความแตกต่างของความเข้มข้น เป็นต้น

สมการแสดงฟลักซ์ของการพามวล

$$N_A = k_c \Delta C_A \qquad (2.5)$$

โดย $N_A$ คือ ฟลักซ์เชิงโมลของโมเลกุล A เทียบกับพิกัดคงที่

$\Delta C_A$ คือ ผลต่างของความเข้มข้นของ A ระหว่างค่าที่พื้นผิวกับค่าเฉลี่ยในของไหล หรือระหว่างค่าเฉลี่ยในของไหลสองชนิด

$k_c$ คือ สัมประสิทธิ์การพามวล (Convective mass transfer coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 การถ่ายเทมวลระหว่างเฟส

เฟส (Phase) คือ ส่วนหนึ่งของระบบที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และแยกออกจากเฟสอื่น ๆ ของระบบ ซึ่งจะมีรอยต่อระหว่างเฟสเรียกว่า Interface การถ่ายเทมวลภายในเฟสเกิดขึ้นได้จากความแตกต่างของความเข้มข้นภายในเฟส ตัวอย่างเช่น (ระบบปิด) การถ่ายเทแอมโมเนียระหว่างเฟสก๊าซ (อากาศ) และเฟสของเหลว (น้ำ) แอมโมเนียซึ่งละลายน้ำได้ดีก็จะถูกถ่ายเทไปยังน้ำ ในขณะเดียวกันน้ำก็ระเหยไปยังก๊าซเฟส เมื่อระบบอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ในที่สุดระบบก็จะเข้าสู่สมดุล นั่นคือ โมเลกุลของน้ำกลายเป็นไอด้วยอัตราเร็วเท่ากับการกลั่นตัวของไอน้ำ ในทำนองเดียวกันอัตราที่โมเลกุลของแอมโมเนียละลายน้ำ เท่ากับอัตราที่แอมโมเนียกลับเข้าสู่ก๊าซเฟส อัตรานี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำและความดันไอของแอมโมเนียที่ภาวะสมดุล ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำและก๊าซเฟสจะมีค่าคงที่ ถ้ามีการเติมก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้นเข้าไปในระบบ สมดุลของระบบจะเลื่อนไป แล้วเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง โดยความดันไอย่อยของแอมโมเนียในก๊าซเฟสจะเปลี่ยนไปจากค่าเดิม ดังนั้น ในสภาวะที่เกิดความสมดุลว่างเฟส สิ่งที่เกิดขึ้นคือ "อัตราการถ่ายเทมวลสุทธิเท่ากับศูนย์" กลไกการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส สามารถอธิบายได้โดย ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two-resistance theory) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือการถ่ายเทมวลจากภายในเฟสที่หนึ่งไปยัง Interface การถ่ายเทข้าม Interface และการถ่ายเทจาก Interface ไปยังภายในของเฟสที่สอง

วิทแมน ได้นำเสนอ "ทฤษฎีสองต้านทาน" เป็นครั้งแรก ซึ่งได้รับการแสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมสำหรับปัญหาการถ่ายเทมวลระหว่างเฟสตัวอย่างในกรณี การขนส่งออกซิเจนจากอากาศลงไปในน้ำมีทั้งสามขั้นตอน คือ การถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศจำนวนมากไปยังพื้นผิวของน้ำ การถ่ายเทออกซิเจนผ่านอินเตอร์เฟส และการถ่ายเทออกซิเจนจากพื้นผิวของอากาศไปยังน้ำจำนวนมาก

**ตัวอย่างกระบวนการถ่ายเทมวลสารระหว่างสองเฟส**

ตัวถูกละลายถ่ายเทจาก Gas phase ไปยัง Liquid phase เช่น การดูดซับก๊าซ (Gas absorption) การลดความชื้น (Dehumidification) การกลั่น (Distillation)

ตัวถูกละลายถ่ายเทจาก Liquid phase ไปยัง Gas phase เช่น การเพิ่มความชื้น (Humidification) ตัวถูกละลายถ่ายเทจากของเหลวหนึ่งไปอีกของเหลวหนึ่งที่ไม่ละลายกัน ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-liquid extraction)

ตัวถูกละลายถ่ายเทจากของแข็งไปยังของเหลว ได้แก่ การอบแห้ง การชะ (Leaching)

ตัวถูกละลายถ่ายเทจากของไหลไปยังพื้นผิวของของแข็ง ได้แก่ การดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน

## 2.3 สารดูดความชื้น(Desiccant)

สารดูดความชื้น (Desiccant) คือ สารที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้น (Moisture) ซึ่งมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น การถนอมอาหารการขนส่งสินค้าใช้ในห้องทดลองใช้ในกระบวนการผลิต เป็นต้น

### 2.3.1 ประเภทสารดูดความชื้น

**1. สารดูดความชื้นประเภทของแข็ง**

สารดูดความชื้นประเภทของแข็งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความดันลดในกระบวนการผลิตอากาศมากกว่าแบบของเหลว แต่การประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นประเภทของแข็งมีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยกว่าแบบของแข็ง เนื่องจากการจัดการกับสสารประเภทของแข็งทำได้ง่ายกว่า

**- ซิลิกาเจล (Silica Gel)**

สารสังเคราะห์ที่สกัดจากทรายของผสมกรดกำมะถันมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) ซิลิกาเจลถูกใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในบรรจุภัณฑ์ยาและอาหาร ลักษณะของซิลิคอนไดออกไซด์เป็นเม็ดกลม เป็นโพรง มีรูพรุน ทำให้มีพื้นผิวที่ใช้ในการดูดความชื้นเป็นจำนวนมาก ประมาณ 800 ตารางเมตรต่อน้ำหนัก 1 กรัม หรือประมาณ 35-40 % ของน้ำหนักตัวประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ ประสิทธิภาพในการดูดความชื้นจะลดลงไปเรื่อย ๆ และมีโอกาสที่จะคายความชื้น (Desorption) ออกจากตัวเองเช่นกันซิลิกาเจลมี 4 ชนิด

ก) ชนิดเม็ดสีขาว (White silica gel) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นประมาณ 35-40% ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแต่ละเม็ดประมาณ 2-5 มิลลิเมตร

ข) ชนิดเม็ดสีน้ำเงิน (Blue silica gel) มีการเติม Cobalt chloride ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีเป็นสีชมพูเมื่อความชื้นสัมพัทธ์รอบข้างมากกว่า 40% ชนิดนี้นิยมใช้อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร่หลาย เนื่องจากมีประโยชน์ในการสังเกตได้โดยง่ายว่าสินค้ามีโอกาสเสี่ยงต่อความชื้นมากน้อยเพียงใด หากซิลิกาเจลที่ใช้ยังคงมีสีน้ำเงินแสดงว่าความชื้นรอบข้างมีระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากสีของซิลิกาเจลเปลี่ยนเป็นสีชมพูแสดงว่าความชื้นรอบข้างนั้นมีปริมาณที่สูงเกินกว่าที่ซิลิกาเจลจะดูดและควบคุมให้อยู่ในระดับที่ต่ำได้

ค) ชนิดเม็ดสีส้ม (Orange silica gel) มีคุณสมบัติเหมือนกับชนิดสีน้ำเงินทุกประการ การทำงานจะเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียวอ่อน ซิลิกาเจลชนิดนี้ยังไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูง

ง) ชนิดเม็ดทราย (Silica sand) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นเหมือนกับเม็ดขาวทุกประการแตกต่างกันที่ขนาดเม็ดของสาร ซึ่งสารดูดความชื้นชนิดเม็ดทรายจะมีขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร

- ดินไดอะตอม (Diatomaceous earth)

ดินที่เกิดจากซากพืชเซลล์เดียว มีลักษณะคล้ายกรวดขนาดเล็กสีเทาหรือสีน้ำตาลแต่มีการนำไปผ่านกระบวนการผลิตจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดความชื้นได้สูง ดินไดอะตอมเป็นสารจากธรรมชาติจึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เมื่อได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูงและเติมสารเร่งปฏิกิริยาบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) จะมีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้ดีมากถึง 70-80% ของน้ำหนักตัว เมื่อเทียบกับซิลิกาเจลแล้วอัตราเร็วในการดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ที่ 75% ของดินไดอะตอมจะต่ำกว่า การดูดความชื้นของดินไดอะตอมนี้มีแรงดึงดูดของโมเลกุลค่อนข้างมาก ทำให้การคายความชื้นเมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้นเกิดขึ้นได้น้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย จากความสามารถในการดูดความชื้นที่ดี อัตราเร็วไม่เร็วจนเกินไปและโอกาสในการคายความชื้นที่ต่ำมากเป็นเหตุให้ดินไดอะตอมเป็นทางเลือกที่ดีของสารดูดความชื้นและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ

- ดินเหนียวดูดซับ (Montmorillonite clay)

ดินธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมาก ดินประเภทนี้เมื่อได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcination) จะทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นและการคงสภาพหลังการใช้ดีขึ้น โดยปกติดินเหนียวดูดซับมีความสามารถในการดูดความชื้นประมาณ 25% ของน้ำหนักตัว ประสิทธิภาพดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะลดลงค่อนข้างมากเมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยเหตุนี้การใช้ดินเหนียวดูดซับสำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งจะต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดนี้

**- เยื่อกระดาษ (Plant fiber)**

สารดูดความชื้นชนิดนี้จัดเป็นนวัตกรรมของบริษัท Shanghai polly technology development (ประเทศจีน) ที่สามารถพัฒนาเยื่อกระดาษธรรมชาติให้มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้มากถึง 100% ของน้ำหนักตัว ความสามารถในการดูดความชื้นได้มากกว่า Silica Gel ถึง 3 เท่า ณ ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ นั้น ทำให้ Polly Fiber Desiccant สามารถนำมาใช้ทดแทน Silica Gel ในอุตสาหกรรมอาหารและยาได้เป็นอย่างดี

**- แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) หรือหินปูน (Caustic lime / Quick lime)**

ลักษณะเป็นผงสีขาว เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นประมาณ 28% ของน้ำหนักตัว มีอัตราการคายความชื้นที่ต่ำ ความเร็วในการดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำค่อนข้างช้า เมื่อมีการดูดความชื้นจนกระทั่งอิ่มตัวจะกลายเป็นสารกึ่งเหลว (Swell) คล้ายแป้งละลายน้ำข้น มีคุณสมบัติในการกัดกร่อนสูง ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ของสารดูดความชื้นประเภทนี้ต้องป้องกันไม่ให้สารดูดความชื้นปนไปกับผลิตภัณฑ์ได้โดยเด็ดขาด

**- แคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate, $CaSO_4$)**

สารที่ได้จากแร่ยิปซั่ม การดูดความชื้นค่อนข้างต่ำประมาณ 10% ของน้ำหนักตัว เป็นสารที่คงสถานะได้ดีไม่เป็นพิษและไม่กัดกร่อน

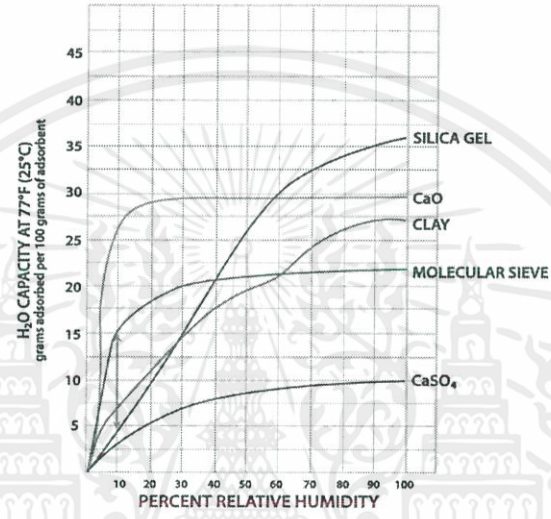
**- โมเลกุลลาร์ซีฟ (Molecular sieve)**

สารสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างพิเศษทำให้มีพื้นผิวสัมผัสประมาณ 700-800 ตารางเมตรต่อ 1 กรัม และมีแรงดึงดูดความชื้นที่สูงมากดูดความชื้นได้ดีมากภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์รอบข้างในระดับต่ำ (10%-30%) โดยมีประสิทธิภาพในการดูดความชื้นประมาณ 22% ของน้ำหนักตัว ทำให้ปัญหาการคายความชื้นน้อยกว่าซิลิกาเจลและดินเหนียวดูดซับเมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้น โมเลกุลลาร์ซีฟยัง

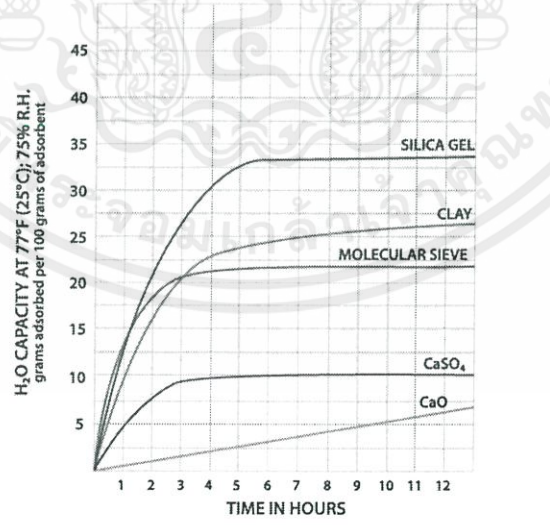
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานของรัฐในการใช้งานกับอาหารและยาจึงทำให้สารชนิดนี้ยังไม่แพร่หลายมากนัก

สารดูดความชื้นประเภทของแข็งที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) ดินเหนียวดูดซับ (Montmorillonite clay) แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) แคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate, $CaSO_4$) และโมเลกุลลาร์ซีฟ (Molecular sieve)




รูปที่ 2.3 Equilibrium Capacity ของสารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ




รูปที่ 2.4 อัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2. สารดูดความชื้นประเภทของเหลว** (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน)

สารละลายที่ใช้เป็นสารดูดความชื้นเหลวต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ความดันไอต่ำ เพื่อการถ่ายเทมวลที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างความดันไอของอากาศและความดันไอของสารดูดความชื้นเหลว นอกจากคุณสมบัติด้านความดันไอแล้วสารดูดความชื้นจะต้องมีความหนืดต่ำและคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดี รวมถึงคุณสมบัติที่ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน ไม่มีกลิ่น ไม่ก่อให้เกิดสารพิษ มีความเสถียรและราคาไม่แพง

สารดูดความชื้นเหลวที่นิยมใช้ได้แก่สารละลายลิเทียมโบรไมด์ (LiBr) ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และไตรเอทีลีนไกลคอล (TEG) ความดันไอของสารดูดความชื้นเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสาร ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นเหลวนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสารดูดความชื้นชนิดของแข็ง เนื่องจากสามารถดูดซึมสารปนเปื้อนอื่น ๆ ในอากาศได้ เช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรี รวมถึงเชื้อแบคทีเรีย แต่มีการออกแบบลักษณะการบรรจุที่ยุ่งยากซับซ้อน

### 2.3.2 วัฏจักรสารดูดความชื้นในกระบวนการถ่ายเทความชื้น

สารดูดความชื้นเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นรูพรุนสูง ซึ่งประกอบด้วยช่องว่างภายในขนาดเล็กจำนวนมาก พื้นที่ผิวทั้งหมดมีขนาดใหญ่ 0.1 ถึง 1.0 ตารางกิโลเมตรต่อกิโลกรัมหรือ 20 ถึง 200 สนามฟุตบอลต่อกิโลกรัม ช่องว่างมีขนาดเล็กเป็นนาโนเมตร โดยสารดูดความชื้นจะดูดซับความชื้นจากอากาศ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความดันไอที่แตกต่างระหว่างน้ำในอากาศและน้ำในสารดูดความชื้นนั้น ๆ โดยปกติแล้วไอน้ำจะถูกดูดซับอยู่บนผิวของสารดูดซับความชื้นนั้น ๆ โดยวัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้นทุกชนิดมีความคล้ายกันในเรื่องของการดูดซับความชื้น คือ เมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำในอากาศสารดูดความชื้นจะเริ่มดูดไอน้ำ (ความชื้น) ในอากาศและเมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำของอากาศสารดูดความชื้นคายไอน้ำออกมา (Neti and Wolfe, 1999)

**ความดันไอ (Vapor pressure)**

คือ ความดันของไอที่อุณหภูมิกำหนดสำหรับสารเฉพาะมีความดันไอ ความดันไอนี้เกิดจากโมเลกุลหรืออะตอมหนีจากของเหลวหรือของแข็ง ถ้าอยู่ในจุดสมดุลกับสถานะที่เป็นของเหลวหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแข็งของมัน เรียกว่า ความดันไอสมดุล (Equilibrium vapor pressure) หรือ ความดันไออิ่มตัว (Saturation vapor pressure) ของสารที่อุณหภูมินั้น

ความดันไอของสารที่เป็นของเหลวปกติจะมีความแตกต่างจากความดันไอของสารเดียวกันที่อยู่ในสถานะของแข็ง ถ้าอุณหภูมิของความดันไอของของเหลวสูงกว่าของของแข็ง ของเหลวจะระเหยกลายเป็นไอแต่ไอจะควบแน่นเป็นของแข็ง นั่นคือของเหลวถูกทำให้เยือกแข็ง (Freezing) ถ้าอุณหภูมิของความดันไอของของเหลวต่ำกว่าของของแข็ง ของแข็งจะระเหยกลายเป็นไอแต่ไอจะควบแน่นเป็นของเหลว นั่นคือของแข็งถูกทำให้หลอมเหลว ที่อุณหภูมิที่เท่ากัน ของสองความดันไอที่ซึ่งมีความสมดุลระหว่าง สถานะ ของเหลวและของแข็ง ที่อุณหภูมินี้จะเป็นจุดหลอมเหลว (Melting point)

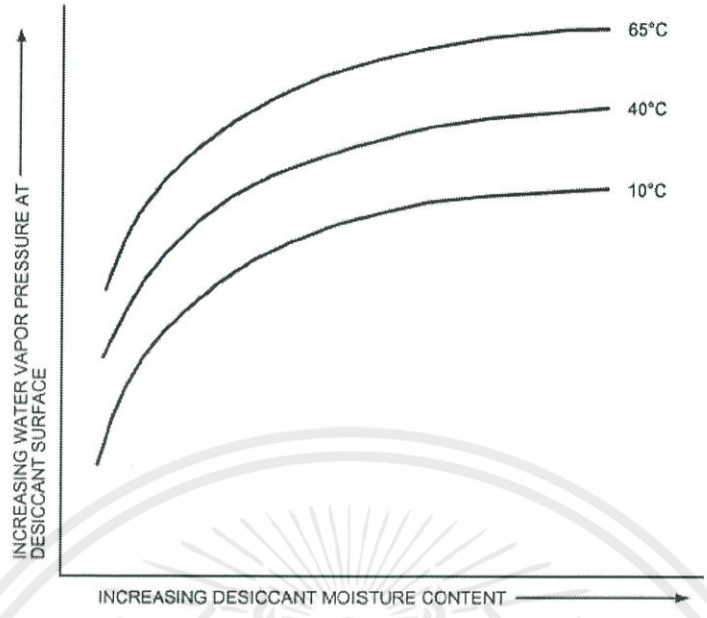
ความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของสารดูดความชื้นที่สูงขึ้น และเมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำในอากาศความชื้นจะถ่ายเทออกจากสารดูดความชื้น ซึ่งเรียกว่า รีเจนเนอเรชั่นหรือกระบวนการคายความชื้น (Regeneration process) ดังรูปที่ 2.5 และในรูปที่ 2.6 แสดงถึงพลังงานที่ใช้ในวัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้นโดย (จากจุด 2-3) พลังงานที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของสารดูดความชื้น (จากจุด 3-1) โดยพลังงานรีเจนเนอเรชั่นจะมีค่าเท่ากับการรวมกันของพลังงาน 3 ส่วน คือ

1. พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของสารดูดความชื้น จนกระทั่งความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นจะมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำในอากาศ

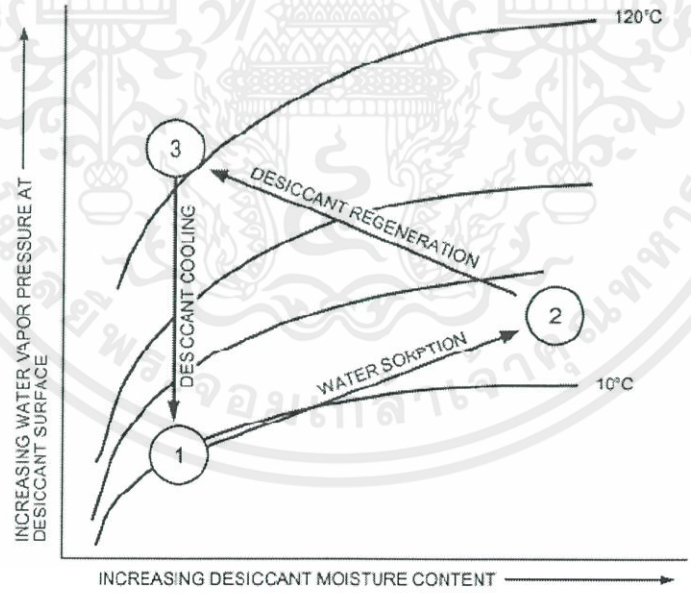
2. พลังงานความร้อนที่ทำให้ความชื้นกลายเป็นไอ (2465 kJ/kg)

3. พลังงานความร้อนในการดึงน้ำออกจากสารดูดความชื้น สำหรับพลังงานที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของสารดูดความชื้นขึ้นอยู่กับปริมาณของสารดูดความชื้น และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิหลังจากการรีเจนเนอเรชั่นและอุณหภูมิต่ำสุดที่สารดูดความชื้นจะสามารถเอาไอน้ำออกจากอากาศได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.5** ความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้น (Neti and Wolfe, 1999)




**รูปที่ 2.6** วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น (Neti and Wolfe, 1999)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

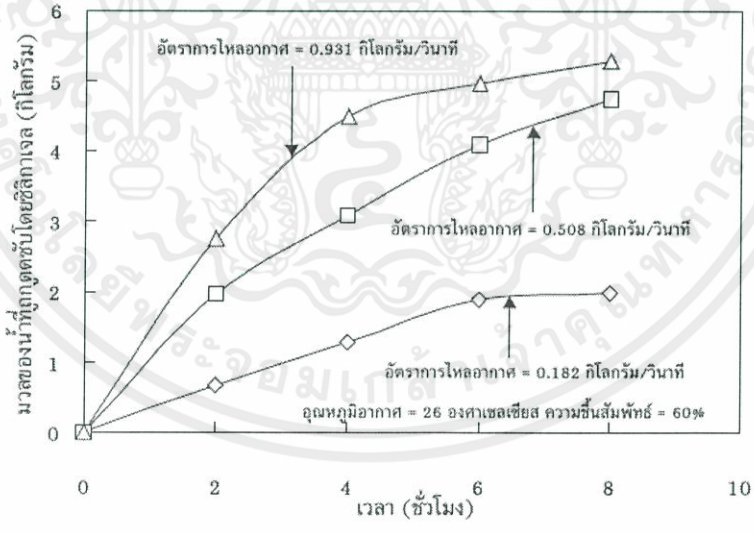
**2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการถ่ายเทความชื้นของสารดูดความชื้น**

**- ชนิดของสารดูดความชื้น**

ความสามารถของการดูดความชื้นในสารดูดความชื้นขึ้นอยู่กับความเป็นรูพรุนที่ผิวของสารดูดความชื้นชนิดนั้น ๆ ซึ่งโครงสร้างตามขนาดและความลึกของรูพรุนก็จะแตกต่างไปตามประเภทของสารดูดความชื้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของสารดูดความชื้น

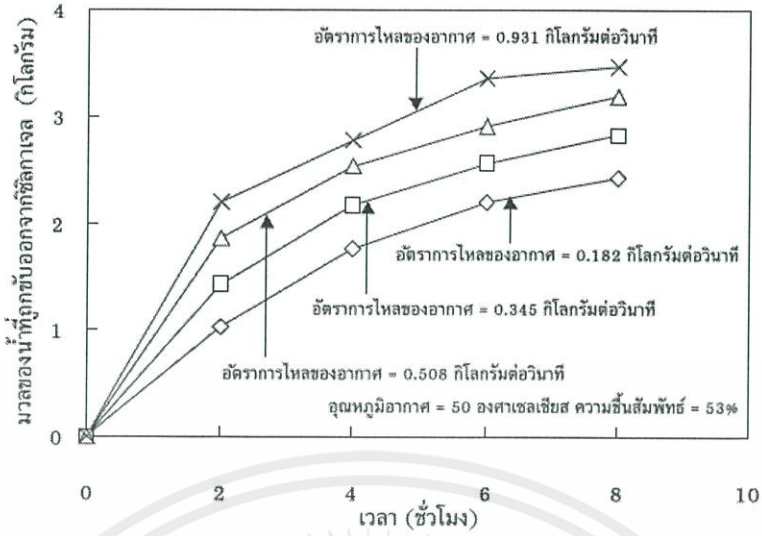
**- อัตราการไหลเชิงมวล**

อติพงศ์นันทพันธุ์ (2548) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีผลต่อสมรรถภาพการดูดความชื้นและคายความชื้นของชุดสารดูดความชื้นที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.182 กิโลกรัมต่อวินาที ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับจะมีค่าต่ำกว่าที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.931 กิโลกรัมต่อวินาทีของการดูดความชื้น และที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.931 กิโลกรัมต่อวินาทีชุดสารดูดความชื้นจะคายความชื้นได้มากที่สุด




**รูปที่** 2.7 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล (อติพงศ์, 2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

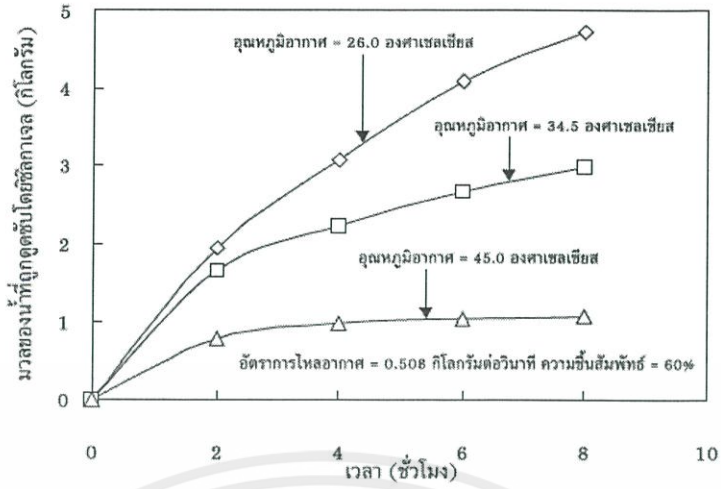



**รูปที่ 2.8** อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล (อติพงศ์, 2548)

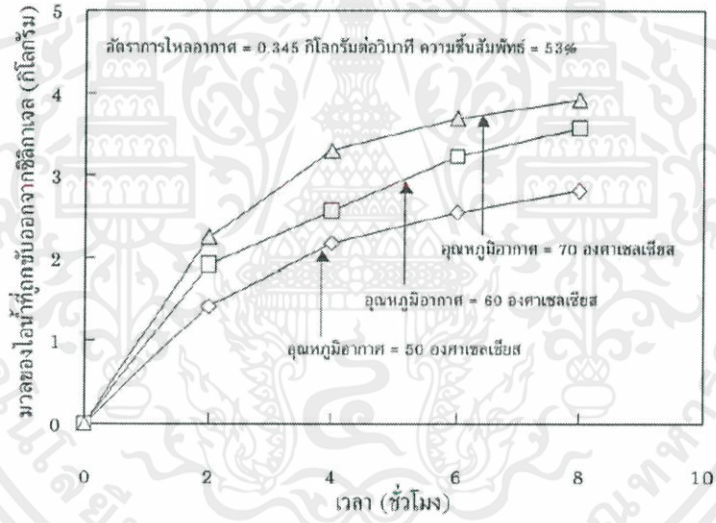
- อุณหภูมิของอากาศ

Grimm and Rosaler (1998) ทำการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีต่อคุณสมบัติการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นการที่อุณหภูมิของอากาศเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นลดลงโดยที่ความเร็วอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 0.508 กิโลกรัมต่อวินาที และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศประมาณ 60 % ความชื้นของซิลิกาเจล กรณีที่อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 26 องศาเซลเซียส ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้มากที่สุดในขณะที่อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจลจะน้อยลงและมีผลต่อการคายความชื้นเช่นกัน จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิอากาศ 70 องศาเซลเซียสจะสามารถทำให้มวลของไอน้ำในซิลิกาเจลลดลงมากกว่าที่อุณหภูมิอากาศที่ 60 องศาเซลเซียสและ 50 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.9** อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล (Grimm and Rosaler, 1998)



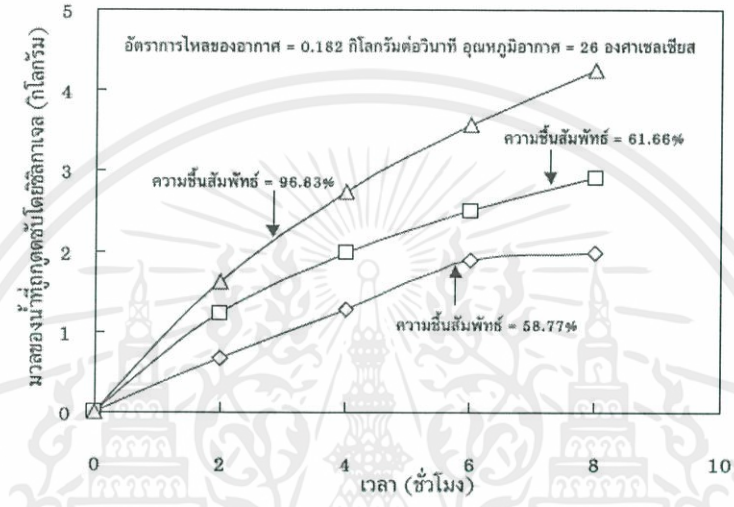

**รูปที่ 2.10** อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล (Grimm and Rosaler, 1998)

**- ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ**

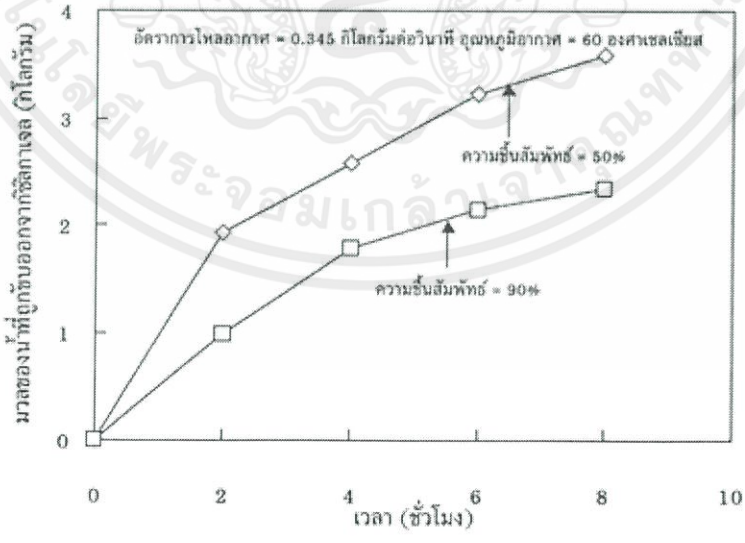
อติพงศ์ นันทพันธุ์ (2548) ได้ทำการศึกษาพบว่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศมีผลต่อการดูดความชื้นและการคายความชื้นโดยที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 0.182 กิโลกรัมต่อวินาทีและอุณหภูมิอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นประมาณ 26 องศาเซลเซียสซึ่งพบว่าความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณไอน้ำที่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น และพบว่าผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความชื้นสัมพัทธ์อากาศขาเข้าชุดสารดูดความชื้นต่อมวลน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล ณ เวลาต่าง ๆ โดยพบว่ากรณีการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่ขับออกจากสารดูดความชื้นลดลงทั้งนี้เนื่องจากในกรณีดังกล่าวผลต่างของความหนาแน่นของไอน้ำในบรรยากาศและความหนาแน่นของน้ำในสารดูดความชื้นน้อยจึงทำให้แรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลความชื้นลดน้อยลงด้วยดังนั้นปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากสารดูดความชื้นจึงลดลง




**รูปที่ 2.11** ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล (อติพงศ์ นันทพันธุ์, 2548)




**รูปที่ 2.12** ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล (อติพงศ์ นันทพันธุ์, 2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

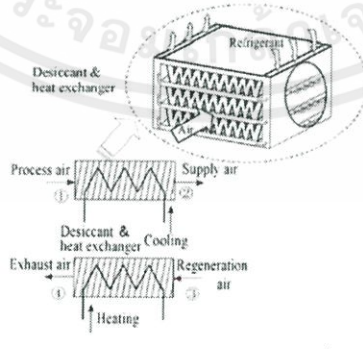
## 2.4 การประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นร่วมกับกระบวนการอบแห้ง

สารดูดความชื้นถูกนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากสารดูดความชื้นสามารถผลิตอากาศร้อนและแห้งได้ ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับกระบวนการอบแห้งที่ใช้ลมร้อน โดยจะให้อากาศผ่านสารดูดความชื้นก่อนส่งเข้าห้องอบแห้งเพื่อลดความชื้นของอากาศ ทำให้ได้อากาศที่ร้อนและแห้ง จึงไม่ต้องใช้อากาศที่อุณหภูมิสูงเกินไปในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นการช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่เสียหายได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง และลดพลังงานที่ต้องใช้ให้ความร้อนกับอากาศ นอกจากนี้ได้มีการนำสารดูดความชื้นไปใช้ร่วมกับระบบอบแห้งแบบใช้แสงอาทิตย์เพื่อให้สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้อย่างต่อเนื่องแม้ไม่มีแสงอาทิตย์

