

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุนสำหรับกระบวนการผลิต
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปพ.

จ 533 ก

พ.ศ. 2539

2539

เลขหมั.....

เลขทะเบียน..... 32027

วัน, เดือน, ปี..... 8 ก.พ. 2542

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Design a Rotary Dryer for the Production of
Carboxymethyl Cellulose**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
for the Degree of Bachelor of Science**

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุนสำหรับกระบวนการผลิต
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

นักศึกษา นางสาวจิราพร จขารวรรณ
นายไทรรงค์ ชันสาคร
นางสาวเสาวณีย์ คงมาก

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์¹
ดร.อัญชสิทธิ์ วาริตสวัสดิ์²
ผศ.ดร.ศักดา ไตรศักดิ์³
ดร.ตะวัน สุขน้อย⁴

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2539

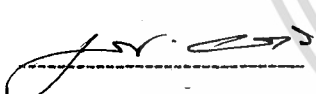
1, 3 และ 4

อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

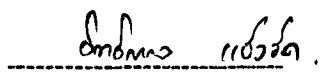

(ผศ.นงนุช เกตราณวัฒน์)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ

(ผศ.ดร.สุนิตย์ สุขสำราญ)

ประธานกรรมการ


(ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พรวิมล

กรรมการ

(ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์)

อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์

กรรมการ

(ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์)

Sitida Tinda.

กรรมการ

(ผศ.ดร.ศักดิ์ ไตรศักดิ์)

ตะวัน

กรรมการ

(ดร.ตะวัน สุขน้อย)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--------------------|--|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุนสำหรับกระบวนการผลิต คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส |
| นักศึกษา | นางสาวจิราพร จยาวรรณ นายไทรรงค์ ชันสาคร นางสาวเสาวณีย์ คงมาก |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์ ¹ ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ ² ผศ.ดร.ศักดิ์ ไตรศักดิ์ ³ ดร.ตะวัน สุขน้อย ⁴ |
| ภาควิชา | เคมี |
| ปีการศึกษา | 2539 |
| 1, 3 และ 4 | อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 2 | อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| | บทคัดย่อ |

โครงการนี้เป็นการใช้ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง เพื่อออกแบบเครื่องอบแห้งสำหรับ
อบแห้งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (ซีเอ็มซี) ซึ่งเตรียมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฟสทรานเฟอร์
การคำนวณออกแบบเครื่องอบแห้งนี้ใช้ฐานการคำนวณ โดยคิดจากอัตราการป้อนเข้าของซีเอ็มซี
12.5 กก./ชม. เนื่องจากปัจจัยด้านรูปทรงและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์
เนื่องจากความร้อน และอัตราการระเหยของของเหลวที่ต้องการกำจัดออกจากผลิตภัณฑ์ ดังนั้น
ในโครงการพิเศษนี้จึงเลือกเครื่องอบแห้งแบบหมุน

เมื่ออัตราส่วนความชื้นขาเข้าของซีเอ็มซี (w_1) มีค่า 0.70 กก.ไอโซโพรพานอล/
กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง และเมื่อกำหนดอัตราส่วนความชื้นขาออกของซีเอ็มซี (w_2) เท่ากับ 0.08
กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง จากการทดลองเบื้องต้นจะได้ค่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤติ
(w_c) และค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล (w_s) 0.22 และ 0 กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง
ตามลำดับ และจากการใช้ลมร้อนที่ 50, 60, 70, 80 และ 90 °ซ จะคำนวณปริมาตรของเครื่องอบ-
แห้งที่เหมาะสมได้ 0.6321, 0.6298, 0.5569, 0.5138 และ 0.5356 ลบ.ม. ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|-------------------------|--|-----------------------------|
| Special Project Title | Design a Rotary Dryer for the Production of Carboxymethyl Cellulose | |
| Name | Miss Chiraporn | Chayawan |
| | Mr. Trirong | Khunsakorn |
| | Miss Saowanee | Kongmak |
| Special Project Advisor | Asst.Prof.Dr. Theerawat | Mongkolausawat ¹ |
| | Dr. Anchaleeporn | Waritswat ² |
| | Asst.Prof.Dr. Sakda | Trisak ³ |
| | Dr. Tawan | Sooknoi ⁴ |
| Department | Chemistry | |
| Academic Year | 1996 | |
| 1,3 and 4 | Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang | |
| 2 | Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang | |

Abstract

The purpose of this project is to use the principles of drying to design a dryer for the production of carboxymethyl cellulose (CMC) which will be synthesized by phase transfer catalyst. Design calculations are based on using a CMC input of 12.5 kg/h. Due to several factors, e.g., product shape, product quality, thermal degradation of product and the evaporation rate of liquid phase from product, the rotary dryer was selected.

When the input moisture content of CMC (w_1) was 0.70 kg isopropanol (C_3H_8O)/kg dry product and the output moisture content of the product (w_2) was set at 0.08 kg C_3H_8O /kg dry product, the critical moisture content (w_c) and the equilibrium moisture content (w_e) were found to be 0.22 and 0 kg C_3H_8O /kg dry product, respectively.

In addition, by using hot air at temperatures of 50, 60, 70, 80 and 90 °C, the required volume of the rotary dryer was 0.6321, 0.6298, 0.5569, 0.5138 and 0.5356 m³, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ บริษัท ไทยเซลลูโลสโปรดักส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ เซลลูโลสชนิดผง ข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และนำชมโรงงาน ของขอบคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ให้ทดลองใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) ขอขอบพระคุณ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับข้อมูล การวิเคราะห์ผลเพื่อคำนวณออกแบบ เครื่องอบแห้ง ผศ.ดร. สุนิตย์ สุขสำราญ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ อ. อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล อาจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้คำปรึกษา เกี่ยวกับการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีทุกท่านที่ อำนวยความสะดวกในระหว่างการทำโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์ ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ ผศ.ดร. ศักดา ไตรศักดิ์ และ ดร. ตะวัน สุขน้อย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขโครงการ ทำให้โครงการพิเศษฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใดคณะผู้จัดทำขออภัยและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

นางสาวจิราพร จยารธรรม

นายไตรรงค์ ชันสาคร

นางสาวเสาวณีย์ คงมาก

12 มีนาคม 2540

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | ช |
| สัญลักษณ์ | ญ |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และกระบวนการผลิต | |
| 2.1 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 3 |
| 2.2 ประโยชน์และการใช้งานของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 4 |
| 2.3 กระบวนการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 4 |
| บทที่ 3 ทฤษฎีและการคำนวณเพื่อออกแบบเครื่องอบแห้ง | |
| 3.1 ประเภทเครื่องอบแห้ง | 8 |
| 3.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง | 32 |
| 3.3 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง | 34 |
| 3.4 ตัวแปรที่สำคัญต่อการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุน | 36 |
| บทที่ 4 การดำเนินการทดลอง | |
| 4.1 อุปกรณ์การทดลองและสารเคมี | 39 |
| 4.1.1 อุปกรณ์การทดลอง | 39 |
| 4.1.2 สารเคมี | 40 |
| 4.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 40 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|----|
| 4.3 การทำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ และการหาค่าองศาการแทนที่ | 41 |
| 4.3.1 การทำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ | 41 |
| 4.3.2 การหาค่าองศาการแทนที่ | 41 |
| 4.4 การเก็บข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบ | 42 |
| 4.4.1 การหาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง | 42 |
| 4.4.2 การหาอุณหภูมิกระเปาะเปียก | 42 |
| บทที่ 5 ผลการทดลอง | |
| 5.1 การหาค่าตัวแปรพื้นฐานที่ใช้ในการอบแห้ง | 43 |
| 5.1.1 ผลการทดลองหาเส้นลักษณะเฉพาะการอบแห้ง | 43 |
| 5.1.2 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียก ($t_w, ^\circ\text{C}$) กับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ($t_d, ^\circ\text{C}$) | 50 |
| 5.1.3 การคำนวณค่าตัวแปรที่จำเป็นในการหาปริมาตรเครื่องอบแห้ง | 51 |
| 5.2 การหาปริมาตรเครื่องอบแห้ง | 57 |
| 5.2.1 ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ | 57 |
| 5.2.2 ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ | 58 |
| 5.2.3 ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง | 58 |
| 5.3 การประเมินค่าใช้จ่ายโดยประมาณของการเดินเครื่องอบแห้ง | 62 |
| บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 66 |
| ภาคผนวก | |
| ภาคผนวก ก การเตรียมสารเคมี | 69 |
| ภาคผนวก ข การคำนวณหาค่าองศาการแทนที่ | 70 |
| ภาคผนวก ค การวิเคราะห์คุณสมบัติอากาศชื้นสำหรับไอโซโทรพานอล | 72 |
| ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดลอง | 78 |
| เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม | 88 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 3.1 การเลือกเครื่องอบแห้ง | 24 |
| ตารางที่ 3.2 การจำแนกประเภทของเครื่องอบแห้ง | 29 |
| ตารางที่ 5.1 แสดงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล (w_c) ค่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤติ (w_c) และค่าอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาเข้า (w_1) จากการทดลอง | 43 |
| ตารางที่ 5.2 แสดงค่าอนทัลปีของอากาศที่มีไอโซพรพานอล (i) ที่มีอุณหภูมิ ของลมร้อนขาเข้า (t_2) ต่าง ๆ | 55 |
| ตารางที่ 5.3 แสดงข้อมูลพื้นฐานการคำนวณหาปริมาตรของเครื่องอบแห้งแบบหมุน | 59 |
| ตารางที่ 5.4 แสดงปริมาณสารเคมีที่ใช้และการประเมินราคา | 63 |
| ตารางที่ 5.5 แสดงการประเมินค่าไฟฟ้าโดยประมาณของการเดินเครื่องอบแห้งแบบหมุน ต่อวัน | 65 |
| ตารางที่ ข.1 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ (จากการสังเคราะห์ซีเอ็มซีในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร) | 71 |
| ตารางที่ ง.1 แสดงการกระจายของขนาดของอนุภาคซีเอ็มซี | 78 |
| ตารางที่ ง.2 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของซีเอ็มซีที่เวลาในการอบแห้งต่าง ๆ (ผลการทดลอง ครั้งที่ 1) | 80 |
| ตารางที่ ง.3 แสดงค่าความเร็วในการอบแห้ง (R_d) ที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่าง ๆ (ผลการทดลอง ครั้งที่ 1) | 81 |
| ตารางที่ ง.4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของซีเอ็มซีที่เวลาในการอบแห้งต่าง ๆ (ผลการทดลอง ครั้งที่ 2) | 82 |
| ตารางที่ ง.5 แสดงค่าความเร็วในการอบแห้ง (R_d) ที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่าง ๆ (ผลการทดลอง ครั้งที่ 2) | 83 |
| ตารางที่ ง.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของซีเอ็มซีที่เวลาในการอบแห้งต่าง ๆ (ผลการทดลอง ครั้งที่ 3) | 84 |
| ตารางที่ ง.7 แสดงค่าความเร็วในการอบแห้ง (R_d) ที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่าง ๆ (ผลการทดลอง ครั้งที่ 3) | 85 |
| ตารางที่ ง.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_w) กับเวลา ที่อุณหภูมิลมร้อนต่าง ๆ | 86 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_w , °๑)

87

กับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (t_d , °๑)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 3 |
| รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตซีเอ็มซี | 7 |
| รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งแบบถาด | 9 |
| รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ | 10 |
| รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง | 11 |
| รูปที่ 3.4 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย | 12 |
| รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด | 13 |
| รูปที่ 3.6 เครื่องอบแห้งแบบสูญญากาศ | 14 |
| รูปที่ 3.7 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดป้อนวัสดุเข้าโดยตรง | 14 |
| รูปที่ 3.8 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดมีเครื่องกระจายวัสดุ | 15 |
| รูปที่ 3.9 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดมี Disintegrator | 15 |
| รูปที่ 3.10 เครื่องอบแห้งแบบหมุน | 18 |
| รูปที่ 3.11 แผ่นยกแบบต่าง ๆ | 20 |
| รูปที่ 3.12 วิธี Seal แบบต่าง ๆ | 21 |
| รูปที่ 3.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลา | 34 |
| รูปที่ 3.14 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง | 36 |
| รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง (ผลการทดลองครั้งที่ 1) | 44 |
| รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการอบแห้ง (R_p) กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (ผลการทดลองครั้งที่ 1) | 45 |
| รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง (ผลการทดลองครั้งที่ 2) | 46 |
| รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการอบแห้ง (R_p) กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (ผลการทดลองครั้งที่ 2) | 47 |
| รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลากับเวลาในการอบแห้ง (ผลการทดลองครั้งที่ 3) | 48 |
| รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการอบแห้ง (R_p) กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (ผลการทดลองครั้งที่ 3) | 49 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--|----|
| รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_w) กับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (t_d) | 50 |
| รูปที่ 5.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงสภาพของลมร้อนและวัสดุอบแห้งภายในเครื่องอบแห้งโดยให้ ลมร้อนไหลแบบสวนทางกับวัสดุ | 51 |
| รูปที่ ๖.1 แสดงการกระจายของขนาดของอนุภาคซีเอ็มซี | 79 |
| รูปที่ ๖.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียกกับเวลาที่อุณหภูมิลมร้อนต่าง ๆ | 87 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

- A : ค่าคงที่สำหรับไอโพรพานอล
- A_a : รัศมีสมมูลของรูปทรงที่ใช้ต่อน้ำหนักเป็นกรัมของสารตัวอย่าง
- A_r : พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน (ตร.ม.)
- B : ค่าคงที่สำหรับไอโซโพรพานอล
- B_v : ปริมาตรของสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ (มล.)
- C : ค่าคงที่สำหรับไอโซโพรพานอล
- C_c : ความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)
- C_H : ความร้อนจำเพาะขึ้น (กิโลแคลอรี/กก. °ซ)
- C_{H1} : ความร้อนจำเพาะขึ้นของลมร้อนขาออก (กิโลแคลอรี/กก. °ซ)
- C_{H2} : ความร้อนจำเพาะขึ้นของลมร้อนขาเข้า (กิโลแคลอรี/กก. °ซ)
- C_{HC} : $(C_{H1} + C_{H2})/2$
- C_i : ความร้อนจำเพาะของไอโซโพรพานอล (กิโลแคลอรี/กก. °ซ)
- C_{ia} : ความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลที่อากาศรอบนอก
- C_{iw} : ความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลที่ผิววัสดุขึ้น
- C_s : ความร้อนจำเพาะของวัสดุไร้ความชื้น (กิโลแคลอรี/กก. °ซ)
- D : ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มล.)
- D_T : เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวทรงกระบอก (เมตร)
- E : ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มอล)
- F : ความเร็วของการป้อนวัสดุ (ลบ.ม./ชม. ตร.ม.ของพื้นที่หน้าตัดของเครื่องอบแห้ง)
- F_a : น้ำหนักของซีเอ็มซีในรูปทรง (กรัม)
- F_r : อัตราส่วนความชื้นอิสระ
- F_C : อัตราส่วนความชื้นวิกฤติ
- G : ความเร็วเชิงมุม (กก.ก๊ว/ชม. ตร.ม.)
- G_o : อัตราการไหลของอากาศแห้ง (กก.อากาศแห้ง/ชม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- h : เอนทัลปีของอากาศชั้น (กิโลแคลอรี/กก.อากาศแห้ง)
- h_a : เอนทัลปีของอากาศแห้ง (กิโลแคลอรี/กก.อากาศแห้ง)
- h_i : เอนทัลปีของไอโซโพรพานอล (กิโลแคลอรี/กก.อากาศแห้ง)
- h_A : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงพื้นที่ (กิโลแคลอรี/ตร.ม. ชม.°ซ)
- h_V : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (กิโลแคลอรี/ตร.ม. ชม.°ซ)
- H : ความชื้นลมร้อน (กก.ไอน้ำ/กก.อากาศแห้ง)
- H_1 : ความชื้นลมร้อนขาออก (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.อากาศแห้ง)
- H_2 : ความชื้นลมร้อนขาเข้า (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.อากาศแห้ง)
- H_{vb} : เอนทัลปีของการระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิจุดเดือด (จูล/โมล)
- $\Delta H_V(T_1)$: เอนทัลปีของการระเหยกลายเป็นไอของไอโซโพรพานอล ณ อุณหภูมิจุดเดือด (กิโลแคลอรี/กก.)
- $\Delta H_V(T_2)$: เอนทัลปีของการระเหยกลายเป็นไอของไอโซโพรพานอล ณ อุณหภูมิกระเปาะเปียก (กิโลแคลอรี/กก.)
- i : เอนทัลปีของอากาศที่มีไอโซโพรพานอล (กิโลแคลอรี/กก.อากาศแห้ง)
- k_a : ความหนาแน่นของอากาศแห้ง (กก./ลบ.ม.)
- k_g : สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (กิโลจูล/ตร.ม. ชม.) \times (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.อากาศแห้ง)
- L : ความยาวของทรงกระบอก (เมตร)
- M : มวลของวัสดุแห้ง (กก.)
- M_a : น้ำหนักโมเลกุลของอากาศแห้ง
- M_i : น้ำหนักโมเลกุลของไอโซโพรพานอล
- n : จำนวนแผ่นยก
- N : จำนวนรอบของการหมุนของตัวทรงกระบอก (รอบ/นาที)
- N_a : จำนวนโมลของอากาศแห้ง
- N_i : จำนวนโมลของไอโซโพรพานอล
- P : กำลังสำหรับการหมุนขับเคลื่อนของเครื่องอบแห้ง (กำลังม้า)
- P_a : ความดันของอากาศแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- t_d : อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (°ซ)
 t_w : อุณหภูมิกระเปาะเปียก (°ซ)
 t_{do} : อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (°ซ)
 t_{m1} : อุณหภูมิวัสดุขาเข้า (°ซ)
 t_{m2} : อุณหภูมิวัสดุขาออก (°ซ)
 t_{mc} : อุณหภูมิกระเปาะเปียกของจุด (t_1', H_1) (°ซ)
 T : เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในเครื่องอบแห้ง (ชม.)
 T_1, T_b : อุณหภูมิจุดเดือดของไอโซโพรพานอล (เคลวิน)
 T_2 : อุณหภูมิกระเปาะเปียกของไอโซโพรพานอล (เคลวิน)
 u : ความเร็วของก๊าซ (เมตร/ชม.)
 v_H : ปริมาตรจำเพาะชื้น (ลบ.ม./กก.อากาศแห้ง)
 V : ปริมาตรของเครื่องอบแห้ง (ลบ.ม.)
 V_I : ปริมาตรของเครื่องอบแห้งในช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ (ลบ.ม.)
 V_{II} : ปริมาตรของเครื่องอบแห้งในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ (ลบ.ม.)
 V_{III} : ปริมาตรของเครื่องอบแห้งในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง (ลบ.ม.)
 V_S : ปริมาตรของเครื่องอบแห้งเมื่อกำเนินถึงแฟกเตอร์ความปลอดภัย (ลบ.ม.)
 V_T : $V_I + V_{II} + V_{III}$
 w : อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของวัสดุ (กก./กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง)
 w_1 : อัตราส่วนความชื้นวัสดุขาเข้า (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง)
 w_2 : อัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออก (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง)
 w_a : น้ำหนักของอากาศแห้ง (กก.)
 w_c : อัตราส่วนความชื้นวิกฤติ (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง)
 w_d : อัตราส่วนความชื้นของวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุแห้ง (กก./กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง)
 w_e : อัตราส่วนความชื้นสมดุล (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง)
 w_i : น้ำหนักของไอโซโพรพานอล (กก.)
 w_w : อัตราส่วนความชื้นของวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุเปียก (กก./กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- W_0 : อัตราการป้อนวัสดุไร้ความชื้น (กก./วัสดุไร้ความชื้น/ชม.)
- X : อัตราส่วนของวัสดุที่มีอยู่ในเครื่อง (%)
- Z : อัตราเร็วของการถ่ายโอนมวล (กก./ชม.)
- μ : ความหนืดของอากาศ (นิวตัน.วินาที/ตร.ม.)
- ρ_B : ความหนาแน่นของอากาศ (กก./ลบ.ม.)
- ρ_g : ความหนาแน่นปรากฏของวัสดุ (กก./ลบ.ม.)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ สามารถผลิตเป็นสารอนุพันธ์ได้หลายชนิด เช่น เซลลูโลสไนเตรต (Cellulose nitrate) เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC) เป็นต้น