### 2.4.1 การประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นประเภทของแข็ง

การนำสารดูดความชื้นประเภทของแข็งมาใช้ร่วมกับระบบอบแห้ง มีข้อดี คือ การจัดการค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถจัดเรียงได้หลายรูปแบบ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการให้ความร้อนเพื่อคายความชื้น ซึ่งความร้อนส่วนนี้อาจจะเป็นความร้อนส่วนที่เหลือจากการอบแห้งผลิตภัณฑ์ แต่ข้อเสียของสารดูดความชื้นประเภทของแข็ง คือ จะทำให้อากาศเกิดความดันตกคร่อมค่อนข้องมากเมื่อไหลผ่านสารดูดความชื้น

Jeong et al. (2011) ศึกษาและวิเคราะห์สมรรถนะของการผลิตอากาศร้อนและอากาศเย็นโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งภายในมีสารทำความเย็นและสารดูดความชื้นชนิดของแข็งทำงานร่วมกัน โดยให้สามารถผลิตอากาศร้อนอุณหภูมิต่ำสุดอย่างน้อย 33 องศาเซลเซียส และผลิตอากาศเย็นอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส

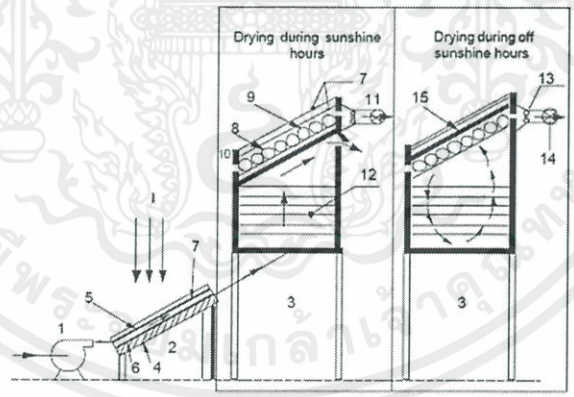



**รูปที่ 2.13** เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับสารทำความเย็นและสารดูดความชื้น (Jeong et al., 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thoruwa et al. (1996) สร้างเครื่องอบแห้งแบบใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับสารดูดความชื้น (ดินเหนียวชุบสารละลายแคลเซียมคลอไรด์) ซึ่งสามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้ตลอดทั้งวัน ในช่วงกลางวันใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ทำให้อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง และในช่วงกลางคืนใช้การหมุนเวียนของอากาศภายในห้องอบแห้งไหลผ่านสารดูดความชื้น ทดลองอบแห้งข้าวโพดสด 90 กิโลกรัม สามารถลดความชื้นของข้าวโพดจากความชื้น (ฐานแห้ง) 38% เหลือ 15% ภายใน 24 ชั่วโมง

Shanmugam and Natarajan (2006) พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับสารดูดความชื้น (ดินเหนียวชุบสารละลายแคลเซียมคลอไรด์) ในช่วงที่ไม่มีแสงใช้การหมุนเวียนของอากาศภายในห้องอบแห้งไหลผ่านสารดูดความชื้นมีพัดลมสองทิศทางควบคุมทิศทางการไหล ในช่วงที่มีแสงใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่าน Flate plate collector ทำให้อากาศร้อนและใช้ Blower เป่าอากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง ขณะเดียวกันใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ในการคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้นซึ่งติดตั้งไว้ส่วนบนของห้องอบแห้งเพื่อเตรียมใช้งานในช่วงที่ไม่มีแสง



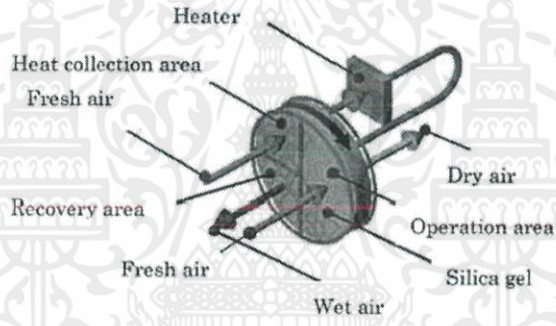

**รูปที่ 2.14** เครื่องอบแห้งแบบใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับสารดูดความชื้น (Shanmugam and Natarajan, 2006)

Shanmugam and Natarajan (2007) ศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับสารดูดความชื้น โดยมีการใช้กระจกสะท้อนติดตั้งส่วนบนของสารดูดความชื้นเพื่อให้การแผ่รังสีความร้อนไปยังสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าการติดกระจกช่วยให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมรรถนะการคายความชื้นของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น 20% และช่วยลดเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ (อบแห้งสับปะรดใช้เวลาลดลง 4 ชั่วโมง และอบแห้งถั่วเขียวใช้เวลาลดลง 2 ชั่วโมง)

Nagaya et al. (2006) ออกแบบและพัฒนาเครื่องลดดูดความชื้นของอากาศเพื่อใช้งานร่วมกับระบบอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ได้ออกแบบเป็นแบบ Desiccant-rotor dehumidifier ซึ่งทำงานโดยการหมุนต่อเนื่อง ประกอบด้วย 3 โซนบรรจุสารดูดความชื้น (ซิลิกาเจล) โซนแรก Operating zone เป็นโซนที่ให้ซิลิกาเจลดูดความชื้นจากอากาศได้อากาศแห้งส่งไปใช้ในห้องอบแห้ง โซนที่สอง Recovery zone ให้ความร้อนแก่อากาศชื้นและปล่อยออก โซนสุดท้าย Heat collection zone ซิลิกาเจลคายความร้อนให้กับอากาศ ทั้งสามโซนจะทำงานอย่างต่อเนื่องเพื่อผลิตอากาศแห้งผ่านไปยัง Heater ทำให้อากาศอุณหภูมิสูงขึ้น (49 องศาเซลเซียส) และส่งต่อไปใช้ในห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์

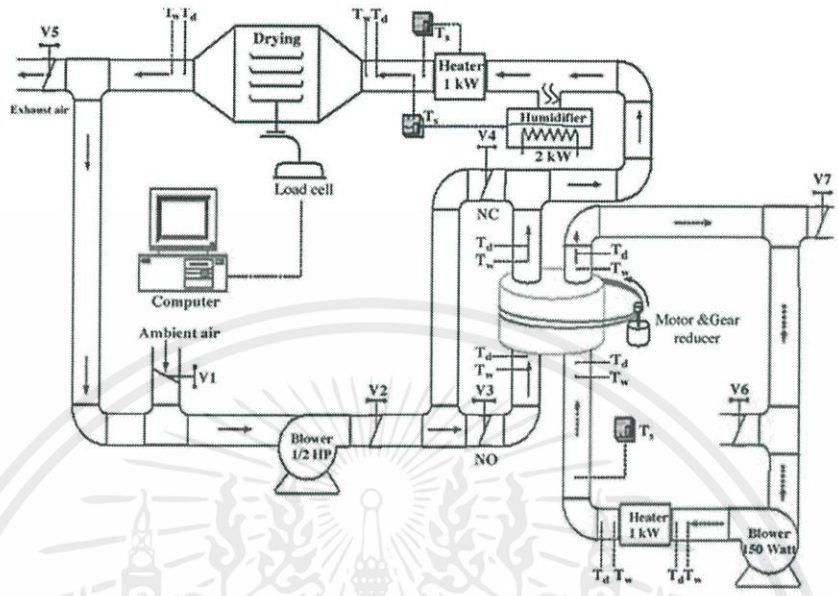



**รูปที่ 2.15** Desiccant-rotor dehumidifier (Nagaya et al., 2006)

Madhiyanon et al. (2007) พัฒนาระบบอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นรูปแบบวงล้อหมุน (Rotary desiccant wheel) ระบบประกอบด้วยการใช้งานอากาศ 2 วงจร คืออากาศวงจรแรกใช้สำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยอากาศจากบรรยากาศจะถูกลดความชื้นโดยให้ไหลผ่าน Desiccant wheel เพื่อให้สารดูดความชื้นที่บรรจุอยู่ภายในดูดความชื้นออกจากอากาศแล้วส่งต่อไปยัง Heater ก่อนนำไปใช้ในห้องอบแห้ง และอากาศวงจรที่สองจะถูกให้ความร้อนเพื่อนำมาใช้คายความชื้นออกจากสารดูดความชื้นใน Desiccant wheel ทำให้สารดูดความชื้นแห้งและสามารถใช้ดูดความชื้นจากอากาศได้อย่างต่อเนื่อง จากการทดลองพบว่าระบบนี้ช่วยลดเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้ 25% เมื่อเทียบกับระบบอบแห้งแบบใช้ลมร้อนทั่วไป แต่ต้องใช้พลังงานมากกว่าระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

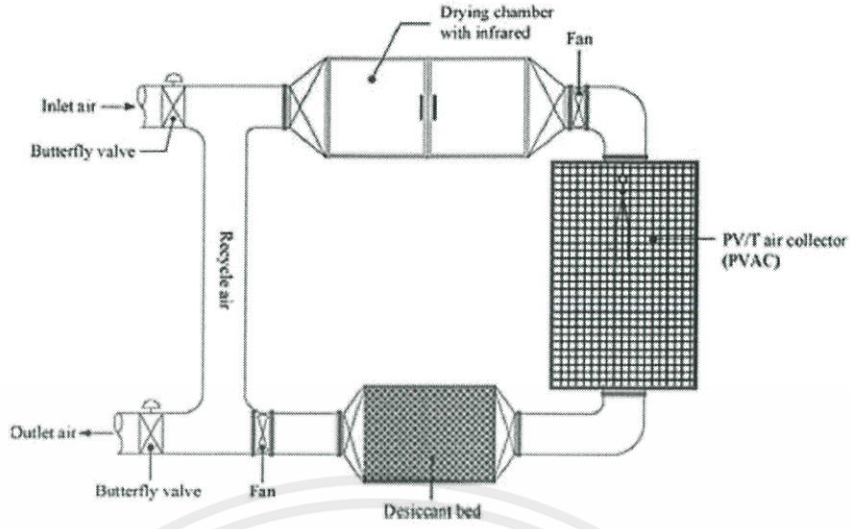
ทั่วไป 40-80% เนื่องจากจะต้องใช้พลังงานในการทำให้อากาศร้อนเพื่อคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้นซึ่งคิดเป็น 40% ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในระบบ



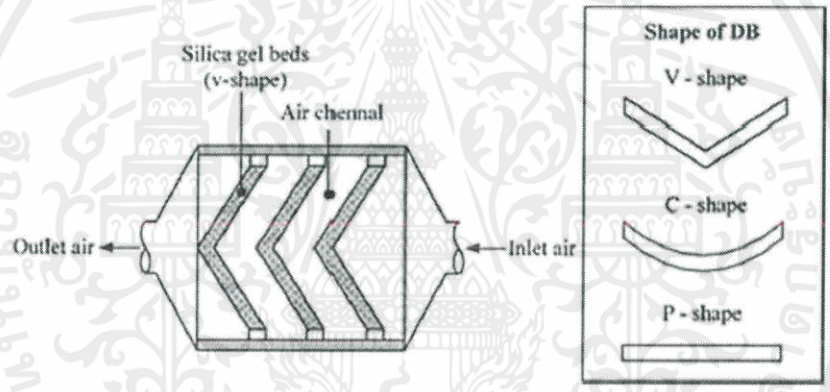

**รูปที่ 2.16** ระบบอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับ Rotary desiccant wheel (Madhiyanon et al., 2007)

Punlek et al. (2009) ศึกษาและทดลองการใช้สารดูดความชื้นร่วมกับระบบอบแห้งแบบใช้รังสีอินฟราเรด ระบบประกอบด้วย PV air collector, สารดูดความชื้น (ซิลิกาเจล) และห้องอบแห้งแบบใช้รังสีอินฟราเรด และได้สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม CFX ทำนายอัตราเร็วและความดันตกคร่อมของอากาศหลังผ่านสารดูดความชื้น เพื่อเลือกรูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้นที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้ พบว่าการบรรจุสารดูดความชื้นแบบ V-shape ให้ผลดีที่สุด การทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยระบบนี้เมื่อเทียบกับแบบลมร้อนทั่วไปพบว่าช่วยลดเวลาการอบแห้งลง 44% และใช้พลังงานน้อยกว่า 63%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.17** ระบบอบแห้งแบบใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับสารดูดความชื้น (Punlek et al., 2009)



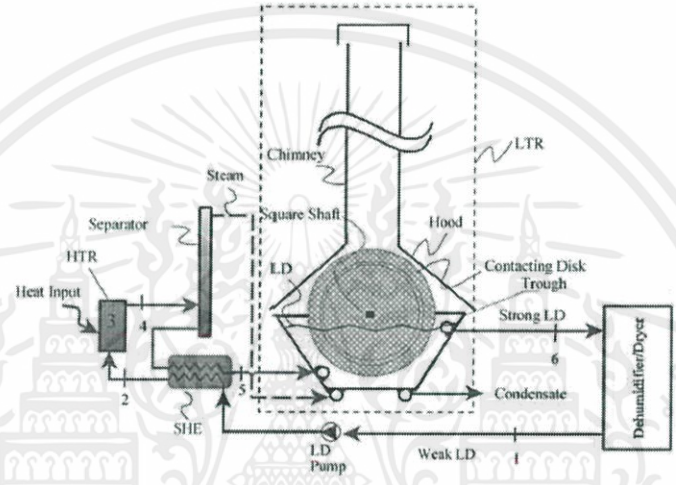

**รูปที่ 2.18** รูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้น (Punlek et al., 2009)

### 2.4.2 การประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นประเภทของเหลว

การนำสารดูดความชื้นประเภทของเหลวมาใช้ร่วมกับระบบอบแห้ง มีข้อดี คือ ทำให้เกิดความดันตกคร่อมน้อยกว่าประเภทของแข็ง ระบบมีความยืดหยุ่นและสามารถแยกระบบส่วนที่คายความชื้นออกห่างจากพื้นที่ส่วนที่ดูดความชื้นได้ นอกจากนี้ยังใช้ความร้อนไม่สูงในการคายความชื้น รองรับความชื้นได้มากและสามารถดูดซับสารอื่นที่ปนเปื้อนมากับอากาศได้ แต่ข้อเสีย คือ การจัดการจะยุ่งยาก ซับซ้อน และต้องพิจารณาปัญหาการเกิด Carried over ที่อาจจะเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

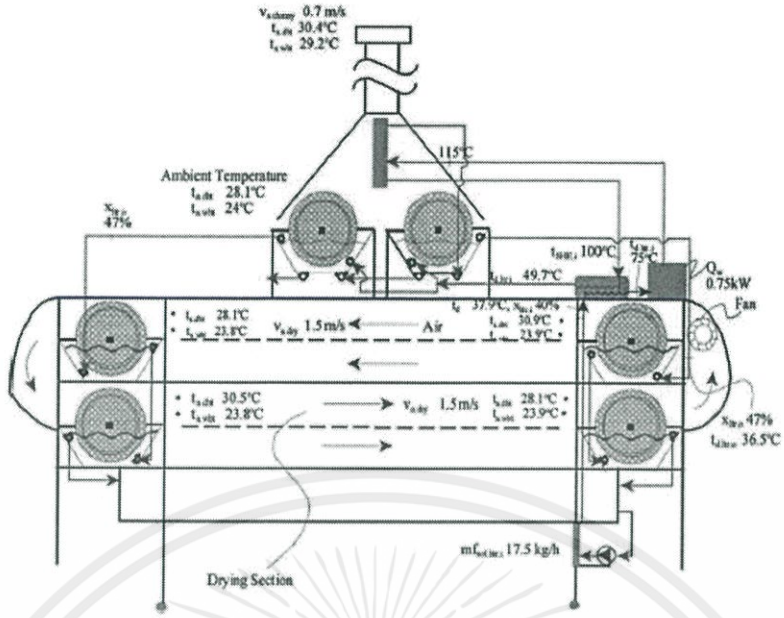
Rane et al. (2003) พัฒนาระบบอบแห้งแบบใช้สารดูดความชื้นประเภทของเหลว ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารดูดความชื้น ในกระบวนการคายความชื้นประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกสารดูดความชื้นเหลวจะถูกต้มที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดไอน้ำผสมกับสารดูดความชื้นและแยกด้วยเครื่องแยก ขั้นตอนที่สองสารดูดความชื้นเหลวที่ร้อนจะไหลผ่านท่อที่อุณหภูมิต่ำกว่าและเกิดการควบแน่น น้ำจากสารดูดความชื้นบริเวณแผ่นสัมผัสจะถ่ายเทไปสู่อากาศเกิดความแตกต่างของความดันไอระหว่างสารดูดความชื้นกับอากาศ ทำให้เกิดการถ่ายเทความชื้นขึ้น




**รูปที่ 2.19** ระบบการทำงานสารดูดความชื้นประเภทของเหลว (Rane et al., 2003)

และได้มีการพัฒนาระบบการทำงานสารดูดความชื้นประเภทของเหลวให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นเพื่อเชื่อมต่อกับระบบอบแห้ง โดยให้อากาศไหลผ่านชุดลดความชื้น 4 ชุด เพื่อลดความชื้นของอากาศและส่งต่อไปใช้ในส่วนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ สำหรับสารดูดความชื้นเหลวจากชุดลดความชื้นจะไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำด้วยแรงโน้มถ่วง และถูกปั๊มส่งต่อไปสู่กระบวนการคายความชื้นเพื่อวนกลับมาใช้ใหม่ จากการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความชื้นสูงกว่าแบบใช้ลมร้อนปกติ 227% และประหยัดพลังงานมากกว่า 56%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.20** ระบบอบแห้งร่วมกับสารดูดความชื้นประเภทของเหลว (Rane et al., 2003)

### 2.4.3 แหล่งพลังงานสำหรับการคายความชื้นของสารดูดความชื้น

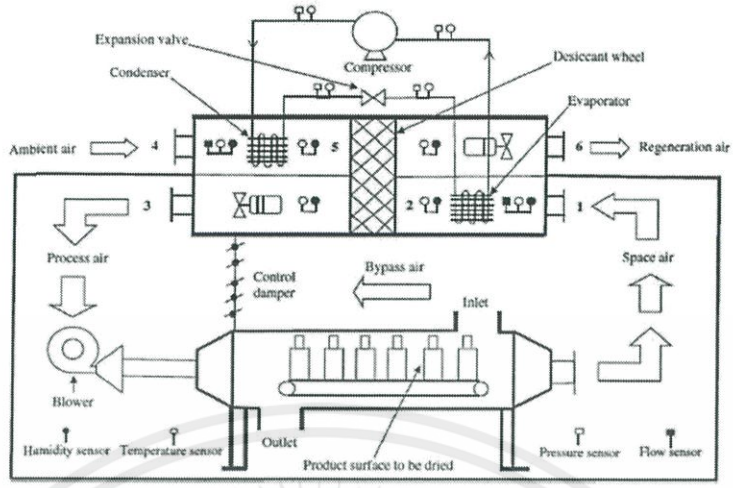
การนำพลังงานมาใช้สำหรับคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้นจะคำนึงถึงการนำพลังงานมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถลดต้นทุนในส่วนนี้ได้มากที่สุด จึงนิยมใช้พลังงานที่อุณหภูมิไม่สูงมาก เช่น พลังงานหมุนเวียนหรือพลังงานความร้อนทิ้งจากระบบ

**- พลังงานความร้อนจากระบบการอัดไอ (ปั๊มความร้อน)**

ปั๊มความร้อนเป็นระบบที่ใช้พลังงานต่ำ การนำสารดูโความชื้นมาใช้กับระบบหรือเรียกว่าระบบไฮบริด เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพด้านพลังงานและลดความชื้นของอากาศ ความร้อนที่ถูกปลดปล่อยจากปั๊มความร้อนผ่านคอนเดนเซอร์สามารถนำมาใช้คายความชื้นออกจากสารดูดความชื้นได้

Wang et al. (2011) ออกแบบและพัฒนาระบบไฮบริดระหว่างปั๊มความร้อนและวงล้อสารดูดความชื้น โดยมีปั๊มความร้อน 2 ชุด ชุดหนึ่งสำหรับผลิตอากาศร้อนและผ่านสารดูดความชื้นเพื่อให้อากาศแห้งนำไปอบแห้งผลิตภัณฑ์และอีกชุดเพื่อคายความชื้นออกจากสารดูความชื้น โดยความร้อนจากปั๊มความร้อนกระจายความร้อนผ่านคอนเดนเซอร์ให้อากาศไหลผ่านได้อากาศร้อนไปผ่านสารดูดความชื้นเพื่อคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้น ซึ่งระบบที่ใช้ปั๊มความร้อนสองชุดสามารถประหยัดพลังงานความร้อนมากกว่าแบบใช้ปั๊มความร้อนชุดเดียว 30-60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.21** ปั๊มความร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้น (Wang et al., 2011)

**- พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์**

การใช้พลังงานแสงอาทิตย์มีการศึกษาอย่างกว้างขวางเพราะเป็นพลังงานที่นำมาใช้ได้ฟรี ข้อจำกัด คือการลงทุนอุปกรณ์เริ่มต้นค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงแต่จะคุ้มค่าถ้าลงทุนระยะยาว รวมทั้งการแผ่รังสีความร้อนของแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ

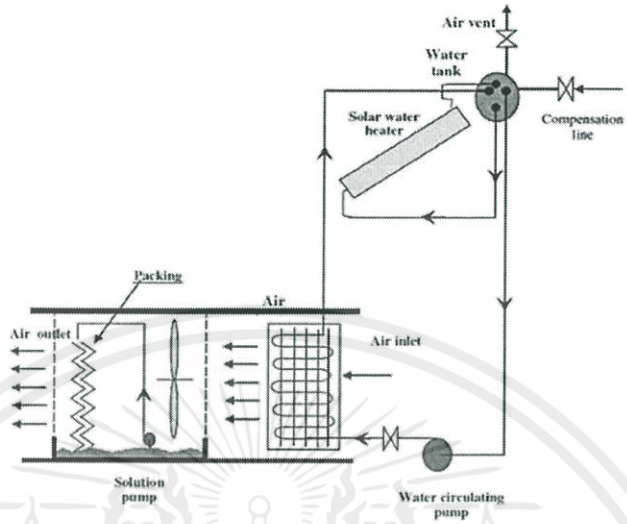
Ahmed et al. (2005) สร้างชุดทดลองแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้น ใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์อุณหภูมิ 60-90 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลของการดูดและคายความชื้นของสารดูดความชื้นต่อปัจจัย ได้แก่ ความหนาของวงล้อสารดูดความชื้น, อัตราการไหลของอากาศและความเร็วรอบในการหมุนของวงล้อ

Xiong et al. (2009) ศึกษาการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับสารดูดความชื้นประเภทของเหลวแบบ 2 ขั้นตอน ใช้สารดูดความชื้น 2 ชนิด คือ สารละลาย $CaCl_2$ และ สารละลาย LiBr พบว่าความสามารถในการดูดความชื้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารดูดความชื้น สัมประสิทธิ์สมรรถนะและสัมประสิทธิ์สมรรถนะความร้อนของระบบเท่ากับ 2.13 และ 0.97 ตามลำดับ

Alosaimy and Hamed (2011) ประยุกต์ใช้การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้สำหรับการคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้น อุปกรณ์สำคัญ ได้แก่ ถังบรรจุน้ำ, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับอากาศ-น้ำ และสารดูดความชื้นของเหลว ($CaCl_2$) บรรจุแบบรวงผึ้ง โดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ผลิตน้ำร้อนในถังและให้ไหลเวียนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ เมื่อได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศร้อนเป่าไปยังสารดูดความชื้นเหลวเพื่อให้สารดูดความชื้นคายความชื้นออก พบว่าสามารถลดความชื้นของสารดูดความชื้นได้ 50%




**รูปที่ 2.22** การคายความชื้นจากสารดูดความชื้นเหลวด้วยระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Alosaimy and Hamed, 2011)

**- พลังงานจากความร้อนทิ้ง**

การนำความร้อนทิ้งจากกระบวนการมาใช้สำหรับคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้น เป็นหนึ่งในทางเลือกที่ดีที่สุดเนื่องจากไม่ต้องมีการลงทุนเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามต้องมีอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่ปล่อยไอร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 60-140 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่อุปกรณ์ประเภทนี้ใช้ได้ในโรงงานหรือห้างสรรพสินค้า

Zaltash et al. (2006) รายงานผลของการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของระบบ Distributed generation (DG) ร่วมกับการฟื้นฟูความร้อนทิ้งที่ได้จากระบบ โดยการใช้เทคโนโลยี Thermally activated (TA) ซึ่งความร้อนทิ้งถูกนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศเพื่อส่งไปใช้ต่อในกระบวนการให้ความร้อน, ทำความเย็นและการลดความชื้นในสารดูดความชื้นผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพพลังงานรวมของระบบเพิ่มขึ้นจาก 5% เป็น 7%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 รูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้นประเภทของแข็ง

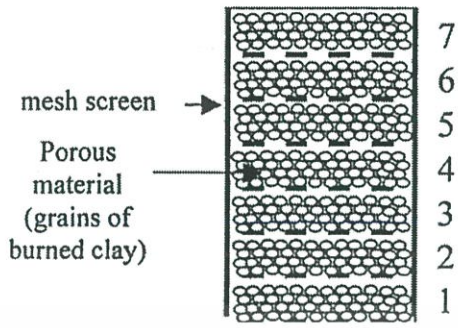
รูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้นประเภทของแข็งภายในหอดูดความชื้นมีหลายรูปแบบ เช่น Rotating horizontal bed, Vertical bed, Rotating honeycomb, Fluidized bed, Inclined bed เป็นต้น ซึ่งการเลือกรูปแบบการบรรจุต้องพิจารณาหลายด้านประกอบกัน ถ้าต้องการประสิทธิภาพในการดูดความชื้นและคายความชื้นสูงควรเลือกใช้การบรรจุแบบ Rotating honeycomb หรือ Fluidized bed แต่ระบบค่อนข้างซับซ้อน การดำเนินการยุ่งยาก รวมทั้งต้นทุนการลงทุนและค่าซ่อมบำรุงค่อนข้างสูง กรณีต้องการดำเนินการที่ง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน นิยมใช้แบบ Multiple vertical bed แต่มีข้อเสีย คือ อากาศที่ไหลผ่านสารดูดความชื้นเกิดความดันตกคร่อมค่อนข้างมากทำให้ต้องเพิ่มกำลัง Blower สูงขึ้นเพื่อนำอากาศที่ผ่านสารดูดไปใช้ต่อ ซึ่งได้มีการพัฒนาการบรรจุสารดูดความชื้นเพื่อลดปัญหาความดันตกคร่อมของอากาศ โดยการบรรจุแบบ Radial packed bed เป็นการลดระยะทางของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านสารดูดความชื้นทำให้ช่วยลดความดันตกคร่อมของอากาศได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะศึกษารูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้นเฉพาะแบบ Multiple vertical bed และ Radial bed

### 2.5.1 แบบ Vertical bed

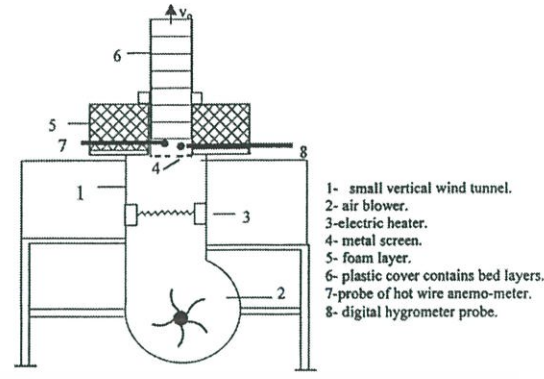
การบรรจุสารดูดความชื้นประเภทของแข็งแบบ Vertical bed เป็นรูปแบบที่นิยมนำมาใช้งาน เนื่องจากการดำเนินงานไม่ยุ่งยากทั้งการสร้างหอบรรจุสารดูดความชื้นและการบรรจุสารดูดความชื้นค่อนข้างง่าย โดยสารดูดความชื้นจะจัดเรียงในหอดูดความชื้นขึ้นไปตามแนวความสูงของหอ แต่อากาศจะเกิดความดันตกคร่อมระหว่างไหลผ่านสารดูดความชื้น ยิ่งไหลผ่านชั้นของสารดูดความชื้นสูง ความดันตกคร่อมก็จะสูง

Ahmed (2000) ศึกษาและทดลองคุณลักษณะการดูดความชื้นในหอดูดความชื้นแบบ Vertical bed และศึกษาผลของเวลา ($T_r$) ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในสารดูดความชื้น เปรียบเทียบทางทฤษฎีกับการทดลอง โดยใช้สารดูดความชื้นเป็นก้อนดินเผาชุบสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จัดเรียงในหอดูดความชื้นเป็นชั้นทั้งหมด 7 ชั้นตามความสูงของหอดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

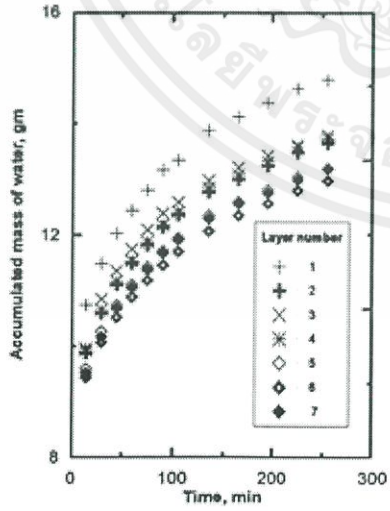



รูปที่ 2.23 จัดเรียงสารดูดความชื้นแบบ Vertical bed (Ahmed, 2000)

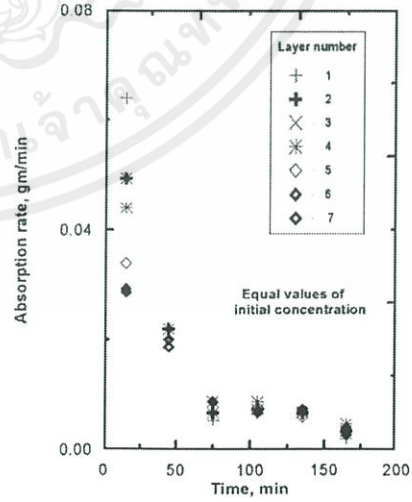



รูปที่ 2.24 ชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบ Vertical bed (Ahmed, 2000)

ในการทดลองใช้ Blower ดูดอากาศเข้าจากด้านล่างให้ผ่านชั้นของสารดูดความชื้นและไหลออกทางด้านบนของหอดูดความชื้น วัดความเร็วของอากาศใช้ Hot wire anemometer วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศโดยใช้ Digital hygrometer และบันทึกน้ำหนักของสารดูดความชื้นแต่ละชั้นต่อเวลาซึ่งผลการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำที่สารดูดความชื้นดูดซับและอัตราการดูดซับความชื้นจะมากที่สุดในชั้นที่ 1 และลดลงตามลำดับชั้นที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.25 และ 2.26 ตามลำดับ และพบว่าปริมาณการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เช่นเดียวกับอัตราการดูดซับน้ำที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากในช่วงแรกความดันไอระหว่างสารดูดความชื้นกับอากาศแตกต่างกันมากทำให้เกิดการถ่ายเทน้ำอย่างรวดเร็ว




รูปที่ 2.25 ปริมาณน้ำที่สะสมในสารดูดความชื้นแต่ละชั้นต่อเวลา (Ahmed, 2000)




รูปที่ 2.26 อัตราการดูดความชื้นแต่ละชั้นต่อเวลา (Ahmed, 2000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของเวลา ($T_r$) ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในสารดูดความชื้น จัดให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วยเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง

สมดุลการถ่ายเทความชื้น ; $$(1-\varepsilon)K\frac{\partial C}{\partial t} = ka(C-C^*) \quad (2.6)$$

ซึ่ง; $$T_r = \theta\frac{ka}{K(1-\varepsilon)} \quad (2.7)$$

ที่สภาวะเริ่มต้น ; $$C(0,T_r) = C_0 \quad (2.8)$$

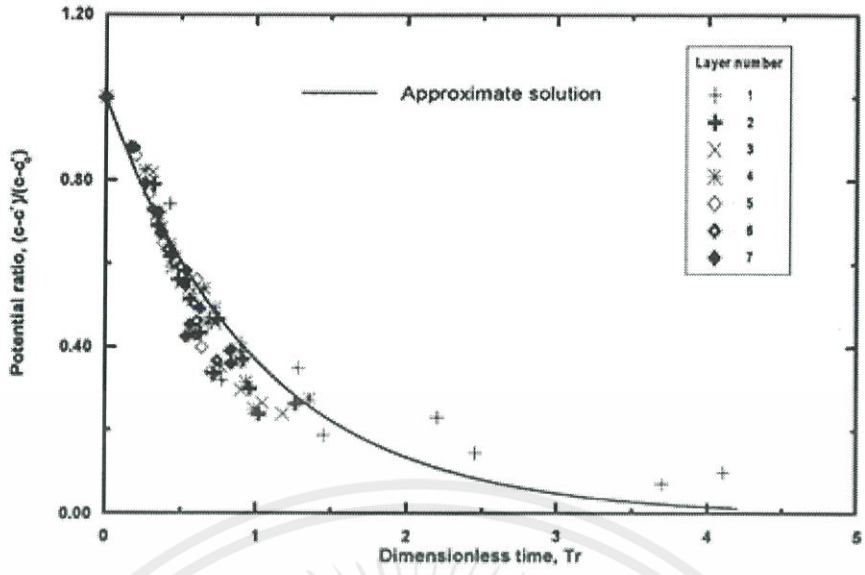
จะได้ ; $$\frac{C-C^*}{C-C_0^*} = exp\,(-T_r) \quad (2.9)$$

โดย

| | | | |
|---|---|---|---|
| $a$ | คือ | พื้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของ bed ต่อหน่วยปริมาตร, | $m^2/m^3$ |
| $C$ | คือ | ความเข้มข้นในของไหล, | $mol/m^3$ |
| $C_0$ | คือ | ความเข้มข้นเริ่มต้นในของไหล, | $mol/m^3$ |
| $C^*$ | คือ | ความเข้มข้นในของไหลที่สภาวะสมดุลกับสารดูดความชื้น, | $mol/m^3$ |
| $C_0^*$ | คือ | ความเข้มข้นเริ่มต้นในของไหลที่สภาวะสมดุล, | $mol/m^3$ |
| $k$ | คือ | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, | m/s |
| $K$ | คือ | ค่าคงที่ความสัมพันธ์สำหรับการดูดความชื้นที่สภาวะสมดุล | |
| $T_r$ | คือ | เวลาสัมพัทธ์ (ตัวแปรไร้หน่วย) | |
| $\varepsilon$ | คือ | ช่องว่างทั้งหมดระหว่างสารดูดความชื้น | |
| $\theta$ | คือ | ความแตกต่างของเวลาจริงกับเวลาที่ของไหลไปถึง bed, | s |

จากการทดลองเมื่อนำค่าสัดส่วนความเข้มข้นในของไหล $[(C-C^*)/(C-C_0^*)]$ มาพลอตกราฟต่อเวลา$(T_r)$ พบว่าจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งตรงกับสมการทางทฤษฎี แสดงว่าผลการทดลองน่าเชื่อถือและยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



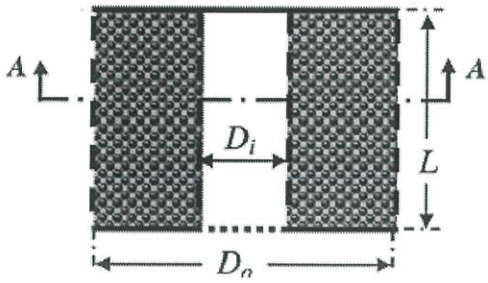

**รูปที่ 2.27** ทฤษฎีและการทดลองผลของสัดส่วนความเข้มข้นในของไหลต่อเวลา (ตัวแปรไร้หน่วย) (Ahmed, 2000)

### 2.5.2 แบบ Radial bed

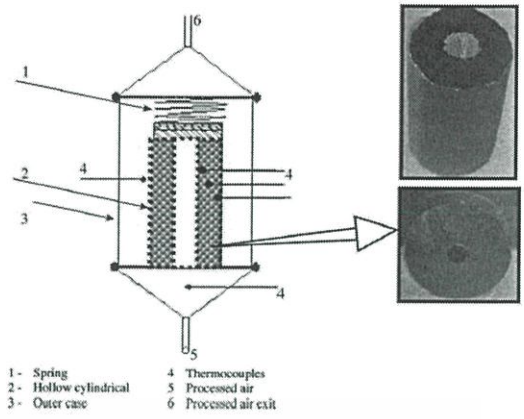
การบรรจุสารดูดความชื้นประเภทของแข็งแบบ Radial bed เป็นรูปแบบที่พัฒนามาเพื่อลดปัญหาเรื่องความดันตกคร่อมของอากาศจากการบรรจุแบบ Vertical bed เนื่องจากการบรรจุแบบ Radial bed จะบรรจุสารดูดความชื้นตามความหนาของทรงกระบอกกลวงและให้อากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีของทรงกระบอกกลวงสัมผัสกับสารดูดความชื้น ซึ่งช่วยลดระยะทางที่อากาศไหลผ่านสารดูดความชื้นทำให้เกิดความดันตกคร่อมของอากาศน้อยลง แต่การดำเนินการจะยุ่งยากกว่าแบบ Vertical bed เพราะต้องทำที่บรรจุสารดูดความชื้นเป็นลักษณะทรงกระบอกกลวง

Awad et al. (2006) ศึกษาและทดลองคุณลักษณะการดูดความชื้นในหอดูดความชื้นแบบ Radial bed รวมทั้งศึกษาผลของสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ($D_o/D_i$) ของทรงกระบอกกลวงที่บรรจุสารดูดความชื้นต่อความสามารถในการดูดความชื้นและเปรียบเทียบความดันตกคร่อมของอากาศระหว่างการบรรจุสารดูดความชื้นแบบ Radial bed และแบบ Vertical bed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.28** ลักษณะการบรรจุสารดูดความชื้น Radial bed (Awad, et al., 2006)




**รูปที่ 2.29** ชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบ Radial bed (Awad, et al., 2006)

ในการทดลองใช้ Silica gel เป็นสารดูดความชื้น ให้อากาศไหลเข้าจากทางด้านล่างของหอไหลขึ้นไปตามช่องตรงกลางของทรงกระบอกกลวงที่บรรจุซิลิกาเจล หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านชั้นซิลิกาเจลตามแนวรัศมีของทรงกระบอกกลวงกระจายออกสู่บริเวณด้านข้างของหอและไหลออกทางด้านบนของหอดูดความชื้น โดยมีการวัดอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์, อัตราการไหลของอากาศ และนำซิลิกาเจลออกมาชั่งเมื่อเวลาผ่านไปจนน้ำหนักคงที่ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับทางทฤษฎี

อัตราการถ่ายเทความชื้น, $$dR = ka(w-w^{*})Adr \quad (2.10)$$

สมดุลความชื้นในอากาศ, $$-v(r)p_a(r)\frac{\partial w}{\partial r} = \varepsilon p_a(r)\frac{\partial w}{\partial r} + (1-\varepsilon)p_s \quad (2.11)$$

สมการสมดุลความชื้นในซิลิกาเจล, $$(1-\varepsilon)p_s\frac{\partial q}{\partial t} = ka(w-w^{*}) \quad (2.12)$$

โดย $dR$ คือ อัตราการดูด/อัตราการคายความชื้น, kg/s

$ka$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร, $kg/m^3*s$

$w$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ, $kg_{water\ vapor}/kg_{dry\ air}$

$w^{*}$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก, $kg_{water\ vapor}/kg_{dry\ air}$

$A$ คือ พื้นที่ที่อากาศไหลผ่าน, $m^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$dr$ คือ ตำแหน่งตามแนวรัศมี

$v$ คือ ความเร็วอากาศ, m/s

$p_a$ คือ ความหนาแน่นอากาศ, $kg/m^3$

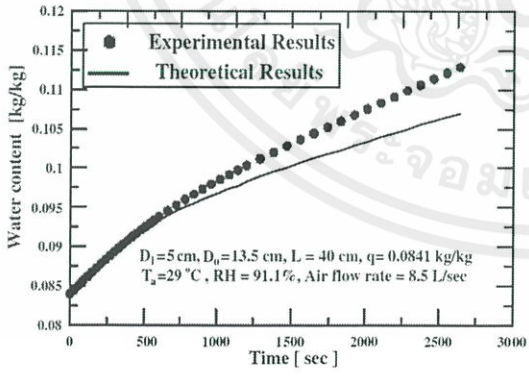
$\varepsilon$ คือ ช่องว่างของการบรรจุซิลิกาเจล

$p_s$ คือ ความหนาแน่นของซิลิกาเจล, $kg/m^3$

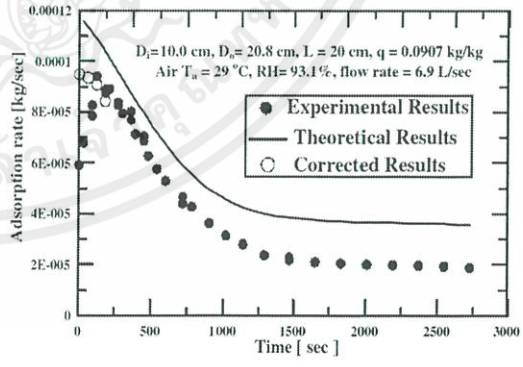
$\frac{\partial q}{\partial t}$ คือ ปริมาณน้ำในซิลิกาเจลที่เวลาใด ๆ , $kg_{water}/kg_{dry\ silica\ gel}$

$\frac{\partial w}{\partial r}$ คือ ปริมาณน้ำในอากาศที่ตำแหน่งใด ๆ ตามแนวรัศมี

ผลการทดลองพบว่าปริมาณน้ำที่สารดูดความชื้นดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกดังรูปที่ 2.30 สำหรับอัตราการดูดความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและคงที่เมื่อเวลาผ่านไปดังรูปที่ 2.31 และผลของการเพิ่มสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ($D_o/D_i$) ของทรงกระบอกกลวงที่บรรจุสารดูดความชื้นดังรูปที่ 2.32 พบว่าช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นแต่ความดันตกคร่อมของอากาศก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าเปรียบเทียบความดันตกคร่อมกับแบบ Vertical bed ดังรูปที่ 2.33 พบว่าความดันตกคร่อมถือว่าน้อยมากและสำหรับค่า $ka$ รูปที่ 2.34 ของกระบวนการดูดความชื้นมีแนวโน้มเหมือนกับอัตราการดูดความชื้นคือลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่อย ๆ ลดลง

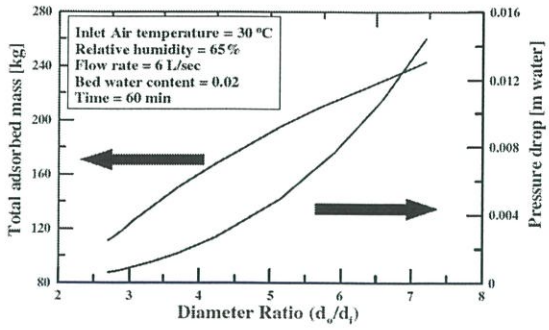



**รูปที่** 2.30 ปริมาณน้ำที่สะสมในสารดูดความชื้นต่อเวลา (Awad et al., 2006)

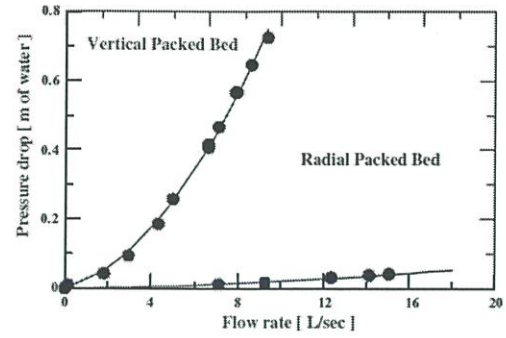



**รูปที่** 2.31 อัตราการดูดความชื้นต่อเวลาต่อเวลา (Awad et al., 2006)

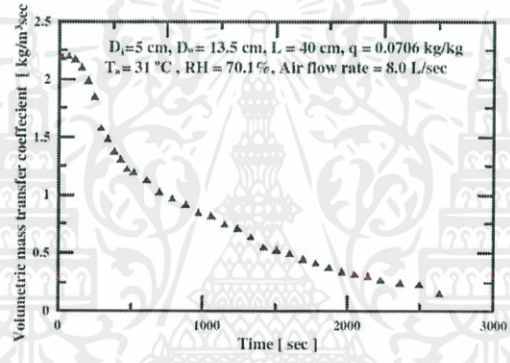
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่** 2.32 ปริมาณน้ำที่สะสมในสารดูดความชื้นกับอัตราส่วน $D_o/D_i$ (Awad et al., 2006)




**รูปที่** 2.33 ผลของความดันตกคร่อมกับรูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้น (Awad et al., 2006)




**รูปที่** 2.34 ค่า *ka* ของกระบวนการดูดความชื้นการบรรจุสารดูดความชื้น (Awad et al., 2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## ระเบียบวิธีวิจัย

โครงงานวิจัยเรื่องการออกแบบและพัฒนาหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีนี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนสำคัญคือ 1) การทดลองเบื้องต้น 2) การออกแบบและสร้างชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี และ 3) การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความชื้นภายในหอดูดความชื้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.1 การทดลองเบื้องต้น

การทดลองเบื้องต้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาคุณลักษณะด้านการถ่ายเทความชื้นของซิลิกาเจล เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบชุดทดลองหอดูดความชื้นและการวางแผนการทดลอง ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเบื้องต้นเป็น 2 การทดลองย่อย ได้แก่

1) ศึกษาอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์อากาศแตกต่างกัน

2) ศึกษาอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

#### 3.1.1 อุปกรณ์

1) กล่องสารละลายเข้มข้นที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกัน 4 ค่าคือ ความชื้นสัมพัทธ์ 57% (สารละลาย NaBr), 63% (สารละลาย $NaNO_2$), 75% (สารละลาย NaCl) และ84% (สารละลาย KCl)

2) ซิลิกาเจลชนิดสีน้ำเงิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 มิลลิเมตร

3) ถ้วยอะลูมิเนียม

4) เครื่องชั่งน้ำหนักสี่ตำแหน่ง (Pioneer PA214, OHAUS)

5) ตู้อบลมร้อน (UNE, Memmert)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 วิธีการทดลอง

การทดลองที่ 1 ศึกษาอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์อากาศแตกต่างกัน

1) อบแห้งซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2) บรรจุซิลกาเจลแห้ง 1.5 กรัม ลงในถ้วยอะลูมิเนียม จำนวน 4 ถ้วย และนำไปใส่ในกล่องสารละลายเข้มข้นที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่างกันอย่างละ 1 ถ้วย

3) บันทึกค่าน้ำหนักของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการดูดความชื้นทุก 20 นาที จนถึงนาทีที่ 240

4) ทำการทดลองซ้ำอีกสองรอบ

5) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลกับระดับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

1) ซิลิกาเจลดูดความชื้น เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2) บรรจุซิลกาเจลแห้ง 20 กรัม ลงในถ้วยอะลูมิเนียม จำนวน 3 ถ้วย และนำเข้าตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3) บันทึกค่าน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ลดลงเนื่องจากการคายความชื้นทุก 10 นาที จนถึงนาทีที่ 120

4) ทำการทดลองซ้ำอีกสองรอบ

5) เปรียบเทียบอัตราการคายความชื้นกับอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล

## 3.2 การออกแบบและสร้างหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี

หอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีสำหรับบรรจุซิลิกาเจล 2 กิโลกรัมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 เซนติเมตร และสูง 60 เซนติเมตร ทำจากแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีหนา 0.8 มิลลิเมตร และชุดบรรจุซิลิกาเจลแบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้นขนาดต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1 ทำจากตะแกรงอะลูมิเนียมหนา 0.56 มิลลิเมตร ขนาดช่อง 1.56x1.56 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.1** ขนาดชุดบรรจุซิลิกาเจล 2 กิโลกรัม

| รูปแบบการบรรจุ | $D_o/D_i$ | $D_i$ (เซนติเมตร) | $D_o$ (เซนติเมตร) | $h$ (เซนติเมตร) | $x$ (เซนติเมตร) |
|---|---|---|---|---|---|
| แบบแบบบรรจุเต็ม | 2 | 7.0 | 14.0 | 22.0 | - |
| (Full packing) | 2.5 | 7.0 | 17.5 | 13.0 | - |
| | 3 | 7.0 | 21.0 | 8.0 | - |
| แบบแบ่งชั้น | 2 | 7.0 | 14.0 | 6.0 | 5.0 |
| (Layered packing) | 2.5 | 7.0 | 17.5 | 4.0 | 5.0 |
| | 3 | 7.0 | 21.0 | 2.0 | 5.0 |

โดย $D_i$ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (เซนติเมตร)

$D_o$ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (เซนติเมตร)

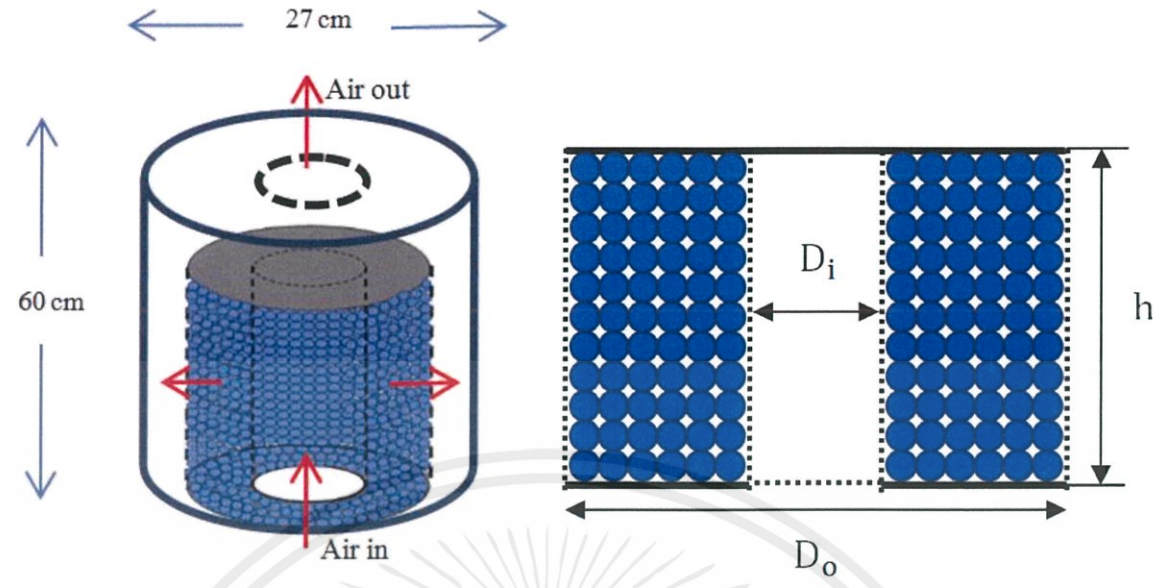
$h$ คือ ความสูงของซิลิกาเจล (เซนติเมตร)

$x$ คือ ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิกาเจล (เซนติเมตร)

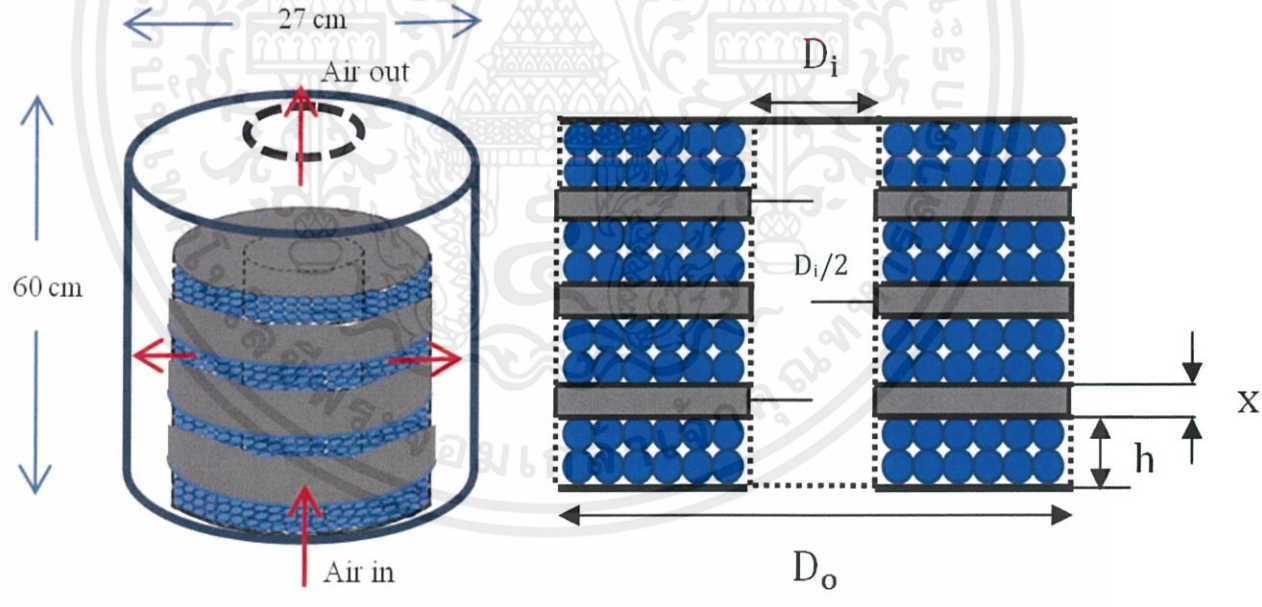
การบรรจุสารดูดความชื้นแบบบรรจุเต็ม (Full packing) ดังรูปที่ 3.1 จะบรรจุซิลิกาเจลเต็มความหนาของชุดบรรจุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงมีช่องตรงกลาง 7 เซนติเมตร สำหรับอากาศไหลเข้า ด้านบนของชุดบรรจุจะปิดสนิทเพื่อบังคับให้อากาศไหลผ่านซิลิกาเจลไปตามแนวรัศมีของชุดบรรจุ

การบรรจุสารดูดความชื้นแบบแบ่งชั้น (Layered) ดังรูปที่ 3.2 จะมีช่องว่างระหว่างชั้นของซิลิกาเจลโดยจะแบ่งซิลิกาเจลเป็น 4 ชั้น มีช่องว่างระหว่างชั้น 5 เซนติเมตร ทำจากสังกะสีลักษณะปิดทึบไม่ให้อากาศสามารถเข้าออกได้ และมีการติดครีบระหว่างชั้นซิลิกาเจล ขนาด $D_i/2$ เซนติเมตร เพื่อชะลอการไหลของอากาศให้สามารถสัมผัสกับซิลิกาเจลได้ทุกชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.1** การบรรจุซิลิกาเจลแบบบรรจุเต็ม




**รูปที่ 3.2** การบรรจุซิลิกาเจลแบบแบ่งชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่ออัตราการการถ่ายเทความชื้นภายในหอดูดความชื้น

การทดลองเพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่ออัตราถ่ายเทความชื้นภายในหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีประกอบด้วย 2 ปัจจัย ได้แก่

1) รูปแบบการบรรจุซิลิกาเจลแตกต่างกัน 2 แบบ คือ แบบบรรจุเต็ม (Full packing) และแบบแบ่งชั้น (Layered)

2) ระยะเวลาที่อากาศสัมผัสกับซิลิกาเจล (Residence times, $t_R$) แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.021 วินาที, 0.032 วินาที และ 0.044 วินาที

### 3.3.1 อุปกรณ์

1) Blower

2) Heater

3) Inverter (JADENDLM1)

4) แผงควบคุม

5) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล (UWE GW พิกัดน้ำหนัก 15 กิโลกรัม)

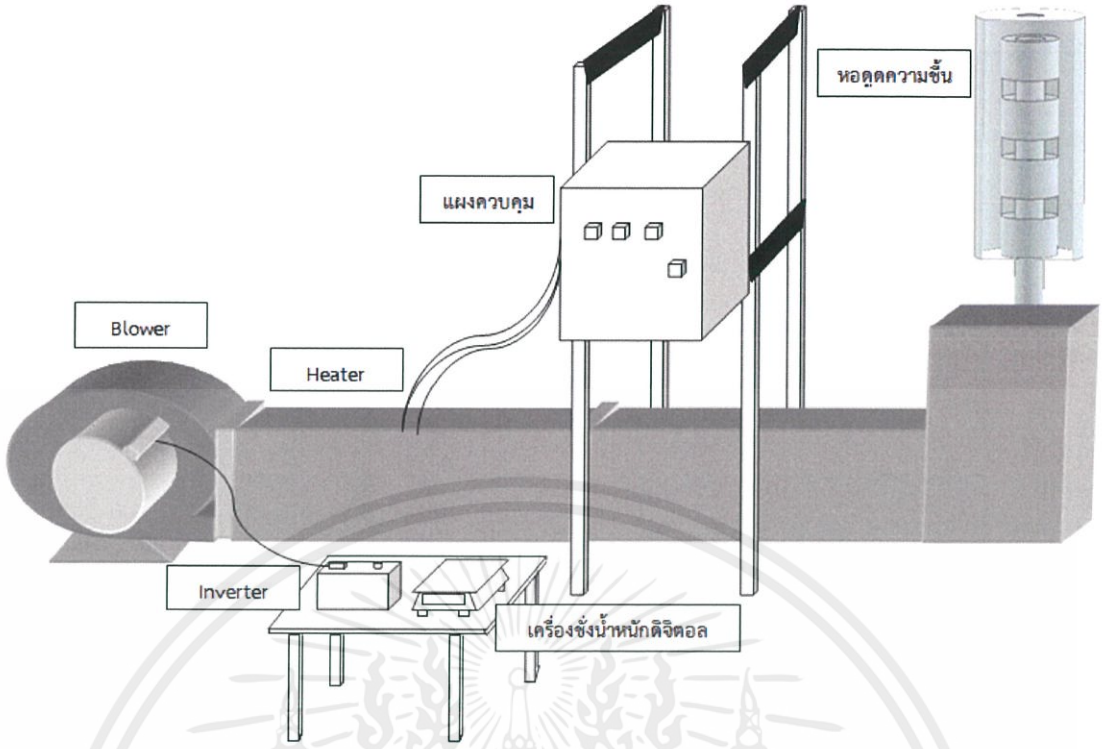
6) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Fluke 971 ความคลาดเคลื่อน ±1)

7) เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (DIGICON DA-43A ความคลาดเคลื่อน ±0.2)

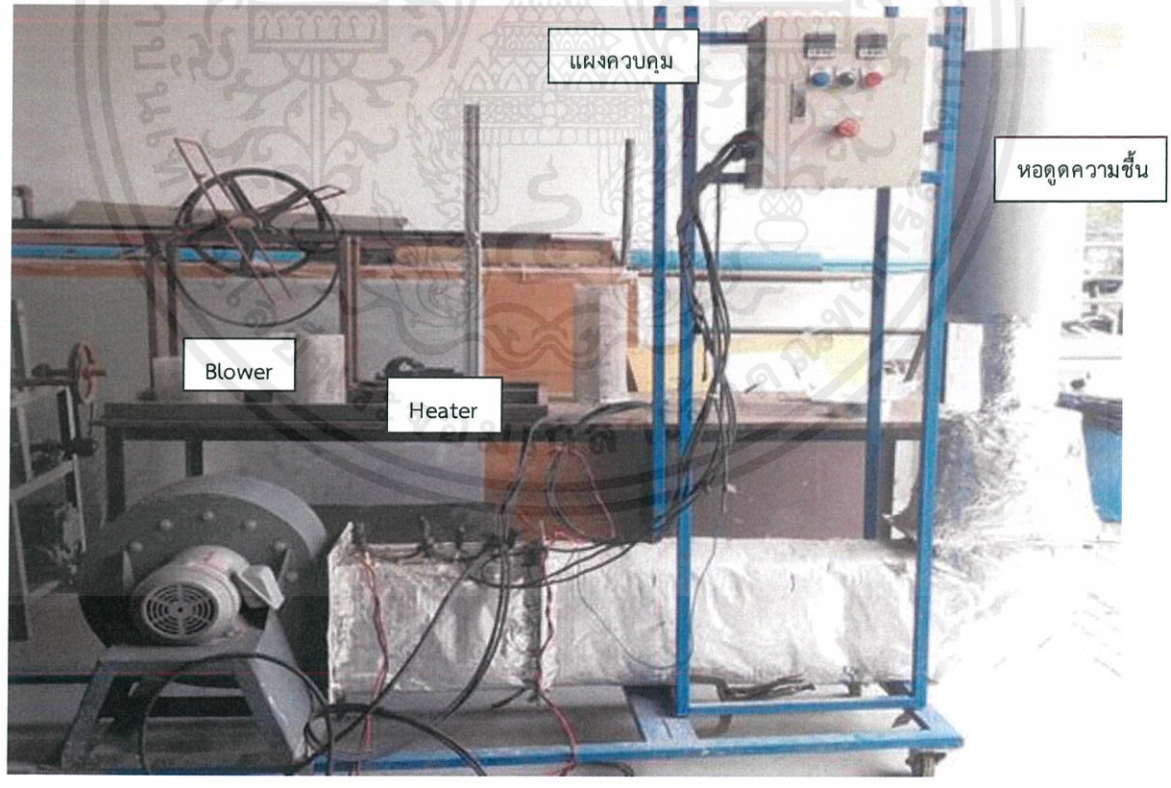
8) เทอร์โมมิเตอร์ (Fluke 52 Series IIความคลาดเคลื่อน ±0.3)

9) หอดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.3** อุปกรณ์ในการทดลอง




**รูปที่ 3.4** ภาพชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.3.2 การทดลองดูดความชื้น**

ทำการทดลอง 2 ซ้ำในแต่ละปัจจัย คือ ทดลองช่วงเวลา 10:00-12:30 น. ความชื้นสัมพัทธ์ 45-70% และช่วงเวลา 13:30-16:00 น. ความชื้นสัมพัทธ์ 40-60%

1) อบซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2) วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดลองด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น

3) ปรับInverter ให้อากาศมีอัตราการไหล 0.08 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีหรือเท่ากับ 20.78 เมตรต่อวินาที (ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อส่งอากาศเท่ากับ 7 เซนติเมตร)

4) บรรจุซิลิกาเจล 2 กิโลกรัม ในชุดบรรจุซิลิกาเจลและนำเข้าหอดูดความชื้น

5) ช่วง 3 นาทีแรก บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นทุก 1 นาที และบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังออกจากหอดูดความชื้น

6) หลังจากผ่าน 3 นาที บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นทุก 3 นาที และบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังออกจากหอดูดความชื้น บันทึกค่าจนครบเวลา 2 ชั่วโมง

7) ทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนรูปแบบการบรรจุ (แบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้น) และเปลี่ยนขนาดชุดบรรจุ ($D_o/D_i$ เท่ากับ 2, 2.5 และ 3) เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาที่อากาศสัมผัสซิลิกาเจล

**ตารางที่ 3.2** ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดชุดบรรจุซิลิกาเจลกับระยะเวลาที่อากาศสัมผัสซิลิกาเจลที่อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 0.08 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีและปริมาณซิลิกาเจล 2 กิโลกรัม

| $D_o/D_i$ | ระยะเวลาที่อากาศสัมผัสกับซิลิกาเจล, $t_R$ (วินาที) |
|---|---|
| 2 | 0.021 |
| 2.5 | 0.032 |
| 3 | 0.044 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การทดลองคายความชื้น

ทำการทดลอง 2 ซ้ำในแต่ละปัจจัย

1) ให้ซิลิกาเจลดูดความชื้นจากอากาศที่มีความเร็ว 25 เมตรต่อวินาที ความชื้นสัมพัทธ์ 50-60% เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2) วัดอุณหภูมิของอากาศก่อนการทดลองด้วยเทอร์โมมิเตอร์

3) ปรับปรับ Inverter ให้อากาศมีอัตราการไหล 0.08 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีหรือเท่ากับ 20.78 เมตรต่อวินาที (ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อส่งอากาศเท่ากับ 7 เซนติเมตร)

4) เปิด Heater ให้อากาศมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

5) บรรจุซิลิกาเจล 2 กิโลกรัมในชุดบรรจุซิลิกาเจลและนำเข้าหอดูดความชื้น

6) ช่วง 10 นาทีแรก บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ลดลงทุก 1 นาที และบันทึกค่าอุณหภูมิของอากาศหลังออกจากหอดูดความชื้น

7) หลังจากผ่าน 10 นาที บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ลดลงทุก 2 นาที และบันทึกค่าอุณหภูมิของอากาศหลังออกจากหอดูดความชื้นจนน้ำหนักซิลิกาเจลคงที่

8) ทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนรูปแบบการบรรจุ (แบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้น) และเปลี่ยนขนาดชุดบรรจุ ($D_o/D_i$ เท่ากับ 2, 2.5 และ 3) เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาที่อากาศสัมผัสซิลิกาเจล

## 3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (*ka*)

### 3.4.1 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การทดลองในงานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองแบบ Full factorial เนื่องจากต้องการศึกษาผลของ 2 ตัวแปร คือ รูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้นและระยะเวลาที่อากาศสัมผัสสารดูดความชื้นว่ามีผลต่อความสามารถในการดูดความชื้นหรือไม่ หลังการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) หากพบว่ามีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญจะทำการเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD Test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$)

### 3.4.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (*ka*)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (*ka*) **ของกระบวนดูดความชื้น** เกิดจากผลคูณของค่า *k* และ *a* ซึ่ง ค่า *k* คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ($kg/m^2 s$) และค่า *a* คือ ผลรวมพื้นที่สัมผัสต่อหน่วยปริมาตรของสารดูดความชื้น ($m^2/m^3$) เหตุผลของการเลือกคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของกระบวนการเป็นเชิงปริมาตร เนื่องจากไม่สามารถหาพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างซิลิกาเจลกับอากาศได้โดยตรง จึงเลือกใช้เป็นเชิงปริมาตรซึ่งค่า *ka* คำนวณได้จากสมการสมดุลความชื้นในซิลิกาเจลดังสมการที่ 2.11 (Awad et al., 2006)

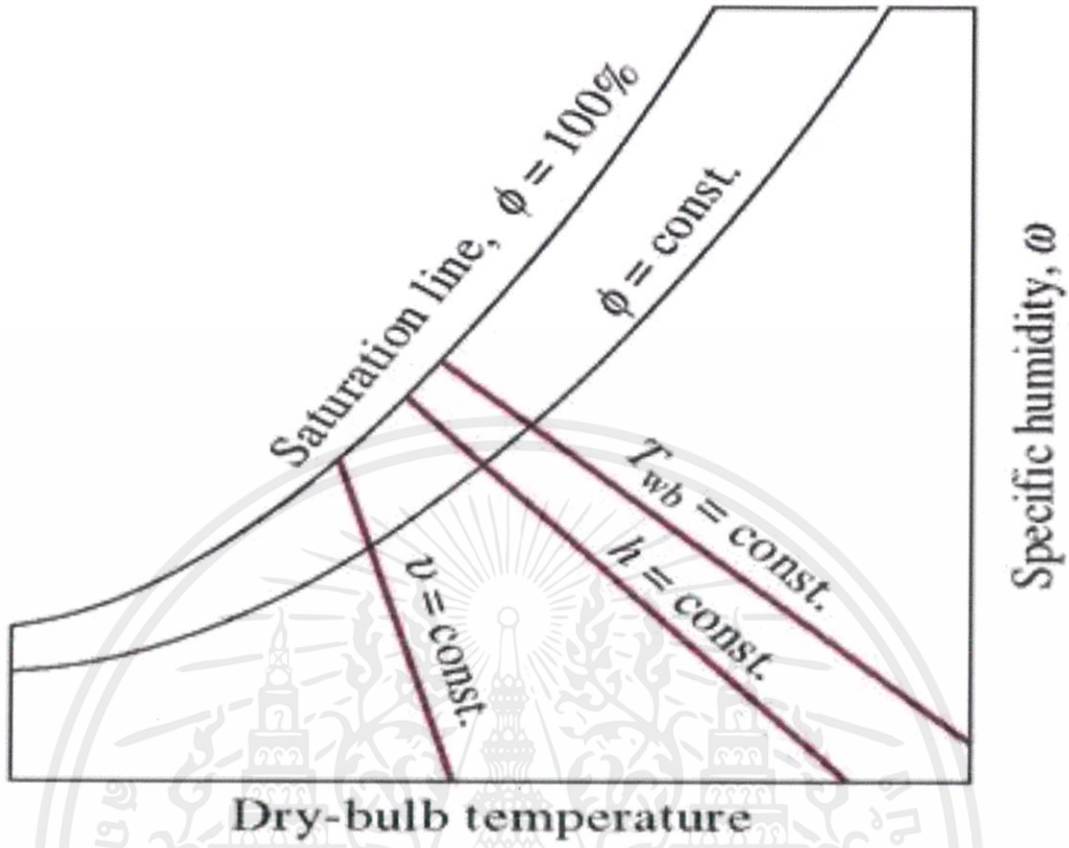
$$(1-\varepsilon)p_s\frac{\partial q}{\partial t} = ka(w-w^*)$$