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารพอลิเมอร์กึ่งสังเคราะห์ (Semi - synthetic polymer) ชนิดหนึ่ง ที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง เป็นต้น

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

จากประโยชน์ดังกล่าวข้างต้น นับได้ว่าซีเอ็มซีมีบทบาทสำคัญต่อวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก การผลิตในเชิงอุตสาหกรรมยังไม่เพียงพอต่อความต้องการภายในประเทศ ยังต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศจำนวนมาก การศึกษาถึงกระบวนการผลิตซีเอ็มซีจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ จากโครงการพิเศษของภาควิชาเคมีที่ผ่านมามีได้ศึกษากระบวนการผลิตซีเอ็มซี ดังนี้

ปี 2535 ทำการศึกษาจากผลงานศาสตร์ของปฏิบัติการการผลิตโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเฟสทรานเฟอร์

ปี 2536 ทำการออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีคั้นแบบขนาด 2 ลิตร และทำการศึกษามเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างใบพัดกวน 2 ชนิด คือ Anchor agitator และ Flat bladed turbine

ปี 2537 มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ ความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ คือ แรงบิด กำลังบิด กำลังต่อปริมาตร ตัวเลขเรย์โนลด์ และความเร็วรอบ

ปี 2538 ศึกษาผลของกำลังบิดต่อปริมาตรที่มีต่อการขยายขนาดของปฏิกรณ์เคมีในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

โครงการพิเศษนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการอบแห้งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยทำการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุนสำหรับกระบวนการผลิตซีเอ็มซี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1. ใช้ทฤษฎีของการอบแห้งในการคำนวณการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุนที่มีกำลังผลิต 50 กก./วัน และเป็นระบบปิดเพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลายออกสู่อากาศ
2. เปรียบเทียบขนาดของเครื่องอบแห้งแบบหมุน เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเปลี่ยนแปลง
3. คำนวณค่าใช้จ่ายโดยประมาณของการเดินเครื่องอบแห้งแบบหมุนที่ทราบขนาด

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

1. เตรียมคาร์บอქสึมเมทิลเซลลูโลส เพื่อเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยใช้สภาวะการเตรียมที่เหมือนกัน
2. ศึกษาลักษณะของเครื่องอบแห้งประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม
3. ทดลองเพื่อเก็บข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุนสำหรับกระบวนการผลิตคาร์บอქสึมเมทิลเซลลูโลส
4. คำนวณขนาดของเครื่องอบแห้งแบบหมุน
5. วิเคราะห์ขนาด และการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนในเชิงเศรษฐศาสตร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในความแตกต่างของเครื่องอบแห้งแต่ละประเภท
2. ใช้เป็นแนวทางในการเลือกชนิดเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตคาร์บอქสึมเมทิลเซลลูโลส
3. ใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง
4. สามารถคำนวณออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุน เพื่อการอบแห้งไอโซโพรพานอลจากคาร์บอქสึมเมทิลเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

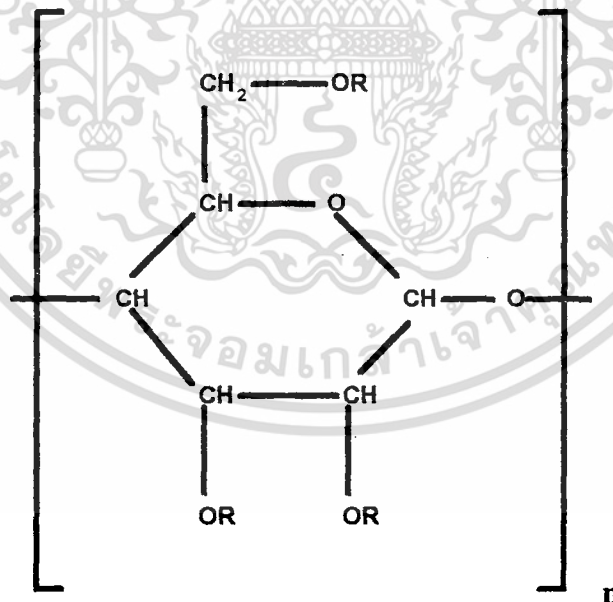
บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกระบวนการผลิต

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้จาก ฝ้าย พางข้าว ชังข้าวโพด และเยื่อกระดาษ เป็นต้น สามารถนำมาผลิตเป็นสารอนุพันธ์ได้หลายชนิด เช่นเซลลูโลสไนเตรต (Cellulose nitrate) ใช้ในอุตสาหกรรมวัตถุระเบิด สี เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) ใช้ในอุตสาหกรรมทำเส้นใยสังเคราะห์

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC) เป็นอนุพันธ์เซลลูโลสที่เตรียมจากปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน (Etherification) ระหว่าง เซลลูโลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับกรดคลอโรอะซิติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฟสทรานเฟอร์

2.1 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [14 : บรรณานุกรม]

R:H หรือ $\text{CH}_2\text{COO}^- \text{Na}^+$

n คือ ความยาวโซ่เฉลี่ยของเม็กโครโมเลกุล มีค่าประมาณ 100 ถึง 200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ประโยชน์และการใช้งานของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

1. อุตสาหกรรมผงซักฟอก (Detergent) ใช้ผสมในผงซักฟอก เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกที่หลุดออกมาจากเนื้อผ้าไม่ให้กลับเข้าไปเกาะบนเนื้อผ้าใหม่อีก
2. อุตสาหกรรมสิ่งทอ (Textile) ผ้าที่เคลือบด้วยซีเอ็มซีจะไม่สกปรกง่ายสามารถซักสิ่งสกปรกออกได้ง่าย และรีดได้ง่าย
3. อุตสาหกรรมอาหาร (Food) เช่น ใช้เป็นสารป้องกันการตกผลึกของน้ำตาล สารทำให้ข้นในน้ำสลัดหรือเครื่องดื่มน้ำ และเป็นสารทำให้เป็นวุ้นในเยลลี่ เป็นต้น
4. อุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง (Pharmaceutical and Cosmetics) โดยใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อ (Thickener) นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวยึดติด (Binder) ในการทำยาเม็ด โดยจะช่วยให้ผงยาเกาะกันแน่นยิ่งขึ้น
5. อุตสาหกรรมน้ำมัน ใช้เป็นสารขุดเจาะ (Drilling fluids) จะใช้ร่วมกับอุปกรณ์ในการขุดเจาะบ่อน้ำมัน โดยจะเติมลงในรูที่เจาะเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวสว่านเจาะร้อนเกินไป
6. อุตสาหกรรมกระดาษ (Pulp and Paper) จะใช้ผสมรวมกับแป้ง เพื่อให้กระดาษเหนียวขึ้น และมีผิวเรียบเหมาะสมแก่การใช้เป็นกระดาษพิมพ์หนังสือ และยังช่วยลดการดูดซึมสิ่งสกปรกประเภทไขมันได้ด้วย
7. อุตสาหกรรมกาว (Adhesive) โดยจะใช้เป็นตัวปรับความหนืดของกาว
8. อุตสาหกรรมเซรามิกส์ (Ceramics) ใช้ผสมกับดินเหนียว จะช่วยให้ส่วนผสมชนิดอื่น ๆ เข้ากันได้ง่ายขึ้น
9. อุตสาหกรรมพอลิเมอร์ (Polymers) ใช้เป็นสารป้องกันการแยกตัว และสารช่วยทำให้การแขวนลอยคงตัวในปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์

2.3 กระบวนการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [19 : บรรณานุกรม]

กระบวนการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีหลายวิธีดังนี้

1. ใช้ถังปฏิริยาแบบหมุน (Rotary drum reactor) เป็นการผลิตแบบกระบวนการต่อเนื่อง วัตถุดิบซึ่งเป็นเยื่อละเอียดจะถูกส่งเข้าทางด้านหนึ่งของถังแล้วเคลื่อนต่อไปเรื่อย ๆ จนได้ผลผลิตออกอีกด้านหนึ่ง ผลผลิตที่ออกจากถังจะต้องเก็บใส่ถังทิ้งไว้ค้างคืนเพื่อให้ปฏิกิริยาสมบูรณ์ วิธีการผลิตนี้เหมาะสมกับการผลิตเป็นจำนวนมาก
2. การผลิตแบบไม่ต่อเนื่องของเยอรมัน (German batch process) แชนแผ่นเยื่อในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 18% (%โดยน้ำหนัก) ที่ 18 - 20 °ซ บีบสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปออก จนเหลือน้ำหนักของอัลคาไลเซลลูโลส (Alkali cellulose) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 2.5 - 1.7 เท่าของแผ่นเยื่อเดิม ผ่านอัลคาไลเซลลูโลสที่ได้เข้าเครื่องตัด และบดจนละเอียดแล้วจึงส่งเข้าเครื่องนวด (Kneader) พร้อมทั้งเติมโซเดียมคลอไรด์ในสภาพที่เป็นของแข็งลงไป นวดสารทั้งหมดเข้าด้วยกันจนเป็นเนื้อเดียวกันทิ้งไว้ค้างคืนส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไป กำจัดได้โดยการเติม NaHCO_3 ซึ่งจะเปลี่ยนเป็น Na_2CO_3 วิธีนี้เป็นขบวนการไม่ต่อเนื่องจึงเหมาะสำหรับทำเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กเพราะไม่ต้องใช้เครื่องจักรมาก

3. การผลิตแบบผสมวัตถุดิบทุกอย่าง (All ingredients mixing process) ผสมเยื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดคลอไรด์ทั้งหมดเข้าด้วยกันในเครื่องผสม

4. การผลิตแบบแซ่ในกรด (Pre-acid treatment process) แซ่แผ่นเยื่อในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 15% (% โดยปริมาตร) ที่ 70 - 80 °ซ ประมาณ 1 นาที บีบกรดที่มากเกินไปออก ล้างน้ำจนมีสภาพเป็นกลาง นำแผ่นเยื่อที่ได้มาเคลือบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วเข้าเครื่องอบ ภายใต้อุณหภูมิไอน้ำที่ 100 °ซ เพื่อไม่ให้น้ำระเหยออก โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือกำจัดออกโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

5. การผลิตแบบวิธีกลับลำดับก่อน (Reverse order process) แซ่แผ่นเยื่อในสารละลายคลอไรด์เข้มข้น 30 - 80% (% โดยน้ำหนัก) ก่อนแล้วจึงเอามาแซ่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30 - 35% (% โดยน้ำหนัก) จากนั้นทิ้งสารที่ได้ไว้ที่ 0 - 80 °ซ จนกระทั่งปฏิกิริยาสมบูรณ์

6. การผลิตโดยใช้กรดไตรคลอไรด์ เป็นการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีความหนืดสูง โดยใช้เซลลูโลสที่มีขนาด 10 - 20 เมช ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นใส่กรดไตรคลอไรด์ หรือ เกลืออัลคาไลของกรดไตรคลอไรด์ในปริมาณ 0.005 - 1.0 โมล ต่อ 1 หน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ของโมเลกุลเซลลูโลส ตัวทำละลายที่ใช้เป็นของเหลวตัวกลางได้แก่ น้ำ อะซิฟลาติกแอลกอฮอล์ (เอทานอล นอร์มอล-โพรพานอล ไอโซ-โพรพานอล นอร์มอล-บิวทานอล ไอโซ-บิวทานอล 2-บิวทานอล และเทอร์เทียร์-บิวทานอล) โซโครคาร์บอนวงแหวน (เบนซีน โทลูอิน และเอทิลเบนซีน) อะซิฟลาติกอีโตน

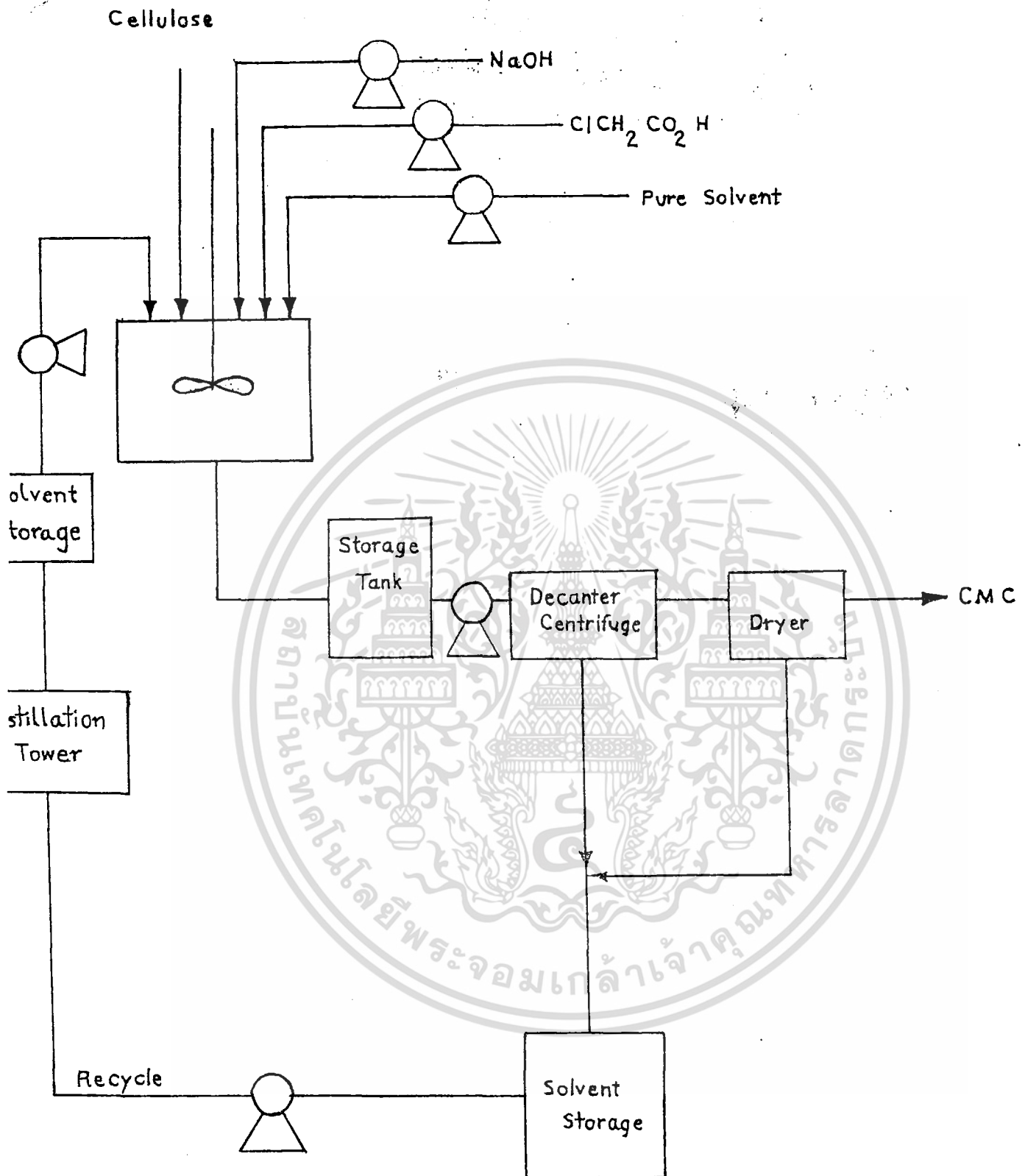
การผลิตแบบนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งในการเตรียมซีเอ็มซีในสภาพของแข็งและของเหลว

7. การผลิตโดยใช้ออกซิเจนควบคุมความหนืดของซีเอ็มซี เป็นการผลิตซีเอ็มซีในสภาพของเหลว สามารถใช้ควบคุมความหนืดของซีเอ็มซี โดยการเติมออกซิเจน 5 - 75% (% โดยปริมาตร) ปริมาตรของออกซิเจนจะใช้เท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าความหนืดที่ต้องการ

8. การผลิตซีเอ็มซีที่เหนียวเพิ่มขึ้น เมื่อให้ความร้อนแก่เกล็ดอัลคาไลของคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส ซีเอ็มซีที่ละลายน้ำในรูปของแข็งภายใต้สุญญากาศหรือบรรยากาศทั่ว ๆ ไป จะทำให้เกล็ดอัลคาไลมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ดังนั้นเกล็ดโลหะอัลคาไลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ละลายน้ำ และมีค่าองศาการแทนที่ 0.6 - 1.5 มีความเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อใช้สภาวะเดียวกันที่อุณหภูมิ 100 - 200 °ซ เป็นเวลา 24 ชม. ภายใต้สุญญากาศหรือบรรยากาศทั่วไป

9. การผลิตซีเอ็มซีจากเซลลูโลสที่ใช้แล้ว เป็นการนำเซลลูโลสที่ใช้แล้วมาใช้ ใหม่อีกครั้ง โดยขุมเซลลูโลสลงไปนึ่งในสารละลายของกรดคลอโรอะซิติก และโซเดียมไฮดรอกไซด์จนสารละลายซึมเข้าไปในเซลลูโลสอย่างทั่วถึง ให้ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 30 - 60 °ซ จนปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ จากนั้นบด และอบแห้งจนเหลือความชื้นเพียง 5% ล้างเกล็ดและสารละลายเจือปนอื่น ๆ ออกด้วยแอลกอฮอล์ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ได้จะมีคุณภาพดี และสามารถใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมอาหารได้

10. การผลิตที่ใช้หลาย ๆ ส่วนประกอบที่ละลายน้ำ เป็นการเตรียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส ในรูปของสารละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% (%โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิห้อง แต่ละลายที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °ซ มีค่าองศาการแทนที่ระหว่าง 0.4 - 1.3 และลวดคลื่นแสงอินฟราเรดในช่วง 5.7 - 5.9 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตซีเอ็มซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีและการคำนวณเพื่อออกแบบเครื่องอบแห้ง

เนื่องจากซีเอ็มซีที่ได้จากการสังเคราะห์มีลักษณะเป็น Suspension โดยซีเอ็มซีจะแยกชั้นกับ ไอโซโพรพานอล การแยกซีเอ็มซีออกจาก ไอโซโพรพานอล และน้ำ จะใช้เครื่องกรองแบบ - สูญญากาศ ซีเอ็มซีที่ได้จะมีปริมาณความชื้น ประมาณ 70% เมื่อทำการวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer X ซีเอ็มซีที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคประมาณ 56.7 ไมโครเมตร ซีเอ็มซีที่เตรียมได้มีค่าองศาการแทนที่อยู่ระหว่าง 0.4 - 1.5 สำหรับค่าองศาการแทนที่ (Degree of substitution, DS) เป็นค่าที่แสดงจำนวนกลุ่ม $\text{CH}_2\text{COO}^- \text{Na}^+$ ที่แทนที่ไฮโดรเจน 1 หน่วย ในทางทฤษฎีค่าองศาการแทนที่ของซีเอ็มซีมีค่าเท่ากับ 3 สำหรับในทางปฏิบัติไม่สามารถเตรียมได้เนื่องจากมีปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของสารละลายต่อเซลล์โลส และชนิดของเซลล์โลส เป็นต้น เนื่องจาก ซีเอ็มซี ที่ได้มีปริมาณความชื้นอยู่มาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องผ่านกระบวนการอบแห้ง ซึ่งหลักในการเลือกประเภทเครื่องอบแห้ง ต้องคำนึงถึงรูปทรงและคุณภาพผลิตภัณฑ์ การเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความร้อน และอัตราการระเหยของของเหลวที่ต้องการกำจัดออกจากผลิตภัณฑ์

3.1 ประเภทเครื่องอบแห้ง แบ่งตามลักษณะการทำงานได้ดังนี้

3.1.1 เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryer)

เป็นเครื่องอบแห้งแบบอยู่กับที่ เหมาะสำหรับวัสดุชิ้น ในรูปของแข็งที่ไม่สามารถอบแห้งแบบกองรวมกันในปริมาณมาก ๆ ได้

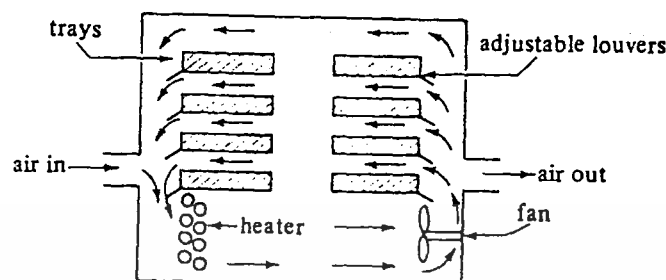
หลักการทำงาน ทำให้อากาศร้อนแล้วให้ไหลผ่านวัสดุชิ้นในเครื่องอบแห้ง ลมร้อนที่เข้าไปจะระเหยเอาของเหลวออกจากวัสดุ การไหลของลมร้อนจะขนานกับถาดบรรจุวัสดุชิ้น หรืออาจตั้งฉากกับตัวถาดก็ได้แล้วแต่การออกแบบ

ข้อเสีย

1. การกระจายของลมร้อน ไม่ทั่วถึง ทำให้วัสดุชิ้นที่จุดต่าง ๆ แห้งไม่เท่ากัน
 2. วัสดุชิ้นตรงทางเข้าของลมร้อนจะแห้งมากกว่าวัสดุชิ้นที่อยู่ตรงทางออกของลมร้อน
- วัสดุชิ้นที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งแบบถาด เช่น ตัวยาผง ขนมหวานต่าง ๆ เครื่องหนัง

ยาสมุนไพร และเซรามิกส์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งแบบถาด [6]

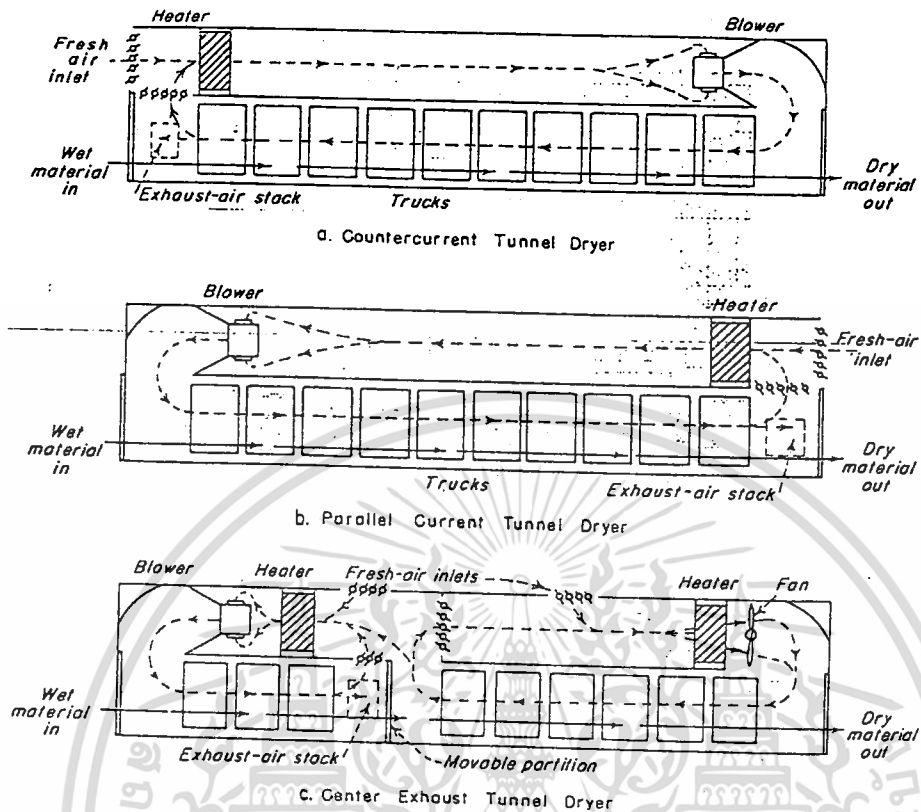
3.1.2 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ (Tunnel dryer)

ระบบการทำงานเป็นแบบต่อเนื่อง มีอัตราการผลิตมาก

หลักการทำงาน วัสดุชิ้นจะอยู่บนสายพาน แล้วให้สายพานเลื่อนเข้าไปในอุโมงค์ที่มีอากาศร้อนไหลสวนทางกับการเคลื่อนที่ของสายพาน หรือจะให้อากาศร้อนไหลขนานทางเดียวกับวัสดุก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าต้องการอัตราการอบแห้งที่เร็วเพียงใด และการทนต่ออุณหภูมิสูง ๆ ของวัสดุชิ้นได้มากเพียงใด เครื่องอบแห้งแบบนี้ใช้ในอุตสาหกรรม ไม้อัด เส้นไหม รองเท้า และการฟอกหนัง เป็นต้น

ข้อเสีย

ผู้ออกแบบต้องคำนวณหรือพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องให้รอบคอบ เพราะถ้าพิจารณาไม่ดีจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ได้ตามมาตรฐานที่ต้องการ ตัวแปรที่สำคัญ เช่น เวลาที่สายพานเคลื่อนที่ในอุโมงค์ ปริมาณของวัสดุชิ้นที่อยู่บนสายพาน ปริมาณความชื้นในวัสดุ ความชื้นของอากาศในวันที่ทำการอบแห้ง และความเร็วของลมร้อน เป็นต้น



รูปที่ 8.2 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ [11]

3.1.3 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer)

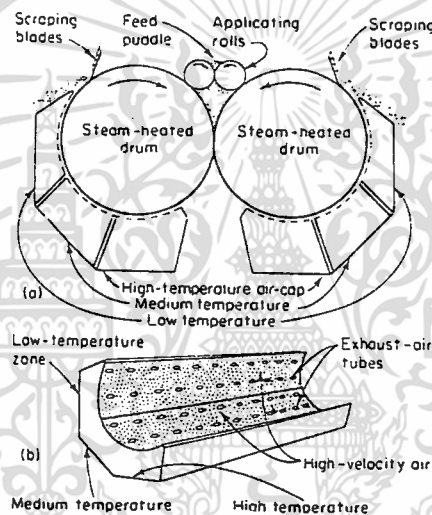
เครื่องอบแห้งแบบนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นแผ่นหรือถูกทำให้เป็นแผ่น พร้อมกับการทำให้แห้ง

หลักการทำงาน ใช้ลูกกลิ้งขนาดใหญ่ ตรงแกนด้านหนึ่งให้อิอน้ำเป็นแหล่งให้ความร้อนเข้าสู่ภายในลูกกลิ้ง และไอน้ำไค้ที่ควบนแน่นจะไหลออกอีกทางด้านหนึ่ง ความร้อนจะผ่านผนังลูกกลิ้ง ไปถ่ายเทให้กับฟิล์มของของเหลวที่ติดกับผนังลูกกลิ้งด้านนอกที่หมุนช้า ๆ พอครบรอบวัสดุชั้นจะเป็นแผ่นของแข็งพอดี ทางด้านล่างของลูกกลิ้งจะมีแผ่น โลหะ ลักษณะคล้ายใบมีดวางติดกับลูกกลิ้ง เพื่อใช้ขูดของแข็งที่เป็นแผ่นให้ลอกจากผนังลูกกลิ้ง

เครื่องอบแห้งแบบนี้ใช้งานได้ทั้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยว และแบบลูกกลิ้งคู่แล้วแต่ความเหมาะสมของวัสดุที่จะใช้ ดังนี้

1. เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยว ใช้ได้ดีกับอุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมอาหาร และ อุตสาหกรรมยา
2. เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ ใช้ได้ดีกับอุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมสิ่งทอ และ อุตสาหกรรมกระดาษ

ในการใช้งานของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง เพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ต้องคำนึงถึงความเร็วลูกกลิ้ง ปริมาณความร้อนจากไอน้ำ ชนิดของผนังลูกกลิ้ง ความหนาของชั้นฟิล์ม



รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง [11]

3.1.4 เครื่องอบแห้งแบบหัวฉีดพ่นฝอย (Spray dryer)

เป็นเครื่องอบแห้งที่สามารถทำให้ของเหลวแห้งเป็นผงในเวลาไม่นานนัก

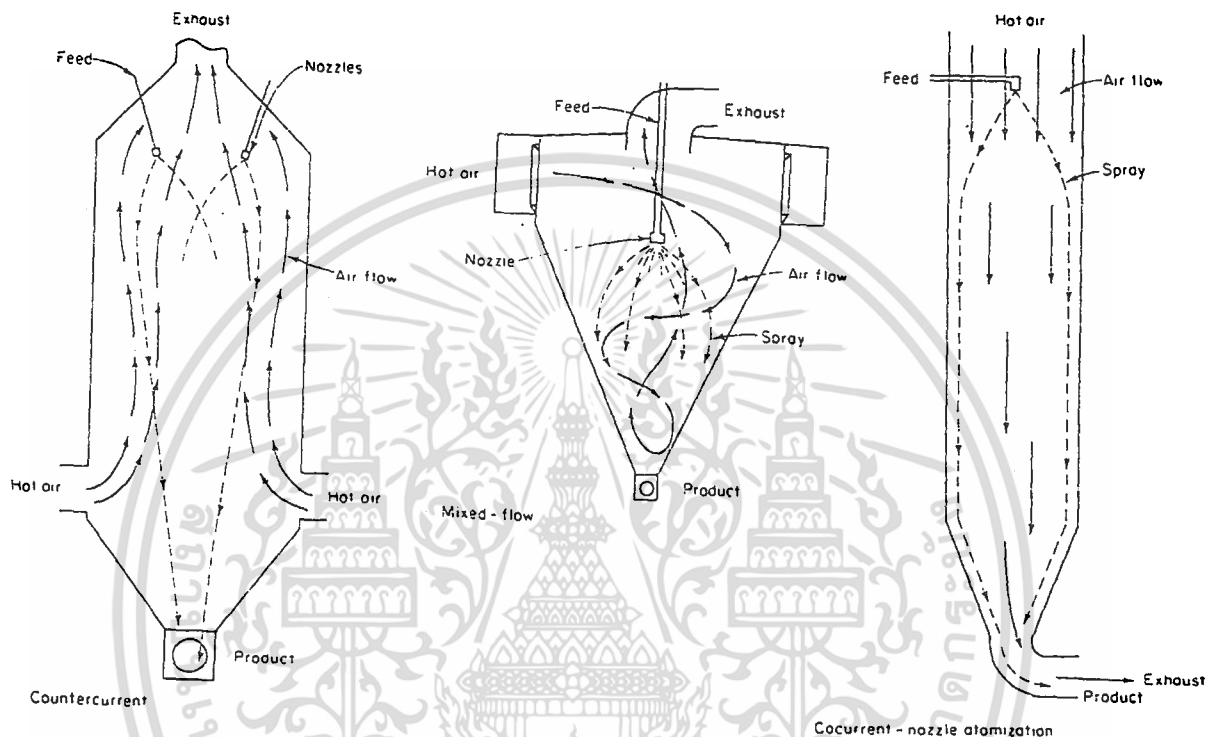
หลักการทำงาน ป้อนวัสดุขึ้นเข้าไปในเครื่องผ่านหัวฉีดหมุนด้วยความเร็วรอบสูงประมาณ 10,000 รอบต่อนาที

จุดประสงค์ของการทำงานผ่านหัวฉีด คือ ต้องการให้วัสดุขึ้นกลายเป็นละอองเล็ก ๆ ลอยอยู่ในเครื่องอบแห้งที่มีลมร้อนไหลสวนทางขึ้นมา ความร้อนของลมร้อนจะทำให้ของเหลวระเหยได้อย่างรวดเร็ว เมื่อละอองของวัสดุขึ้นลอยลงมาถึงส่วนล่างของเครื่องอบแห้ง วัสดุขึ้นจะกลายเป็นผงเล็ก ๆ และถูกดูดออกจากเครื่องด้วยพัดลมดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสีย

ต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการทำงานสูง สินค้าที่จะใช้เครื่องอบแห้งแบบนี้จึงมีราคาแพง ส่วนมากใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น กาแฟผงสำเร็จรูป ไข่ผง และนมผง เป็นต้น



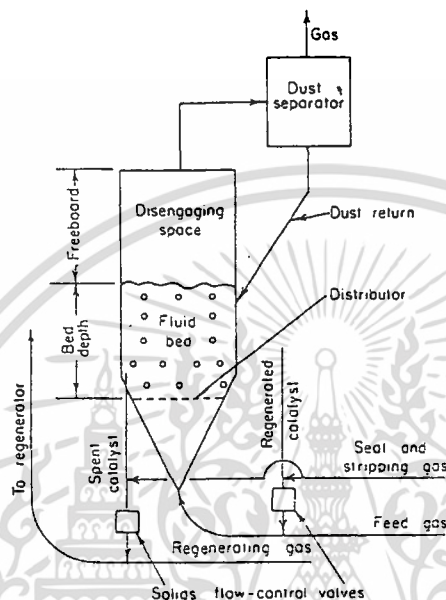
รูปที่ 3.4 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย [11]

3.1.5 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized-bed dryer)

มีลักษณะเป็นหอ หรือถังซึ่งภายในบรรจุด้วยอนุภาคของวัสดุซึ่งที่พื้นของถังจะมีแผ่นรองรับที่เจาะรูพรุน เพื่อให้สามารถเป่าอากาศ หรือลมร้อนผ่านวัสดุขึ้นจากด้านล่าง ถ้าความเร็วถึงระดับหนึ่งวัสดุชิ้นจะเคลื่อนไหว การเคลื่อนไหวของวัสดุชิ้นมีลักษณะเหมือนกำลังแขวนลอยอยู่ในลมร้อนที่ไหลผ่าน การที่ขึ้นของวัสดุชิ้นเปลี่ยนสภาพจากอยู่นิ่งมาเป็นแขวนลอย เรียก “Fluidized” ซึ่งเป็นสภาพกึ่งกลางระหว่างสภาพเบดนิ่ง (Fixed bed) และสภาพถูกพัดพาด้วยอากาศ (Pneumatic conveyor) กล่าวคือ เม็ดของแข็งจะกระจัดกระจายในลักษณะแขวนลอย และมีคุณสมบัติในการไหลคล้ายของเหลว เมื่อมองจากภายนอกจะเห็นว่าที่ผิวของ Fluidized bed เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นจะมีลักษณะคล้ายของเหลวที่กำลังเดือด เนื่องจากการเคลื่อนไหวของเม็ดของแข็งมีลักษณะคล้ายของเหลว

อุตสาหกรรมที่นิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบนี้ ส่วนมากลักษณะของผลิตภัณฑ์จะเป็นเม็ดหรือผงละเอียด เช่น อุตสาหกรรมยา อาหารสัตว์ พลาสติก เมล็ดพืช และน้ำตาลทราย เป็นต้น



รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด [11]

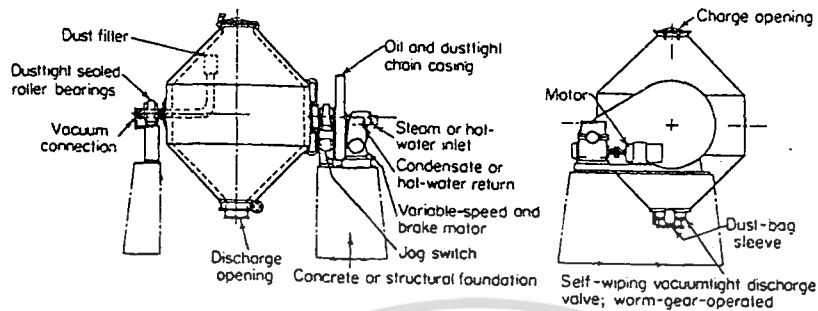
3.1.6 เครื่องอบแห้งแบบสูญญากาศ (Vacuum dryer)

เครื่องอบแห้งสูญญากาศ เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการอบแห้งภายใต้สภาวะความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ โดยให้ความร้อนในการอบแห้งโดยอ้อม เหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุเปียกพวก Liquid slurry หรือ Paste ตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบนี้ เช่น เครื่องอบแห้งแบบ Vacuum shelf dryer และ Agitator pan dryer หรือ Agitated vacuum dryer

Vacuum shelf dryer เป็นเครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยอ้อม ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Vacuum tight chamber, Heated chamber, Supporting shelf และส่วน Condenser เครื่องอบแห้งแบบนี้ใช้ในการอบแห้งวัสดุที่ใช้ในทางเภสัชกรรม วัสดุที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่าย และวัสดุที่ต้องนำตัวทำละลายน้ำกลับมาใช้ใหม่เนื่องจากราคาแพง

Agitator pan dryer หรือ Agitated vacuum dryer เครื่องอบแห้งแบบนี้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ใช้อบแห้งวัสดุประเภท ของเหลว สเลอรี เครื่องอบแห้งแบบนี้ตัวทำละลายถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในกรณีของเหลว และสเลอรี เมื่อทำการอบแห้ง Power consumption เพิ่มขึ้นมากขึ้นแล้วลดลง ดังนั้น Motor gear stirrer ต้องมีขนาดเพียงพอสำหรับ Power consumption

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



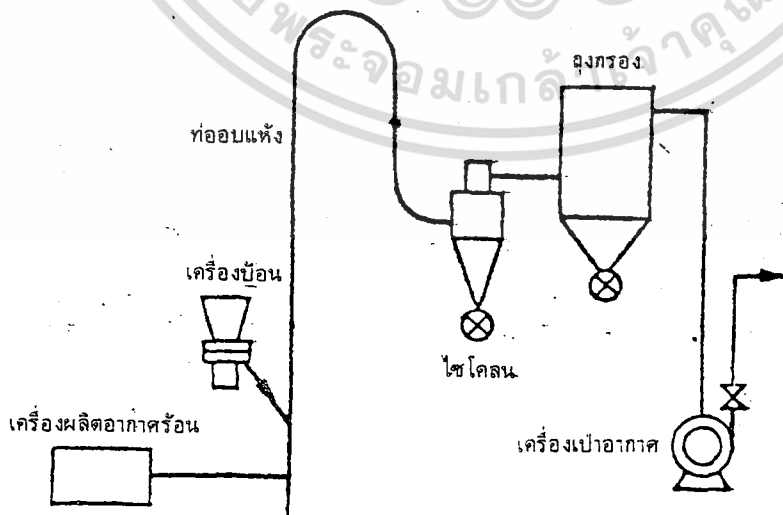
รูปที่ 3.6 เครื่องอบแห้งแบบสูญญากาศ [11]

3.1.7 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic conveying dryer)

การจำแนกประเภทเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม แบ่งตามวิธีป้อนวัสดุเปียกเข้าเครื่อง -
อบแห้ง ได้ดังนี้