โดย

| | | | |
|---|---|---|---|
| $ka$ | คือ | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร, | $kg/m^3*s$ |
| $w$ | คือ | ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ, | $kg_{water\ vapor}/kg_{dry\ air}$ |
| $w^*$ | คือ | ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก, | $kg_{water\ vapor}/kg_{dry\ air}$ |
| $\varepsilon$ | คือ | ช่องว่างของการบรรจุซิลิกาเจล | |
| $p_s$ | คือ | ความหนาแน่นของซิลิกาเจล, | $kg/m^3$ |
| $\frac{\partial q}{\partial t}$ | คือ | ปริมาณน้ำในซิลิกาเจลที่เวลาใดๆ, | $kg_{water}/kg_{dry\ silica\ gel}$ |

ค่า *w* และ $w^*$ เป็นค่าปริมาณน้ำในอากาศ เปิดค่าได้จากแผนภูมิไซโครเมตริก โดยใช้สภาวะของอากาศขาเข้าและขาออกจากหอดูดความชื้น คือ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (%RH, Ø) และอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry- bulk temperature) ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.5** แผนภูมิไซโครเมตริก (ที่มา: https://ienergyguru.com/2015/09/psychometric charts)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

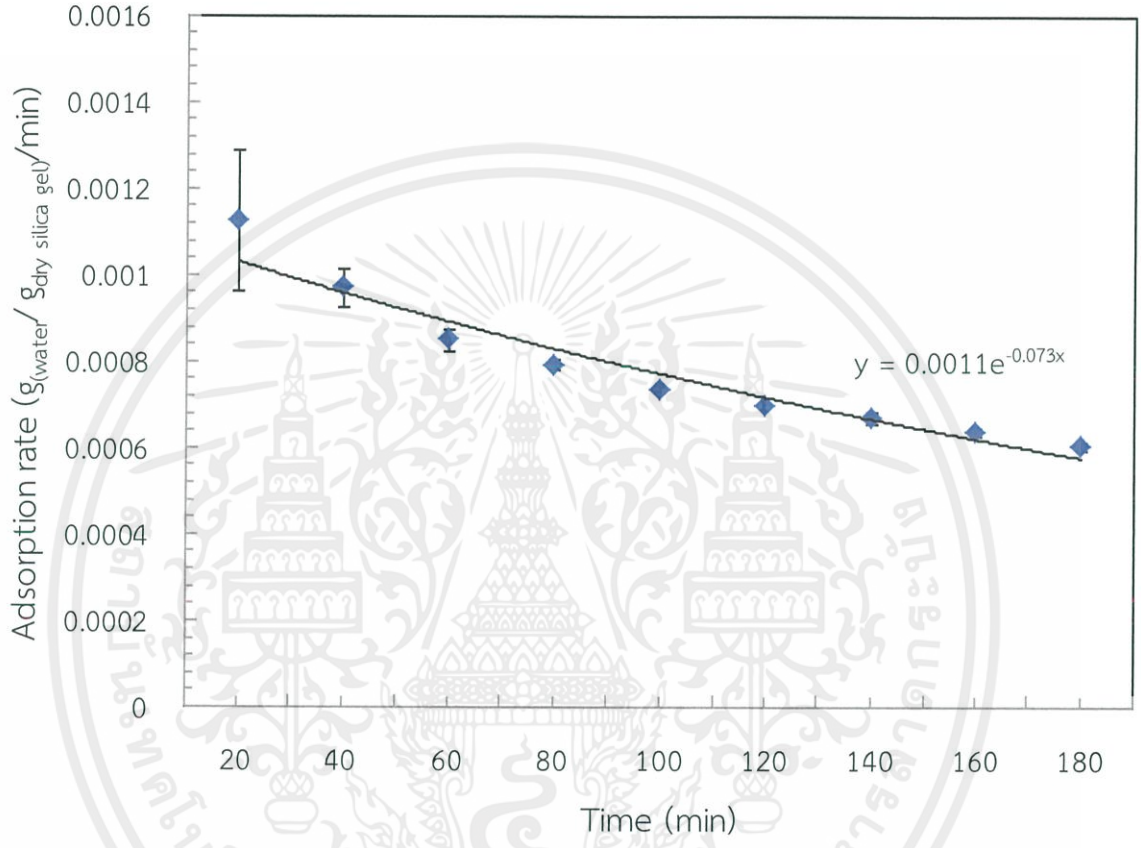
# บทที่ 4

# ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

## 4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น

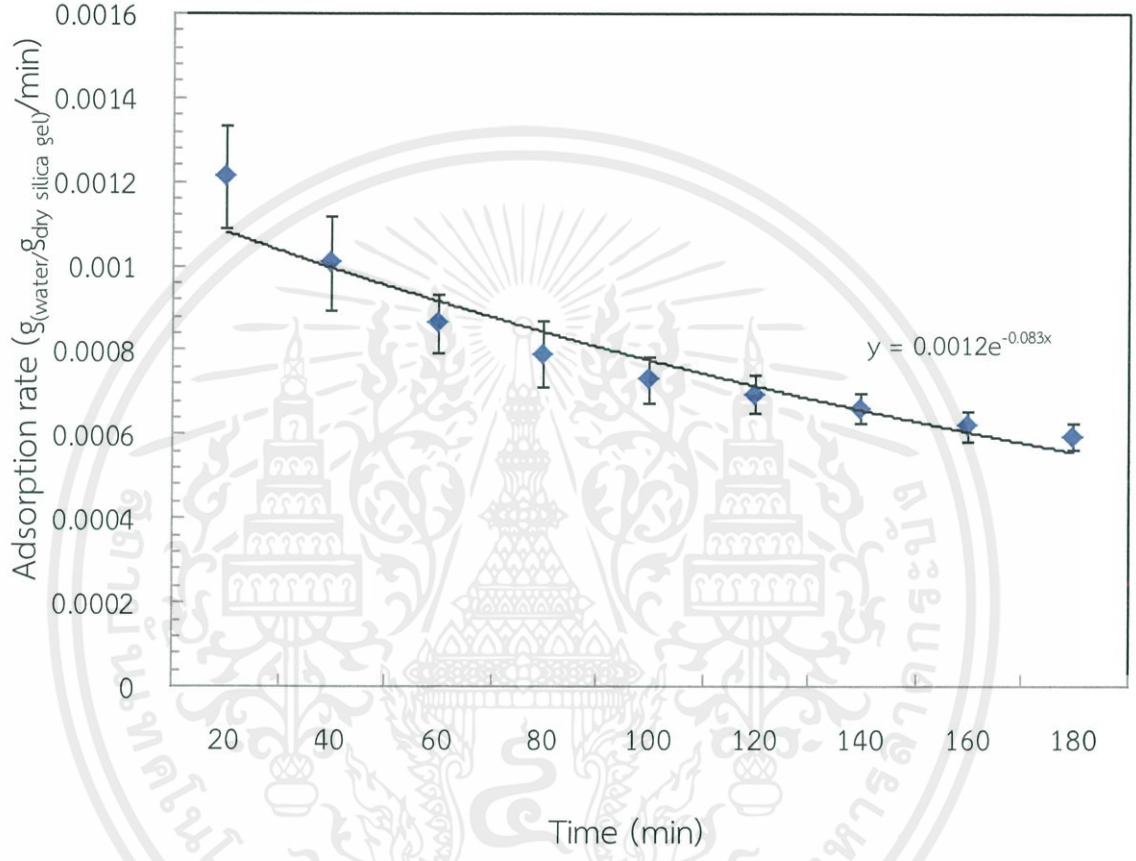
การทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาคุณลักษณะด้านการถ่ายเทความชื้นของซิลิกาเจลโดยการศึกษาอัตราการดูดความชื้นของที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแตกต่างกันคือ 54%, 63% และ 75% ผลแสดงดังรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ พบว่าอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลมีค่าสูงสุดในช่วงเริ่มต้นกระบวนการ โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 54%, 63% และ 75% มีอัตราการดูดความชื้นสูงสุด เท่ากับ 0.00125, 0.00121 และ 0.00118 ($g_{water}/g_{dry\ silica\ gel}$)/min และค่อย ๆ ลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล อัตราการดูดความชื้นต่ำสุดของกระบวนการ เท่ากับ 0.00060, 0.00059 และ 0.0060 ($g_{water}/g_{dry\ silica\ gel}$)/min ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54%, 63% และ 75% ตามลำดับ และอัตราการดูดความชื้นที่ %RH ทั้ง 3 ระดับมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที อธิบายได้ว่า อัตราการดูดความชื้นในช่วง 120 นาทีแรกของกระบวนการ เป็นผลมาจากความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างอากาศกับซิลิกาเจล ทำให้อัตราการดูดความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทั้งสามระดับมีค่าแตกต่างกัน แต่หลังจากผ่านไป 120 นาที อัตราการดูดความชื้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการดูดซับน้ำของซิลิกาเจล จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าผลการทดลองมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าสูงทำให้ความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างอากาศกับซิลิกาเจลสูง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นได้อย่างรวดเร็วในระหว่างการทดลอง สำหรับผลการทดลองอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 60 ℃ แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลมีค่าสูงสุดในช่วงเริ่มต้นและลดลงอย่างรวดเร็วจนเข้าใกล้ค่าศูนย์เมื่อผ่านไป 100 นาที จะเห็นได้ว่ากระบวนการคายความชื้นดำเนินไปได้รวดเร็วกว่าอัตราการดูดความชื้น เนื่องจากความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างอากาศกับซิลิกาเจลของกระบวนการคายความชื้นสูงกว่ากระบวนการดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



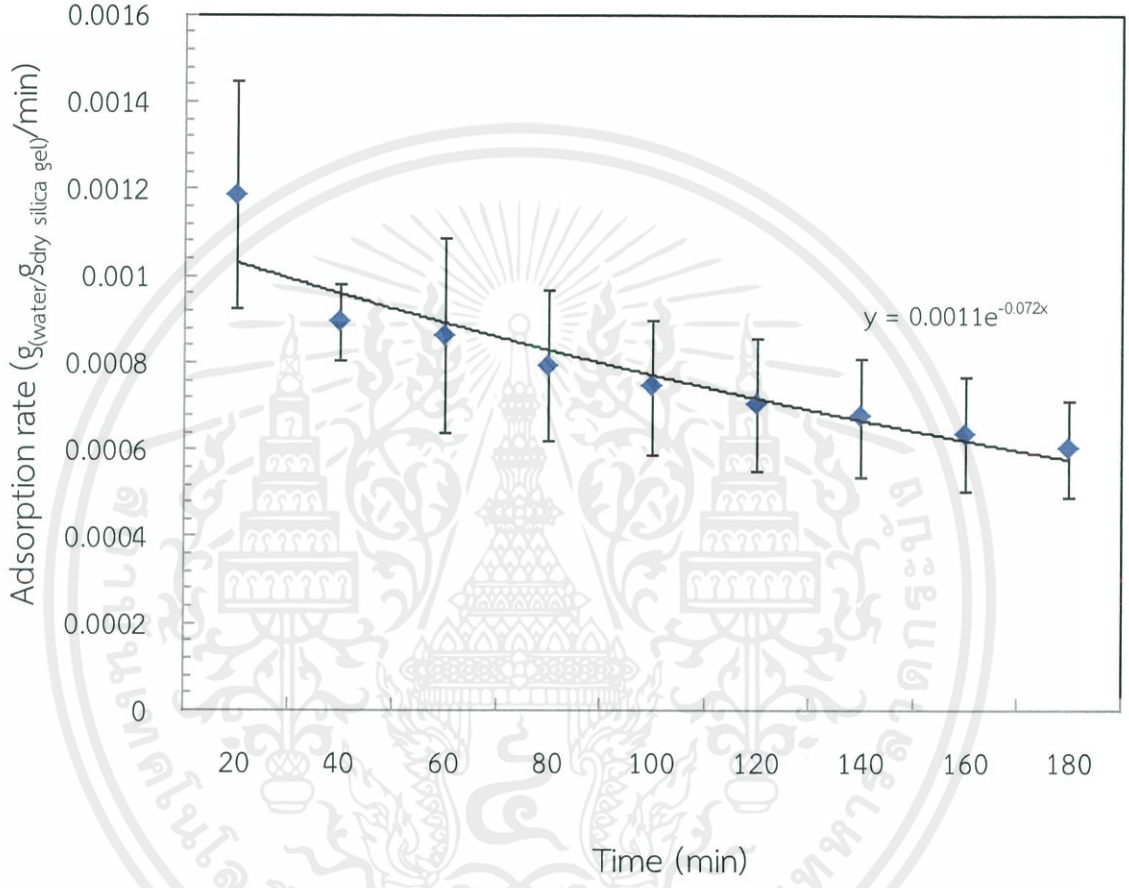

**รูปที่ 4.1** การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ในสภาวะบรรยากาศที่มีความชื้น 54%RH (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



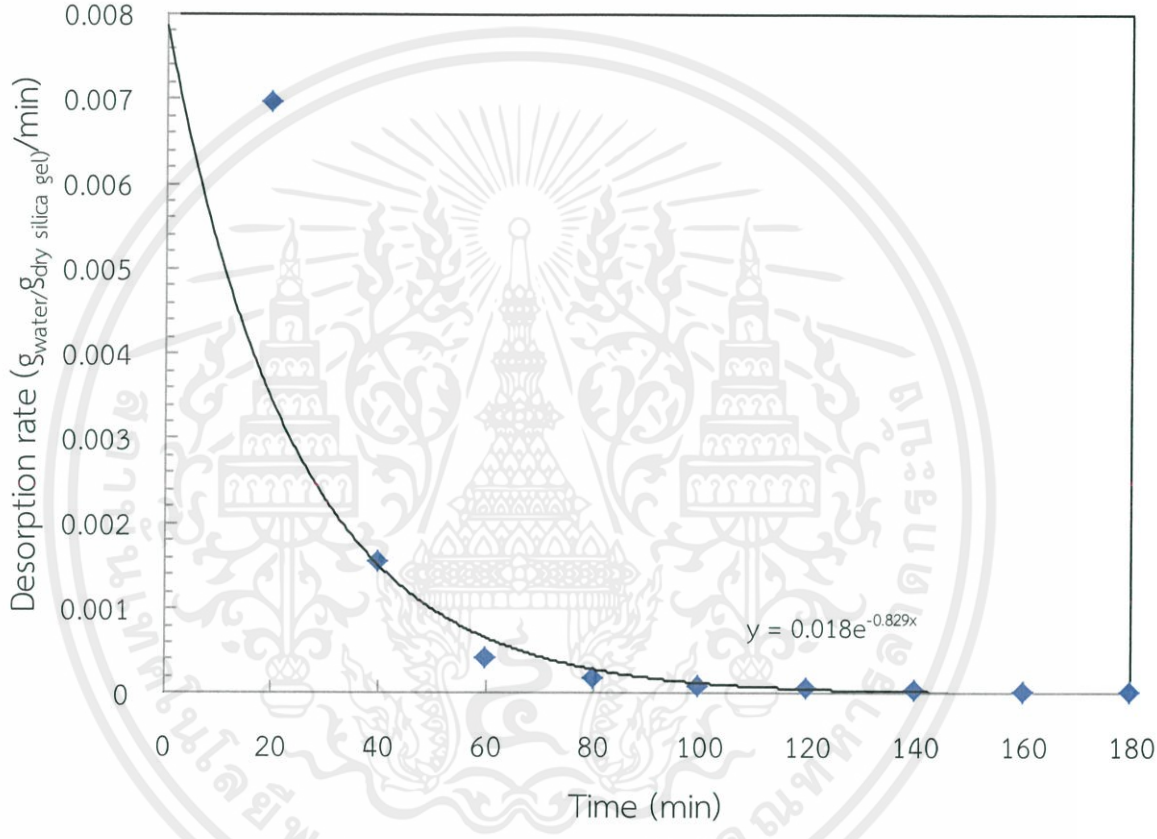

**รูปที่ 4.2** การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ในสภาวะบรรยากาศที่มีความชื้น 63%RH (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.3** การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ในสภาวะบรรยากาศที่มีความชื้น 75%RH (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.4** การเปลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่อุณหภูมิ 60°C (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

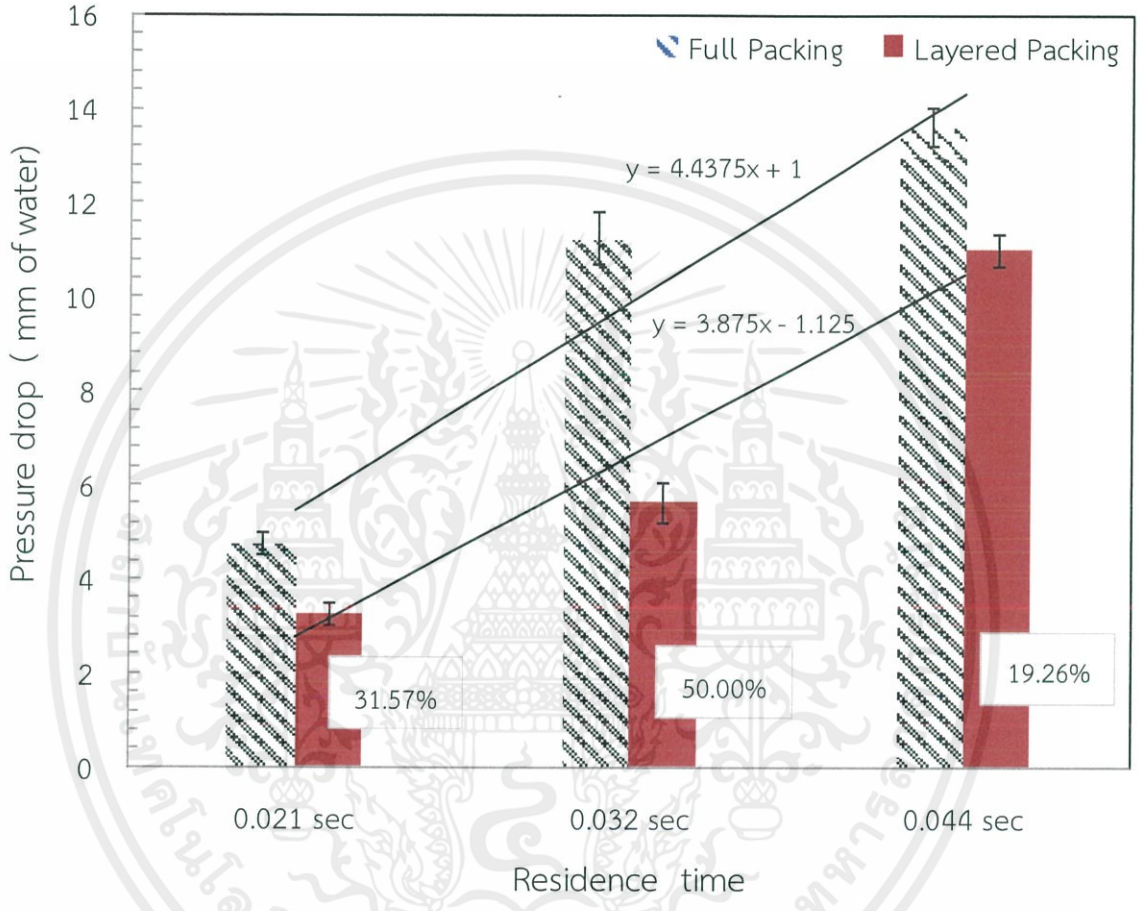
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลของรูปแบบการบรรจุซิลิกาเจล

### 4.2.1 ความดันตกคร่อม (Pressure drop)

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความดันตกคร่อมของอากาศหลังผ่านซิลิกาเจล โดยการบรรจุแบบบรรจุเต็ม (Full packing) และแบบแบ่งชั้น (Layered packing) และที่ระยะเวลาที่สัมผัสซิลิกาเจล ($t_R$) ต่างกัน 0.021, 0.032 และ 0.044 วินาที ดังแสดงรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่า ความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อ $t_R$ เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูป สำหรับการบรรจุแบบแบ่งชั้นจะเกิดความดันตกคร่อมน้อยกว่าแบบบรรจุเต็ม เท่ากับ 12.18%, 50.00% และ 19.26% ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021, 0.032 และ 0.044 วินาที ตามลำดับ จากสมการ Burke-Plummer พบว่า ความดันตกคร่อมของของไหลที่ผ่านชั้นของแข็งหรืออนุภาคของแข็ง จะแปรผันโดยตรงกับความสูงของชั้นของอนุภาคที่อากาศไหลผ่าน ซึ่งสามารถนำมาอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ คือ การบรรจุซิลิกาเจลแบบแบ่งชั้นทำให้ความสูงของชั้นซิลิกาเจล ($h$) ที่อากาศจะไหลผ่านลดลงเมื่อเทียบกับแบบบรรจุเต็ม ทำให้เกิดความดันตกคร่อมน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.5** ความดันตกคร่อมแบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

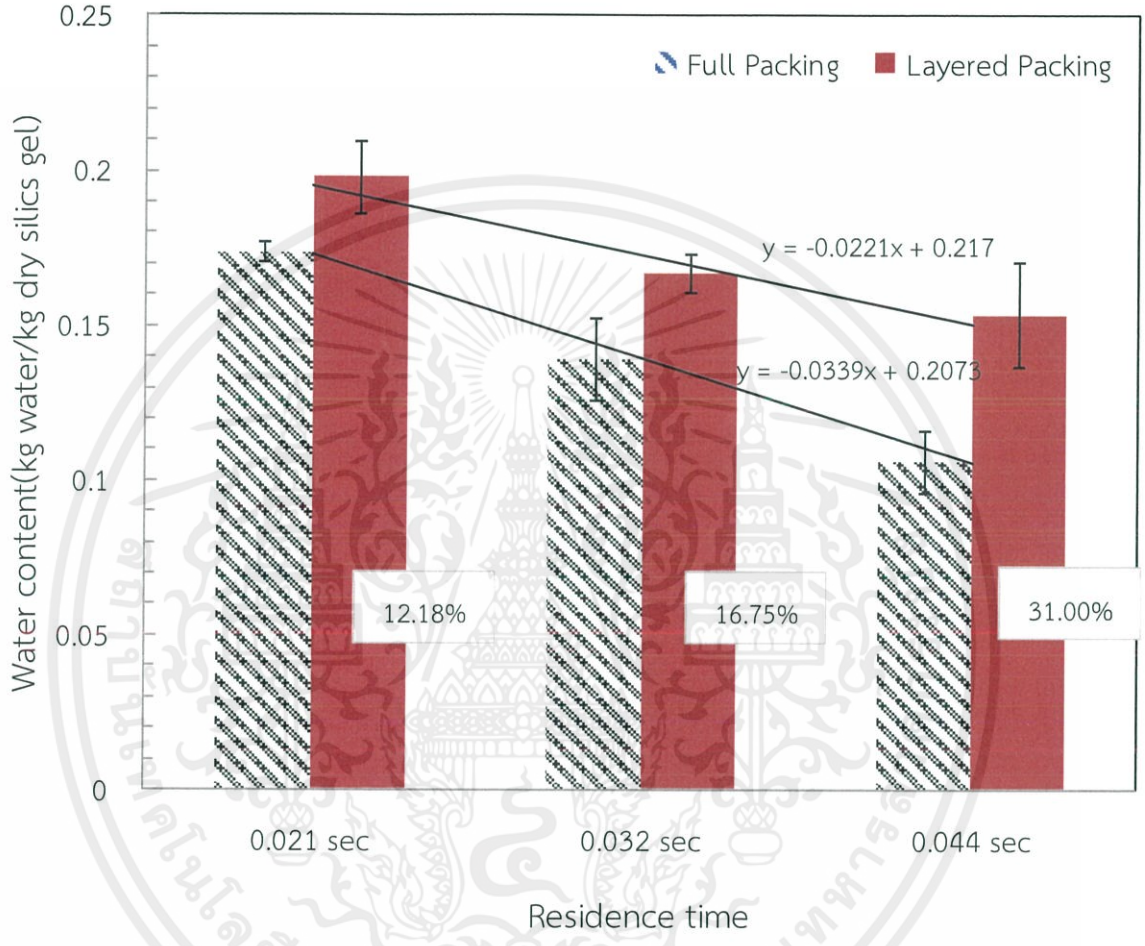
### 4.2.2 การดูดความชื้น

การทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการดูดความชื้นและอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลโดยการบรรจุซิลิกาเจลแตกต่างกันสองแบบ คือ แบบบรรจุเต็ม (Full packing) และแบบแบ่งชั้น (Layered packing) โดยใช้ซิลิกาเจลแห้ง 2 กิโลกรัม ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และบันทึกค่าน้ำหนักซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการดูดความชื้นจากอากาศ

**- ปริมาณน้ำสะสม**

ปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลสามารถดูดได้จากอากาศเปรียบเทียบระหว่างการบรรจุแบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้นที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า การบรรจุซิลิกาเจลแบบแบ่งชั้นสามารถดูดซับความชื้นจากอากาศได้มากกว่าแบบบรรจุเต็ม เท่ากับ 12.18%, 16.75% และ 31.00% ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021, 0.032 และ 0.044 ตามลำดับ โดยที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที สามารถดูดความชื้นจากอากาศได้มากที่สุด โดยแบบบรรจุเต็มมีปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดได้เท่ากับ 0.17 $kg_{water}/kg_{dry\ silica\ gel}$ และแบบแบ่งชั้นดูดความชื้นได้เท่ากับ 0.19 $kg_{water}/kg_{dry\ silica\ gel}$ ปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดซับได้จะลดลงเมื่อ $t_R$ เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูป จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า เมื่อพิจารณาตลอดทั้งกระบวนการปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดได้แบบแบ่งชั้นมีค่ามากกว่าแบบบรรจุเต็มอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 เนื่องจากการบรรจุแบบแบ่งชั้นช่วยเพิ่มโอกาสให้อากาศสามารถสัมผัสกับซิลิกาเจลได้อย่างทั่วถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



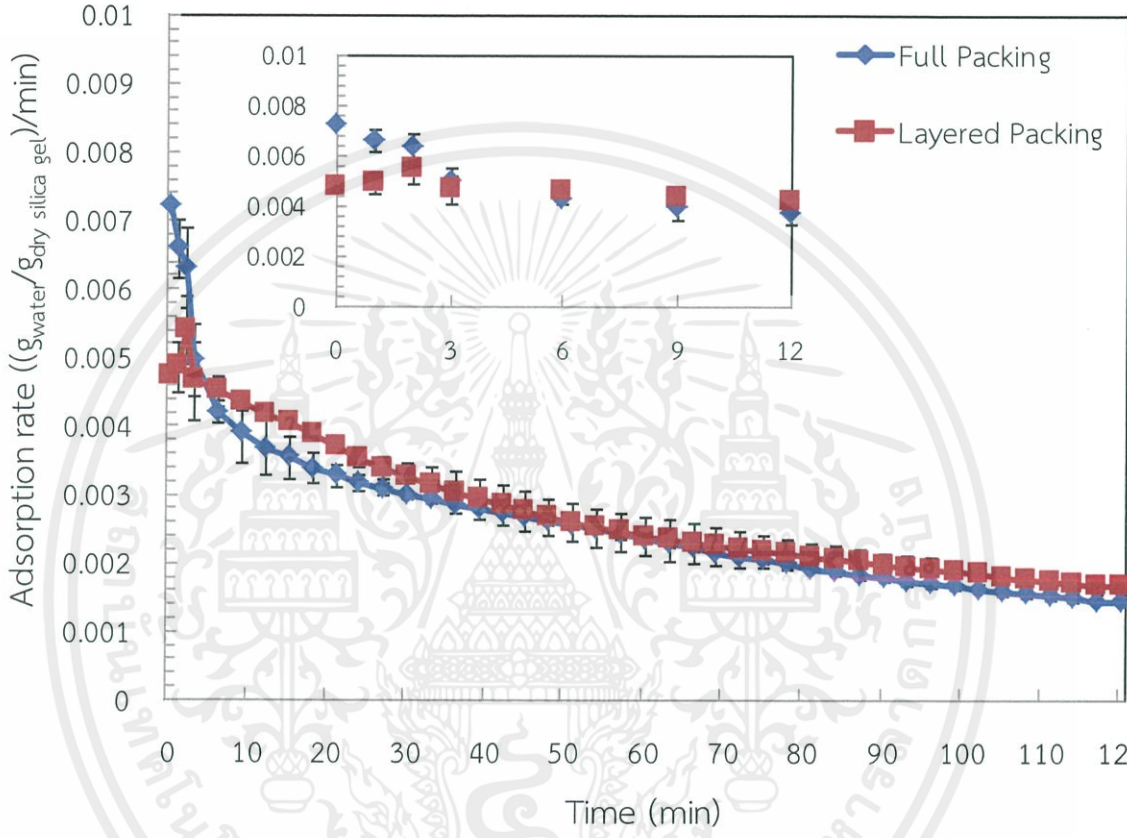

**รูปที่ 4.6** ปริมาณน้ำสะสมในซิลิกาเจลแบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**- อัตราการดูดความชื้น**

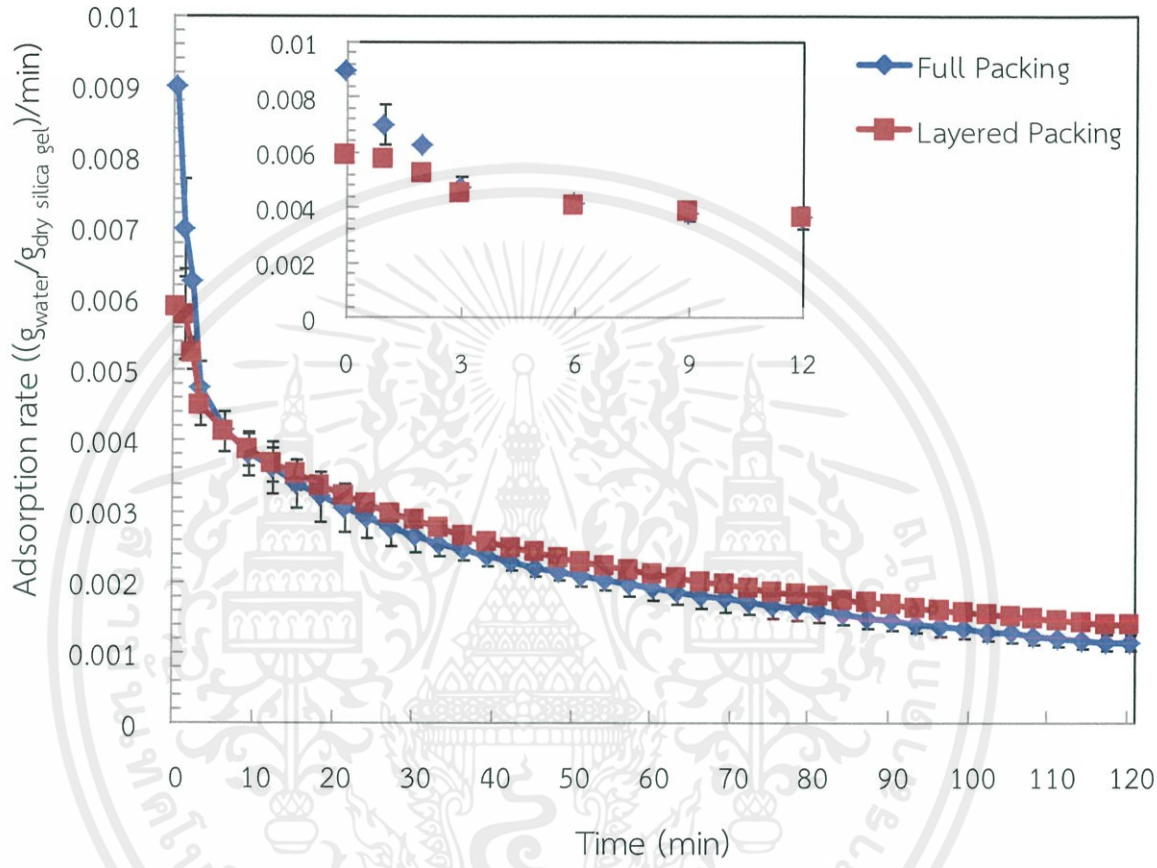
สำหรับอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล (($g_{water}/g_{dry\ silica\ gel}$)/min) ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.021, 0.032 และ 0.044 วินาที ดังรูปที่ 4.7 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ จากการขยายกราฟในช่วงแรก พบว่าแบบบรรจุเต็มมีอัตราการดูดความชื้นสูงกว่าแบบแบ่งชั้น แต่หลังจากผ่านไป 10 นาทีโดยประมาณ แบบแบ่งชั้นจะมีอัตราการดูดความชื้นสูงกว่าแบบบรรจุเต็ม และพบว่าผลของการบรรจุแบบแบ่งชั้นจะมีอัตราการดูดความชื้นมากกว่าแบบบรรจุเต็มอย่างชัดเจนเมื่อ residence time มากที่สุด ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที เนื่องจากที่ $t_R$ มากที่สุด ระยะทางที่อากาศสัมผัสซิลิกาเจลจะมากที่สุดทำให้โอกาสในการสัมผัสซิลิกาเจลส่งผลชัดเจนที่สุด อัตราการดูดความชื้นระหว่างแบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้นจึงแตกต่างกันชัดเจนที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