ก. ชนิดป้อนวัสดุเข้าโดยตรง (Direct feed type)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้ไม่ใช้เครื่องกระจายวัสดุ (Dispenser) ในการป้อนวัสดุเปียกเข้าเครื่อง วัสดุถูกป้อนโดยตรงผ่านชู้ต (Chute) เข้าไปในหลอดเร่งความเร็ว (Acceleration tube) ลมร้อน ไหลผ่านด้วยความเร็ว 20 - 40 เมตร/วินาที การกระจายวัสดุจะเกิดจากแรงปะทะกับลมร้อน เครื่องอบแห้งชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับวัสดุผงที่ง่ายต่อการกระจาย

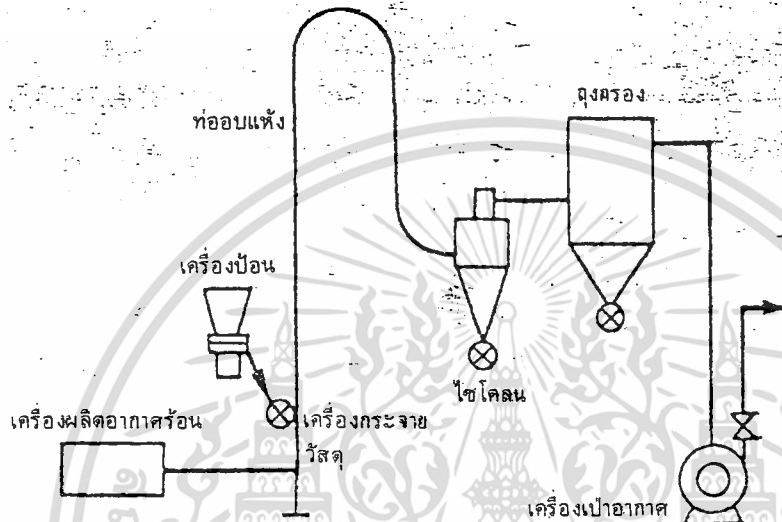


รูปที่ 3.7 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดป้อนวัสดุเข้าโดยตรง [15 : บรรณานุกรม]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ชนิดมีเครื่องกระจายวัสดุ (Disperser-Attached type) ติดอยู่

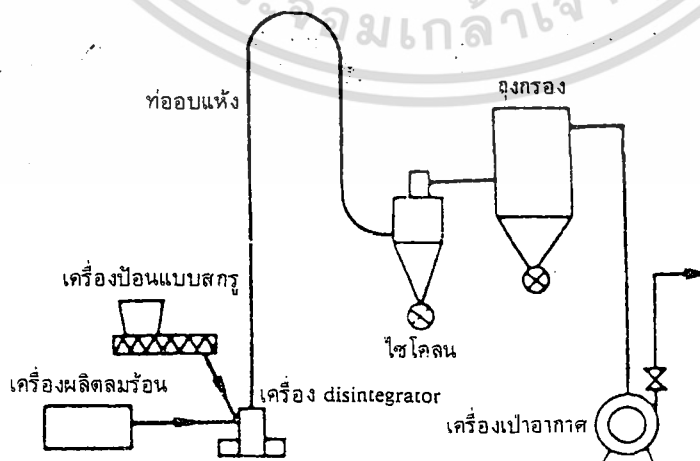
เครื่องอบแห้งชนิดนี้วัสดุถูกป้อนผ่านเครื่องกระจายวัสดุเข้าไปในกระแสมร้อน เครื่องกระจายวัสดุทำหน้าที่กระจายวัสดุผงที่รวมตัวเป็นก้อนเนื่องจากความชื้น และไม่สามารถกระจายได้โดยปะทะกับกระแสมร้อนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3.8 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดมีเครื่องกระจายวัสดุ [15 : บรรณานุกรม]

ค. ชนิดมีเครื่อง Disintegrator (Disintegrator-Attached type)

เครื่องชนิดนี้ใช้เครื่อง Disintegrator เพื่อทำให้วัสดุก้อนที่ค่อนข้างนิ่มแตกกระจาย ช่วยกวนวัสดุให้เข้ากับลมร้อนอย่างดี สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงมาก และสามารถลดความชื้นได้ 50 - 80% ของความชื้นทั้งหมดใน Disintegrator



รูปที่ 3.9 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดมี Disintegrator [15 : บรรณานุกรม]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.8 เครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary dryer)

โครงสร้างหลักของเครื่องอบแห้งแบบหมุนประกอบด้วยทรงกระบอกที่หมุนรอบแกนกลาง โดยทำมุมเอียงที่เหมาะสมกับแนวระดับ (ขนานกับแนวระดับในบางกรณี) ดังนั้น ทรงกระบอกนี้จะสูงข้างหนึ่ง และต่ำข้างหนึ่ง วัสดุเม็ดที่ต้องการอบแห้งจะถูกป้อนเข้าทางปลาย ด้านสูงของทรงกระบอกแล้วค่อย ๆ กลิ้งลงตามการหมุนของทรงกระบอก และถูกทำให้แห้งโดยการสัมผัสกับลมร้อนที่ไหลผ่านทรงกระบอกหรือโดยการสัมผัสกับผิวให้ความร้อนในขณะที่วัสดุเคลื่อนที่ไปตามทรงกระบอก ทิศทางของลมร้อนอาจจะมีทิศทางเดียวกันหรือมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของวัสดุก็ได้ วัสดุชิ้นที่อยู่ภายในทรงกระบอก จะมีการพลิกตัวอย่างสม่ำเสมอ ทุกส่วนของวัสดุชิ้นจะสัมผัสกับอากาศร้อนอย่างทั่วถึง ในกรณีที่ทิศทางของลมร้อนตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัสดุ วัสดุที่แห้งแล้วจะออกทางด้านต่ำของทรงกระบอก และอากาศชื้นจะออกทางด้านสูงของทรงกระบอก นอกจากนี้ในเครื่องอบแห้งแบบนี้ อาจติดตั้งกริบหรือก้างปลาไว้ภายในเพื่อช่วยให้วัสดุเคลื่อนที่ขึ้นลง และพลิกตัวได้ดี

เครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่มีความชื้นสูงถึง 70% และลดปริมาณความชื้นลงได้ต่ำกว่า 10% เครื่องอบแห้งแบบหมุนนิยมใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมถลุงแร่ และอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น

การจำแนกประเภทเครื่องอบแห้งแบบหมุน

เครื่องอบแห้งแบบหมุน สามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

ก. เครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนโดยตรง (ลมร้อนสัมผัสกับวัสดุแห้งโดยตรง)

- แบบขนาน

- แบบไหลสวนทาง

ข. เครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนโดยอ้อม (ลมร้อนถ่ายเทผ่านผนังของทรงกระบอกโดยการนำความร้อน)

ค. เครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนทั้ง โดยตรงและโดยอ้อม

เครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนโดยตรง

เครื่องอบแห้งแบบนี้วัสดุอบแห้งและลมร้อนสัมผัสกันโดยตรง เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด ในกรณีการไหลแบบขนาน วัสดุอบแห้งและลมร้อนจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน ถึงแม้ว่าก๊าซที่ใช้จะมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง อุณหภูมิของวัสดุอบแห้งที่สัมผัสกับลมร้อนที่เข้ามายังคงมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกะเปาะเปียกของอากาศ เพราะว่าการอบแห้งอยู่ในช่วงของการระเหยจากผิววัสดุ ส่วนที่ทางออกของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิของลมร้อนจะลดลง ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อบแห้งจะไม่ขึ้นสูงมากนัก ถึงแม้ว่าการอบแห้งจะเกิดขึ้นในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ สรุปได้ว่าลักษณะพิเศษอย่างหนึ่งของการไหลแบบขนานคือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์จะแทบไม่ค่อยเสื่อมลง ถึงแม้ร้อนที่ใช้จะมีอุณหภูมิก่อนข้างสูง

ในการไหลแบบสวนทาง วัสดุอบแห้งจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลมร้อน วิธีนี้เหมาะสมสำหรับกรณีที่ต้องการการเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ให้สูงมาก

เครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนโดยอ้อม

เครื่องอบแห้งแบบนี้วัสดุอบแห้งจะถูกทำให้ร้อนโดยการนำความร้อนผ่านผนังโลหะ และโดยการแผ่รังสีความร้อน ลักษณะพิเศษบางประการ ได้แก่

1. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูง เพราะว่าอากาศที่ต้องใช้ขับไล่ไอน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุมีปริมาณน้อย

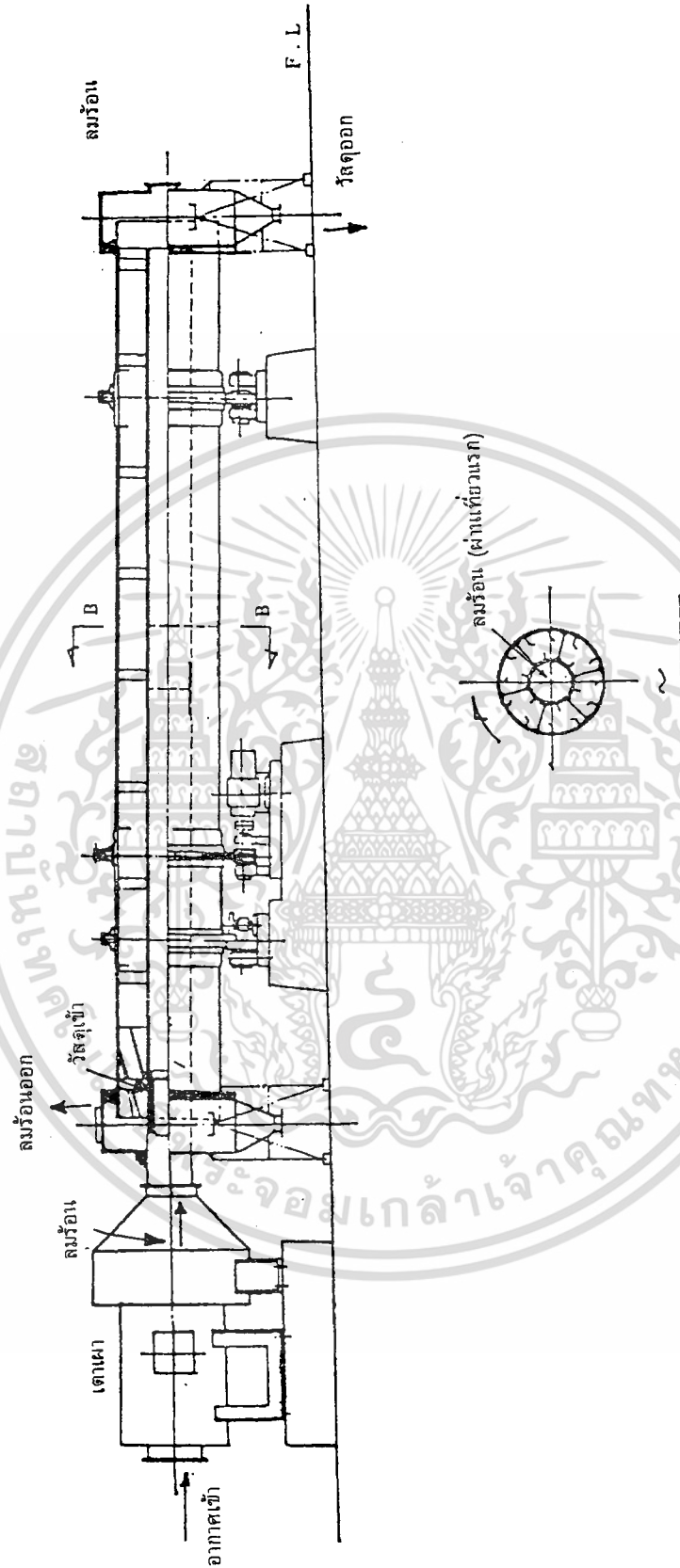
2. การเก็บสารละลายที่เป็นความชื้นของวัสดุกลับคืนมาทำได้ง่าย เพราะความชื้นของอากาศก็มีค่าสูง นอกจากนี้ปริมาณฝุ่นที่เกิดจากกระแสลมร้อนก็มีค่าน้อย

สำหรับประเภทที่ให้ความร้อนผ่านผนัง ด้านนอกของทรงกระบอกอบแห้งจะถูกสร้างเป็นเตาเผาและทรงกระบอกจะถูกทำให้ร้อนโดยก๊าซที่เกิดจากการสันดาปอยู่ภายนอก เป็นต้น นอกจากการอบแห้งแล้วเครื่องอบแห้งชนิดนี้ยังใช้สำหรับทำความร้อน ย่าง (Roasting) เผาเป็นผง (Calcination) และอื่น ๆ อีกด้วย

เครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนทั้งโดยตรงและโดยอ้อม

เครื่องอบแห้งประเภทนี้เป็นแบบผสมของแบบรับความร้อนโดยตรงและรับความร้อนโดยอ้อม เครื่องประเภทนี้ได้รับการดัดแปลงแก้ไขมาเพื่อจุดประสงค์ต่าง ๆ รูปแบบในปัจจุบันประกอบด้วย ทรงกระบอกสองชั้น ลมร้อนจะไหลผ่านทรงกระบอกชั้นในก่อน แล้วเปลี่ยนทิศทางการไหลที่ด้านปลายที่ถ่ายผลิตภัณฑ์ออกเพื่อไหลย้อนทางไปในช่องว่างวงแหวนระหว่างทรงกระบอกชั้นในและทรงกระบอกชั้นนอก และไปออกที่ปลายทางเข้าของวัสดุอบแห้ง ส่วนวัสดุอบแห้งจะเคลื่อนที่ไปในช่องว่างวงแหวนในทิศทางตรงข้ามกับลมร้อน นอกจากนี้จะได้รับความร้อนจากการสัมผัสกับลมร้อนแล้ว วัสดุยังได้รับความร้อนผ่านผนังของทรงกระบอกชั้นใน โดยการนำความร้อนอีกด้วย ลักษณะพิเศษนี้ทำให้สามารถใช้ก๊าซร้อนจัดได้ เพราะก๊าซร้อนจะถ่ายเทความร้อนบางส่วนผ่านผนังของทรงกระบอกชั้นใน ทำให้อุณหภูมิของก๊าซร้อนลดลงพอที่จะไปสัมผัสกับวัสดุอบแห้ง โดยตรงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 เครื่องอบแห้งแบบหมุน [15 : บรรณานุกรม]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเครื่องอบแห้งแบบหมุน

1. โครงสร้างหลัก (Main body)

โครงสร้างหลักซึ่งเป็นรูปทรงกระบอกมักจะทำด้วยเหล็กแผ่น เหล็กไร้สนิม (Stainless steel) และเหล็กหล่อ ในกรณีที่ต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูงบางครั้งจะบุด้านในของผนังด้วย ปลอกทนความร้อนเครื่องอบแห้งที่ใช้งานจริง ๆ มีตั้งแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ถึง 3 เมตร กว้าง และความยาวตั้งแต่ 2 เมตร ถึง 50 เมตร

ความหนาของผนังเครื่องอบแห้งจะต้องกำหนดจากการคำนวณความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งขึ้นกับน้ำหนักของวัสดุอบแห้งในเครื่อง น้ำหนักของวัสดุที่ใส่บุด้านในของทรงกระบอก และความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก นอกจากนี้ ยังต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น ฤทธิ์กัดกร่อนของวัสดุอบแห้ง และอายุการใช้งาน ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์ช่วย

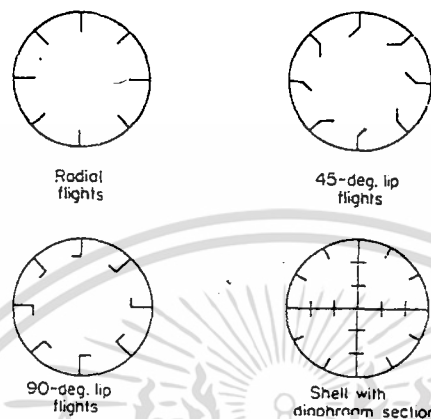
การเลือกความเร็วของลมร้อนที่ไม่ก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของวัสดุอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนโดยตรง จะต้องคำนึงถึงอัตราการไหลของลมร้อนที่ต้องใช้ ขนาดของอนุภาค และน้ำหนักจำเพาะของวัสดุอบแห้ง จากนั้นทำการกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่อง แล้วคำนวณหาความยาวจากปริมาตรที่ต้องใช้ ซึ่งประเมินค่าได้จากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

ในกรณีที่วัสดุอบแห้งเหนียวเหนอะหนะ หรือวัสดุอบแห้งเกาะติดเป็นก้อนโตขึ้นเรื่อย ๆ บนผิวในของตัวเครื่องได้ง่าย หรือวัสดุที่รวมตัวเป็นก้อนใหญ่ ๆ ได้ง่าย จะต้องใช้มาตรการพิเศษในเครื่องอบแห้งแบบหมุน ตัวอย่างของมาตรการที่ว่า ได้แก่ การเคาะตีตัวเครื่องจากด้านนอก การแขวนโซ่ไว้ในเครื่อง และการใส่ลูกเหล็กกลมไว้ในเครื่องเพื่อช่วยกระจายวัสดุอบแห้ง เป็นต้น ในบางครั้งมาตรการที่ใช้อาจเป็นการดัดแปลงวิธีปฏิบัติงาน เช่น การเวียนผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วจำนวนมากกลับไปผสมกับวัสดุอบแห้งเพื่อลดปริมาณความชื้น และเพิ่มคุณสมบัติการกระจายตัวของวัสดุ นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับกวนและทำให้วัสดุที่อบแห้งแตกละเอียดในตัวเครื่องเพื่อให้สามารถอบแห้งสลอรี่ (Slurry) ที่มีความชื้นมากกว่า 80% (W.B.) เช่น Activated sludges, Digested sludges, Metal hydroxide sludges, Wet - dust collection sludges และอื่น ๆ เครื่องอบแห้งบางรุ่นมี Vanes ติดไว้ข้างในสำหรับกวนวัสดุสลอรี่

2. Flights (แผ่นยก (Lifters)) ในกรณีของเครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนโดยตรงแผ่นยกมีไว้เพื่อแบ่งกระจายวัสดุอบแห้งให้ทั่วผนังของทรงกระบอก และเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างลมร้อนกับวัสดุอบแห้ง

เนื่องจากรูปร่างและคุณสมบัติของวัสดุจะเปลี่ยนไปในระหว่างอบแห้ง บางครั้งอาจเลือกรูปร่างของแผ่นยกให้เหมาะสมยิ่งขึ้นโดยการติดตั้ง Vanes ที่มีโครงสร้างง่าย ๆ สำหรับการกวน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยกวัสดุในครั้งแรกและใช้โครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 3.11 โดยทั่วไปแล้วไม่ควรใช้โครงสร้างของแผ่นยกที่สลับซับซ้อนเกินไป



รูปที่ 3.11 แผ่นยกแบบต่าง ๆ [11]

3. ล้อและลูกกลิ้ง

ล้อและลูกกลิ้งเป็นส่วนที่รองรับการหมุนเวียนของเครื่อง วัสดุที่ใช้ทำอาจเป็นเหล็กหล่อ จุดที่รองรับอาจมีจำนวน 2, 3, หรือ 4 จุด ขึ้นอยู่กับความยาวของตัวเครื่องอบแห้ง เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้งประมาณ $1/4$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อ เพื่อป้องกันการสึกหรอของผิวสัมผัสจะต้องให้ความสำคัญเกี่ยวกับการหล่อลื่น และการป้องกันฝุ่น ยิ่งกว่านั้นการเลือกชนิดของลูกปืน (Bearings) สำหรับลูกกลิ้งจะต้องคำนึงถึงสถานที่ติดตั้ง น้ำหนักที่รับ เป็นต้น เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของตัวเครื่องในแนวแกนจะต้องทำ Thrust structure ไว้ในที่บริเวณที่ผลจากความร้อนมีน้อย และใกล้ ๆ กับ Driving gear โดยทั่วไปจะใช้ Thrust rollers อย่างไรก็ดี ในกรณีที่ Thrust loads มีน้อยอาจเจาะร่องไว้บนล้อหรือลูกกลิ้งเพื่อรองรับ Thrust loads ถ้าขาดความระมัดระวังในการติดตั้งจะเกิดปัญหาตามมาในไม่ช้า เช่น การสึกหรอด้านเดียวของลูกกลิ้ง เป็นต้น

4. Driving gears

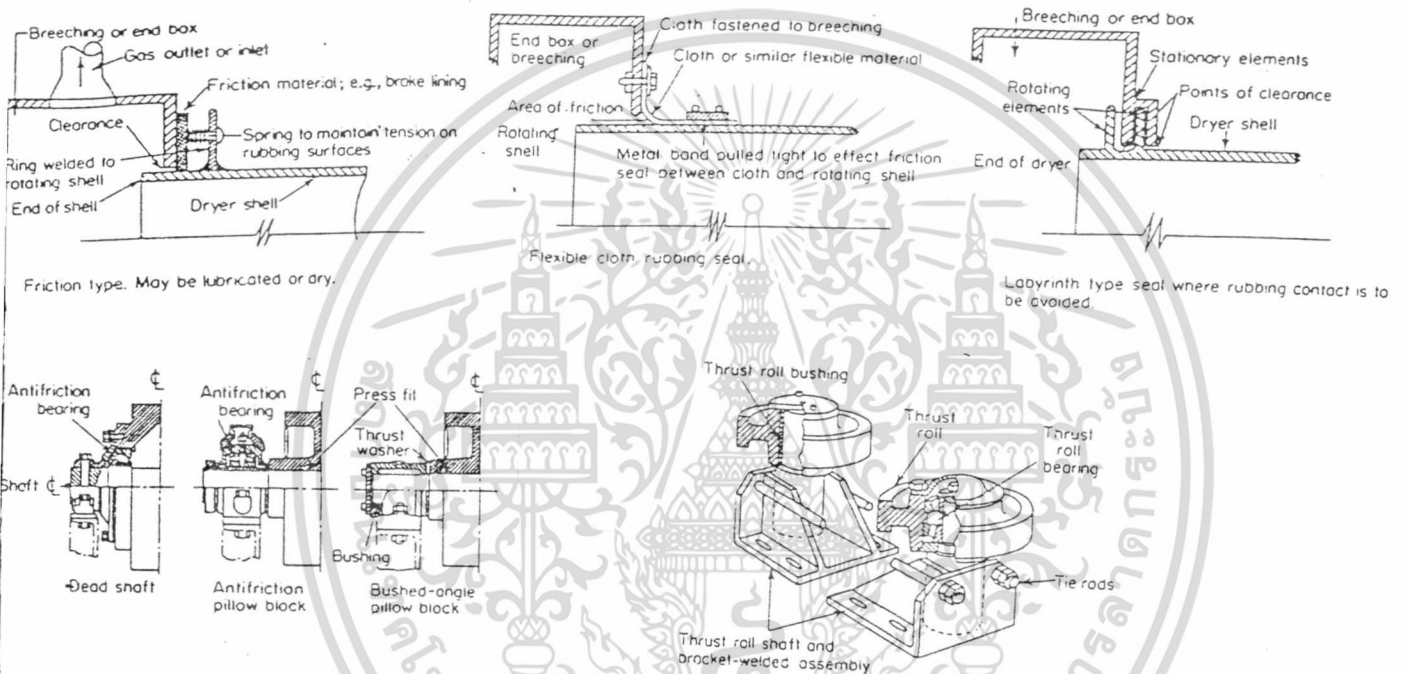
ในกรณีที่ต้องใช้กำลังไม่มากอาจขับเคลื่อนแกนของลูกกลิ้งเพื่อหมุนตัวเครื่อง โดยแรงเสียดทานกับล้อ เมื่อต้องการกำลังเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจะขับเคลื่อนโดยใช้โซ่ สำหรับเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่จะใช้ Driving gear เนื่องจากชุดมอเตอร์ เพื่องทด เกียร์เปลี่ยนความเร็วที่กะทัดรัดหาได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกชุดเหล่านี้ควรทำอย่างมีเหตุผลเพื่อให้สามารถหมุนตัวเครื่องอบแห้งตามจำนวนรอบการหมุนต่อนาทีที่กำหนดไว้

5. Air seals

เราจำเป็นต้องใช้ Seals ณ ตำแหน่งที่ตัวเครื่องที่หมุนพบกับส่วนที่อยู่นิ่งเพื่อป้องกันการรั่วไหลของลมร้อน และการแทรกซึมของอากาศจากข้างนอก ส่วนใหญ่แล้วจะใช้ Labyrinth - structure และทำให้เกิดความมิดชิดของอากาศ (Airtightness) โดยอาศัยคุณสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ



รูปที่ 3.12 วิธี Seal แบบต่าง ๆ [11]

ลักษณะเด่นของเครื่องอบแห้งแบบหมุนคือ

1. สามารถอบแห้งวัสดุปริมาณมากอย่างต่อเนื่อง

เครื่องอบแห้งแบบหมุนสามารถใช้อบวัสดุเม็ด วัสดุสะเก็ด และวัสดุก้อน ตัวอย่างของวัสดุที่อบแห้งได้แก่ ผลึกต่าง ๆ น้ำตาล ปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยอนินทรีย์ ปูนขาว และถ่านหิน เป็นต้น นอกจากนี้แล้วเครื่องอบแห้งแบบหมุนยังมักใช้อบแห้งเศษปลา (Fish dregs) ข้าวโพด (Corn jam) หล้า ถากผลไม้ ถากแป้งที่ใช้เป็นอาหารสัตว์ และอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดก็ตามลักษณะเด่นที่มีร่วมกันคือ การอบแห้งอย่างต่อเนื่องในปริมาณมาก ๆ มีหลายเครื่องที่ใช้ระเหยความชื้นมากกว่า 10 ตัน/ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้ง่ายเพราะมีโครงสร้างง่าย

โครงสร้างหลักประกอบด้วยทรงกระบอกที่หมุนรอบแกนกลางโดยทำมุมเอียงที่เหมาะสมกับแนวระดับ ดังนั้นจึงทนทาน และแทบไม่เคยเสียเลย

3. สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของวัสดุอบแห้งได้ง่าย

เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งประเภทอื่นๆ เช่น เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน (Flow through dryer) เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic conveying dryer) และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed dryer) เครื่องอบแห้งแบบหมุนสามารถปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น และขนาดของวัสดุอบแห้งที่ป้อนเข้าได้ในช่วงที่กว้าง

สำหรับการอบแห้งวัสดุประเภทเม็ดหยาบและอนุภาค เช่น ผลึก เราจะใช้เครื่องอบแห้งแบบหมุนก็ได้ อย่างไรก็ตามในบางครั้งจะเป็นการเหมาะสมมากกว่าถ้าใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหรือแบบฟลูอิดไคซ์เบด ดังนั้น การเลือกประเภทของเครื่องอบแห้งควรทำโดยมีการเปรียบเทียบอย่างถี่ถ้วน

4. สามารถใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิสูงได้

โครงสร้างของเครื่องอบแห้งแบบหมุนสามารถทนอุณหภูมิสูง ๆ ได้ วัสดุอบแห้งหลาย ๆ ชนิด สามารถอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิหลายร้อยองศาเซลเซียสได้ถ้าใช้การไหลแบบขนานในกรณีเช่นนั้นจะกินกำลังไฟน้อยกว่าเครื่องอบแห้งประเภทอื่น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้สูงกว่า 70% ได้ ถ้ามีการหมุนเวียนอากาศส่วนใหญ่ที่ใช้แล้วกลับมาใช้งานอีก

จากคุณลักษณะของเครื่องอบแห้งประเภทต่าง ๆ จะเห็นว่า เครื่องอบแห้งแบบหมุนมีลักษณะเด่นในเรื่องของ ความคงทน ความสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ๆ และอบแห้งอย่างต่อเนื่องในปริมาณมาก อีกทั้งสามารถให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีความชื้นเหลือค่อนข้างสม่ำเสมอ ทั้ง ๆ ที่ความชื้นของวัสดุที่ป้อนเข้าอาจเปลี่ยนแปลงอย่างไม่สม่ำเสมอ

การกำหนดอุณหภูมิสูงสุดของลมร้อนที่ใช้จะต้องพิจารณาถึงพฤติกรรมของวัสดุ และสภาพการสัมผัสระหว่างวัสดุและลมร้อนภายในเครื่องอบแห้งตัวจริง ค่าอุณหภูมิสูงสุดของลมร้อนที่ใช้ได้นี้จะต้องไม่ใช่ค่าที่หาได้จากการอบแห้งที่อยู่นิ่งอยู่กับที่ เคยปรากฏตัวอย่างมาแล้วว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์เสื่อมลงภายใต้สภาวะการอบแห้งอย่างอยู่นิ่งที่อุณหภูมิ 160 °ซ แต่ไม่เกิดการเสื่อมคุณภาพในเครื่องอบแห้งแบบหมุนที่มีการไหลแบบขนานทั้ง ๆ ที่ใช้ลมร้อนที่ 850 °ซ ด้วยเหตุนี้การตอบคำถามเกี่ยวกับเรื่องนี้จะต้องอาศัยวิธีการตรวจสอบข้อมูลของการปฏิบัติงานจริง ๆ หรืออาศัยวิธีการทดสอบในเครื่องอบแห้งตัวจริงภายใต้สภาวะที่เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากซีเอ็มซีที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นผงเล็ก ๆ จากตารางที่ 3.1 [15: บรรณานุกรม] และ ตารางที่ 3.2 [15: บรรณานุกรม] แสดงการเลือกเครื่องอบแห้ง วัสดุชนิดผงและเม็ดสามารถใช้ได้กับเครื่องอบแห้งหลายประเภท สำหรับโรงงานพิเศษนี้จะเลือกออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุน เนื่องจากสามารถอบแห้งอย่างต่อเนื่องในปริมาณมาก วัสดุชิ้นได้สัมผัสกับอากาศร้อนอย่างทั่วถึง และผลิตภัณฑ์มีความชื้นเหลือค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ทั้งนี้ก่อนที่จะนำซีเอ็มซีที่ผลิตได้เข้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบหมุนจะต้องแยกไอโซโทรพานอลออกก่อน ซึ่งสำหรับการผลิตจำนวนมากจะต้องใช้ Decanter สำหรับไอโซโทรพานอลที่แยกได้จะต้องนำไปทำให้บริสุทธิ์เพื่อนำกลับไปใช้ในการสังเคราะห์ซีเอ็มซีใหม่ การที่ไม่ถ้าจะเลือกเครื่องอบแห้งประเภทฟลูอิดซ์เบดเพราะจะมีความซับซ้อนในการคำนวณมากกว่า อีกทั้งจะต้องออกแบบ Cyclone ที่ดักวัสดุหลังจากการอบแห้งและยังจะต้องสูญเสียพลังงานในการอบแห้งมากทำให้ค่าใช้จ่ายสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การเลือกเครื่องอบแห้ง [15 : บรรณานุกรม]

| สภาวะของวัสดุ เปียก | ตัวอย่างของวัสดุ | แบบของการปฏิบัติการ | ประเภทของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม | |
|----------------------------|--|---|---|--|
| | | | A (กรณีทั่วไป) | B (กรณีเฉพาะ) |
| 1. สารละลายและ สเลอรี | สารละลายเกลือ, สารสกัดจากพืช ผงซักฟอก, สารละลายของเรซิน (resin), ฝุ่นแผ่น, น้ำมัน | แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก | a. แบบพ่นฝอย (spray) | |
| | | แบบต่อเนื่องปริมาณ น้อย | b. แบบดรัม (drum) (ดรัมสูญญากาศ) | |
| 2. วัสดุแช่แข็ง | ยา, อาหาร (ก้อน, ผง) | ไม่ต่อเนื่อง (batch) ปริมาณน้อย | a. แบบแช่แข็ง (freeze dry) | |
| | | กึ่งต่อเนื่อง (semibatch) ปริมาณมาก | | |
| 3. วัสดุคล้ายแป้ง เปียก | ซิลิเนียม, ฝุ่นทราย (silica gel), แป้ง, ดินเหนียว, ออกไซด์แดง, สี ผง, โทเทเนียม ขาว, ผงถ่าน, เด็ก กรอง, ตะกอน แคลเซียมคาร์บอ เนต ฯลฯ | แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก | a. แบบพาหะลม (pneumatic conveying) b. แบบแบนด์ไหล ผ่าน (through flow band) หรือ อุโมงค์ (tunnel) | c. แบบอุโมงค์ ไหลขนาน d. แบบพ่นฝอย |
| | | แบบต่อเนื่องปริมาณ น้อย | c. แบบทรงกระบอก นำความร้อนและ แบบรางกวนนำ ความร้อน f. แบบดรัม (ดรัมสูญญากาศ) | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

| สภาวะของวัสดุ เปียก | ตัวอย่างของวัสดุ | แบบของการปฏิบัติการ | ประเภทของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม | |
|---|---|-------------------------------|--|---|
| | | | A. (กรณีทั่วไป) | B. (กรณีเฉพาะ) |
| | | แบบไม่ต่อเนื่องปริมาณ น้อย | g. แบบทรงกระบอก นำความร้อนและ แบบรางกวนนำ ความร้อน (รวมสูญญากาศ) h. แบบกล่องไหลผ่าน ผ่าน (through flow chamber type) | i. แบบกล่องไหล ขนาน (parallel-flow box type) j. แบบกล่องสูญญา กาศ |
| 4. วัสดุชนิดผงและ เม็ด ¹⁾ | ยิบซั่ม, ilmenite, ข้าว, ข้าวโพด, ยางสังเคราะห์ของ พีวีซีและอื่น ๆ, activated carbon, ทราย, ปุ๋ยเคมี, ปุ๋ยฟอสเฟตหลอม รูป | แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก | a. แบบพาหนะลม b. แบบรางกวนใช้ อากาศร้อน (Air-heated, agitated trough) c. แบบหมุน (ro tary) d. แบบหมุนและมี ท่อไอน้ำ e. แบบ fluidized bed f. แบบไหลผ่านชนิด หมุน (through flow rotary), แบบไหลผ่านชนิด ตั้ง (through-flow vertical type) | g. แบบแบนด์ (อุโมงค์) ไหลผ่าน h. แบบจานหลายชั้น (multi disk) i. แบบกึ่งหัน (เทอร์ โบ) ตั้งและแบบตั้ง |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

| สภาวะของวัสดุ เปียก | ตัวอย่างของวัสดุ | แบบของการปฏิบัติการ | ประเภทของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม | |
|-----------------------------------|--|-------------------------------|---|---|
| | | | A. (กรณีทั่วไป) | B. (กรณีเฉพาะ) |
| | | แบบต่อเนื่องปริมาณ น้อย | j. แบบทรงกระบอก นำความร้อนและ แบบรางกวนนำ ความร้อน k. แบบ fluidized bed | |
| | | แบบไม่ต่อเนื่องปริมาณ น้อย | 1. แบบ fluidized bed m. แบบทรงกระบอก นำความร้อน และแบบรางกวน นำความร้อน (รวมสูญญากาศ) | n. แบบกล่องไหลผ่าน o. แบบแบนด์ (อุโมงค์) ไหลผ่าน |
| 5. วัสดุที่เป็นก้อน ²⁾ | ถ่านบดย่อย, ไม้คอก, แร่, เค้กกรองบาง ประเภท, ตะกอน | แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก | a. แบบหมุน b. แบบไหลผ่านชนิด หมุน, แบบไหล ผ่านชนิดตั้ง c. แบบหมุนและมีท่อ ไอน้ำ | d. แบบอุโมงค์ไหล ขนาน (แบนด์) e. แบบแบนด์ไหลผ่าน (อุโมงค์) |
| | | แบบไม่ต่อเนื่องปริมาณ น้อย | | f. แบบกล่องไหล ขนาน g. แบบกล่องไหลผ่าน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

| สถานะของวัสดุ เปื่อย | ตัวอย่างของวัสดุ | แบบของการปฏิบัติการ | ประเภทของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม | |
|-------------------------|--|--------------------------------------|---|----------------------------------|
| | | | A. (กรณีทั่วไป) | B. (กรณีเฉพาะ) |
| 6. วัสดุที่เป็นสะเก็ด | โพลียูรีเทน, ตัวเหลือง อัดแบน, ซีนมัน ฝรั่งทอด | แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก | a. แบบแบนด์ไหล ผ่าน b. แบบหมุนและมีท่อ ไอน้ำ c. แบบไหลผ่านชนิด แบน | d. แบบอุโมงค์ไหล ขนาน |
| | | แบบไม่ต่อเนื่องปริมาณ น้อย | e. แบบกล่องไหลผ่าน | |
| 7. วัสดุเส้นใยสั้น | เส้นใยสั้น, lin- ter, เส้นแป้ง, เซลลูโลสชนิดแอ ซิเตดและไนเตรด | แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก | a. แบบแบนด์ไหลผ่าน | |
| | | แบบต่อเนื่องปริมาณ น้อย | b. แบบกล่องไหลผ่าน | |
| 8. วัสดุเม็ดแข็งที่ | โพลียูรีเทน, เครื่อง ใช้ เซรามิก, เส้น ไหม, กระดาษผง, เครื่องสุขภัณฑ์เซรา มิก, หนังกุ้ง, ไม้ อัด, เส้าไม้, กระดาษชนิดหนา และบาง | แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก | a. แบบอุโมงค์ (แบนด์) ไหลขนาน | b. แบบอุโมงค์ (แบนด์) ไหลผ่าน |
| | | แบบไม่ต่อเนื่องปริมาณ มากหรือน้อย | c. แบบกล่องไหล ขนาน | d. แบบ dielectric |
| | | แบบไม่ต่อเนื่องปริมาณ น้อย | | e. แบบกล่องไหลผ่าน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

| สภาวะของวัสดุ เป็ยก | ตัวอย่างของวัสดุ | แบบของการปฏิบัติการ | ประเภทของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม | |
|---------------------------------|--|---------------------------------|--|--------------------------|
| | | | A. (กรณีทั่วไป) | B. (กรณีเฉพาะ) |
| 9. วัสดุแบบแผ่นยาว ต่อเนื่อง | ผ้าทอ, กระดาษ, กระดาษพิมพ์, sliver | แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก | a. แบบฉีดพ่น (nozzle jet) b. แบบไหลขนาน c. แบบทรงกระบอก หลายลูก (multicylinder) | |
| | | แบบต่อเนื่องปริมาณ น้อย | d. แบบทรงกระบอก ลูกเดียวหรือหลาย ลูก | e. แบบรังสีอินฟรา เรด |
| 10. สีและของเหลว ที่ใช้ทา | | แบบต่อเนื่องและไม่ต่อ เนื่อง | a. แบบรังสีอินฟรา เรด b. แบบฉีดพ่น (nozzle jet) | c. แบบไหลขนาน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การจำแนกประเภทของเครื่องอบแห้ง [15 : บรรณานุกรม]