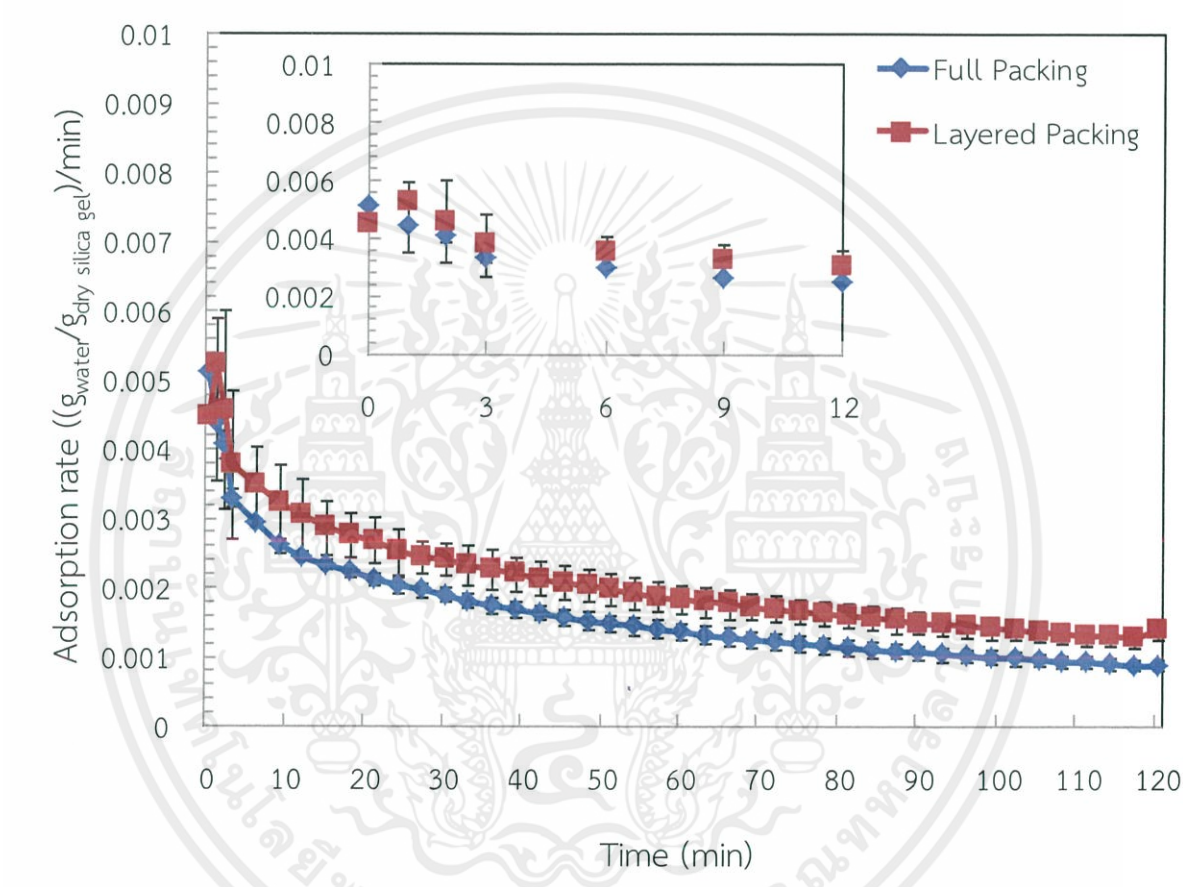

**รูปที่ 4.7** การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.8** การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



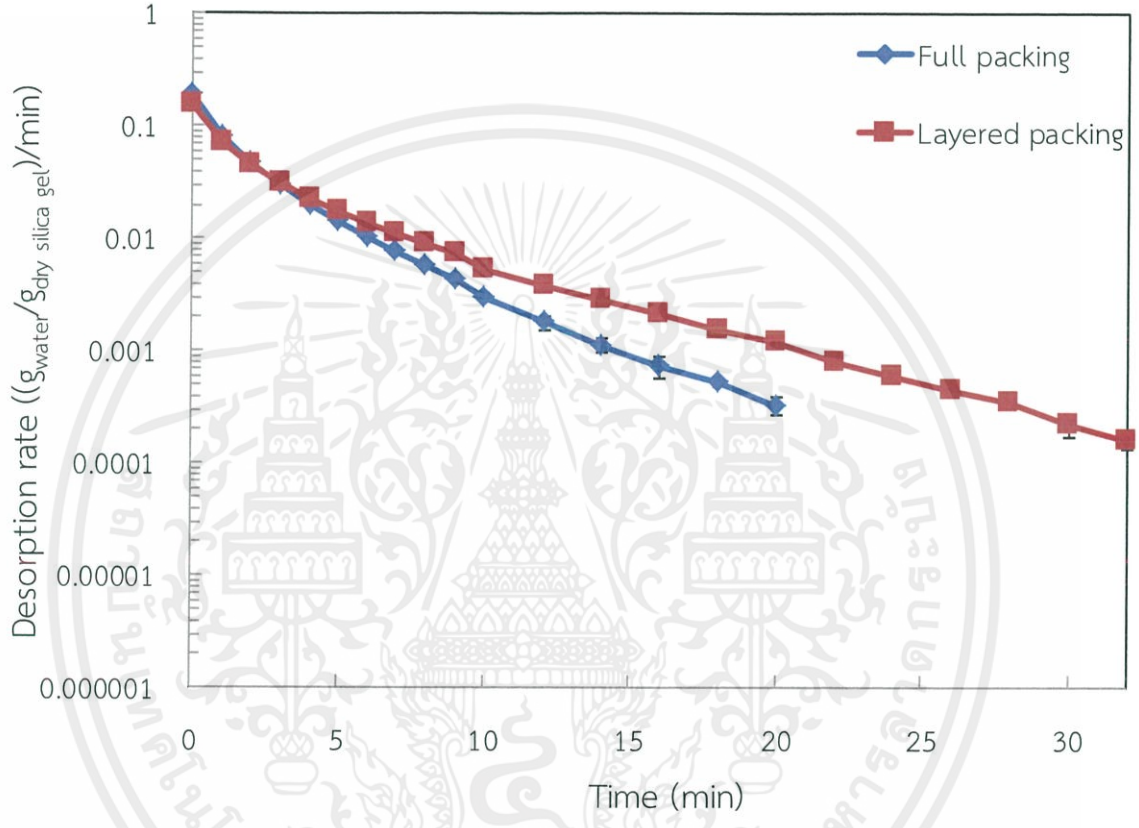

**รูปที่ 4.9** การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 การคายความชื้น

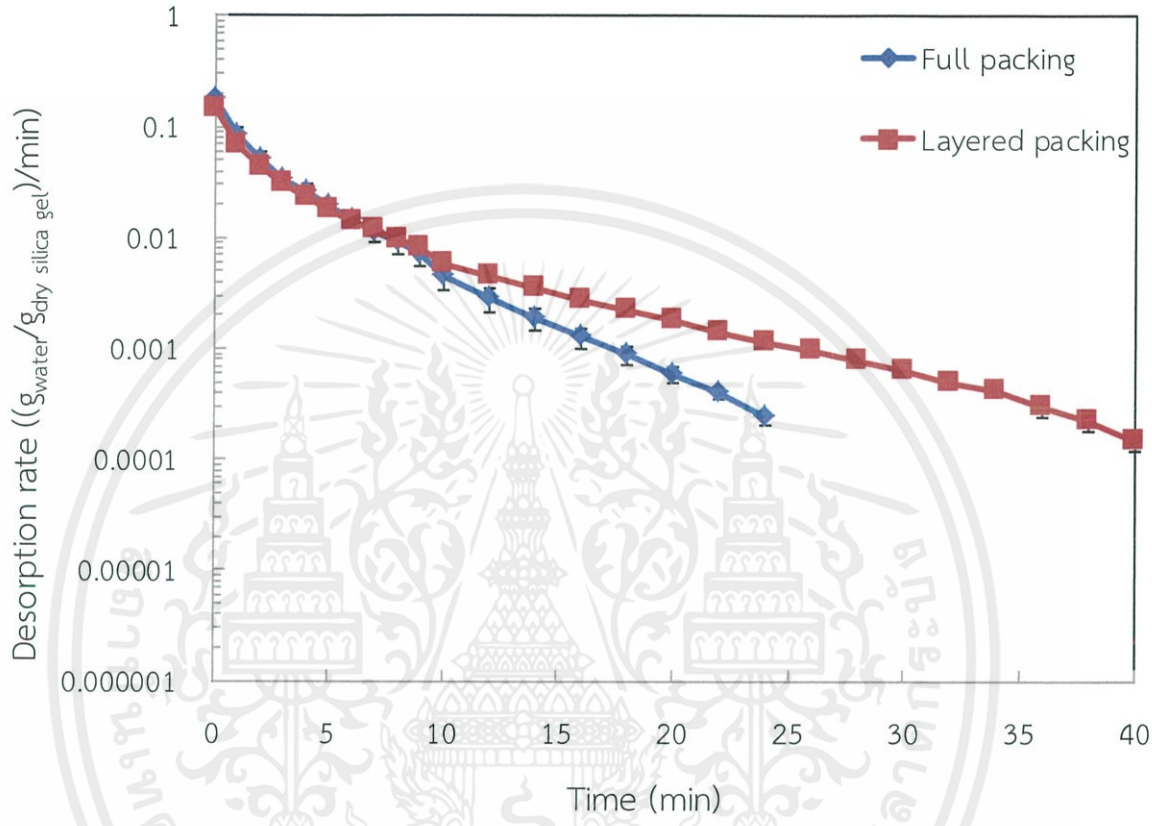
อัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ($(g_{water}/g_{dry\ silica\ gel})$/min) ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.021, 0.032 และ 0.044 วินาที ดังรูปที่ 4.10 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ พบว่าในช่วงประมาณ 10 นาทีแรกของกระบวนการ อัตราการคายความชื้นระหว่างแบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เป็นผลมาจากความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างอากาศกับซิลิกาเจลซึ่งแตกต่างกันมาก จึงทำให้รูปแบบการบรรจุยังไม่ส่งผลต่อการคายความชื้นมากนัก แต่หลังจาก 10 นาทีผ่านไป สามารถเห็นความแตกต่างของอัตราการคายความชื้นระหว่างการบรรจุทั้งสองรูปแบบ เนื่องจากความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างอากาศกับซิลิกาเจลน้อยลง ทำให้รูปแบบการบรรจุมีผลต่อการคายความชื้นอย่างชัดเจน และการบรรจุแบบแบ่งชั้นมีอัตราการคายความชื้นสูงกว่าแบบบรรจุเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



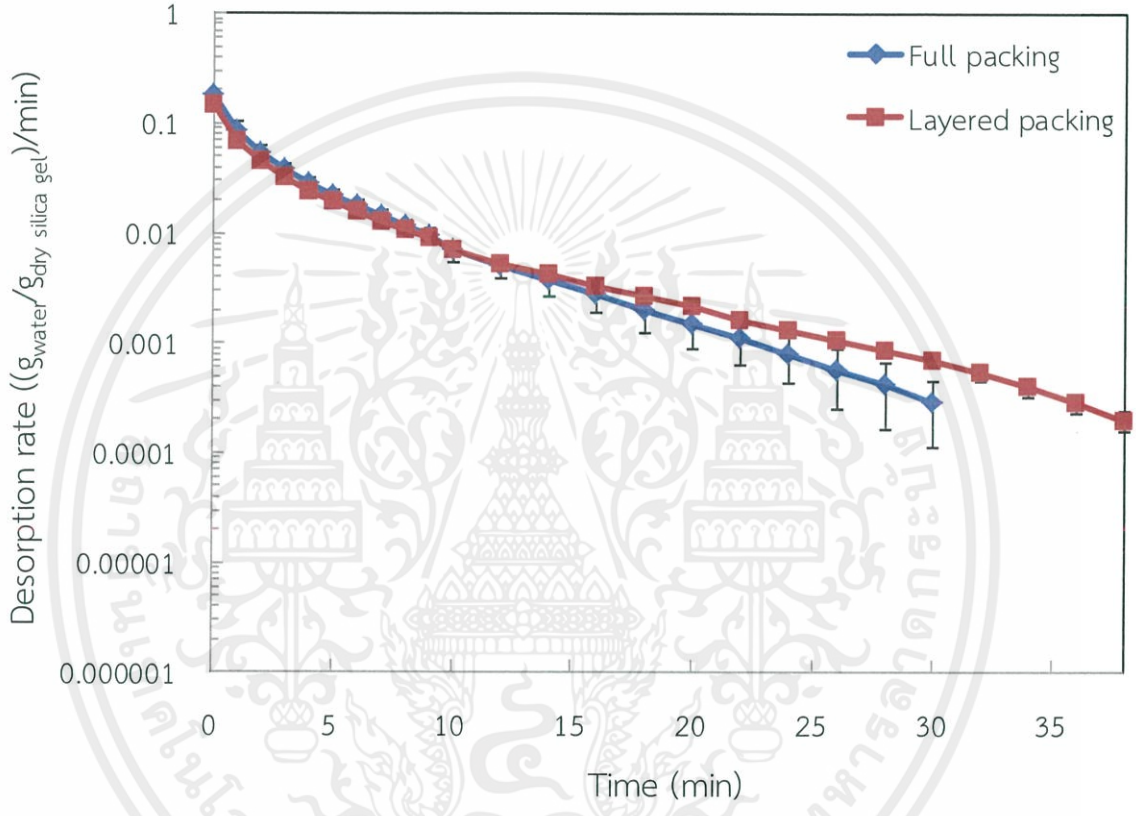

**รูปที่ 4.10** การเปลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.11** การเลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



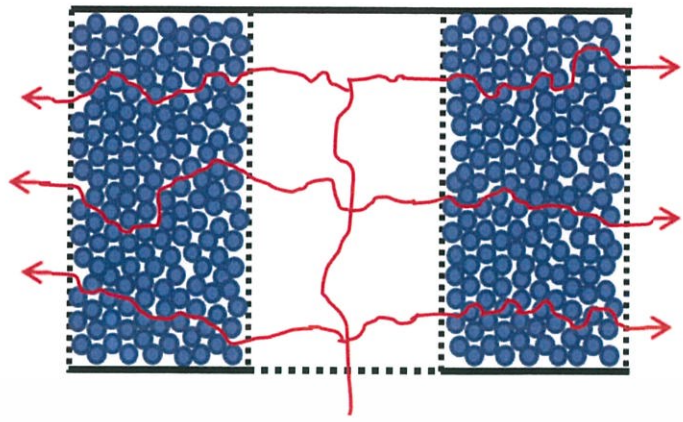

**รูปที่ 4.12** การเปลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

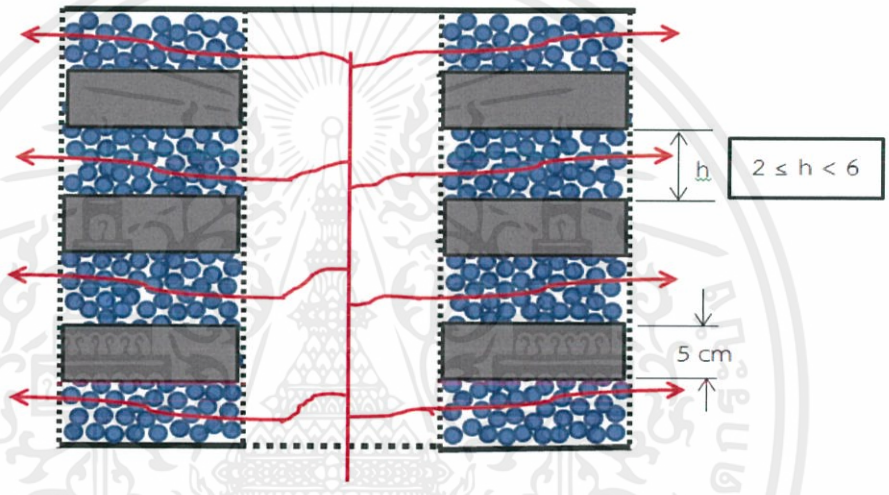
**4.2.4 แบบจำลองรูปแบบการไหลของอากาศในหอดูดความชื้น**

จากผลการทดลอง การบรรจุซิลิกาเจลแบบแบ่งชั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบบรรจุเต็มทั้งการดูดความชื้นและคายความชื้น สามารถอธิบายได้จากรูป 4.8 (A) (B) และ (C) แสดงเส้นทางการไหลของอากาศที่สัมผัสซิลิกาเจล สำหรับการบรรจุแบบบรรจุเต็ม แบบแบ่งชั้นไม่ติดครีบ และแบบแบ่งชั้นติดครีบ ตามลำดับ จากทฤษฎีการไหลของของไหล คือ ของไหลจะไหลไปในทิศทางที่ไหลได้ง่ายที่สุดหรือมีสิ่งกีดขวางการไหลน้อยสุด สามารถนำมาอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ คือ สำหรับแบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้นไม่ติดครีบ อากาศจะไหลขึ้นไปชั้นบนสุดของชุดบรรจุซิลิกาเจล ซึ่งมีแผ่นสังกะสีปิดสนิทไม่ให้อากาศไหลผ่านไปได้ ทำให้มวลอากาศส่วนใหญ่ไหลผ่านชั้นซิลิกาเจลบริเวณด้านบน จึงเกิดการถ่ายเทความชื้นบริเวณด้านบนเป็นส่วนใหญ่ เห็นได้จากการเปลี่ยนสีของซิลิกาเจลดังรูปที่ 4.13 (A) และ (B) ซึ่งซิลิกาเจลจะเปลี่ยนสีอย่างชัดเจนที่บริเวณชั้นบนของชุดบรรจุซิลิกาเจล ส่วนชั้นล่างจะเกิดการเปลี่ยนสีค่อนข้างน้อย เป็นส่วนที่อากาศไม่สัมผัสกับซิลิกาเจล (Dead zone) และสำหรับการบรรจุแบบแบ่งชั้นติดครีบ ครีบจะช่วยกีดขวางการไหลของอากาศ ทำให้อากาศไหลผ่านซิลิกาเจลทุกชั้น เพิ่มโอกาสให้อากาศสัมผัสซิลิกาเจลได้อย่างทั่วถึง ทำให้เกิดการถ่ายเทความชื้นได้ดีกว่า แสดงดังรูปที่ 4.13 (C) ซึ่งจะเห็นว่าซิลิกาเจลในแต่ละชั้นเปลี่ยนสีอย่างสม่ำเสมอ

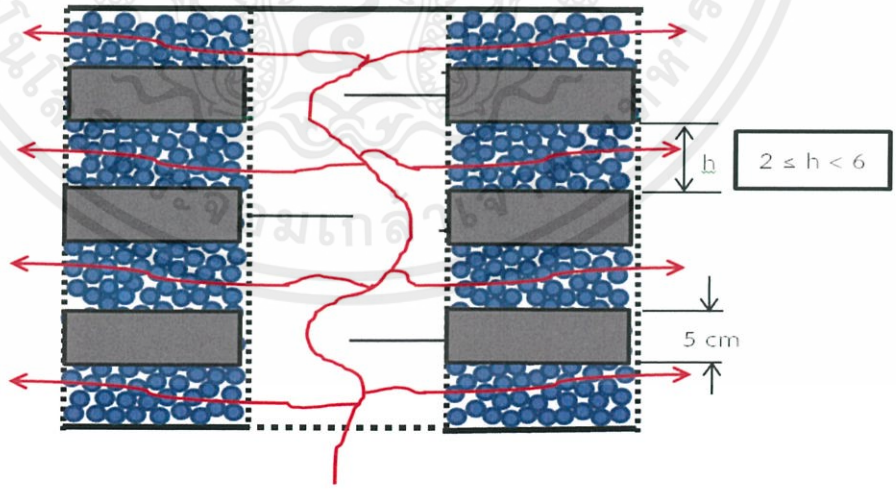
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(A)



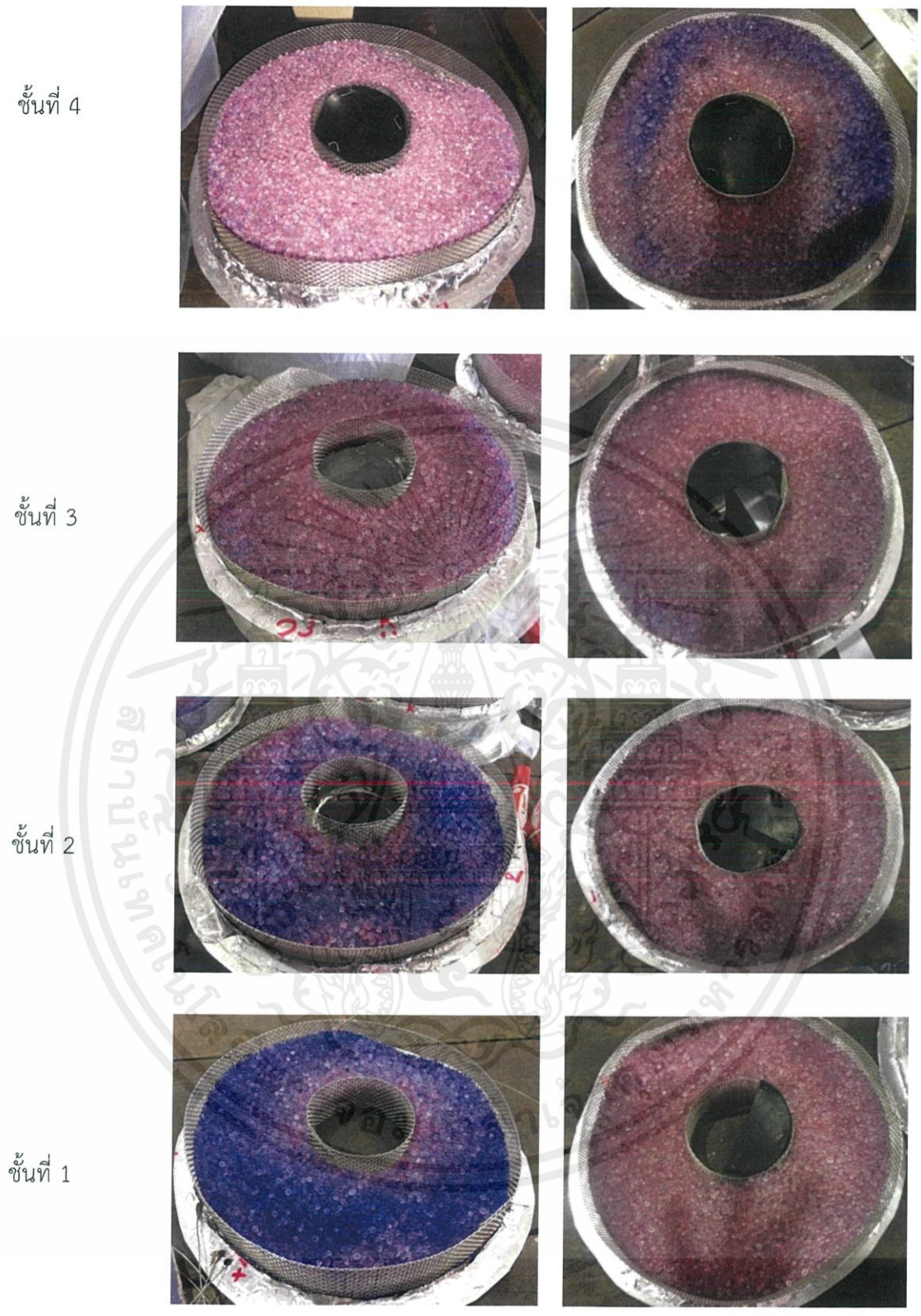

(B)




(C)

**รูปที่ 4.13** การไหลของอากาศสัมผัสซิลิกาเจล ที่รูปแบบการบรรจุต่างกัน (A) แบบบรรจุเต็ม (B) แบบแบ่งชั้นไม่ติดครีบ (C) แบบแบ่งชั้นติดครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.14** สีของซิลิกาเจลหลังผ่านกระบวนการดูดความชื้น สำหรับการบรรจุแบบแบ่งชั้น (A) ไม่ติดครีบ (B) ติดครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

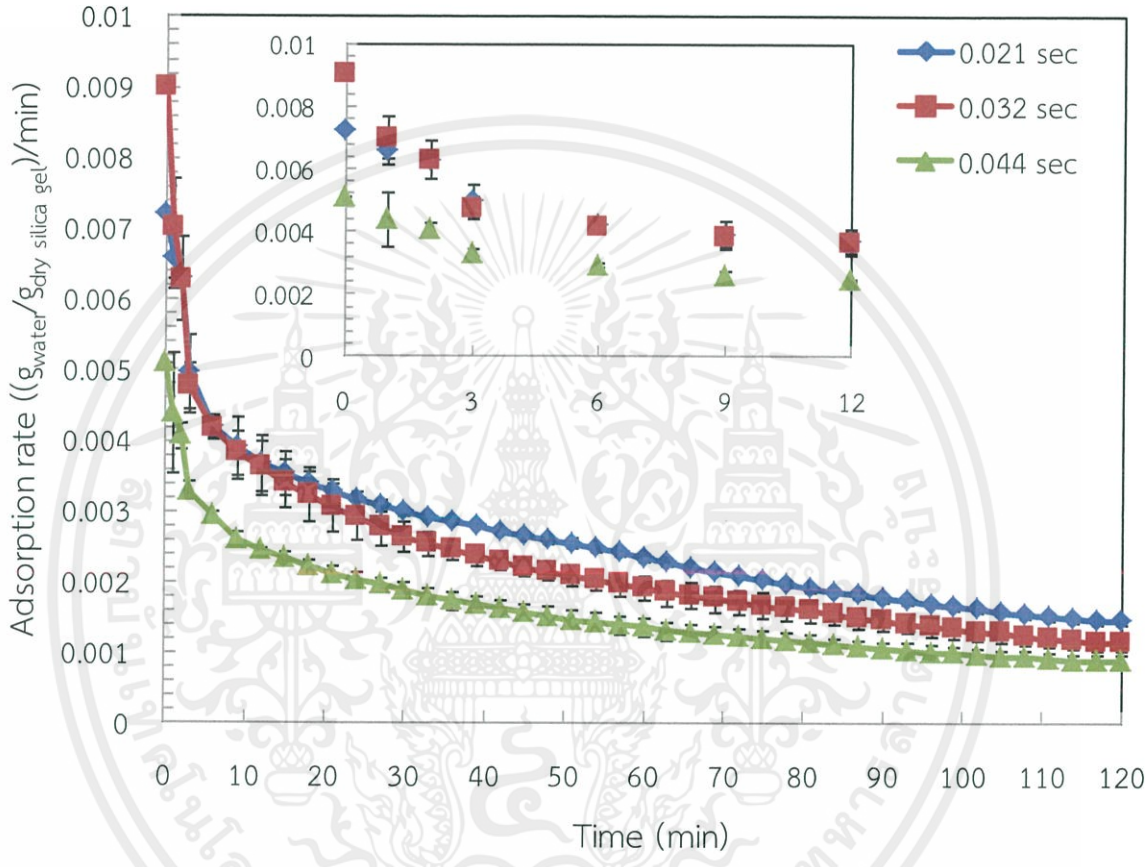
## 4.3 ผลของระยะเวลาที่อากาศสัมผัสสารดูดความชื้น (Residence times, $t_R$)

การทดลองเพื่อศึกษาผลของระยะเวลาที่อากาศสัมผัสสารดูดความชื้น ($t_R$) ต่ออัตราการถ่ายเทความชื้นโดยการเปลี่ยนรูปแบบของชุดบรรจุซิลิกาเจล 3 รูปแบบ ตามรายละเอียดดังตารางที่ 3.2

### 4.3.1 การดูดความชื้น

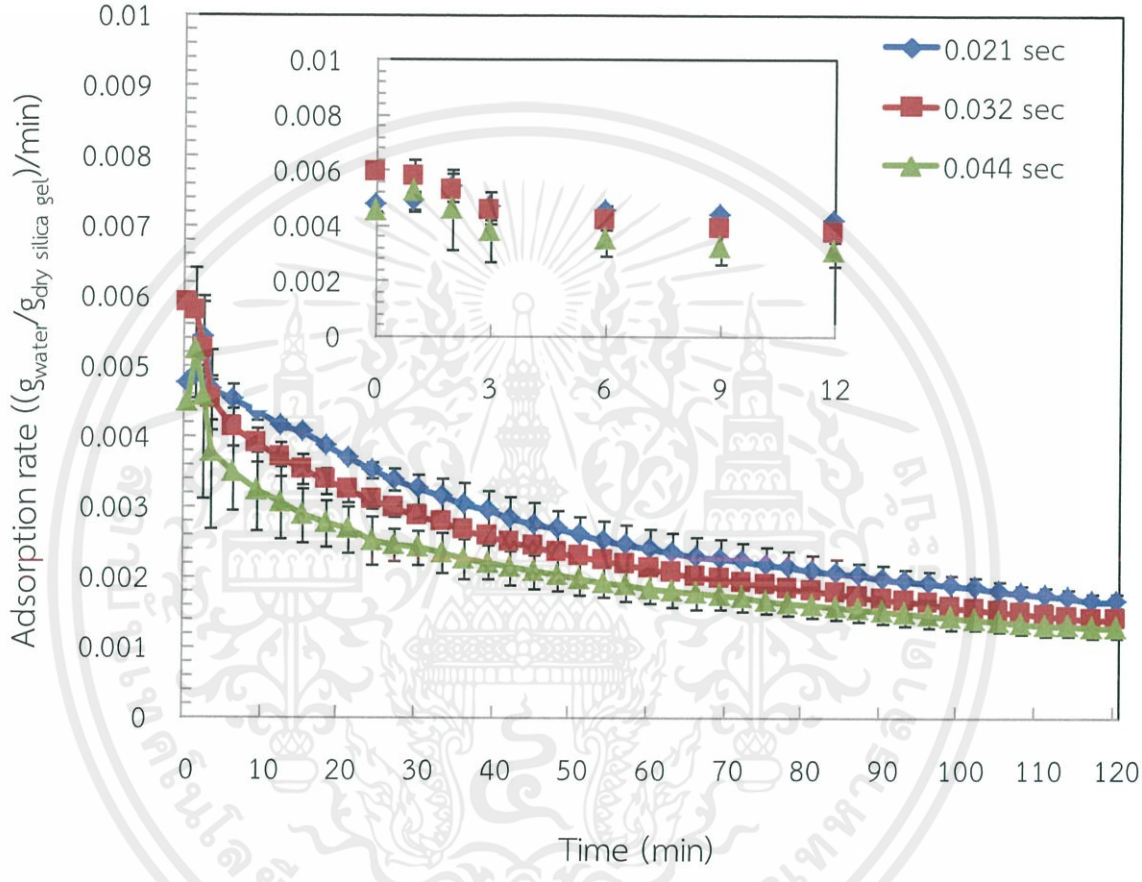
อัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ สำหรับการบรรจุแบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้น ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามระดับ ผลการทดลองพบว่าที่ $t_R$ น้อยที่สุดเท่ากับ 0.021 วินาที มีอัตราการดูดความชื้นสูงที่สุดเมื่อพิจารณาโดยตลอดกระบวนการทั้งแบบบรรจุเต็มและแบบแบ่งชั้น และอัตราการดูดความชื้นจะลดลงเมื่อ $t_R$ เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.15** การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ สำหรับการบรรจุแบบบรรจุเต็ม (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



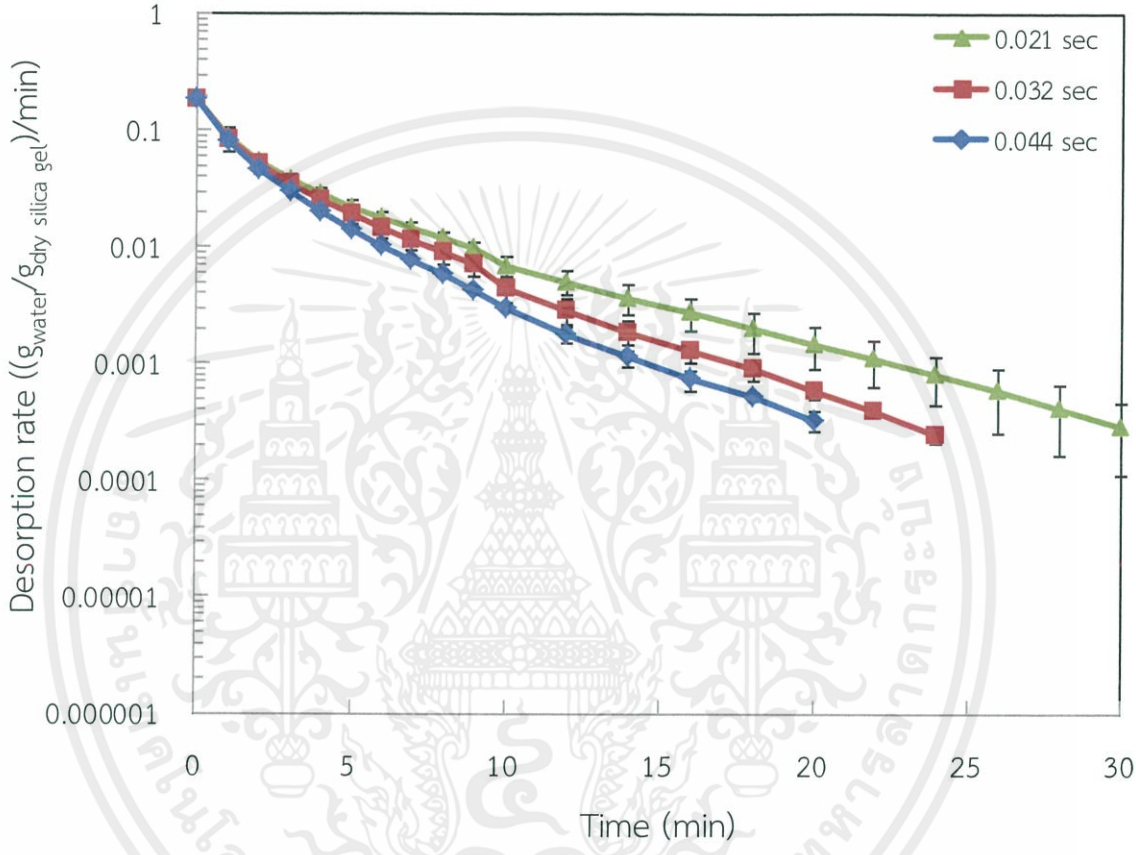

**รูปที่ 4.16** การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ สำหรับการบรรจุแบบแบ่งชั้น (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 การคายความชื้น