| | สภาวะของวัสดุ | ประเภทของเครื่องอบแห้ง | วิธีปฏิบัติการ | การไหลของลมร้อน | ปริมาณที่อบแห้ง | วัสดุที่เหมาะสม (ลำดับขั้นของความเหมาะสม) | |
|-------------|--|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------|---|-----------|
| | | | | | | ดีมาก | ดี |
| ให้ความร้อน | อยู่นิ่ง | แบบกล่อง (chamber) | ไม่ต่อเนื่อง | ขนาน | น้อย | 7 | 2, 4 |
| | | | | ไหลผ่าน | | 2, 5, 6 | 3, 4, 7 |
| ด้วยลมร้อน | เคลื่อนที่ | แบบอุโมงค์ (tunnel) | ต่อเนื่อง | ขนาน | มาก | 2, 7, 8 | 4, 5, 9 |
| | | ฉีดพ่น (nozzle jet) | ต่อเนื่อง | สวนทาง | มาก | 8, 9 | |
| | | แบบแบนด์ (band) | ต่อเนื่อง | ไหลผ่าน | มาก | 2, 5, 6 | 3, 4, 7 |
| | | แบบกั้นตั้ง | ต่อเนื่อง | ไหลผ่าน | มาก | 3 | |
| | | แบบตั้ง | | | | 3, 4 | |
| กวน | แบบหมุน (rotary) แบบไหลผ่านชนิดหมุน (through flow rotary) | ต่อเนื่อง | ขนาน, ไหลผ่าน, กระจัดกระจาย | มาก | 3, 4, 5 | | |
| | | | | | | แบบรางกวน (agitated trough) | ต่อเนื่อง |
| | | แบบ fluidized bed | ต่อเนื่อง หรือไม่ต่อเนื่อง | กระจัดกระจาย (disperse) | มาก | 3 | |
| | | แบบจานหลายชั้น (multidisk) | ต่อเนื่อง | ขนาน | มาก | | 3 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

| | สภาวะของวัสดุ | ประเภทของเครื่องอบแห้ง | วิธีปฏิบัติการ | การไหลของลมร้อน | ปริมาณที่อบแห้ง | วัสดุที่เหมาะสม (ลำดับชั้นของความเหมาะสม) | |
|------------------------------|----------------|---|---------------------------|-----------------|-----------------|---|------|
| | | | | | | ดีมาก | ดี |
| | พาไหลโดยลมร้อน | แบบพ่นฝอย (spray) | ต่อเนื่อง | กระจัดกระจาย | มาก | 1, 2 | |
| | | แบบพาหะลม (pneumatic conveying) | ต่อเนื่อง | กระจัดกระจาย | มาก | 2, 3 | |
| ให้ความร้อน โดยการนำความร้อน | อยู่นิ่ง | freeze dryer หรือแบบกล่องสุญญากาศ | ไม่ต่อเนื่อง | | น้อย | 10 | 2, 3 |
| | เคลื่อนที่ | แบบดรัม (drum) | ต่อเนื่อง | | น้อย | 1, 2 | |
| | | แบบทรงกระบอกหลายลูก (multicylinder) | ต่อเนื่อง | | มาก | 8 | |
| กวน | | แบบทรงกระบอกกวนและแบบรางกวน (ความดันบรรยากาศ, สุญญากาศ) | ไม่ต่อเนื่องหรือต่อเนื่อง | | น้อย | 2, 3 | |
| | | แบบหมุนและมีมัดท่อไอน้ำ | ต่อเนื่อง | | มาก | 3, 4, 5 | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

| | สภาวะ ของวัสดุ | ประเภทของเครื่องอบ แห้ง | วิธีปฏิบัติ การ | การไหลของ ลมร้อน | ปริมาณที่ อบแห้ง | วัสดุที่เหมาะสม (ลำดับ ชั้นของความเหมาะสม) | |
|--|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---|----|
| | | | | | | ดีมาก | ดี |
| | อื่น ๆ | เครื่องอบแห้งแบบ อินฟราเรด | ต่อเนื่อง หรือไม่ต่อ เนื่อง | | น้อย, มาก | 9 | 8 |
| | | เครื่องอบแห้งแบบ dielectric | ต่อเนื่องหรือ ไม่ต่อเนื่อง | | น้อย, มาก | | 7 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง (Drying fundamentals) [16 : บรรณานุกรม]

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย สิ่งที่สำคัญในการอบแห้งคือ การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

ในกระบวนการอบแห้ง จะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของอากาศชื้น ดังนั้นจึงควรที่จะมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณสมบัติของอากาศชื้น ดังนี้

3.2.1 ความดันไอ (Vapour pressure)

ความดันไอ (P_v) คือ ส่วนของความดันย่อย (Partial pressure) ที่กระทำโดยโมเลกุลของไอน้ำที่อยู่ในอากาศชื้น ถ้าอากาศชื้นนี้อิ่มตัวด้วยไอน้ำเรียกความดันนี้ว่า ความดันไออิ่มตัว (Saturated vapour pressure, P_{vs}) ค่าความดันไออิ่มตัวนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิคือ ถ้าอุณหภูมิสูง ความดันไออิ่มตัวก็จะสูงขึ้นด้วย

3.2.2 อัตราส่วนความชื้นสมดุล (Equilibrium humidity)

อัตราส่วนความชื้นสมดุล (w_e) คือ ปริมาณความชื้นที่ยังมีอยู่ในวัสดุชื้น ที่มีปริมาณเท่ากับ ความชื้นของอากาศภายนอก ทำให้ไม่มีการแพร่ของความชื้นเข้าไปในวัสดุชื้นเมื่อทิ้งไว้ที่ความดันบรรยากาศภายนอก

3.2.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity)

ความชื้นสัมพัทธ์ (R_H) คือ ความชื้นที่มีอยู่ในอากาศโดยคิดจากสัดส่วนของปริมาณไอน้ำ ที่มีอยู่จริงที่อุณหภูมินั้นต่อสัดส่วนของปริมาณไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน ปกติค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 100%

3.2.4 ความชื้น (Humidity ratio)

ความชื้น (H) คือ มวลของไอน้ำที่อยู่ในอากาศแห้งหนึ่งหน่วยมวล

3.2.5 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature)

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (t_d) คือ อุณหภูมิของอากาศชั้นภายในห้องที่ทำการวัดในขณะนั้น โดยนำเทอร์โมมิเตอร์ไปแขวนอย่างอิสระที่ใดที่หนึ่ง

3.2.6 อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-bulb temperature)

อุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_w) คือ อุณหภูมิของอากาศชั้นที่วัดขณะที่กระเปาะเทอร์โมมิเตอร์ ถูกหุ้มด้วยผ้าก๊อซหรือสำลีเปียก และมีลมพัดผ่านกระเปาะเปียกนี้ด้วยความเร็วอย่างต่อเนื่อง 4.6 เมตร/วินาที อุณหภูมิที่ได้จากการวัดวิธีนี้อาจเรียกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงไซโครเมตริก

อุณหภูมิกระเปาะเปียกวัดอีกแบบหนึ่ง โดยพ่นละอองน้ำภายในสถานที่ที่จะวัด น้ำจะระเหยเข้าไปในชั้นบรรยากาศมากที่สุดจนไม่สามารถระเหยได้อีกเป็นอากาศที่อิ่มตัว ซึ่งอุณหภูมิที่ได้จากการวัดวิธีนี้อาจ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงเทอร์โมไดนามิกส์

อุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ได้จากการวัด โดยวิธีทั้งสองนี้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ในทางปฏิบัติ นิยมใช้ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงไซโครเมตริกในการคำนวณเพราะว่าทำการวัดได้ง่ายกว่า

3.2.7 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-point temperature)

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (t_{dp}) คือ อุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศเริ่มควบแน่นเมื่ออากาศนั้นถูกทำให้เย็นลงที่อัตราส่วนความชื้นและความดันบรรยากาศคงที่

3.2.8 เอนทัลปีของอากาศชื้น (Enthalpy)

เอนทัลปีของอากาศชื้น (h) คือ ค่าปริมาณความร้อนของอากาศชื้นที่สูงกว่าอุณหภูมิอ้างอิงที่กำหนดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง โดยที่อุณหภูมิอ้างอิงเป็นอุณหภูมิใด ๆ ก็ได้ ในทางปฏิบัตินิยมใช้อุณหภูมิอ้างอิงของน้ำที่ 32 °ฟ และของอากาศแห้งที่ 0 °ฟ (ในระบบอังกฤษ) และอุณหภูมิอ้างอิงของน้ำ และอากาศแห้งที่ 0 °ซ (ในระบบเมตริก และระบบสากล) ความดัน 1 บรรยากาศ

3.2.9 ปริมาตรจำเพาะชื้น (Humid volume)

ปริมาตรจำเพาะชื้น (v_H) คือ ปริมาตรรวมของอากาศแห้ง 1 กก. และของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุอบแห้ง จะให้นิยามดังนี้

w_d = อัตราส่วนความชื้นของวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุแห้ง (Moisture content)

w_w = อัตราส่วนความชื้นของวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุเปียก ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตลอด

เวลา ดังนั้นจึงนิยามที่จะใช้มวลของวัสดุแห้งเป็นมาตรฐานในการคำนวณความชื้น

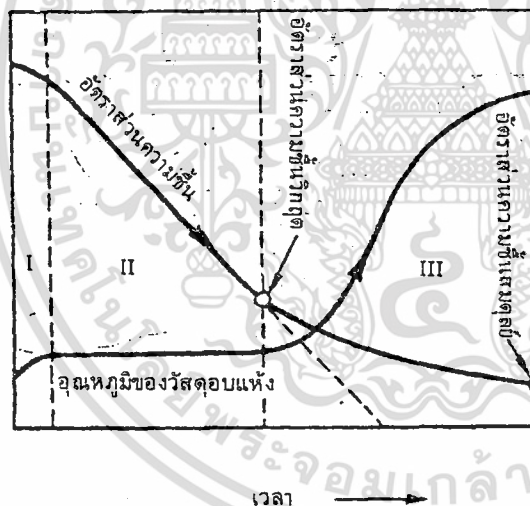
w_d สัมพันธ์กับ w_w ดังนี้ [15 : บรรณานุกรม]

$$w_d = w_w / (1 - w_w)$$

$$w_w = w_d / (1 + w_d)$$

3.3 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (Drying characteristic curve)

การอบแห้งวัสดุที่เปียกชื้นอย่างมากภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งที่คงที่ เช่น ในกรณีที่วางวัสดุเปียกชื้นภายในกระแสมวลปริมาณมากที่มีอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมคงที่ เมื่อวัดการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลา จะได้เส้นกราฟดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลา [15 : บรรณานุกรม]

การอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ ๆ คือ

1. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ
2. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่
3. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

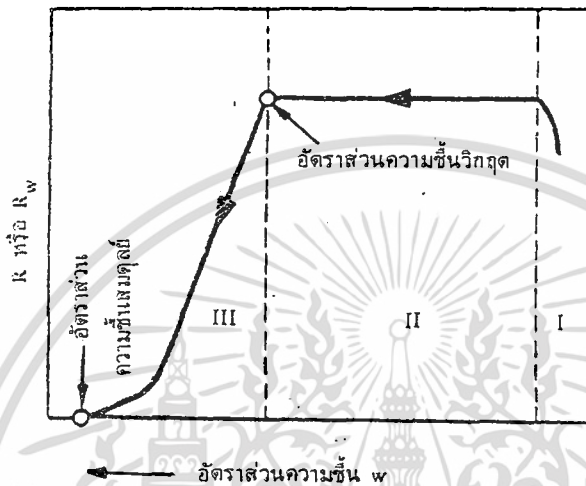
ที่ผิวของวัสดุที่เปียกชื้น ความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet - bulb temperature) ของกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้ คือ ช่วง I. ในรูปที่ 3.13 ในช่วงที่ II ที่ถัดไป อุณหภูมิจะมีค่าคงที่ประมาณ t_w ควบไคที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในการระเหยช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น ดังเห็นได้จากรูป อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย w ของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วง II นี้ ดังนั้น ความเร็วของการระเหยจะมีค่าคงที่ (Constant drying rate) ในช่วง III ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิวของวัสดุ ดังนั้นผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้ง และอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น สรุปแล้วความเร็วของการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลง เพราะปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับนอกจากจะลดลงแล้ว ความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้น และเพิ่มอุณหภูมิจนของวัสดุด้วยการอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล w_e (Equilibrium moisture content) ค่าของอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่จุดต่อระหว่าง II กับ III มีชื่อเรียกว่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤติ w_c (Critical moisture content) ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย w ไค ๆ และ w_e มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นอิสระ F_r (Free moisture content) F_r คือ ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไปได้โดยการอบแห้ง ในกรณีของวัสดุที่มีช่วง II และ III นานมาก จะไม่คำนึงช่วง I ก็ได้ อนึ่งในกรณีของวัสดุที่ไม่เปียกชื้น หรือในกรณีของวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะบางชนิด อาจไม่มีช่วง II เลยก็ได้

เงื่อนไขของการอบแห้งอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เงื่อนไขภายนอกวัสดุที่ก่อให้เกิดการอบแห้ง และเงื่อนไขภายในตัววัสดุอบแห้งเอง เงื่อนไขภายนอกวัสดุจะเกี่ยวข้องกับวิธีการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุ และวิธีกำจัดไอน้ำที่ระเหยออกมา ส่วนเงื่อนไขภายในตัววัสดุอบแห้ง ได้แก่ องค์ประกอบ และรูปร่าง อัตราส่วนความชื้น อัตราส่วนความชื้นสมดุลของวัสดุอบแห้ง เป็นต้น สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความเร็วของการอบแห้งมี อาทิ เช่น R (กก. น้ำ/ชม. ตร.ม.), R_w (กก.น้ำ/ชม. กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง) เป็นต้น ถ้าให้ M เป็นมวลของวัสดุแห้ง (กก.) และ A_s เป็นพื้นที่ของการอบแห้ง (ตร.ม.) จะได้ [15 : บรรณานุกรม]

$$R = R_w(M/A_s)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นกราฟที่ได้จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการอบแห้ง และ w มีชื่อเรียกว่า เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยกับเวลาในรูปที่ 3.13 คือ R_w ถ้าเขียนกราฟของ R_w หรือ R กับ w จะได้รูปที่ 3.14 (ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงการหดตัวของพื้นผิววัสดุ บางทีหาช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ไม่พบ)



รูปที่ 3.14 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง [15 : บรรณานุกรม]

3.4 ตัวแปรที่สำคัญต่อการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุน [15 : บรรณานุกรม]

3.4.1 จำนวนรอบของการหมุน (N : รอบ/นาที) ของตัวทรงกระบอก

โดยทั่วไปแล้วใช้สมการดังต่อไปนี้ [15 : บรรณานุกรม]

$$ND_T = 7 - 12 \text{ เมตร/นาที}$$

โดยที่ D_T = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวทรงกระบอก (เมตร)

3.4.2 ความเร็วเชิงมวล (G : กก. ก๊าซ / ชม. ตร.ม.) ของลมร้อนในตัวทรงกระบอก

เพื่อจำกัดปริมาณของฝุ่นที่เกิดจากลมร้อนให้น้อยกว่า 3%

$$G \cong 2000 \text{ กก. ก๊าซ / ชม. ตร.ม.} \quad \text{สำหรับอนุภาคละเอียดเบา}$$

$$G \cong 6000 \text{ กก. ก๊าซ / ชม. ตร.ม.} \quad \text{สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่}$$

ในที่นี้ $G = u\rho_g$ เมื่อ u = ความเร็วของก๊าซ (เมตร/ชม.)

$$\rho_g = \text{ความหนาแน่นของก๊าซ (กก./ลบ.ม.)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 จำนวนแผ่นยก (Lifters : n)

ตามปกติ จำนวน n ได้จาก [15 : บรรณานุกรม]

$$n/D_T = 8 - 10$$

3.4.4 อัตราส่วนของวัสดุที่มีอยู่ในเครื่อง (X : %)

อัตราส่วนของวัสดุที่มีอยู่ในเครื่อง X คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ภาคตัดขวางที่ถูกครอบครองโดยวัสดุกับพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวทรงกระบอก ($\pi D_T^2/4$) ค่าที่เหมาะสมที่สุดของ X ประมาณ 6 - 12% [15 : บรรณานุกรม]

3.4.5 มุมเอียงของตัวเครื่อง (S_D : เมตร/ความยาวเครื่อง(เมตร))

ค่าของ S_D ประมาณคร่าว ๆ ได้จาก [15 : บรรณานุกรม]

$$X = (0.4F/60NS_D D_T)(100)$$

ในที่นี้ F คือ ความเร็วของการป้อนวัสดุ (ลบ.ม./ชม. ตร.ม. ของพื้นที่หน้าตัดของเครื่อง) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$F = W_0 / \{\rho_B (\pi D_T^2 / 4)\}$$

โดยที่ W_0 = อัตราการป้อนวัสดุไร้ความชื้น (กก.วัสดุไร้ความชื้น/ชม.)

ρ_B = ความหนาแน่นปรากฏของวัสดุ (กก./ลบ.ม.)

$$S_D = 0 - 0.06$$

3.4.6 ผลการลดความดันของก๊าซที่ไหลผ่านเครื่อง

โดยทั่วไป ผลการลดความดันมีค่าประมาณ 1 มม.น้ำ/ความยาวของเครื่อง (เมตร)

3.4.7 กำลังสำหรับการหมุนขับเคลื่อนของเครื่อง (P : กำลังม้า)

วิธีการคำนวณโดยละเอียดก็มีแต่สามารถคำนวณประมาณคร่าว ๆ

ได้จาก [15 : บรรณานุกรม]

$$P = D_T L$$

โดยที่ L = ความยาวของเครื่อง (เมตร)

3.4.8 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (h_v : กิโลแคลอรี/ชม. ลบ.ม. °ซ)

สมการที่ได้จากการทดลองมีให้ใช้หลายสมการ ปกติค่าของ h_v อยู่ในช่วง 100 - 200 กิโลแคลอรี/ชม. ลบ.ม. °ซ และลดลงเมื่อ D_T เพิ่มขึ้น

$$\text{สำหรับการไหลแบบสวนทาง} \quad h_v D_T = 19X^{0.5} G_o^{0.16} \quad (1)$$

$$\text{สำหรับการไหลแบบขนานและแบบสวนทาง} \quad h_v D_T = 0.56(n - 1)^5 G_o^{0.46} \quad (2)$$

G_o = ความเร็วเชิงมวลของลมร้อน (กก.ก๊าซ/ชม. ตร.ม.)

เนื่องจากค่าของ h_v จะลดลงอย่างมากถ้าเกิดการรวมตัวของวัสดุ ดังนั้น จึงควรใช้ค่าที่น้อยที่สุดที่หาได้ ในกรณีที่เครื่องอบแห้งแบบหมุนถูกใช้เป็นเครื่องระบายความร้อนสำหรับวัสดุเม็ด ค่าของ h_v จะเป็น 2 - 6 เท่าของค่าที่คำนวณได้จากสมการ (1) และ (2)

3.4.9 อุณหภูมิของก๊าซที่ปล่อยออกมา (t_1 : °ซ)

การกำหนดอุณหภูมิของก๊าซที่ปล่อยออกมาควรคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายเดินเครื่อง ค่า t_1 ที่เหมาะสมหาได้จาก

$$(t_2 - t_1)/(\Delta t)_{avg} = 1.4 - 2.0$$

$(\Delta t)_{avg}$ = เป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างอุณหภูมিরะหว่างก๊าซกับวัสดุที่ทางเข้าและทางออกของวัสดุ

t_2 = เป็นอุณหภูมิที่ทางเข้าของก๊าซ, °ซ

3.4.10 เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในเครื่อง (T : ชม.)

ค่าของ T คำนวณได้จาก [15 : บรรณานุกรม]

$$T = LX/100F$$

บทที่ 4

การดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง

1. สั่งเคราะห์ซีเอ็มซีจากเซลลูโลสชนิดผง (Powdered cellulose) ในถังปฏิกรณ์เคมี ขนาด 2 ลิตร และ 24.7 ลิตร
2. เลือกชนิดเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตซีเอ็มซี และหาค่าพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณเครื่องอบแห้ง

4.1 อุปกรณ์การทดลองและสารเคมี

4.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. ถังปฏิกรณ์เคมีขนาดความจุ 24.7 ลิตร สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ANSI 304 พร้อมใบพัดกวนประเภท Anchor
2. ถังปฏิกรณ์เคมีขนาดความจุ 2 ลิตร สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ANSI 304 พร้อมใบพัดกวนประเภท Anchor
3. เครื่องกวนเชิงกล (Mechanical stirrer) IKA LABOR TECHNIK รุ่น EUROSTAR POWER DIGITAL 230 โวลต์ 130 วัตต์
4. เครื่องกวนเชิงกลกระแสสลับขนาด 2 แรงม้า
5. เครื่องควบคุมการกวนของเครื่องกวน Adjustable frequency AC motor drive รุ่น M - tronic K1
6. เครื่องควบคุมกำลังบิดของการกวน Constant torque digital indicating controller รุ่น YOKOGAWA UT15
7. เครื่องวัดและแปลงสัญญาณกระแสสลับ Current transmitter รุ่น WISCO CT 086S
8. เครื่องควบคุมแบบ PD (PD controller)
9. เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) ชนิด K
10. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 45 °ซ
11. ชุดกรองสารแบบสูญญากาศ และกระดาษกรอง
12. เทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง 0 - 100 °ซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. เครื่องดูดความชื้น (Desiccator)
14. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 80 และ 105 °ซ
15. เครื่องทำน้ำเย็น (Cooling aid)
16. ชุดกลั่นเอทานอลขนาด 10 ลิตร
17. กระดาษลิตมัส

4.1.2 สารเคมี

1. กรดคลอโรอะซีติก (ClCH_2COOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท ฟลูกา
2. กรดไนตริก (HNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท คาร์เลอร์บา
3. กรดอะซีติก (CH_3COOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
5. ซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมอร์ค
6. เซลลูโลสชนิดผง (Powdered cellulose) บริษัท ไทยเซลลูโลสโปรดักส์
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริษัท ไฟเบอร์เซลล์แอนด์คีวีลอปเมนต์
8. ไดฟีนิลามีน ($(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
9. เทตระแอมโมเนียมคลอไรด์ ($(\text{CH}_3)_4\text{N}^+\text{Cl}^-$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท ฟลูกา
10. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 95% (%โดยปริมาตร) เกรดวิเคราะห์ บริษัท คาร์เลอร์บา
11. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 80% (%โดยปริมาตร) เกรดวิเคราะห์ บริษัท คาร์เลอร์บา
12. ไอโซโพรพานอล ($(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
13. น้ำกลั่น (Distilled water)

4.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

1. ใช้ถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร
2. ใส่เซลลูโลส 72.00 กรัม
3. ใส่ Me_4NCl 0.86 กรัม (0.008 โมล)
4. ใส่ไอโซโพรพานอล 1400 มล.
5. ตั้งเครื่องมือในอ่างควบคุมอุณหภูมิ กวนด้วยความเร็ว 300 - 500 รอบ/นาที
6. ค่อย ๆ หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 36% (%โดยน้ำหนัก) 180 กรัม (1.620 โมล) จากกรวยแยกจนหมดภายใน 15 นาที
7. กวนที่อุณหภูมิห้อง 20 นาที เริ่มให้ความร้อนจนถึง 45 °ซ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ความเร็วรอบ 160, 50 รอบ/นาที เมื่อวัตถุดิบเริ่มต้นเป็น Paper pulp และ Powdered cellulose ตามลำดับ)

8. ละลาย ClCH_2COOH 73.48 กรัม (0.77 โมล) ในไอโซโพรพานอล 220 มล. แล้วเติมลงในถังปฏิกรณ์เคมี
9. ทำการปั่นกวนต่ออีก 210 นาที หลังจากนั้นหยุดปฏิกิริยาโดยการแช่น้ำเย็นที่ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$
10. ปรับให้เป็นกลางด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น แล้วกรองผ่านกระดาษกรองโดยเครื่องกรองสูญญากาศ แยกไอโซโพรพานอล ได้ซีเอ็มซีแล้วทำซีเอ็มซีให้บริสุทธิ์

4.3 การทำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้บริสุทธิ์และการหาค่าองศาการแทนที่

4.3.1 การทำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้บริสุทธิ์

1. กรองซีเอ็มซีที่เตรียมได้ด้วยเครื่องกรองแบบสูญญากาศ แล้วล้างซีเอ็มซีให้หมดเกลือโซเดียมคลอไรด์ และเกลือโซเดียมไกลโคเลต ด้วยเอทานอลที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (การทดสอบว่ามีเกลือเหลืออยู่หรือไม่ ทำโดยนำเอทานอลที่ผ่านการล้างซีเอ็มซี 5 หยดสุดท้ายมาหยดด้วยซิลเวอร์-ไนเตรต ถ้ามีตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์เกิดขึ้นแสดงว่ายังมีเกลือเหลืออยู่ต้องทำการล้างจนไม่พบตะกอนสีขาว)
2. ล้างต่อด้วยเอทานอลปราศจากน้ำ กรองให้แห้ง แล้วถ่ายตะกอนบนกระดาษกรอง
3. นำไปอบที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 5 ชม.
4. ทำให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น

4.3.2 การหาค่าองศาการแทนที่

1. นำซีเอ็มซีที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ปริมาณ 2 กรัม ผสมกับเอทานอล 95% 75 มล.
2. กวนโดยใช้ Magnetic stirrer จนสารกระจายตัวแล้วเติมกรดไนตริก 2.5 มล. ขณะปั่นกวน และกวนต่อ เริ่มให้ความร้อนและปล่อยให้เดือดเป็นเวลา 5 นาที แล้วกวนต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 - 15 นาที
3. กรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันแล้วถ่ายตะกอน ลงบีกเกอร์ 250 มล.
4. เติม เอทานอล 95% (% โดยปริมาตร) 50 - 100 มล. กวนต่อ 1 - 2 นาที กรองและล้างซีเอ็มซีให้หมด กรดไนตริกด้วยเอทานอล 80% (% โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (การทดสอบว่ามีกรดเหลืออยู่หรือไม่โดยนำเอทานอลที่ผ่านการล้างซีเอ็มซี 5 หยดสุดท้ายหยดบนกระดาษกรอง แล้วหยดสารละลายไคฟีนิลามีน 1 หยด บนกระดาษกรอง ถ้าสารละลายไคฟีนิลามีนเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินแสดงว่ายังมีกรดไนตริกเหลืออยู่ต้องทำการล้างจนสารละลายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใสจนไร้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคพินิลามีนที่หยด ไม่เปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน)

5. ล้างด้วยเมทานอลปราศจากน้ำ แล้วกรองให้แห้ง ถ่ายลงบนกระดาษฟิลา
6. อบที่อุณหภูมิ 105 °ซ เป็นเวลา 3 ชม. แล้วทิ้งให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น
7. ตะกอนซีเอ็มซีที่ได้มีสีขาว อยู่ในรูปกรด ไม่ละลายน้ำ
8. ชั่ง 0.5000 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ 250 มล. เติมน้ำกลั่น 100 มล. กวนด้วย

Magnetic stirrer

9. เปิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 นอร์มอล 10 มล. ให้ความร้อนจนเดือด และปล่อยให้เดือดเป็นเวลา 15 - 30 นาที
10. โทเทรตด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.5 นอร์มอล ใช้ฟีนอล์ฟทาไลน์เป็นอินดิเคเตอร์ จนได้สารละลายใส ไม่มีสี
11. จดบันทึกปริมาณกรดไฮโดรคลอริก

4.4 การเก็บข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบเครื่องอบแห้ง

4.4.1 การหาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

1. นำซีเอ็มซีที่ปรับสถานะเป็นกลางแล้ว มาทำการดูดความชื้นด้วยเครื่องกรอบแบบสูญญากาศ
2. ชั่งน้ำหนักงานทดลอง และนำซีเอ็มซีที่ได้จากข้อ 1 ใส่ในงานทดลองชั่งน้ำหนักงานทดลองอีกครั้ง
3. นำเข้าตู้อบที่ตั้งอุณหภูมิ 80 °ซ อ่านอุณหภูมิกระเปาะเปียก และจดบันทึกน้ำหนักซีเอ็มซี ทุก ๆ 5 นาที
4. นำมาเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง %ความชื้นกับเวลา และ R_p กับ %ความชื้น
5. หาค่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤติ และอัตราส่วนความชื้นสมดุล

4.4.2 การหาอุณหภูมิกระเปาะเปียก

1. นำบีกเกอร์ขนาด 250 มล. ใส่ไอโซโพรพานอล 150 มล.
2. ใส่ตู้อบ อบที่อุณหภูมิ 50, 60, 70, 80 และ 90 °ซ ตามลำดับ และอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 5 นาที
3. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียกกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 การหาค่าตัวแปรพื้นฐานที่ใช้ในการอบแห้ง

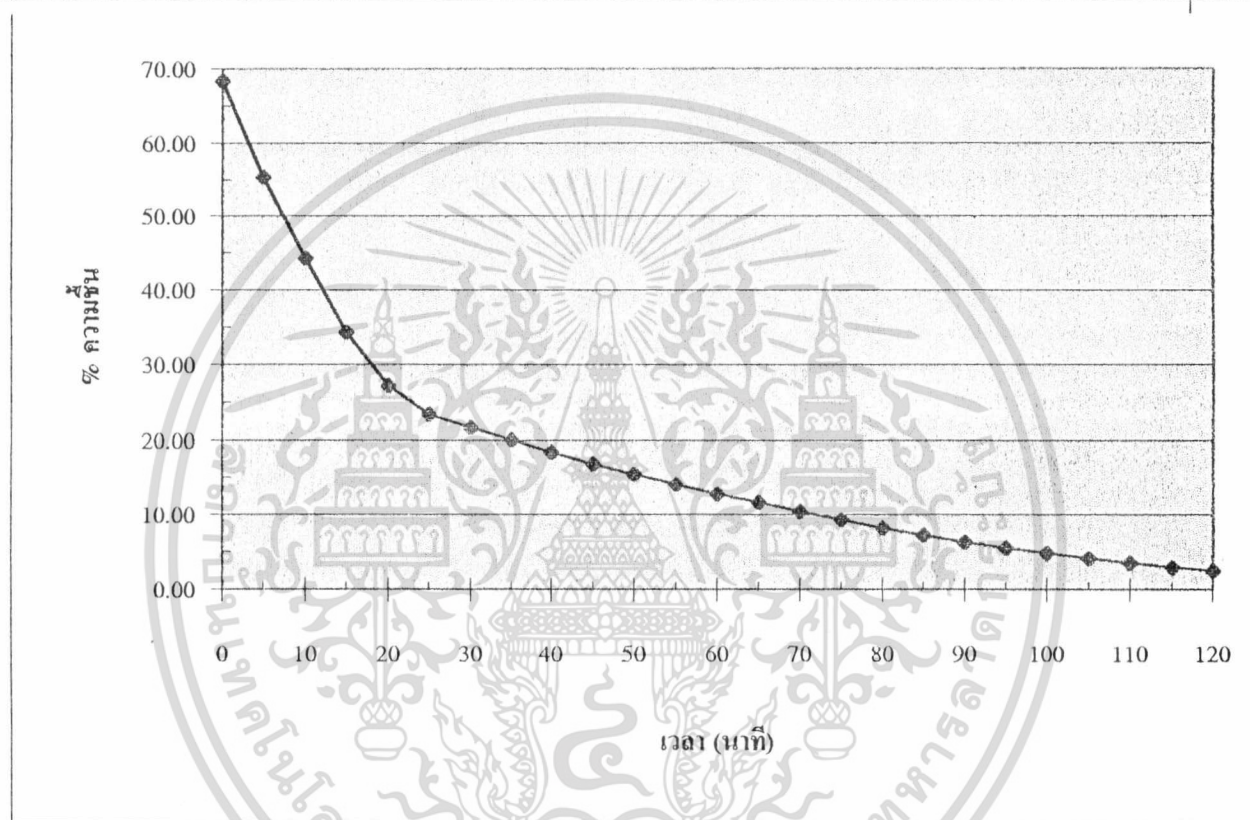
5.1.1 ผลการทดลองหาเส้นลักษณะเฉพาะการอบแห้ง

รูปที่ 5.1, 5.3 และ 5.5 แสดงผลการทดลองเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง ไอโซโทรพานอลจากซีเอ็มซี รูปที่ 5.2, 5.4 และ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการอบแห้ง ไอโซโทรพานอลและเปอร์เซ็นต์ความชื้นในซีเอ็มซี จากผลการทดลองสามารถหาค่าพื้นฐานในการอบแห้ง คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล (w_e) และ ค่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤติ (w_c) (จากรูปที่ 5.1, 5.3 และ 5.5) ได้ผลดังนี้

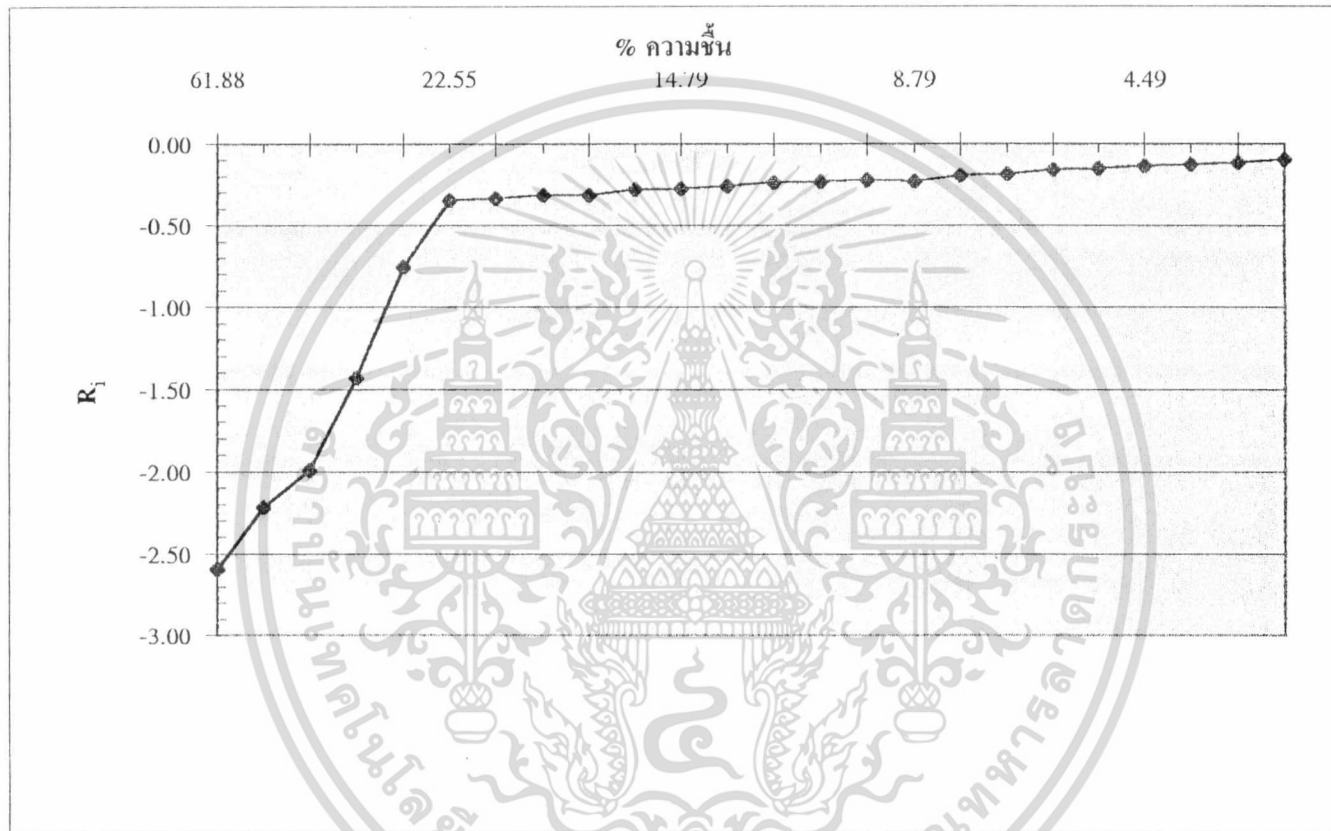
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล (w_e) ค่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤติ (w_c) และค่าอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาเข้า (w_1) จากการทดลอง

| การทดลองครั้งที่ | อัตราส่วนความชื้นสมดุล (w_e) (กก.ไอโซโทรพานอล/ กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง) | อัตราส่วนความชื้นวิกฤติ (w_c) (กก.ไอโซโทรพานอล/ กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง) | อัตราส่วนความชื้นวัสดุ ขาเข้า (w_1) (กก.ไอโซโทรพานอล/ กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง) |
|------------------|---|--|--|
| 1 | 0 | 0.22 | 0.68 |
| 2 | 0 | 0.20 | 0.70 |
| 3 | 0 | 0.22 | 0.71 |
| ค่าเฉลี่ย | 0 | 0.22 | 0.70 |

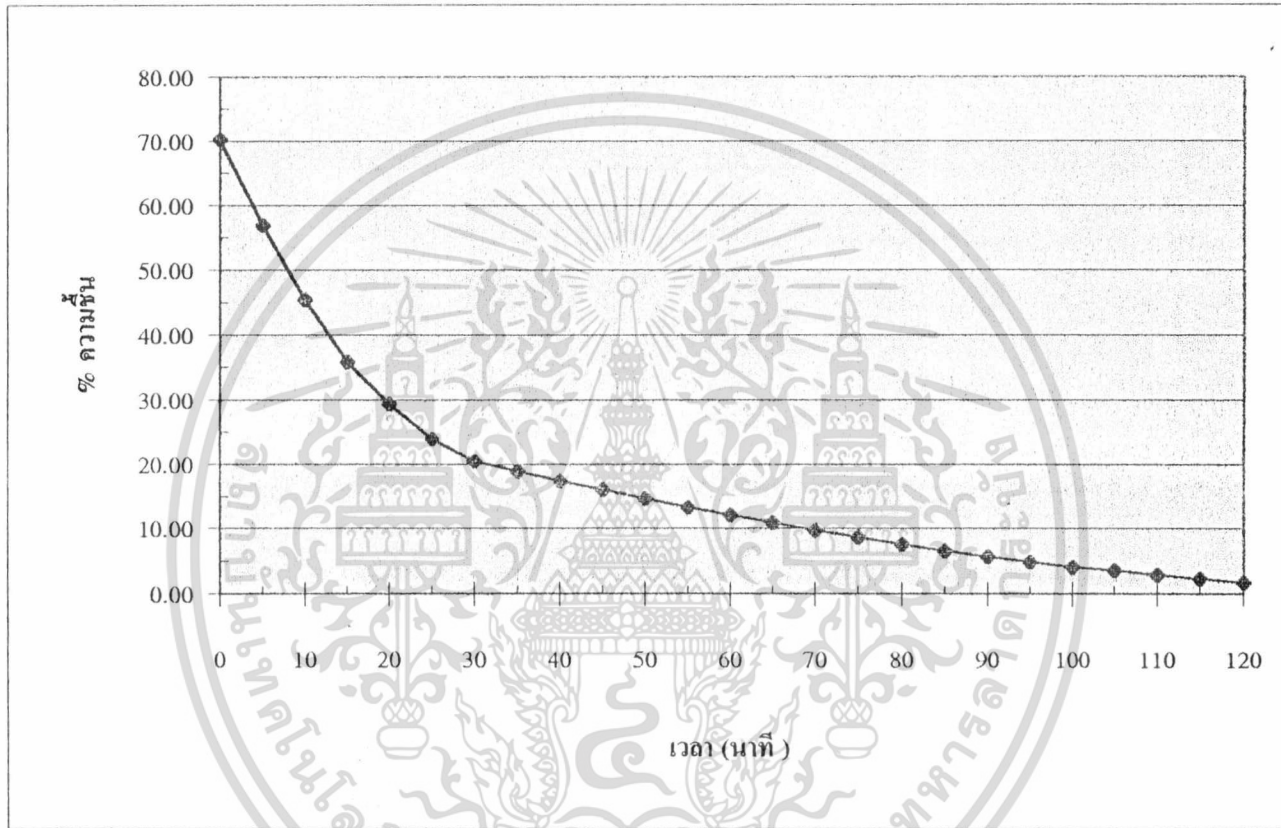
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