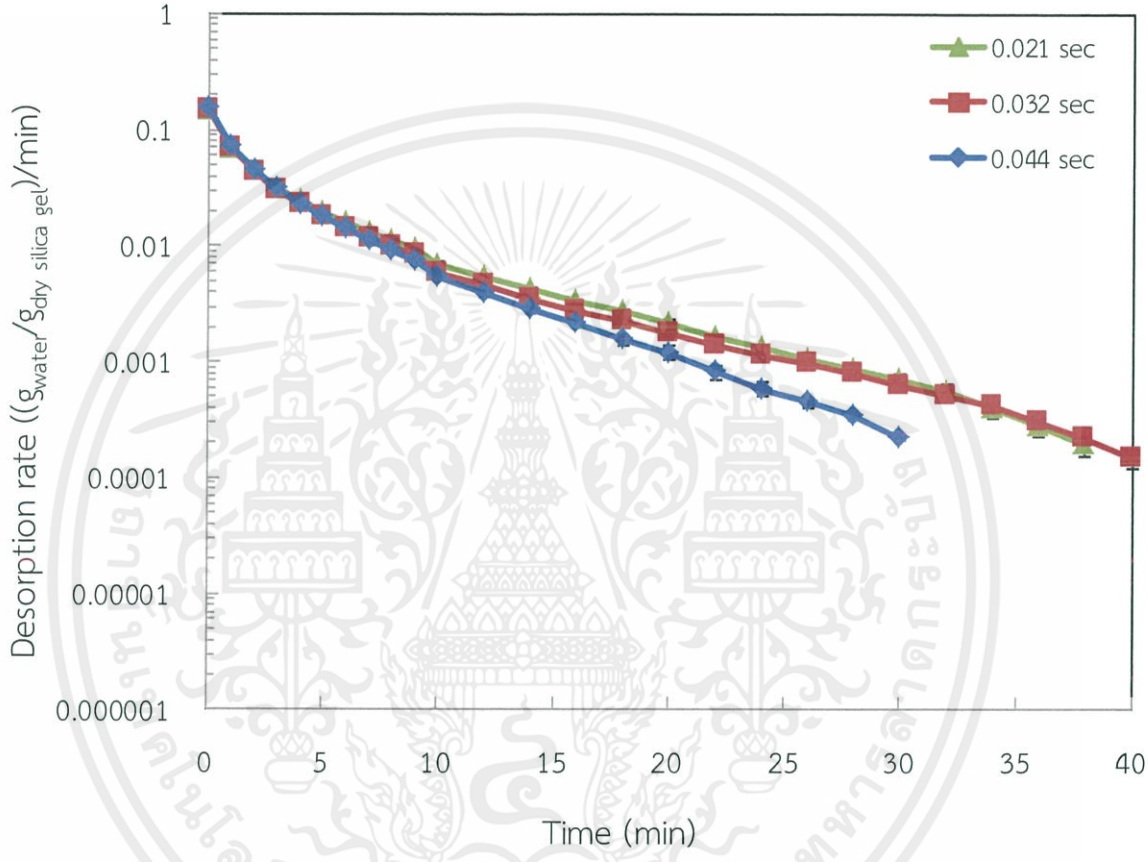
สำหรับผลของระยะเวลาที่อากาศสัมผัสสารดูดความชื้น, $t_R$ ต่ออัตราการคายความชื้นสำหรับการบรรจุแบบบรรจุเต็ม ดังรูปที่ 4.10 พบว่าช่วง5 นาทีแรกโดยประมาณ อัตราการคายความชื้นจะมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 $t_R$ หลังจากนั้นจึงเริ่มเห็นความแตกต่างชัดเจนขึ้น และสำหรับการบรรจุแบบแบ่งชั้น ดังรูปที่ 4.11 พบว่า อัตราการคายความชื้นใกล้เคียงกันในช่วง 10 นาทีแรก และแตกต่างกันหลัง 10 นาทีผ่านไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการบรรจุซิลิกามีผลการถ่ายเทความชื้นดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นและการบรรจุแบบแบ่งชั้นมีการถ่ายเทความชื้นได้ดีกว่าแบบบรรจุเต็มโดยอัตราการคายความชื้นสูงที่สุดที่ residence time เท่ากับ 0.021 วินาที และต่ำที่สุดที่ residence time เท่ากับ 0.044 วินาที ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับอัตราการดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.17** การเปลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ สำหรับการบรรจุแบบบรรจุเต็ม (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

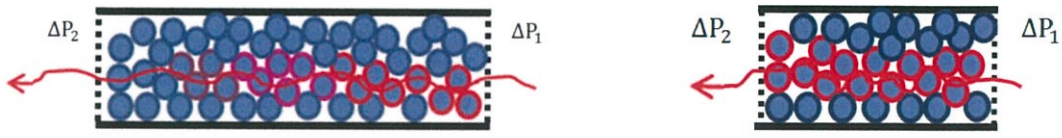
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.18** การเปลี่ยนแปลงอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ สำหรับการบรรจุแบบแบ่งชั้น (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 วิเคราะห์ผลของระยะเวลาที่อากาศสัมผัสสารดูดความชื้น




(A) (B)

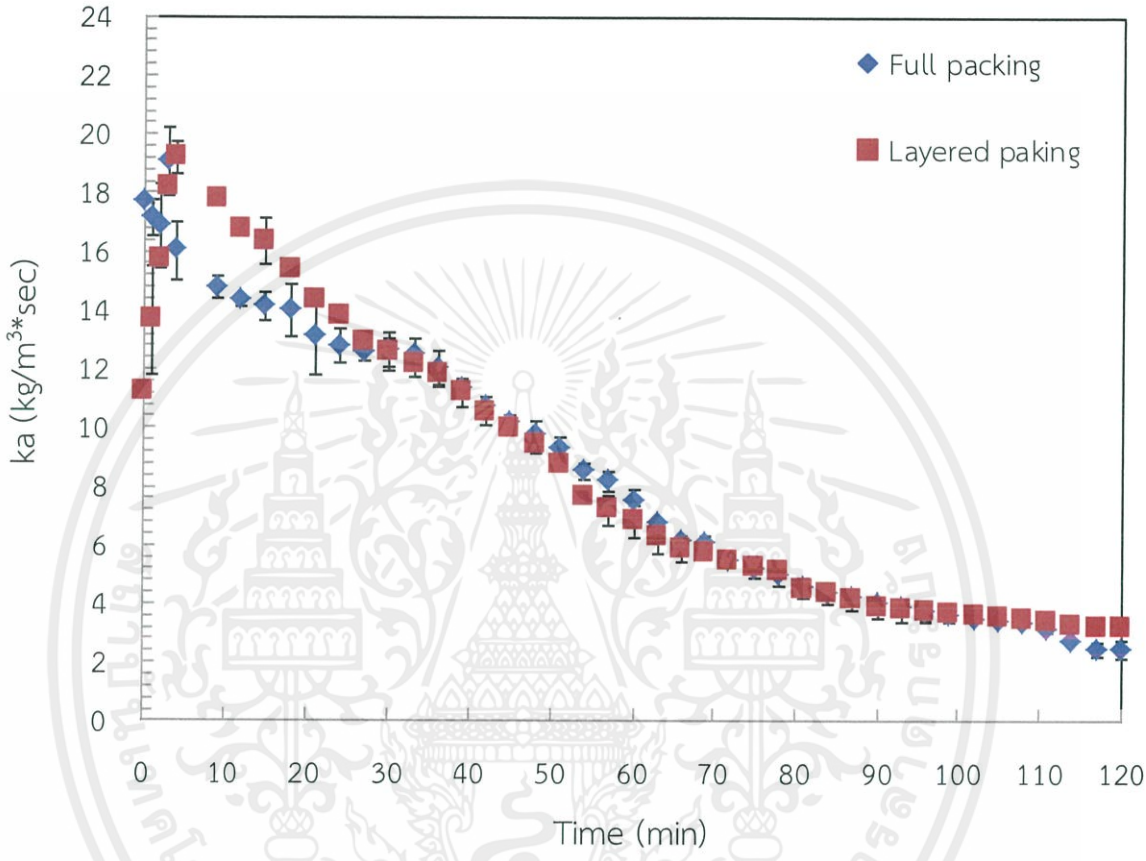
**รูปที่ 4.19** แบบจำลองการไหลของอากาศผ่านชั้นซิลิกาเจลที่ $t_R$ ต่างกัน (A) $t_R$ มาก (B) $t_R$ น้อย

ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาที่อากาศสัมผัสกับซิลิกาเจล, $t_R$ น้อย หอดูดซับจะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความชื้นดีกว่า $t_R$ มาก ทั้งกรณีการดูดความชื้นและคายความชื้น สามารถอธิบายได้จากรูป 4.13 (A) และ (B) ซึ่งแสดงแบบจำลองการไหลของอากาศผ่านชั้นซิลิกาเจล และความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างอากาศกับซิลิกาเจล ($\Delta P$) สำหรับ $t_R$ มาก และ$t_R$น้อย ตามลำดับ ช่วงทางเข้าที่อากาศสัมผัสกับซิลิกาเจล $\Delta P_1$ จะมีค่าสูงและลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากอากาศกับซิลิกาเจลเกิดถ่ายเทความชื้นตลอดเวลาที่อากาศไหลผ่าน ที่หน้าตัดการไหลบริเวณทางออก $\Delta P_2$ จะมีค่าน้อย ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีที่ $t_R$ มาก อากาศจะถ่ายเทความชื้นกับซิลิกาเจลไปตลอดระยะทาง ทำให้ที่ทางออก $\Delta P_2$ น้อยมาก นั่นก็คือที่ทางออกไม่เกิดการถ่ายเทความชื้นหรือถ่ายเทความชื้นน้อยมาก ซึ่งต่างกับ $t_R$ น้อย $\Delta P_2$ ยังมีค่าสูง อากาศจะถ่ายเทความชื้นกับซิลิกาเจลได้ตลอดระยะทาง ทำให้ที่ $t_R$ น้อยเกิดการถ่ายเทความชื้นได้ดีกว่าที่ $t_R$ มาก

## 4.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (*ka*)

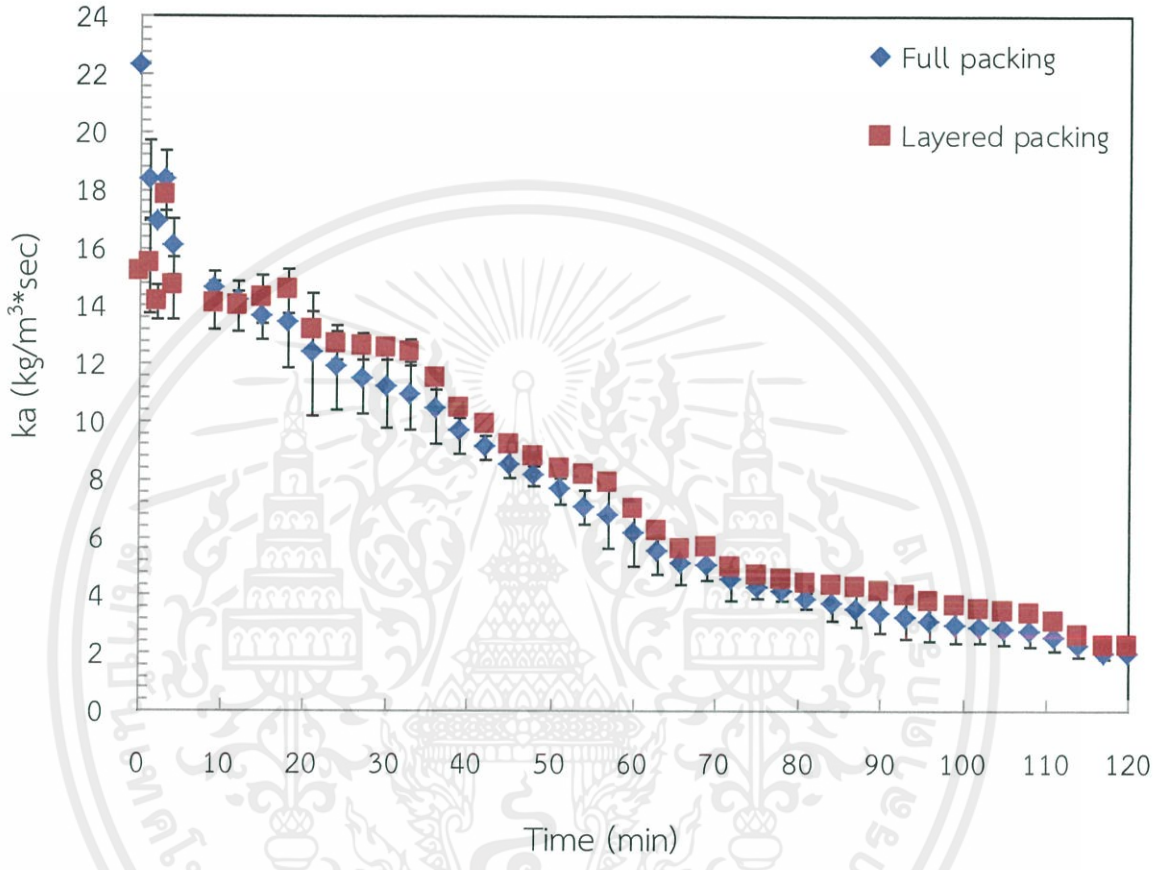
จากการทดลองดูดความชื้นและนำผลที่ได้มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (*ka*) เปรียบเทียบระหว่างการบรรจุแบบแบ่งชั้น และแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ แตกต่างกัน 3 ระดับ ดังรูปที่ 4.13 4.14 และ 4.15 พบว่าแบบแบ่งชั้นมีค่า *ka* สูงกว่าแบบบรรจุเต็มซึ่งสอดคล้องกับอัตราการดูดความชื้น และมีค่าสูงสุดในช่วงแรกและค่อยๆ ลดลงจนถึงค่าที่น้อยที่สุดเมื่อสิ้นสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



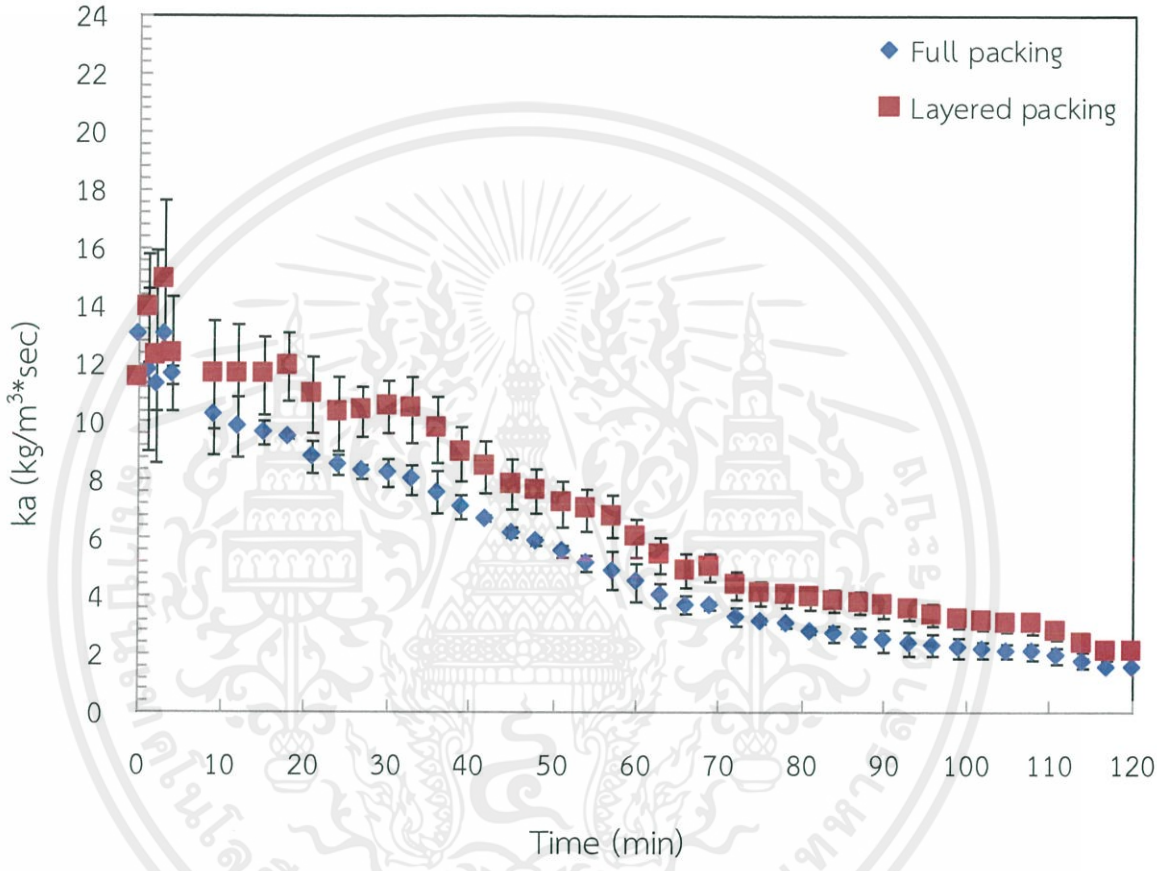

**รูปที่ 4.20** การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร ($ka$) ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.21** การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (ka) ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.22** การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (*ka*) ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายเทมวลสารในระบบของสารตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไป ตามกฎของฟิค (Fick's law) ดังสมการที่ 2.4 เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร นั่นคือ ความเข้มข้นจะเป็นแรงขับ (Driving force) ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลและจะเกิดมากน้อยเท่าไหร่ขึ้นกับความแตกต่างของความเข้มข้น และสำหรับกระบวนการถ่ายเทความชื้น จากสมการที่ 2.11 (Awad et al., 2006) ความแตกต่างของความดันไอน้ำจะเป็นแรงขับทำให้เกิดการถ่ายเทความชื้นระหว่างอากาศกับซิลิกาเจล โดยน้ำจะถ่ายโอนจากที่ความดันไอน้ำสูงไปต่ำและหยุดการถ่ายเทเมื่อความดันไอน้ำระหว่างอากาศกับซิลิกาเจลสมดุลกัน ซึ่งสามารถอธิบายการลดลงของค่า *ka* จากกระบวนการดูดความชื้นได้ คือ ในช่วงเริ่มต้นกระบวนของการดูดความชื้น ความดันไอน้ำของซิลิกาเจลน้อยมากเมื่อเทียบกับอากาศ เนื่องจากซิลิกาเจลแห้งมากจึงมีปริมาณน้ำในซิลิกาเจลน้อยมาก ทำให้ความแตกต่างของความดันไอน้ำมากส่งผลให้ *ka* มีค่าสูง หลังจากนั้นเมื่อซิลิกาเจลมีการดูดความชื้นความดันไอน้ำของซิลิกาเจลจะเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งซิลิกาเจลดูดความชื้นจนอิ่มตัวทำให้ความดันไอน้ำสูงที่สุดซึ่งมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับความดันไอน้ำของอากาศ ทำให้ความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างอากาศกับซิลิกาเจลน้อยที่สุด ส่งผลให้ *ka* มีค่าน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการทดลอง

1) อัตราการดูดความชื้นและคายความชื้นของซิลิกาเจลจะสูงสุดในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการและจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเทียบกับเวลา

2) การบรรจุซิลิกาเจลแบบแบ่งชั้น (Layered packing) จะเกิดความดันตกคร่อมน้อยกว่าแบบบรรจุเต็ม (Full packing) เท่ากับ 12.18%, 50.00% และ 19.26% ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021, 0.032 และ 0.044 วินาที ตามลำดับ และความดันตกคร่อมจะลดลง เมื่อ $t_R$ ลดลง

3) การบรรจุซิลิกาเจลแบบแบ่งชั้น (Layered packing) สามารถดูดซับความชื้นจากอากาศได้มากกว่า แบบบรรจุเต็ม (Full packing) เมื่อพิจารณาจนสิ้นสุดกระบวนการ ปริมาณน้ำที่ดูดได้สูงกว่าแบบบรรจุเต็ม เท่ากับ 12.18%, 16.75% และ 31.00% ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021, 0.032 และ 0.044 ตามลำดับ โดยที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที สามารถดูดความชื้นจากอากาศได้มากที่สุด โดยแบบบรรจุเต็มดูดซับน้ำได้เท่ากับ 0.17 $kg_{water}/kg_{dry\ silica\ gel}$ และแบบแบ่งชั้นดูดซับน้ำได้เท่ากับ 0.19 $kg_{water}/kg_{dry\ silica\ gel}$ และปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดซับได้จะลดลงเมื่อ $t_R$ เพิ่มขึ้น

4) การบรรจุซิลิกาเจลแบบแบ่งชั้น (Layered packing) จะมีอัตราการดูดความชื้นสูงกว่าแบบบรรจุเต็ม (Full packing) เมื่อพิจารณาตลอดทั้งกระบวนการ โดยจะมีอัตราการดูดความชื้นมากกว่าแบบบรรจุเต็มชัดเจนที่สุดเมื่อ Residence time มากที่สุด เท่ากับ 0.044 วินาที และอัตราการดูดความชื้นจะลดลงเมื่อ $t_R$ เพิ่มขึ้น

5) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร ($ka$) ของกระบวนการดูดความชื้น จะมีค่าสูงสุดในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการและค่อยๆลดลง มีแนวโน้มเป็นไปตามอัตราการดูดความชื้นซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างอากาศกับซิลิกาเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการทดลองควรมีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าหอดูดความชื้น เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

2) ในการชั่งน้ำหนักควรหลีกเลี่ยงการนำซิลิกาเจลออกมาจากหอดูดความชื้น หรือลดระยะเวลาในการเอาออกมาให้น้อยที่สุด เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง

3) ควรมีการศึกษา kinetics ของกระบวนการคายความชื้นเพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บรรณานุกรม


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

อติพงศ์นันทพันธุ์, ทนงเกียรติเกียรติศิริโรจน์และณัฐวุฒิดุษฎี. (2005). การทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย. *วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร*, 13, 25-36.

Ahmed, M.H.2000.Theoretical and experimental study on the transient adsorption characteristics of a vertical packed porous bed. *Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Engineering, Mansoura University,Renewable Energy*27: 525–541.

Ahmed, M.H., Kattab, N.M.,&Fouad, M. 2005.Evaluation and optimization of solar desiccant wheel performance. *Renewable Energy*30:305–25.

Alosaimy, A.S., &Hamed, A.M. 2011. Theoretical and experimental investigation on the application of solar water heater coupled with air humidifier for regeneration of liquid desiccant. *Energy* 36: 3992–4001.

Awad, M.M., Ramzy A., Hamed, A.M.,&Bekheit, M.M. 2006.Theoretical and experi mental investigation on the radial flow desiccant dehumidification bed.*Applied Thermal Engineering* 28: 75–85.

Gandhidasan, P. 2002. A simplified model for air dehumidification with liquid desiccant.*Solar Energy* 76: 409–416.

Grimm, N.R., &Rosaler, R.C. 1998. Desiccant dehumidification.HVAC system and component handbook (2nd edition). New York: McGraw-Hill.

Hamed, A.M. 2002.Theoretical and experimental study on the transient adsorption characteristics of a vertical packed porous bed.*Renewable Energy* 27: 525–541.

Jeong, J., Yamaguchi, S., Saito, K.,& Kawai, S. 2011. Performance analysis of desiccant dehumidification systems driven by low-grade heat source.*International Journal of Refrigeration*34:928–945.

Madhiyanon, T., Adirekrut, S., Sathiruangsak, P., &Soponron, S. 2007. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: drying performance and product quality studies. *Chemical Engineering and Processing*46:282–90.

Miller, W.M. 1983. Energy storage via desiccant for food agricultural applications.*Energy in Agriculture* 2:341–354.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nagaya, K., Li, Y., Jin, Z., Fukumuro, M., Ando, Y., &Akaishi, A. 2006.Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control.*Journal of Food Engineering* 75: 71–77.

Neti, S., & Wolfe, E.I. 1999. Measurements of effectiveness in a silica gel rotary exchanger. *Applied Thermal Engineering*20 : 309-322.

Punlek, C., Pairintra, R., Chindaraksa, S., &Maneewan, S. 2009. Simulation design and evaluation of hybrid PV/T assisted desiccant integrated HA-IR drying system (HPIRD). *Food and Bioproducts Processing* 87: 77–86.

Rane, M.V., Reddy, S., &Easow, R.R. 2005. Energy efficient liquid desiccant-based dryer. *Applied Thermal Engineering* 25: 769–781.

Sato,K.,Katahira, M.,&Toji, E. 1996.Drying charac- teristics of raw bulb and dehumidified air and moisture content distribution of different bulb parts.*Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery, Tohoku Branch* 44: 43–46.

Shanmugam,V.,&Natarajan E.2005.Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. *Renewable Energy* 31: 1239–1251.

Shanmugam, V., &Natarajan, E. 2007. Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Applied Thermal Engineering* 27: 1543–1551.

Thoruwa, F.N., Smith, J.E., Grant, A.D., &, C.M. 1996. Development in solar drying using forced ventilation and solar regenerated desiccant materials. *WREC*.

Wang, W.C., Calay, R.K., &Chen, Y.K. 2011.Experimental study of an energy efficient hybrid system for surface drying.*Applied Thermal Engineering* : 425–431.

Xiong, Z.Q., Dai, Y.J., &Wang, R.Z. 2009. Investigation on a two-stage solar liquid-desiccant (LiBr) dehumidification system assisted by CaCl2 solution. *Applied Thermal Engineering* 29: 1209–1215.

Zaltash, A., Petrov, A.Y., Rizy, D.T., Labinov, S.D., Vineyard, E.A., &Linkous, R.L. 2006.Laboratory R&D on integrated energy systems (IES). *Applied Thermal Engineering* 26: 28–35.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

# ข้อมูลจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.1** ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | %RH ออก | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | %RH ออก | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 64.7 | 64.7 | 32.4 | 32.4 | 0 | | 58.9 | 58.9 | 33.6 | 33.6 | 0 |
| 1 | | 64.5 | 33.6 | 32.3 | 41.4 | 15 | | 58.9 | 31.7 | 33.6 | 44.6 | 14 |
| 2 | | 62.0 | 32.3 | 31.6 | 40.6 | 28 | | 56.9 | 28.8 | 33.5 | 44.2 | 25 |
| 3 | | 61.0 | 34.0 | 31.7 | 41.2 | 40 | | 55.7 | 29.7 | 33.5 | 44.3 | 36 |
| 6 | | 60.0 | 38.1 | 31.8 | 39.0 | 61 | | 54.1 | 33.1 | 33.0 | 42.8 | 59 |
| 9 | | 57.3 | 40.3 | 31.9 | 37.4 | 81 | | 53.5 | 36.7 | 33.5 | 44.4 | 71 |
| 12 | | 56.4 | 41.5 | 32.0 | 37.4 | 100 | | 52.9 | 38.8 | 34.3 | 40.0 | 88 |
| 15 | | 55.1 | 42.9 | 32.2 | 36.8 | 117 | | 54.2 | 41.8 | 33.8 | 38.7 | 105 |
| 18 | | 54.8 | 44.1 | 32.2 | 36.4 | 133 | | 55.3 | 42.6 | 34.0 | 38.4 | 123 |
| 21 | | 56.7 | 45.4 | 32.7 | 36.5 | 147 | | 54.8 | 44.0 | 34.2 | 38.1 | 139 |
| 24 | | 57.0 | 46.5 | 32.3 | 36.5 | 161 | | 55.4 | 45.2 | 33.5 | 37.2 | 155 |
| 27 | | 58.1 | 48.5 | 33.0 | 36.0 | 174 | | 56.0 | 46.0 | 33.8 | 37.6 | 170 |
| 30 | | 58.3 | 48.8 | 33.6 | 36.1 | 187 | | 56.5 | 46.6 | 34.0 | 37.4 | 184 |
| 33 | | 58.9 | 50.1 | 33.1 | 35.8 | 199 | | 56.3 | 47.6 | 34.3 | 36.8 | 199 |
| 36 | | 59.2 | 50.2 | 32.8 | 35.8 | 211 | | 55.6 | 47.8 | 34.3 | 36.4 | 212 |
| 39 | | 58.5 | 50.8 | 33.2 | 35.4 | 222 | | 56.0 | 48.7 | 34.0 | 36.3 | 226 |
| 42 | | 59.2 | 51.1 | 32.9 | 35.6 | 233 | | 55.9 | 49.1 | 34.1 | 36.2 | 238 |
| 45 | | 58.3 | 52.4 | 33.4 | 35.0 | 243 | | 57.8 | 50.5 | 33.3 | 36.1 | 249 |
| 48 | | 58.8 | 52.2 | 32.8 | 35.1 | 251 | | 57.4 | 50.5 | 33.6 | 35.9 | 262 |
| 51 | | 59.1 | 53.9 | 33.1 | 34.8 | 261 | | 57.9 | 51.5 | 33.3 | 35.5 | 274 |
| 54 | | 58.4 | 53.3 | 32.7 | 34.8 | 271 | | 57.6 | 51.8 | 32.8 | 35.3 | 284 |
| 57 | | 59.7 | 53.4 | 32.8 | 34.9 | 278 | | 57.6 | 52.5 | 33.1 | 35.3 | 292 |
| 60 | | 58.8 | 54.4 | 33.5 | 34.8 | 286 | | 59.5 | 52.7 | 33.0 | 35.8 | 299 |
| 63 | | 59.2 | 55.5 | 33.7 | 34.8 | 291 | | 59.0 | 53.2 | 33.6 | 35.2 | 305 |
| 66 | | 58.6 | 54.9 | 33.7 | 34.9 | 296 | | 59.2 | 52.8 | 33.4 | 35.2 | 310 |
| 69 | | 59.2 | 55.2 | 33.6 | 34.6 | 301 | | 58.9 | 53.5 | 32.2 | 35.0 | 314 |
| 72 | | 59.0 | 56.1 | 33.5 | 34.2 | 306 | | 58.3 | 54.0 | 32.4 | 35.0 | 318 |
| 75 | | 60.1 | 55.8 | 32.8 | 34.0 | 310 | | 58.9 | 53.5 | 33.5 | 35.1 | 322 |
| 78 | | 59.6 | 55.9 | 32.8 | 34.2 | 313 | | 58.5 | 54.5 | 32.7 | 34.8 | 327 |
| 81 | | 60.7 | 56.2 | 33.3 | 34.0 | 315 | | 58.4 | 54.5 | 33.2 | 34.9 | 330 |
| 84 | | 59.1 | 56.1 | 33.4 | 34.0 | 316 | | 59.7 | 54.7 | 33.7 | 34.7 | 332 |
| 87 | | 59.3 | 56.1 | 33.5 | 34.1 | 318 | | 59.5 | 55.4 | 33.1 | 34.1 | 336 |
| 90 | | 58.4 | 56.3 | 33.6 | 34.1 | 320 | | 59.2 | 55.7 | 33.4 | 34.7 | 339 |
| 93 | | 58.5 | 56.6 | 33.0 | 33.8 | 323 | | 59.0 | 54.8 | 33.3 | 34.7 | 342 |
| 96 | | 58.1 | 56.4 | 33.3 | 33.9 | 327 | | 59.0 | 55.5 | 33.2 | 34.3 | 344 |
| 99 | | 58.2 | 56.8 | 33.5 | 32.7 | 328 | | 59.2 | 56.0 | 33.5 | 34.5 | 347 |
| 102 | | 58.5 | 57.1 | 33.4 | 34.0 | 331 | | 59.1 | 56.0 | 33.1 | 34.2 | 349 |
| 105 | | 59.0 | 57.1 | 33.1 | 34.1 | 333 | | 59.9 | 55.8 | 32.1 | 34.3 | 351 |
| 108 | | 59.0 | 57.3 | 33.3 | 33.0 | 334 | | 59.2 | 53.6 | 32.2 | 34.2 | 354 |
| 111 | | 59.6 | 57.0 | 33.6 | 34.1 | 336 | | 59.0 | 56.5 | 32.8 | 34.0 | 357 |
| 114 | | 59.1 | 57.1 | 33.4 | 34.0 | 337 | | 59.2 | 57.1 | 33.0 | 34.0 | 360 |
| 117 | | 59.0 | 57.2 | 34.1 | 34.0 | 338 | | 60.0 | 56.8 | 33.1 | 34.0 | 361 |
| 120 | | 58.5 | 57.4 | 33.3 | 33.8 | 338 | | 59.8 | 56.6 | 33.2 | 34.0 | 362 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.2** ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | %RH ออก | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | %RH ออก | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 66.9 | 66.9 | 31.3 | 31.3 | 0 | | 50.1 | 50.4 | 33.9 | 33.9 | 0 |
| 1 | | 64.5 | 38.9 | 31.4 | 41.2 | 19 | | 48.2 | 30.9 | 34.1 | 42.2 | 17 |
| 2 | | 62.4 | 33.7 | 31.5 | 42.7 | 28 | | 47.5 | 26.5 | 34.8 | 44.4 | 28 |
| 3 | | 60.5 | 33.5 | 31.9 | 42.4 | 36 | | 46.1 | 27.5 | 34.9 | 43.5 | 39 |
| 6 | | 58.0 | 37.3 | 32.6 | 40.6 | 58 | | 44.3 | 30.3 | 35.0 | 42.1 | 56 |
| 9 | | 59.2 | 39.8 | 32.8 | 39.7 | 79 | | 43.6 | 32.7 | 35.1 | 40.6 | 71 |
| 12 | | 58.6 | 40.9 | 33.0 | 37.4 | 98 | | 43.4 | 33.8 | 35.1 | 39.5 | 85 |
| 15 | | 57.5 | 43.7 | 33.4 | 36.4 | 116 | | 44.0 | 34.3 | 35.1 | 39.1 | 101 |
| 18 | | 57.8 | 45.0 | 33.3 | 37.9 | 131 | | 43.7 | 35.9 | 34.8 | 38.7 | 113 |
| 21 | | 58.1 | 45.6 | 33.3 | 37.5 | 145 | | 44.5 | 36.6 | 34.9 | 37.8 | 125 |
| 24 | | 58.1 | 48.0 | 33.6 | 36.7 | 157 | | 43.9 | 37.8 | 34.8 | 37.1 | 136 |
| 27 | | 59.0 | 49.8 | 32.7 | 36.1 | 168 | | 43.5 | 37.3 | 34.7 | 37.0 | 147 |
| 30 | | 58.7 | 49.8 | 32.8 | 35.6 | 176 | | 42.5 | 38.2 | 34.9 | 36.8 | 157 |
| 33 | | 59.7 | 50.3 | 33.0 | 36.0 | 182 | | 43.0 | 38.2 | 34.3 | 36.6 | 166 |
| 36 | | 60.2 | 51.8 | 33.4 | 35.4 | 189 | | 43.4 | 39.1 | 34.7 | 36.4 | 176 |
| 39 | | 60.4 | 52.0 | 33.4 | 35.2 | 198 | | 43.4 | 39.8 | 34.6 | 36.2 | 184 |
| 42 | | 58.4 | 51.8 | 33.5 | 35.2 | 206 | | 43.8 | 39.8 | 34.4 | 36.0 | 191 |
| 45 | | 59.0 | 52.7 | 33.4 | 35.0 | 214 | | 44.0 | 39.9 | 34.5 | 35.8 | 197 |
| 48 | | 59.7 | 53.0 | 33.2 | 35.2 | 221 | | 42.9 | 40.0 | 34.7 | 35.8 | 203 |
| 51 | | 59.5 | 52.4 | 33.3 | 35.3 | 229 | | 42.8 | 40.4 | 34.7 | 35.6 | 209 |
| 54 | | 59.0 | 52.7 | 33.0 | 35.1 | 237 | | 42.7 | 40.6 | 34.3 | 35.6 | 214 |
| 57 | | 59.5 | 53.9 | 33.2 | 34.6 | 244 | | 42.8 | 40.8 | 34.6 | 35.5 | 218 |
| 60 | | 59.4 | 53.9 | 33.3 | 34.6 | 250 | | 43.1 | 41.1 | 34.6 | 35.4 | 221 |
| 63 | | 59.2 | 54.5 | 32.5 | 34.6 | 257 | | 43.3 | 41.2 | 34.4 | 35.4 | 224 |
| 66 | | 58.8 | 54.5 | 33.4 | 34.6 | 263 | | 44.0 | 41.9 | 34.3 | 35.3 | 227 |
| 69 | | 58.1 | 54.3 | 33.5 | 34.5 | 268 | | 44.6 | 42.1 | 34.3 | 35.2 | 231 |
| 72 | | 57.7 | 54.0 | 33.8 | 34.5 | 272 | | 45.5 | 42.9 | 34.3 | 35.4 | 235 |
| 75 | | 58.3 | 54.2 | 33.5 | 34.4 | 276 | | 46.1 | 43.6 | 34.3 | 35.3 | 238 |
| 78 | | 57.3 | 54.4 | 33.6 | 34.3 | 279 | | 46.1 | 43.5 | 34.4 | 35.4 | 241 |
| 81 | | 56.2 | 54.1 | 33.0 | 34.1 | 282 | | 44.9 | 43.1 | 34.3 | 35.2 | 243 |
| 84 | | 56.8 | 54.6 | 33.5 | 34.0 | 285 | | 43.9 | 42.9 | 34.2 | 35.0 | 249 |
| 87 | | 55.8 | 54.4 | 33.9 | 34.0 | 287 | | 43.3 | 42.4 | 34.3 | 34.9 | 251 |
| 90 | | 54.6 | 53.4 | 33.6 | 33.8 | 287 | | 43.5 | 42.2 | 34.5 | 34.9 | 251 |
| 93 | | 55.1 | 53.5 | 33.4 | 33.9 | 288 | | 44.4 | 42.9 | 34.3 | 34.9 | 252 |
| 96 | | 54.8 | 53.6 | 33.5 | 33.7 | 290 | | 44.0 | 42.2 | 34.5 | 34.8 | 253 |
| 99 | | 54.5 | 53.6 | 33.1 | 33.6 | 292 | | 42.8 | 42.3 | 34.1 | 34.8 | 254 |
| 102 | | 54.0 | 53.5 | 33.0 | 33.5 | 293 | | 44.0 | 42.6 | 34.1 | 34.8 | 254 |
| 105 | | 54.3 | 53.5 | 33.4 | 33.5 | 293 | | 44.9 | 43.4 | 34.2 | 34.8 | 254 |
| 108 | | 53.6 | 53.5 | 33.8 | 33.5 | 295 | | 45.2 | 43.9 | 34.2 | 34.9 | 256 |
| 111 | | 52.9 | 53.2 | 33.6 | 33.6 | 296 | | 45.2 | 43.5 | 34.2 | 34.9 | 256 |
| 114 | | 53.2 | 53.2 | 33.7 | 33.6 | 296 | | 45.3 | 43.4 | 34.1 | 34.8 | 258 |
| 117 | | 52.6 | 53.2 | 33.7 | 33.5 | 296 | | 44.9 | 42.6 | 34.3 | 34.8 | 259 |
| 120 | | 52.2 | 52.8 | 33.7 | 33.5 | 297 | | 44.3 | 43.5 | 34.5 | 34.9 | 259 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.3** ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | %RH ออก | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | %RH ออก | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 54.6 | 54.6 | 31.3 | 31.3 | 0 | | 45.5 | 45.5 | 34.6 | 34.6 | 0 |
| 1 | | 54.0 | 41.3 | 31.4 | 41.2 | 7 | | 45.0 | 30.9 | 35.0 | 41.2 | 12 |
| 2 | | 53.2 | 38.1 | 31.7 | 42.7 | 9 | | 44.2 | 27.8 | 34.9 | 42.1 | 19 |
| 3 | | 52.9 | 35.5 | 31.7 | 42.4 | 14 | | 44.5 | 27.5 | 35.0 | 43.5 | 25 |
| 6 | | 52.7 | 30.3 | 31.6 | 40.6 | 17 | | 43.6 | 30.3 | 35.0 | 42.1 | 42 |
| 9 | | 52.7 | 32.7 | 31.9 | 39.7 | 22 | | 44.1 | 32.7 | 34.8 | 40.1 | 54 |
| 12 | | 52.1 | 33.4 | 31.9 | 37.4 | 25 | | 44.2 | 33.4 | 34.7 | 39.2 | 65 |
| 15 | | 52.3 | 34.3 | 31.8 | 36.4 | 39 | | 44.3 | 34.3 | 34.8 | 38.1 | 75 |
| 18 | | 52.8 | 35.9 | 31.6 | 37.9 | 54 | | 43.9 | 35.9 | 35.0 | 38.9 | 86 |
| 21 | | 52.0 | 36.2 | 31.8 | 37.5 | 63 | | 44.0 | 36.2 | 35.0 | 37.8 | 95 |
| 24 | | 51.1 | 37.8 | 31.8 | 36.7 | 75 | | 43.8 | 37.8 | 35.0 | 37.1 | 103 |
| 27 | | 51.1 | 37.3 | 31.9 | 36.1 | 86 | | 44.3 | 37.3 | 34.9 | 37.0 | 111 |
| 30 | | 50.5 | 38.2 | 31.9 | 35.6 | 96 | | 45.7 | 38.2 | 34.5 | 36.2 | 119 |
| 33 | | 50.6 | 38.2 | 32.0 | 36.0 | 106 | | 45.4 | 38.2 | 34.4 | 36.4 | 126 |
| 36 | | 49.8 | 39.1 | 32.0 | 35.4 | 114 | | 44.7 | 39.1 | 34.5 | 36.4 | 130 |
| 39 | | 49.7 | 39.2 | 32.2 | 35.2 | 122 | | 44.4 | 39.2 | 34.5 | 36.2 | 136 |
| 42 | | 49.3 | 39.8 | 32.6 | 35.2 | 130 | | 44.2 | 39.8 | 34.4 | 36.0 | 142 |
| 45 | | 49.9 | 39.9 | 32.1 | 35.0 | 137 | | 44.2 | 39.9 | 34.3 | 35.8 | 147 |
| 48 | | 50.5 | 44.0 | 32.1 | 35.2 | 142 | | 44.6 | 40.0 | 34.3 | 35.8 | 150 |
| 51 | | 50.2 | 40.4 | 32.2 | 35.3 | 148 | | 44.5 | 40.4 | 34.1 | 35.6 | 154 |
| 54 | | 49.3 | 45.6 | 32.8 | 35.1 | 154 | | 45.2 | 40.6 | 34.2 | 35.6 | 157 |
| 57 | | 50.0 | 45.8 | 32.4 | 34.6 | 159 | | 46.4 | 40.8 | 34.0 | 34.5 | 161 |
| 60 | | 50.2 | 46.1 | 32.6 | 34.6 | 164 | | 45.8 | 41.1 | 34.2 | 34.4 | 165 |
| 63 | | 50.2 | 46.2 | 32.5 | 34.6 | 169 | | 46.1 | 41.2 | 33.9 | 33.4 | 168 |
| 66 | | 50.2 | 46.1 | 32.5 | 34.6 | 175 | | 45.9 | 41.1 | 34.2 | 34.3 | 170 |
| 69 | | 50.1 | 46.1 | 32.7 | 34.5 | 178 | | 45.9 | 42.1 | 34.3 | 34.2 | 175 |
| 72 | | 49.8 | 46.4 | 33.0 | 34.5 | 183 | | 45.8 | 42.4 | 34.1 | 34.4 | 178 |
| 75 | | 49.4 | 46.6 | 32.8 | 34.4 | 185 | | 45.4 | 43.6 | 34.2 | 34.3 | 180 |
| 78 | | 49.6 | 46.5 | 32.7 | 34.3 | 189 | | 45.1 | 43.5 | 34.6 | 34.4 | 183 |
| 81 | | 49.0 | 46.1 | 32.7 | 34.1 | 193 | | 45.3 | 43.1 | 34.6 | 34.2 | 185 |
| 84 | | 48.5 | 46.2 | 33.0 | 34.0 | 196 | | 45.1 | 42.2 | 34.5 | 34.0 | 187 |
| 87 | | 49.1 | 47.4 | 33.2 | 34.0 | 200 | | 43.9 | 42.4 | 34.3 | 34.9 | 189 |
| 90 | | 48.8 | 46.2 | 33 | 33.8 | 202 | | 44.4 | 42.2 | 34.6 | 34.9 | 191 |
| 93 | | 48.8 | 46.9 | 33.1 | 33.9 | 204 | | 44.1 | 42.9 | 34.4 | 34.9 | 193 |
| 96 | | 48.3 | 46.2 | 33.5 | 33.7 | 206 | | 44.0 | 42.2 | 34.7 | 34.8 | 195 |
| 99 | | 48.2 | 47.3 | 33.1 | 33.6 | 208 | | 46.1 | 42.3 | 34.5 | 34.8 | 197 |
| 102 | | 47.7 | 46.6 | 33.1 | 33.5 | 211 | | 44.5 | 42.6 | 34.5 | 34.8 | 199 |
| 105 | | 47.5 | 46.4 | 33.2 | 33.5 | 212 | | 43.7 | 43.4 | 34.9 | 34.8 | 200 |
| 108 | | 47.8 | 47.2 | 33.4 | 33.5 | 214 | | 43.0 | 43.2 | 35.0 | 34.9 | 202 |
| 111 | | 47.8 | 47.5 | 33.3 | 33.6 | 216 | | 43.9 | 43.5 | 35.0 | 34.9 | 204 |
| 114 | | 47.4 | 47.1 | 33.8 | 33.6 | 218 | | 42.4 | 43.4 | 35.3 | 34.8 | 205 |
| 117 | | 46.8 | 46.1 | 33.5 | 33.5 | 219 | | 42.6 | 42.6 | 34.7 | 34.2 | 206 |
| 120 | | 46.3 | 46.1 | 33.4 | 33.5 | 222 | | 43.7 | 43.5 | 34.4 | 34.1 | 208 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.4** ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | %RH ออก | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | %RH ออก | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 69.6 | 69.6 | 31.9 | 31.9 | 0 | | 53.8 | 53.8 | 34.1 | 34.1 | 0 |
| 1 | | 69.6 | 47.6 | 31.9 | 37.8 | 10 | | 53.8 | 37.2 | 34.1 | 39.8 | 9 |
| 2 | | 65.9 | 43.4 | 32.0 | 38.9 | 18 | | 53.5 | 34.5 | 33.9 | 41.2 | 21 |
| 3 | | 64.2 | 43.8 | 32.3 | 39.0 | 26 | | 53.1 | 34.2 | 33.4 | 40.9 | 35 |
| 6 | | 64.0 | 46.4 | 32.4 | 37.8 | 54 | | 52.5 | 37.2 | 32.9 | 39.9 | 58 |
| 9 | | 63.6 | 48.7 | 32.4 | 37.3 | 80 | | 52.2 | 38.2 | 32.7 | 39.2 | 83 |
| 12 | | 62.7 | 50.2 | 32.8 | 36.7 | 103 | | 49.3 | 37.9 | 34.0 | 38.7 | 106 |
| 15 | | 62.6 | 50.1 | 32.9 | 36.6 | 125 | | 48.5 | 39.2 | 34.2 | 38.0 | 125 |
| 18 | | 62.4 | 50.0 | 32.5 | 36.6 | 145 | | 48.9 | 39.0 | 34.3 | 37.6 | 148 |
| 21 | | 62.3 | 51.4 | 32.6 | 36.2 | 164 | | 46.8 | 38.7 | 34.5 | 37.4 | 162 |
| 24 | | 61.9 | 52.9 | 32.8 | 36.1 | 181 | | 45.2 | 38.9 | 34.4 | 36.8 | 174 |
| 27 | | 63.0 | 53.7 | 32.4 | 35.4 | 196 | | 45.5 | 39.2 | 34.1 | 36.6 | 185 |
| 30 | | 62.6 | 53.8 | 32.9 | 35.3 | 212 | | 44.0 | 39.4 | 34.2 | 36.4 | 195 |
| 33 | | 62.1 | 55.2 | 32.8 | 35.4 | 227 | | 44.9 | 40.1 | 34.4 | 36.2 | 203 |
| 36 | | 64.7 | 56.1 | 32.3 | 35.3 | 241 | | 45.1 | 40.6 | 33.9 | 36.3 | 212 |
| 39 | | 65.2 | 56.1 | 32.6 | 35.2 | 253 | | 46.0 | 41.3 | 34.4 | 36.2 | 222 |
| 42 | | 63.8 | 56.4 | 32.8 | 35.0 | 264 | | 45.4 | 41.9 | 34.4 | 36.1 | 230 |
| 45 | | 62.4 | 55.8 | 32.9 | 35.0 | 274 | | 46.2 | 42.2 | 34.4 | 36.2 | 238 |
| 48 | | 62.8 | 56.5 | 32.9 | 35.1 | 283 | | 47.2 | 43.0 | 34.1 | 36.1 | 247 |
| 51 | | 63.2 | 56.7 | 33.1 | 34.8 | 293 | | 48.6 | 42.9 | 34.1 | 36.3 | 254 |
| 54 | | 62.0 | 56.4 | 33.0 | 34.8 | 301 | | 48.2 | 44.4 | 34.6 | 36.2 | 260 |
| 57 | | 61.9 | 56.1 | 32.8 | 34.8 | 310 | | 49.1 | 44.3 | 34.4 | 36.1 | 265 |
| 60 | | 61.7 | 57.0 | 33.1 | 34.6 | 319 | | 49.0 | 45.0 | 34.4 | 36.0 | 271 |
| 63 | | 62.4 | 57.1 | 32.8 | 34.6 | 328 | | 49.7 | 44.9 | 34.3 | 35.9 | 276 |
| 66 | | 61.9 | 57.4 | 33.1 | 34.6 | 335 | | 48.4 | 46.0 | 34.3 | 35.8 | 283 |
| 69 | | 61.3 | 57.7 | 33.5 | 34.9 | 343 | | 49.6 | 46.1 | 34.0 | 35.8 | 289 |
| 72 | | 63.3 | 57.5 | 33.1 | 34.8 | 351 | | 50.2 | 46.9 | 34.0 | 35.8 | 298 |
| 75 | | 62.1 | 55.4 | 33.5 | 34.6 | 358 | | 51.1 | 47.1 | 34.4 | 35.9 | 307 |
| 78 | | 59.5 | 56.5 | 33.5 | 34.5 | 364 | | 52.2 | 48.1 | 34.1 | 35.8 | 315 |
| 81 | | 60.0 | 57.8 | 33.4 | 34.5 | 369 | | 52.8 | 48.7 | 33.8 | 35.8 | 322 |
| 84 | | 63.1 | 56.7 | 33.0 | 34.6 | 375 | | 53.4 | 49.5 | 34.2 | 35.6 | 328 |
| 87 | | 60.9 | 57.0 | 33.3 | 34.6 | 381 | | 53.9 | 49.9 | 33.9 | 35.7 | 335 |
| 90 | | 61.1 | 57.4 | 33.3 | 34.5 | 386 | | 53.9 | 50.4 | 34.1 | 35.7 | 341 |
| 93 | | 62.4 | 58.0 | 33.3 | 34.5 | 390 | | 55.9 | 52.0 | 33.6 | 35.4 | 346 |
| 96 | | 60.9 | 57.8 | 33.5 | 34.6 | 395 | | 57.0 | 52.5 | 33.4 | 35.4 | 352 |
| 99 | | 61.2 | 57.9 | 33.6 | 34.7 | 400 | | 57.6 | 52.9 | 33.6 | 35.4 | 357 |
| 102 | | 62.7 | 58.6 | 33.9 | 34.7 | 404 | | 59.0 | 53.3 | 33.3 | 35.3 | 362 |
| 105 | | 62.1 | 58.4 | 33.6 | 34.5 | 407 | | 59.1 | 53.7 | 33.2 | 35.1 | 368 |
| 108 | | 61.8 | 58.2 | 33.2 | 34.4 | 409 | | 59.2 | 53.9 | 32.7 | 35.1 | 372 |
| 111 | | 62.0 | 58.0 | 33.5 | 34.5 | 412 | | 59.6 | 54.1 | 33.0 | 35.1 | 375 |
| 114 | | 61.9 | 57.5 | 33.3 | 34.2 | 415 | | 60.2 | 55.2 | 33.2 | 35.1 | 377 |
| 117 | | 62.3 | 57.4 | 33.6 | 34.6 | 417 | | 60.5 | 54.7 | 33.1 | 35.0 | 380 |
| 120 | | 62.1 | 58.2 | 33.7 | 34.7 | 417 | | 59.4 | 55.4 | 33.4 | 34.8 | 382 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.5** ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | %RH ออก | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | %RH ออก | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 62.8 | 62.8 | 31.6 | 31.6 | 0 | | 53.9 | 53.9 | 33.4 | 33.4 | 0 |
| 1 | | 61.2 | 46.6 | 31.7 | 36.0 | 13 | | 52.8 | 41.0 | 33.9 | 37.3 | 11 |
| 2 | | 60.9 | 44.3 | 31.9 | 37.0 | 23 | | 52.2 | 39.2 | 34.0 | 38.3 | 24 |
| 3 | | 57.8 | 42.0 | 32.0 | 38.3 | 31 | | 51.8 | 38.8 | 34.1 | 38.8 | 33 |
| 6 | | 56.4 | 41.8 | 32.0 | 38.1 | 53 | | 51.2 | 40.7 | 34.2 | 38.4 | 57 |
| 9 | | 56.0 | 43.1 | 32.0 | 37.3 | 73 | | 51.5 | 41.6 | 34.1 | 38.1 | 78 |
| 12 | | 56.7 | 44.4 | 32.3 | 36.8 | 91 | | 50.7 | 42.0 | 33.9 | 37.8 | 98 |
| 15 | | 55.4 | 45.4 | 32.4 | 36.3 | 108 | | 52.5 | 43.0 | 33.5 | 37.6 | 116 |
| 18 | | 54.4 | 46.0 | 32.5 | 35.8 | 125 | | 51.8 | 43.9 | 34.2 | 37.1 | 133 |
| 21 | | 53.7 | 45.4 | 33.0 | 35.8 | 140 | | 52.8 | 44.5 | 33.6 | 36.9 | 147 |
| 24 | | 53.0 | 45.3 | 33.3 | 35.8 | 154 | | 51.2 | 43.1 | 34.3 | 37.5 | 160 |
| 27 | | 54.5 | 46.3 | 33.0 | 35.6 | 167 | | 51.4 | 44.7 | 33.7 | 36.8 | 173 |
| 30 | | 55.8 | 48.3 | 32.7 | 35.5 | 179 | | 51.3 | 44.5 | 33.1 | 36.7 | 184 |
| 33 | | 56.2 | 48.7 | 33.1 | 35.5 | 189 | | 51.5 | 44.7 | 33.6 | 36.3 | 196 |
| 36 | | 57.1 | 49.6 | 32.8 | 35.4 | 200 | | 50.5 | 44.9 | 33.8 | 36.0 | 206 |
| 39 | | 55.5 | 49.2 | 33.2 | 35.2 | 209 | | 51.2 | 45.3 | 33.7 | 36.0 | 214 |
| 42 | | 55.5 | 49.9 | 33.1 | 35.1 | 219 | | 50.4 | 45.5 | 33.7 | 36.0 | 221 |
| 45 | | 57.5 | 50.1 | 33.0 | 35.1 | 229 | | 51.2 | 46.5 | 33.6 | 35.8 | 227 |
| 48 | | 54.3 | 49.6 | 33.3 | 35.0 | 238 | | 51.6 | 47.0 | 33.5 | 35.6 | 234 |
| 51 | | 54.0 | 48.8 | 33.1 | 34.9 | 246 | | 51.5 | 46.4 | 33.7 | 35.7 | 240 |
| 54 | | 56.7 | 51.0 | 32.7 | 34.8 | 255 | | 51.7 | 47.3 | 33.0 | 35.3 | 247 |
| 57 | | 55.8 | 50.4 | 32.8 | 34.7 | 264 | | 51.1 | 47.5 | 33.8 | 35.3 | 253 |
| 60 | | 53.2 | 49.8 | 33.1 | 34.5 | 272 | | 51.2 | 47.3 | 33.7 | 35.3 | 259 |
| 63 | | 54.4 | 49.8 | 33.0 | 34.5 | 279 | | 50.8 | 47.5 | 34.0 | 35.3 | 264 |
| 66 | | 54.9 | 50.3 | 32.6 | 34.5 | 285 | | 51.6 | 47.9 | 33.7 | 35.4 | 268 |
| 69 | | 54.1 | 50.3 | 33.0 | 34.3 | 290 | | 51.8 | 48.1 | 33.3 | 35.3 | 273 |
| 72 | | 53.5 | 50.2 | 33.1 | 34.4 | 296 | | 51.7 | 48.7 | 33.8 | 35.1 | 278 |
| 75 | | 54.5 | 50.7 | 33.5 | 34.5 | 301 | | 51.4 | 48.2 | 33.9 | 35.2 | 284 |
| 78 | | 55.4 | 51.6 | 33.2 | 34.5 | 306 | | 51.4 | 48.1 | 33.7 | 35.0 | 288 |
| 81 | | 53.7 | 50.6 | 33.0 | 34.3 | 310 | | 51.3 | 47.6 | 33.7 | 35.0 | 293 |
| 84 | | 54.0 | 50.6 | 33.0 | 34.3 | 314 | | 51.0 | 48.1 | 33.7 | 34.8 | 298 |
| 87 | | 54.0 | 50.6 | 33.3 | 34.5 | 319 | | 51.5 | 48.9 | 33.7 | 34.7 | 302 |
| 90 | | 51.9 | 50.1 | 33.9 | 34.5 | 322 | | 51.4 | 48.0 | 33.8 | 34.9 | 305 |
| 93 | | 53.4 | 50.1 | 33.4 | 34.4 | 326 | | 51.1 | 48.5 | 33.6 | 34.7 | 309 |
| 96 | | 55.0 | 51.2 | 32.8 | 34.5 | 329 | | 51.7 | 48.7 | 33.6 | 34.8 | 312 |
| 99 | | 54.8 | 51.7 | 33.5 | 34.5 | 333 | | 50.7 | 48.2 | 33.3 | 34.7 | 316 |
| 102 | | 53.9 | 51.5 | 33.4 | 34.5 | 336 | | 52.3 | 49.2 | 33.1 | 34.7 | 319 |
| 105 | | 54.5 | 51.7 | 33.8 | 34.5 | 339 | | 51.6 | 49.2 | 33.5 | 34.6 | 322 |
| 108 | | 53.7 | 51.8 | 33.7 | 34.5 | 341 | | 50.3 | 48.2 | 33.7 | 34.6 | 324 |
| 111 | | 54.9 | 51.8 | 32.8 | 34.4 | 344 | | 50.5 | 47.8 | 33.6 | 34.6 | 326 |
| 114 | | 53.4 | 51.6 | 33.3 | 34.3 | 346 | | 50.9 | 48.1 | 33.9 | 34.6 | 327 |
| 117 | | 52.8 | 51.0 | 34.0 | 34.5 | 349 | | 49.4 | 48.5 | 33.6 | 34.6 | 328 |
| 120 | | 52.2 | 50.9 | 33.6 | 34.4 | 351 | | 50.6 | 48.4 | 33.6 | 34.5 | 329 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.6** ข้อมูลการทดลองดูดความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | %RH ออก | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | %RH ออก | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 54.6 | 54.6 | 31.3 | 31.3 | 0 | | 45.5 | 45.5 | 34.6 | 34.6 | 0 |
| 1 | | 54.0 | 41.3 | 31.4 | 41.2 | 7 | | 45.0 | 30.9 | 35.0 | 41.2 | 12 |
| 2 | | 53.2 | 38.1 | 31.7 | 42.7 | 9 | | 44.2 | 27.8 | 34.9 | 42.1 | 19 |
| 3 | | 52.9 | 35.5 | 31.7 | 42.4 | 14 | | 44.5 | 27.5 | 35.0 | 43.5 | 25 |
| 6 | | 52.7 | 30.3 | 31.6 | 40.6 | 17 | | 43.6 | 30.3 | 35.0 | 42.1 | 42 |
| 9 | | 52.7 | 32.7 | 31.9 | 39.7 | 22 | | 44.1 | 32.7 | 34.8 | 40.1 | 54 |
| 12 | | 52.1 | 33.4 | 31.9 | 37.4 | 25 | | 44.2 | 33.4 | 34.7 | 39.2 | 65 |
| 15 | | 52.3 | 34.3 | 31.8 | 36.4 | 39 | | 44.3 | 34.3 | 34.8 | 38.1 | 75 |
| 18 | | 52.8 | 35.9 | 31.6 | 37.9 | 54 | | 43.9 | 35.9 | 35.0 | 38.9 | 86 |
| 21 | | 52.0 | 36.2 | 31.8 | 37.5 | 63 | | 44.0 | 36.2 | 35.0 | 37.8 | 95 |
| 24 | | 51.1 | 37.8 | 31.8 | 36.7 | 75 | | 43.8 | 37.8 | 35.0 | 37.1 | 103 |
| 27 | | 51.1 | 37.3 | 31.9 | 36.1 | 86 | | 44.3 | 37.3 | 34.9 | 37.0 | 111 |
| 30 | | 50.5 | 38.2 | 31.9 | 35.6 | 96 | | 45.7 | 38.2 | 34.5 | 36.2 | 119 |
| 33 | | 50.6 | 38.2 | 32.0 | 36.0 | 106 | | 45.4 | 38.2 | 34.4 | 36.4 | 126 |
| 36 | | 49.8 | 39.1 | 32.0 | 35.4 | 114 | | 44.7 | 39.1 | 34.5 | 36.4 | 130 |
| 39 | | 49.7 | 39.2 | 32.2 | 35.2 | 122 | | 44.4 | 39.2 | 34.5 | 36.2 | 136 |
| 42 | | 49.3 | 39.8 | 32.6 | 35.2 | 130 | | 44.2 | 39.8 | 34.4 | 36.0 | 142 |
| 45 | | 49.9 | 39.9 | 32.1 | 35.0 | 137 | | 44.2 | 39.9 | 34.3 | 35.8 | 147 |
| 48 | | 50.5 | 44.0 | 32.1 | 35.2 | 142 | | 44.6 | 40.0 | 34.3 | 35.8 | 150 |
| 51 | | 50.2 | 40.4 | 32.2 | 35.3 | 148 | | 44.5 | 40.4 | 34.1 | 35.6 | 154 |
| 54 | | 49.3 | 45.6 | 32.8 | 35.1 | 154 | | 45.2 | 40.6 | 34.2 | 35.6 | 157 |
| 57 | | 50.0 | 45.8 | 32.4 | 34.6 | 159 | | 46.4 | 40.8 | 34.0 | 34.5 | 161 |
| 60 | | 50.2 | 46.1 | 32.6 | 34.6 | 164 | | 45.8 | 41.1 | 34.2 | 34.4 | 165 |
| 63 | | 50.2 | 46.2 | 32.5 | 34.6 | 169 | | 46.1 | 41.2 | 33.9 | 33.4 | 168 |
| 66 | | 50.2 | 46.1 | 32.5 | 34.6 | 175 | | 45.9 | 41.1 | 34.2 | 34.3 | 170 |
| 69 | | 50.1 | 46.1 | 32.7 | 34.5 | 178 | | 45.9 | 42.1 | 34.3 | 34.2 | 175 |
| 72 | | 49.8 | 46.4 | 33.0 | 34.5 | 183 | | 45.8 | 42.4 | 34.1 | 34.4 | 178 |
| 75 | | 49.4 | 46.6 | 32.8 | 34.4 | 185 | | 45.4 | 43.6 | 34.2 | 34.3 | 180 |
| 78 | | 49.6 | 46.5 | 32.7 | 34.3 | 189 | | 45.1 | 43.5 | 34.6 | 34.4 | 183 |
| 81 | | 49.0 | 46.1 | 32.7 | 34.1 | 193 | | 45.3 | 43.1 | 34.6 | 34.2 | 185 |
| 84 | | 48.5 | 46.2 | 33.0 | 34.0 | 196 | | 45.1 | 42.2 | 34.5 | 34.0 | 187 |
| 87 | | 49.1 | 47.4 | 33.2 | 34.0 | 200 | | 43.9 | 42.4 | 34.3 | 34.9 | 189 |
| 90 | | 48.8 | 46.2 | 33 | 33.8 | 202 | | 44.4 | 42.2 | 34.6 | 34.9 | 191 |
| 93 | | 48.8 | 46.9 | 33.1 | 33.9 | 204 | | 44.1 | 42.9 | 34.4 | 34.9 | 193 |
| 96 | | 48.3 | 46.2 | 33.5 | 33.7 | 206 | | 44.0 | 42.2 | 34.7 | 34.8 | 195 |
| 99 | | 48.2 | 47.3 | 33.1 | 33.6 | 208 | | 46.1 | 42.3 | 34.5 | 34.8 | 197 |
| 102 | | 47.7 | 46.6 | 33.1 | 33.5 | 211 | | 44.5 | 42.6 | 34.5 | 34.8 | 199 |
| 105 | | 47.5 | 46.4 | 33.2 | 33.5 | 212 | | 43.7 | 43.4 | 34.9 | 34.8 | 200 |
| 108 | | 47.8 | 47.2 | 33.4 | 33.5 | 214 | | 43.0 | 43.2 | 35.0 | 34.9 | 202 |
| 111 | | 47.8 | 47.5 | 33.3 | 33.6 | 216 | | 43.9 | 43.5 | 35.0 | 34.9 | 204 |
| 114 | | 47.4 | 47.1 | 33.8 | 33.6 | 218 | | 42.4 | 43.4 | 35.3 | 34.8 | 205 |
| 117 | | 46.8 | 46.1 | 33.5 | 33.5 | 219 | | 42.6 | 42.6 | 34.7 | 34.2 | 206 |
| 120 | | 46.3 | 46.1 | 33.4 | 33.5 | 222 | | 43.7 | 43.5 | 34.4 | 34.1 | 208 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.7** ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 40.1 | 34.0 | 78.6 | 353 | | 41.1 | 35.8 | 75.4 | 333 |
| 1 | | 40.0 | 34.1 | 52.1 | 317 | | 42.3 | 36.1 | 48.4 | 300 |
| 2 | | 39.9 | 34.2 | 51.3 | 274 | | 43.4 | 35.7 | 49.2 | 262 |
| 3 | | 39.1 | 34.1 | 50.0 | 234 | | 42.8 | 35.8 | 51.7 | 228 |
| 4 | | 39.0 | 34.3 | 51.8 | 196 | | 42.8 | 35.9 | 54.6 | 195 |
| 5 | | 39.3 | 34.5 | 54.1 | 163 | | 44.1 | 36.2 | 58.0 | 168 |
| 6 | | 38.5 | 34.1 | 57.3 | 139 | | 42.7 | 36.0 | 59.6 | 142 |
| 7 | | 39.6 | 34.2 | 58.2 | 118 | | 43.0 | 36.2 | 63.4 | 120 |
| 8 | | 40.4 | 34.0 | 60.6 | 101 | | 43.6 | 35.9 | 65.3 | 102 |
| 9 | | 41.8 | 33.9 | 62.9 | 85 | | 45.2 | 35.5 | 60.5 | 87 |
| 10 | | 40.7 | 34.0 | 64.7 | 71 | | 46.0 | 35.6 | 64.5 | 73 |
| 12 | | 40.9 | 34.1 | 67.9 | 63 | | 45.8 | 35.5 | 69.4 | 55 |
| 14 | | 42.7 | 34.2 | 68.8 | 45 | | 45.4 | 35.8 | 68.8 | 39 |
| 16 | | 41.7 | 34.2 | 68.5 | 33 | | 46.2 | 35.4 | 71.8 | 27 |
| 18 | | 40.6 | 34.5 | 70.1 | 23 | | 45.1 | 35.3 | 73.8 | 21 |
| 20 | | 42.6 | 34.7 | 70.9 | 19 | | 44.7 | 35.0 | 72.7 | 16 |
| 22 | | 41.5 | 34.2 | 70.9 | 13 | | 44.3 | 35.1 | 73.3 | 11 |
| 24 | | 40.5 | 34.6 | 74.9 | 9 | | 45.9 | 35.4 | 74.2 | 9 |
| 26 | | 42.9 | 34.5 | 74.5 | 6 | | 44.0 | 35.1 | 74.5 | 8 |
| 28 | | 41.8 | 34.1 | 75.0 | 4 | | 45.6 | 34.8 | 74.1 | 7 |
| 30 | | 41.6 | 34.6 | 74.7 | 2 | | 43.0 | 35.1 | 74.9 | 5 |
| 32 | | 41.7 | 34.7 | 75.3 | 1 | | 44.5 | 35.2 | 75.0 | 2 |
| 34 | | - | - | - | - | | 45.5 | 35.8 | 75.7 | 1 |
| 36 | | - | - | - | - | | 45.3 | 35.5 | 76.2 | 1 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.8** ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 39.4 | 35.7 | 78.7 | 339 | | 38.4 | 35.2 | 77.4 | 303 |
| 1 | | 38.7 | 35.9 | 56.1 | 322 | | 38.2 | 35.4 | 55.9 | 287 |
| 2 | | 38.0 | 35.8 | 54.3 | 300 | | 37.3 | 35.5 | 54.8 | 265 |
| 3 | | 36.6 | 35.7 | 56.8 | 278 | | 38.1 | 35.7 | 56.1 | 243 |
| 4 | | 34.6 | 36.3 | 58.0 | 255 | | 38.7 | 35.3 | 57.3 | 205 |
| 5 | | 36.8 | 36.0 | 54.1 | 232 | | 37.6 | 35.0 | 54.9 | 199 |
| 6 | | 38.3 | 35.6 | 56.8 | 211 | | 38.3 | 34.6 | 55.8 | 177 |
| 7 | | 39.5 | 35.8 | 55.2 | 190 | | 39.2 | 35.2 | 56.2 | 157 |
| 8 | | 38.6 | 35.3 | 57.2 | 171 | | 38.6 | 35.3 | 57.2 | 139 |
| 9 | | 40.8 | 35.6 | 56.7 | 150 | | 39.8 | 35.1 | 58.7 | 123 |
| 10 | | 39.2 | 35.8 | 59.1 | 130 | | 39.2 | 34.8 | 59.3 | 106 |
| 12 | | 39.2 | 35.5 | 60.6 | 100 | | 39.2 | 35.5 | 60.6 | 81 |
| 14 | | 38.3 | 35.9 | 63.2 | 74 | | 38.3 | 35.1 | 66.2 | 61 |
| 16 | | 39.1 | 35.5 | 65.5 | 55 | | 39.1 | 34.5 | 65.9 | 46 |
| 18 | | 40.0 | 35.2 | 64.1 | 42 | | 40.4 | 35.2 | 66.1 | 35 |
| 20 | | 40.7 | 35.6 | 67.8 | 32 | | 40.7 | 35.8 | 67.5 | 28 |
| 22 | | 38.4 | 35.2 | 68.0 | 23 | | 38.4 | 35.2 | 68.0 | 21 |
| 24 | | 40.3 | 35.0 | 68.5 | 15 | | 39.3 | 35.0 | 68.5 | 17 |
| 26 | | 40.8 | 35.6 | 73.1 | 11 | | 39.2 | 34.6 | 73.1 | 10 |
| 28 | | 40.1 | 35.3 | 73.6 | 7 | | 40.1 | 35.3 | 73.2 | 8 |
| 30 | | 39.9 | 35.5 | 73.1 | 4 | | 39.2 | 35.5 | 74.1 | 5 |
| 32 | | 39.9 | 35.5 | 74.1 | 2 | | 39.2 | 35.1 | 74.5 | 4 |
| 34 | | 38.2 | 35.1 | 74.2 | 1 | | 38.2 | 35.1 | 74.6 | 3 |
| 36 | | 37.2 | 35.8 | 73.5 | 1 | | 37.2 | 35.3 | 74.3 | 1 |
| 38 | | - | - | - | - | | 37.4 | 35.1 | 75.4 | 1 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.9** ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบบรรจุเต็ม ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 37.2 | 35.8 | 70.5 | 336 | | 40.2 | 34.8 | 70.5 | 295 |
| 1 | | 37.2 | 35.8 | 59.1 | 323 | | 40.8 | 35.3 | 59.1 | 287 |
| 2 | | 36.5 | 36.1 | 62.7 | 303 | | 38.5 | 35.1 | 62.7 | 271 |
| 3 | | 36.8 | 35.2 | 60.3 | 285 | | 38.8 | 35.8 | 60.3 | 252 |
| 4 | | 37.2 | 35.8 | 65.4 | 270 | | 37.2 | 35.2 | 61.4 | 236 |
| 5 | | 37.9 | 35.7 | 61.8 | 255 | | 37.2 | 35.5 | 61.8 | 222 |
| 6 | | 38.2 | 35.4 | 58.8 | 238 | | 37.8 | 36.4 | 60.8 | 205 |
| 7 | | 39.1 | 35.4 | 61.0 | 221 | | 39.1 | 35.2 | 61.0 | 192 |
| 8 | | 39.2 | 35.2 | 61.2 | 206 | | 39.9 | 35.2 | 61.2 | 178 |
| 9 | | 39.2 | 35.5 | 64.9 | 191 | | 39.2 | 35.5 | 63.2 | 164 |
| 10 | | 39.5 | 35.7 | 62.0 | 177 | | 39.6 | 35.2 | 62.0 | 146 |
| 12 | | 38.7 | 35.6 | 60.0 | 155 | | 38.7 | 35.4 | 60.0 | 125 |
| 14 | | 39.2 | 35.4 | 61.2 | 135 | | 39.1 | 35.8 | 61.5 | 103 |
| 16 | | 40.2 | 35.5 | 63.3 | 114 | | 40.5 | 35.5 | 63.3 | 84 |
| 18 | | 40.4 | 35.4 | 61.9 | 99 | | 40.8 | 35.4 | 63.9 | 68 |
| 20 | | 39.3 | 35.1 | 62.7 | 81 | | 40.6 | 35.3 | 62.7 | 55 |
| 22 | | 39.8 | 35.5 | 64.2 | 66 | | 40.2 | 35.5 | 64.2 | 43 |
| 24 | | 40.4 | 35.4 | 62.2 | 54 | | 40.4 | 35.9 | 62.2 | 35 |
| 26 | | 40.0 | 34.8 | 70.2 | 44 | | 41.3 | 34.8 | 70.7 | 25 |
| 28 | | 40.9 | 35.4 | 67.9 | 35 | | 41.9 | 35.2 | 67.3 | 19 |
| 30 | | 40.9 | 35.1 | 69.9 | 27 | | 41.9 | 35.1 | 69.8 | 15 |
| 32 | | 40.8 | 35.2 | 71.4 | 20 | | 40.8 | 35.2 | 71.4 | 11 |
| 34 | | 40.9 | 35.3 | 69.6 | 15 | | 40.9 | 35.9 | 69.6 | 9 |
| 36 | | 41.7 | 35.0 | 71.2 | 11 | | 41.7 | 35.5 | 70.6 | 6 |
| 38 | | 40.9 | 35.3 | 71.6 | 9 | | 40.9 | 35.3 | 72.6 | 4 |
| 40 | | 41.6 | 35.2 | 73.5 | 5 | | 41.6 | 35.2 | 74.5 | 3 |
| 42 | | 40.6 | 35.2 | 75.1 | 4 | | 41.3 | 35.2 | 75.8 | 1 |
| 44 | | 40.1 | 35.4 | 72.6 | 1 | | - | - | - | - |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.10** ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 42.4 | 34.6 | 73.5 | 274 | | 44.6 | 32.6 | 72.5 | 265 |
| 1 | | 42.5 | 34.5 | 58.8 | 261 | | 44.7 | 33.7 | 56.8 | 254 |
| 2 | | 42.5 | 34.6 | 59.0 | 241 | | 43.5 | 33.9 | 57.0 | 236 |
| 3 | | 41.8 | 34.5 | 58.9 | 225 | | 42.8 | 35.5 | 58.2 | 220 |
| 4 | | 42.4 | 34.6 | 59.8 | 207 | | 42.4 | 34.6 | 58.8 | 205 |
| 5 | | 42.6 | 34.4 | 67.6 | 188 | | 42.2 | 34.4 | 63.2 | 190 |
| 6 | | 42.8 | 34.3 | 64.9 | 175 | | 42.8 | 34.9 | 64.2 | 177 |
| 7 | | 42.6 | 34.2 | 62.1 | 160 | | 42.9 | 34.2 | 62.8 | 163 |
| 8 | | 42.2 | 34.1 | 66.5 | 145 | | 42.6 | 34.7 | 66.5 | 150 |
| 9 | | 42.3 | 34.7 | 63.8 | 131 | | 42.3 | 34.7 | 63.2 | 139 |
| 10 | | 42.3 | 34.7 | 68.0 | 121 | | 42.7 | 35.1 | 67.9 | 126 |
| 12 | | 42.0 | 34.8 | 69.2 | 103 | | 41.9 | 34.5 | 69.2 | 110 |
| 14 | | 41.7 | 34.7 | 69.9 | 86 | | 42.7 | 34.1 | 69.2 | 94 |
| 16 | | 41.6 | 35.4 | 71.5 | 73 | | 41.2 | 34.8 | 70.5 | 81 |
| 18 | | 41.2 | 34.6 | 72.0 | 61 | | 41.2 | 34.2 | 71.0 | 68 |
| 20 | | 42.3 | 34.2 | 72.2 | 48 | | 42.3 | 35.8 | 72.2 | 56 |
| 22 | | 41.7 | 34.5 | 72.0 | 41 | | 41.8 | 34.9 | 72.0 | 47 |
| 24 | | 42.0 | 34.6 | 72.1 | 30 | | 42.0 | 34.6 | 72.8 | 35 |
| 26 | | 41.2 | 34.7 | 73.5 | 24 | | 41.9 | 34.7 | 73.5 | 27 |
| 28 | | 42.1 | 34.5 | 74.0 | 20 | | 42.4 | 34.9 | 74.0 | 22 |
| 30 | | 42.5 | 34.5 | 73.8 | 17 | | 42.5 | 34.5 | 73.3 | 18 |
| 32 | | 42.8 | 34.6 | 73.2 | 10 | | 42.4 | 35.6 | 73.9 | 14 |
| 34 | | 42.3 | 34.4 | 74.5 | 8 | | 42.3 | 34.4 | 74.4 | 10 |
| 36 | | 41.4 | 34.6 | 74.7 | 3 | | 42.4 | 33.6 | 74.2 | 6 |
| 38 | | 42.1 | 34.3 | 75.3 | 3 | | 42.1 | 34.3 | 75.3 | 3 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.11** ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 52.7 | 34.2 | 76.5 | 265 | | 45.3 | 34.3 | 74.3 | 272 |
| 1 | | 53.0 | 34.5 | 61.3 | 252 | | 44.8 | 35.1 | 67.8 | 257 |
| 2 | | 51.2 | 34.7 | 64.6 | 237 | | 43.8 | 34.9 | 65.8 | 241 |
| 3 | | 51.5 | 34.7 | 65.0 | 223 | | 44.2 | 35.1 | 66.5 | 226 |
| 4 | | 52.1 | 34.6 | 64.7 | 212 | | 44.3 | 34.8 | 67.8 | 213 |
| 5 | | 51.4 | 34.9 | 67.6 | 196 | | 43.9 | 35.0 | 66.4 | 199 |
| 6 | | 51.5 | 33.9 | 67.0 | 184 | | 44.0 | 34.8 | 67.2 | 186 |
| 7 | | 52.0 | 34.4 | 68.8 | 174 | | 44.0 | 35.0 | 67.3 | 175 |
| 8 | | 52.2 | 34.7 | 69.4 | 163 | | 43.5 | 35.0 | 67.9 | 163 |
| 9 | | 50.0 | 35.1 | 70.0 | 151 | | 44.2 | 34.8 | 68.4 | 153 |
| 10 | | 48.5 | 35.0 | 70.2 | 143 | | 44.2 | 35.1 | 68.3 | 144 |
| 12 | | 47.5 | 35.5 | 70.2 | 125 | | 43.5 | 35.0 | 68.0 | 124 |
| 14 | | 48.5 | 35.5 | 70.6 | 113 | | 43.8 | 35.1 | 68.9 | 110 |
| 16 | | 49.0 | 34.6 | 71.4 | 100 | | 43.4 | 34.9 | 69.8 | 98 |
| 18 | | 50.3 | 34.7 | 71.4 | 88 | | 43.6 | 35.1 | 70.2 | 86 |
| 20 | | 48.4 | 35.4 | 72.4 | 81 | | 43.5 | 35.0 | 71.2 | 77 |
| 22 | | 47.9 | 34.5 | 73.0 | 70 | | 43.3 | 35.3 | 70.1 | 68 |
| 24 | | 47.2 | 35.1 | 72.7 | 59 | | 43.5 | 35.7 | 69.3 | 58 |
| 26 | | 47.3 | 35.0 | 72.8 | 53 | | 44.3 | 35.1 | 70.0 | 50 |
| 28 | | 46.0 | 35.2 | 72.9 | 48 | | 43.6 | 34.9 | 72.0 | 46 |
| 30 | | 45.8 | 35.5 | 72.9 | 42 | | 43.7 | 35.1 | 71.6 | 40 |
| 32 | | 45.1 | 35.4 | 73.9 | 36 | | 43.9 | 35.0 | 71.6 | 34 |
| 34 | | 44.6 | 36.0 | 73.7 | 31 | | 43.4 | 35.2 | 70.9 | 29 |
| 36 | | 45.1 | 36.0 | 73.7 | 29 | | 43.3 | 35.5 | 71.0 | 24 |
| 38 | | 43.8 | 35.8 | 74.2 | 22 | | 43.1 | 34.9 | 72.5 | 18 |
| 40 | | 43.1 | 36.0 | 74.6 | 17 | | 42.9 | 34.9 | 71.5 | 14 |
| 42 | | 43.8 | 35.9 | 74.3 | 12 | | 43.8 | 35.2 | 73.2 | 10 |
| 44 | | 43.0 | 36.3 | 73.6 | 6 | | 43.5 | 35.1 | 74.1 | 7 |
| 46 | | 44.4 | 35.4 | 74.5 | 3 | | 43.6 | 35.0 | 75.2 | 3 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.12** ข้อมูลการทดลองคายความชื้น การจัดเรียงแบบแบ่งชั้น ที่ $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที

| เวลา (นาที) | ครั้งที่ 1 | %RH เข้า | Tเข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) | ครั้งที่ 2 | %RH เข้า | T เข้า (°C) | Tออก (°C) | น้ำหนักที่ลดลง(กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 44.7 | 36.0 | 75.0 | 259 | | 46.2 | 34.6 | 74.2 | 266 |
| 1 | | 44.5 | 36.2 | 59.7 | 253 | | 45.2 | 35.2 | 57.3 | 258 |
| 2 | | 44.0 | 36.1 | 63.5 | 243 | | 44.9 | 35.1 | 62.5 | 246 |
| 3 | | 44.4 | 35.9 | 64.3 | 232 | | 44.8 | 35.2 | 65.2 | 235 |
| 4 | | 44.8 | 35.7 | 66.7 | 219 | | 43.8 | 35.4 | 66.7 | 224 |
| 5 | | 45.0 | 36.1 | 66.6 | 214 | | 45.0 | 35.8 | 66.2 | 215 |
| 6 | | 45.2 | 35.7 | 67.7 | 198 | | 45.2 | 35.2 | 66.7 | 204 |
| 7 | | 45.3 | 35.7 | 67.1 | 189 | | 45.6 | 35.4 | 67.5 | 195 |
| 8 | | 45.1 | 36.1 | 66.7 | 177 | | 45.7 | 36.1 | 66.2 | 185 |
| 9 | | 45.3 | 35.5 | 67.5 | 167 | | 45.9 | 35.1 | 66.3 | 176 |
| 10 | | 45.4 | 35.9 | 65.9 | 159 | | 45.5 | 36.0 | 65.2 | 167 |
| 12 | | 45.5 | 36.1 | 68.6 | 143 | | 45.5 | 36.1 | 68.6 | 150 |
| 14 | | 45.1 | 35.7 | 68.3 | 128 | | 45.8 | 36.2 | 69.3 | 134 |
| 16 | | 45.3 | 36.2 | 69.0 | 116 | | 45.3 | 36.2 | 69.0 | 120 |
| 18 | | 46.2 | 35.6 | 70.5 | 103 | | 46.8 | 35.6 | 70.5 | 108 |
| 20 | | 44.7 | 34.9 | 70.7 | 92 | | 44.2 | 35.9 | 71.7 | 97 |
| 22 | | 44.5 | 35.1 | 70.2 | 83 | | 45.5 | 35.1 | 70.5 | 87 |
| 24 | | 45.1 | 35.9 | 71.3 | 71 | | 45.1 | 35.3 | 71.9 | 67 |
| 26 | | 44.7 | 35.8 | 71.9 | 64 | | 44.7 | 35.9 | 71.2 | 58 |
| 28 | | 44.7 | 36.0 | 70.9 | 55 | | 44.3 | 36.0 | 70.9 | 50 |
| 30 | | 43.8 | 35.9 | 72.2 | 49 | | 43.9 | 35.4 | 72.2 | 42 |
| 32 | | 44.3 | 35.9 | 71.0 | 43 | | 44.7 | 35.9 | 71.0 | 35 |
| 34 | | 44.6 | 36.0 | 72.3 | 36 | | 44.9 | 36.5 | 71.3 | 30 |
| 36 | | 44.3 | 36.1 | 73.5 | 28 | | 44.8 | 36.1 | 73.5 | 23 |
| 38 | | 44.1 | 35.4 | 72.2 | 21 | | 45.1 | 35.4 | 72.5 | 17 |
| 40 | | 44.6 | 35.7 | 73.2 | 16 | | 44.5 | 35.4 | 73.7 | 12 |
| 42 | | 44.4 | 35.7 | 72.8 | 11 | | 45.4 | 35.7 | 74.2 | 6 |
| 44 | | 44.7 | 36.1 | 72.8 | 7 | | 44.2 | 35.1 | 74.8 | 4 |
| 46 | | 44.7 | 36.1 | 74.0 | 3 | | 44.3 | 35.8 | 75.2 | 2 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

# ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 Two-Way ANOVA

**Tests of Between-Subjects Effects**

Dependent Variable: weight

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|
| Corrected Model | .010[a] | 3 | .003 | 23.522 | .000 |
| Intercept | .293 | 1 | .293 | 2103.305 | .000 |
| packing | .003 | 1 | .003 | 24.225 | .001 |
| time | .006 | 2 | .003 | 23.171 | .000 |
| Error | .001 | 8 | .000 | | |
| Total | .304 | 12 | | | |
| Corrected Total | .011 | 11 | | | |

a. R Squared = .898 (Adjusted R Squared = .860)

ตาราง ข.2 LSD

**Multiple Comparisons**

Dependent Variable: weight

LSD

| (I) time | (J) time | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. | 95% Confidence Interval | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Lower Bound | Upper Bound |
| .021 | .032 | .033375* | .0083485 | .004 | .014123 | .052627 |
| | .044 | .056525* | .0083485 | .000 | .037273 | .075777 |
| .032 | .021 | -.033375* | .0083485 | .004 | -.052627 | -.014123 |
| | .044 | .023150* | .0083485 | .024 | .003898 | .042402 |
| .044 | .021 | -.056525* | .0083485 | .000 | -.075777 | -.037273 |
| | .032 | -.023150* | .0083485 | .024 | -.042402 | -.003898 |

Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = .000.

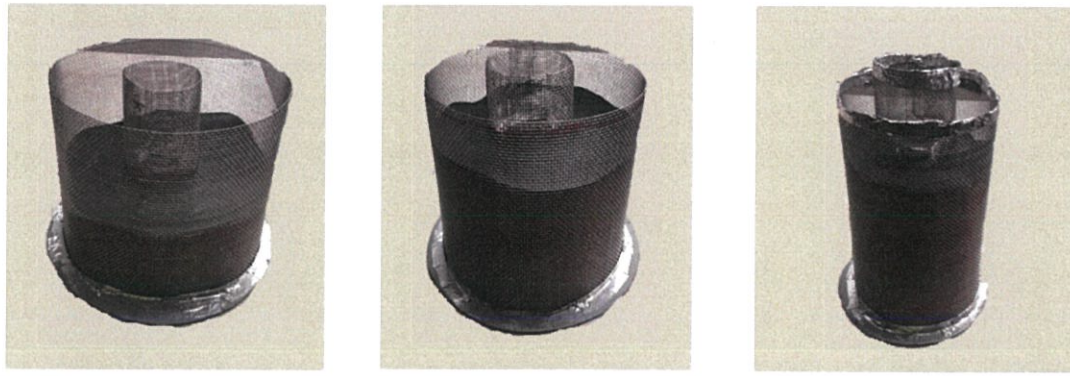
*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

# ภาพการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$t_R$=0.044 วินาที ($D_o/D_i$ =3) $t_R$=0.032 วินาที ($D_o/D_i$ =2.5) $t_R$=0.021 วินาที ($D_o/D_i$ =2)

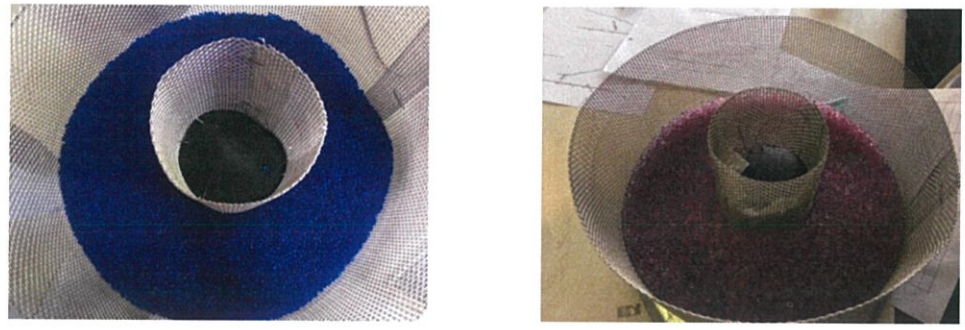
**รูปที่ ค.1** ชุดบรรจุซิลิกาเจลแบบบรรจุเต็ม



$t_R$=0.044 วินาที ($D_o/D_i$ =3) $t_R$=0.032 วินาที ($D_o/D_i$ =2.5) $t_R$=0.021 วินาที ($D_o/D_i$ =2)

**รูปที่ ค.2** ชุดบรรจุซิลิกาเจลแบบแบ่งชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก่อน หลัง

**รูปที่ ค.3** การทดลองดูดความชื้น แบบบรรจุเต็ม, $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที ($D_o/D_i$ =3)



ก่อน หลัง

**รูปที่ ค.4** การทดลองดูดความชื้น แบบบรรจุเต็ม, $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที ($D_o/D_i$ =2.5)

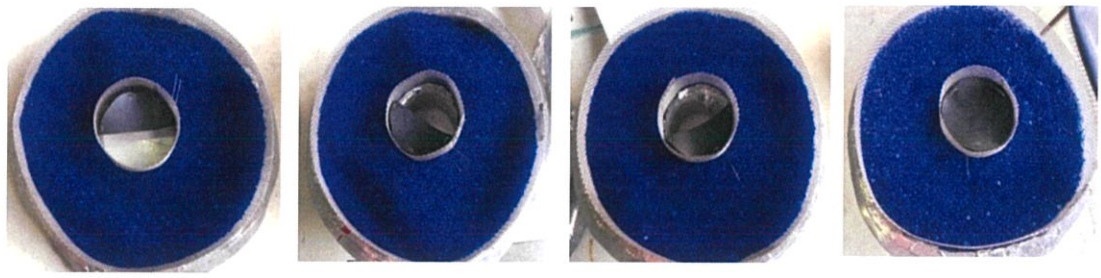


ก่อน หลัง

**รูปที่ ค.5** การทดลองดูดความชื้น แบบบรรจุเต็ม, $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที ($D_o/D_i$ =2)

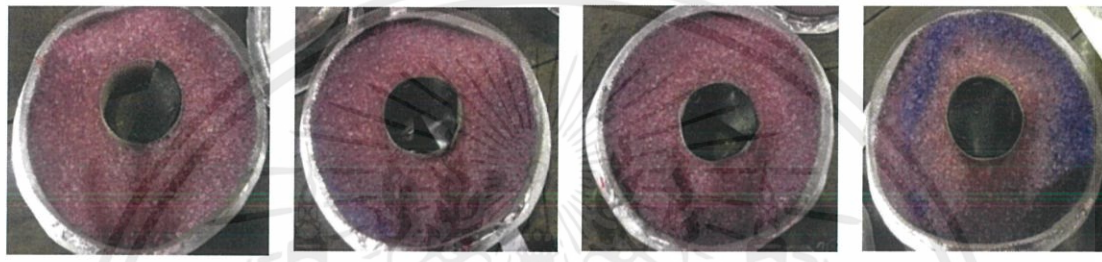
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อน



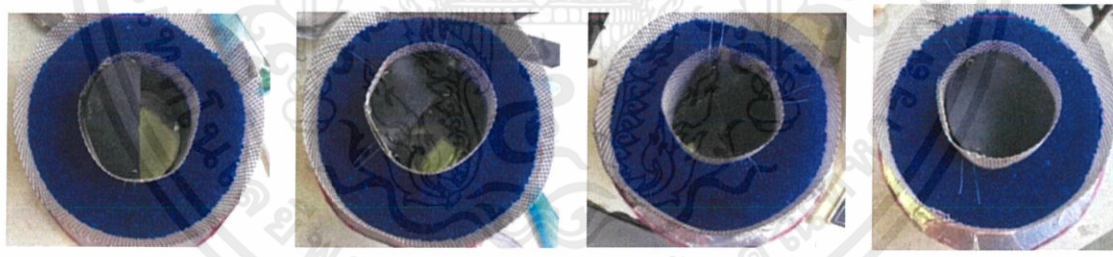
ชั้น 1 ชั้น 2 ชั้น 3 ชั้น 4

หลัง



ชั้น 1 ชั้น 2 ชั้น 3 ชั้น 4

**รูปที่ ค.6** การทดลองดูดความชื้น แบบแบ่งชั้น, $t_R$ เท่ากับ 0.044 วินาที ($D_o/D_i$ =3)



ชั้น 1 ชั้น 2 ชั้น 3 ชั้น 4

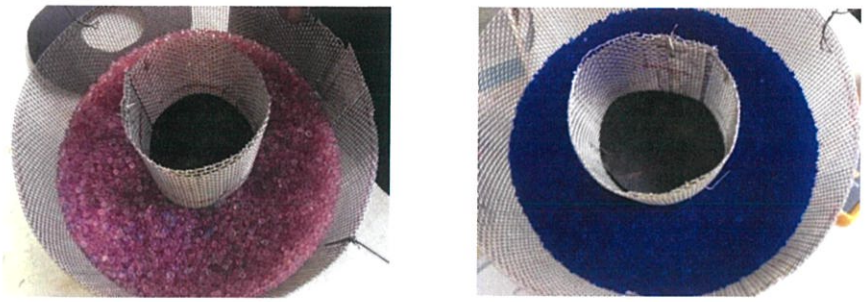
หลัง




ชั้น 1 ชั้น 2 ชั้น 3 ชั้น 4

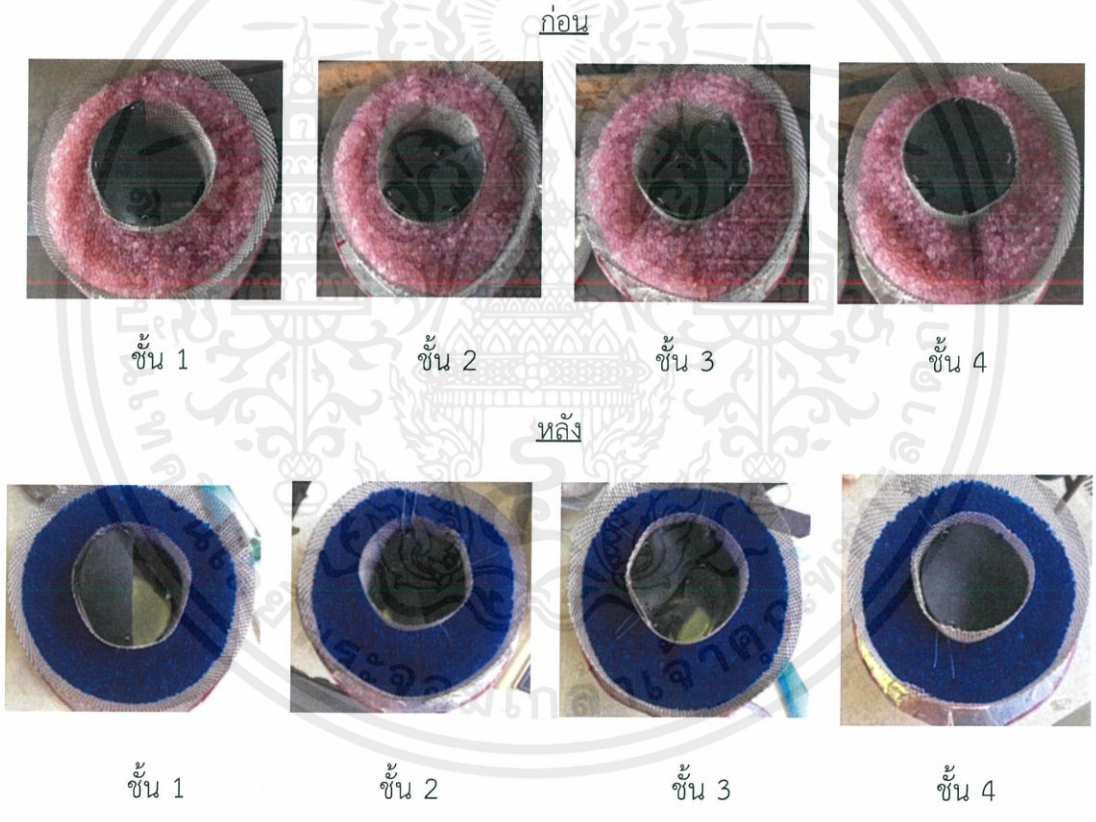
**รูปที่ ค.7** การทดลองดูดความชื้น แบบแบ่งชั้น, $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที ($D_o/D_i$ =2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก่อน หลัง

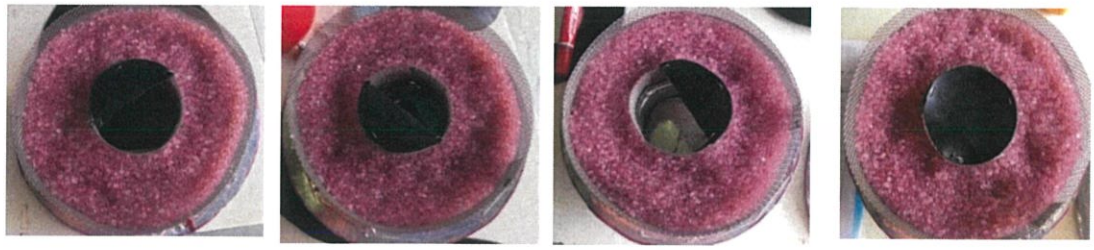
**รูปที่ ค.8** การทดลองดูดความชื้น แบบบรรจุเต็ม, $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที ($D_o/D_i$ =2.5)




**รูปที่ ค.9** การทดลองดูดความชื้น แบบแบ่งชั้น, $t_R$ เท่ากับ 0.032 วินาที ($D_o/D_i$ =2.5)

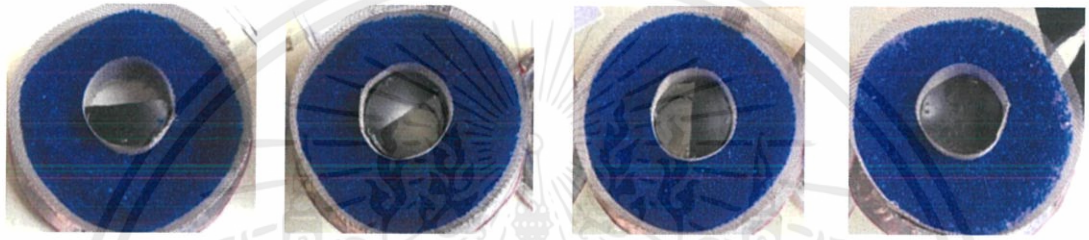
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อน



ชั้น 1 ชั้น 2 ชั้น 3 ชั้น 4

หลัง



ชั้น 1 ชั้น 2 ชั้น 3 ชั้น 4

**รูปที่ ค.10** การทดลองดูดความชื้น แบบแบ่งชั้น, $t_R$ เท่ากับ 0.021 วินาที ($D_o/D_i$ =2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้