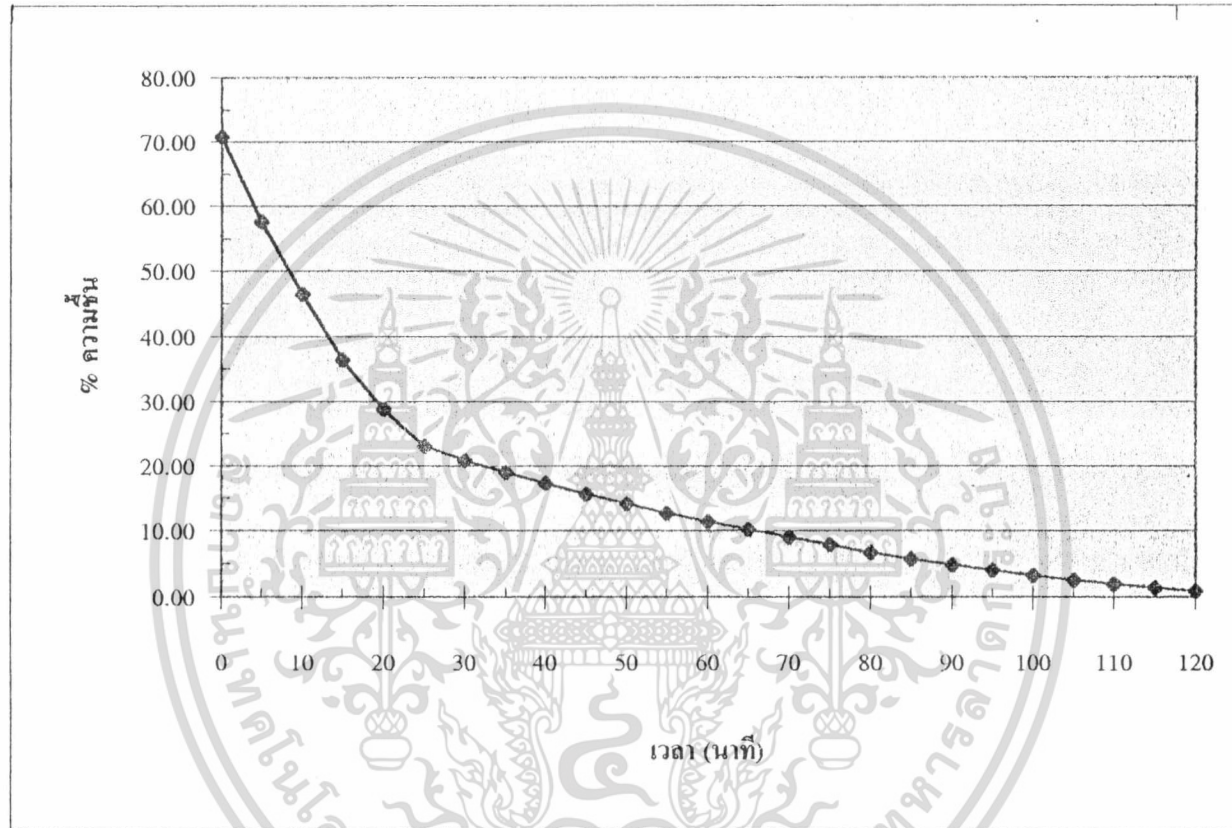
รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง (ผลการทดลองครั้งที่ 1)



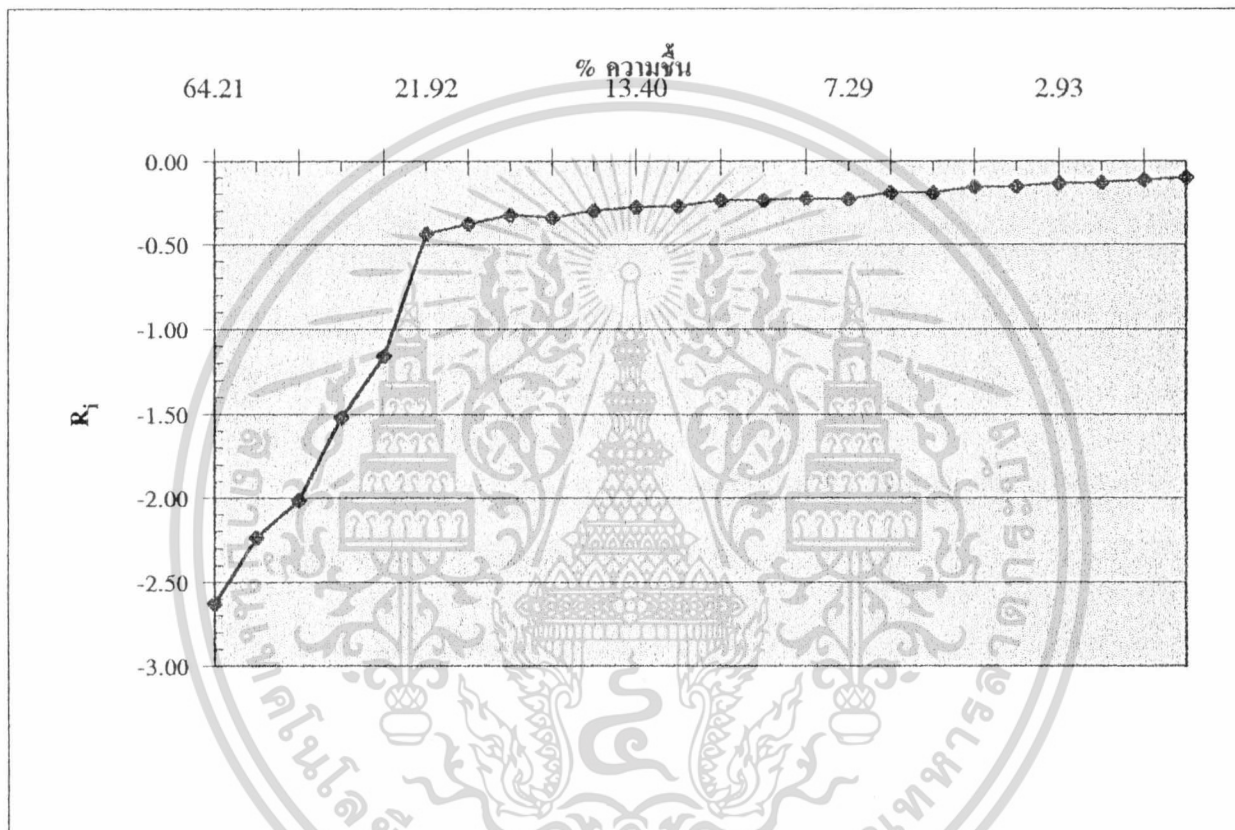
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการอบแห้ง (R_i) กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (ผลการทดลองครั้งที่ 1)



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง (ผลการทดลองครั้งที่ 2)



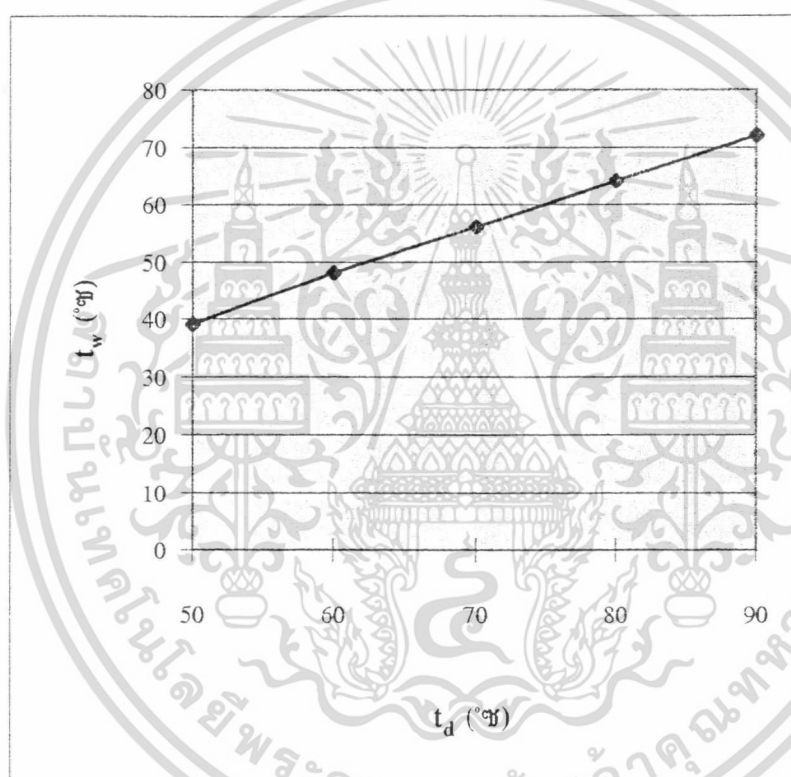
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง (ผลการทดลองครั้งที่ 3)



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการอบแห้ง (R_j) กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (ผลการทดลองครั้งที่ 3)

5.1.2 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_w , °ซ)

กับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (t_d , °ซ)

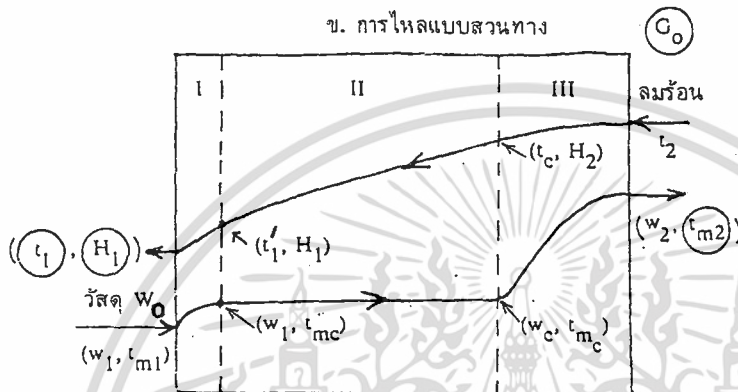


รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_w) กับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (t_d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 การคำนวณค่าตัวแปรที่จำเป็นในการหาปริมาตรเครื่องอบแห้ง

ในโครงการพิเศษนี้เลือกคำนวณออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุน โดยให้ลมร้อนไหลสวนทางกับวัสดุ ซึ่งมีค่าตัวแปรต่าง ๆ ของลมร้อนและวัสดุที่จำเป็นต่อการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงสภาพของลมร้อนและวัสดุอบแห้งภายในเครื่องอบแห้งโดยให้ลมร้อนไหลสวนทางกับวัสดุ [15 : บรรณานุกรม]

ช่วง I คือช่วงให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ ช่วง II คือช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ ช่วง III คือ ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง ตัวแปรต่าง ๆ มีความหมายดังต่อไปนี้

ตัวแปรของลมร้อน

G_0 = อัตราการไหลของอากาศแห้ง (กก.อากาศแห้ง/ชม.)

t_1 = อุณหภูมิลมร้อนขาออก ($^{\circ}\text{C}$)

t_1' = อุณหภูมิที่ช่วงต่อระหว่างช่วงให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุกับช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ ($^{\circ}\text{C}$)

t_2 = อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า ($^{\circ}\text{C}$)

t_c = อุณหภูมิวิกฤติ ($^{\circ}\text{C}$)

H_1 = ความชื้นลมร้อนขาออก (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.อากาศแห้ง)

H_2 = ความชื้นลมร้อนขาเข้า (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.อากาศแห้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรของวัสดุ

$$W_o = \text{อัตราการป้อนวัสดุไร้ความชื้น (กก.วัสดุไร้ความชื้น/ชม.)}$$

$$w_1 = \text{อัตราส่วนความชื้นวัสดุขาเข้า (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง)}$$

$$w_2 = \text{อัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออก (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง)}$$

$$w_c = \text{อัตราส่วนความชื้นวิกฤติ (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง)}$$

$$t_{m1} = \text{อุณหภูมิวัสดุขาเข้า (°ซ)}$$

$$t_{m2} = \text{อุณหภูมิวัสดุขาออก (°ซ)}$$

$$t_{mc} = \text{อุณหภูมิกระเปาะเปียกของจุด (} t_1', H_1 \text{) (°ซ)}$$

ตัวแปรอื่น ๆ นอกเหนือจากที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.8 ที่จำเป็นต่อการคำนวณ คือ

$$w_c = \text{อัตราส่วนความชื้นสมดุล (กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง)}$$

$$t_w = \text{อุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน (°ซ)}$$

$$C_1 = \text{ความร้อนจำเพาะของไอโซโพรพานอล (กิโลแคลอรี/กก. °ซ)}$$

$$C_s = \text{ความร้อนจำเพาะของวัสดุไร้ความชื้น (กิโลแคลอรี/กก. °ซ)}$$

$$h_v = \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (กิโลแคลอรี/ชม.ลบ.ม. °ซ)}$$

$$r_o = \text{ความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของไอโซโพรพานอลที่อุณหภูมิ } 0 \text{ °ซ (กิโลแคลอรี/กก. °ซ)}$$

$$r_w = \text{ความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของไอโซโพรพานอลที่อุณหภูมิ } \text{กระเปาะเปียก (กิโลแคลอรี/กก. °ซ)}$$

$$F_r = \text{อัตราส่วนความชื้นอิสระ} = w_2 - w_c$$

$$F_c = \text{อัตราส่วนความชื้นอิสระวิกฤติ} = w_c - w_c$$

$$i_1 = \text{เอนทัลปีของอากาศที่มีไอโซโพรพานอลที่อุณหภูมิ } t_1 \text{ (กิโลแคลอรี/กก.อากาศแห้ง)}$$

$$i_2 = \text{เอนทัลปีของอากาศที่มีไอโซโพรพานอลที่อุณหภูมิ } t_2 \text{ (กิโลแคลอรี/กก.อากาศแห้ง)}$$

$$C_{HI} = \text{ความร้อนจำเพาะชั้นของลมร้อนขาออก (กิโลแคลอรี/กก. °ซ)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{H_2} = \text{ความร้อนจำเพาะชื้นของลมร้อนขาเข้า (กิโลแคลอรี/กก. °ซ)}$$

$$C_{HC} = (C_{HI} + C_{H_2})/2$$

ในที่นี้จะคำนวณหาปริมาณเครื่องอบแห้งแบบหมุน เพื่อใช้ในการอบแห้งไอโซโพรพานอล จากซีเอ็มซีที่มีอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาเข้า (w_1) 0.70 กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง อัตราส่วนความชื้นวิกฤติ (w_c) 0.22 กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง (ใช้ค่าเฉลี่ยจากผลการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3) โดยมีอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 80 °ซ และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน คือ 68 °ซ เป็นตัวอย่าง ส่วนผลการคำนวณการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิอื่น ๆ จะแสดงไว้ในตารางที่ 5.3

เนื่องจากมีความต้องการอบแห้งซีเอ็มซีที่มีไอโซโพรพานอล 50 กก./วัน โดยคิดเวลาการผลิต 4 ชม. ดังนั้นอัตราการป้อนวัสดุเปียกคือซีเอ็มซีที่มีไอโซโพรพานอล เข้าสู่เครื่องอบแห้งเป็น 12.5 กก./ชม. หรือมีอัตราการป้อนวัสดุไร้ความชื้น (W_o) เท่ากับ $12.5/(1 + 0.70) = 7.35$ กก./ชม.

ตัวแปรที่ทราบในการคำนวณ คือ

$$\text{อัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออก } (w_2) = 0.08 \text{ กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง}$$

$$\text{อัตราส่วนความชื้นวิกฤติ } (w_c) = 0.22 \text{ กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง}$$

$$\text{อัตราส่วนความชื้นสมดุล } (w_e) = 0 \text{ กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง}$$

$$\text{ความชื้นลมร้อนขาเข้า } (H_2) = 0 \text{ กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง}$$

$$\text{อุณหภูมิวัสดุขาเข้า } (t_{m2}) = 25 \text{ °ซ}$$

$$\text{อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า } (t_2) = 80 \text{ °ซ}$$

$$\text{อุณหภูมิลมร้อนขาออก } (t_1) = 70 \text{ °ซ}$$

$$\text{อุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน } (t_w) = 68 \text{ °ซ}$$

$$\text{ความร้อนจำเพาะของวัสดุไร้ความชื้น } (C_s) = 0.3 \text{ กิโลแคลอรี/กก. °ซ}$$

$$\text{ความร้อนจำเพาะของไอโซโพรพานอล } (C_l) = 0.8 \text{ กิโลแคลอรี/กก. °ซ}$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

$$\text{ของเครื่องอบแห้ง } (h_a) = 200 \text{ กิโลแคลอรี/ชม. ลบ.ม. °ซ}$$

$$\text{อัตราส่วนความชื้นอิสระวิกฤติ } (F_c) = 0.22$$

ต่อไปนี้จะแสดงการคำนวณหาค่าที่จำเป็นต่อการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. การคำนวณหาค่าความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของไอโซโพรพานอลที่
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (r_w) และอุณหภูมิ 0 °ซ (r_o)

ค่าเอนทัลปีของการระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิจุดเดือด (ΔH_{vb}) ของสารประกอบ
ประเภทแอลกอฮอล์ กรด หรือเมทิลเอมีน คำนวณจากสมการ Vetere's Modification of
Kistiakowsky Equation [12]

$$\Delta H_{vb}/T_b = 81.119 + 13.083 \log T_b - 25.769 T_b/M_i + 0.146528 T_b^2/M_i^2 - 2.1362 \times 10^{-4} T_b^3/M_i^3$$

เมื่อ T_b = อุณหภูมิจุดเดือดของไอโซโพรพานอล = 355.65 เคลวิน

M_i = น้ำหนักโมเลกุลของไอโซโพรพานอล = 60.1 กรัม

ΔH_{vb} = เอนทัลปีของการระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิจุดเดือด

จะได้ว่า $\Delta H_{vb} = 39296.13$ จูล/โมล = 156.17 กิโลแคลอรี/กก. ←

หาค่าเอนทัลปีของการระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิกะเปาะเปียกจาก Watson
correlation [7]

$$\Delta H_v(T_2) = \Delta H_v(T_1) \left(\frac{T_c - T_2}{T_c - T_1} \right)^{0.38}$$

เมื่อ T_1 = อุณหภูมิจุดเดือดของไอโซโพรพานอล = 355.65 เคลวิน

T_2 = อุณหภูมิใด ๆ ของไอโซโพรพานอล

ดังนั้น ที่อุณหภูมิกะเปาะเปียกของไอโซโพรพานอล $T_2 = 341.15$ เคลวิน

ที่อุณหภูมิ 0 °ซ $T_2 = 273.15$ เคลวิน

T_c = อุณหภูมิวิกฤติของไอโซโพรพานอล = 508.75 เคลวิน

$\Delta H_v(T_1)$ = เอนทัลปีของการระเหยกลายเป็นไอของไอโซโพรพานอล ณ
อุณหภูมิจุดเดือด = 156.17 กิโลแคลอรี/กก.

โดยที่ $\Delta H_v(T_2) = r_w$ หรือ r_o

จะได้ว่า $r_w = 161.63$ กิโลแคลอรี/กก. ←

$r_o = 183.96$ กิโลแคลอรี/กก. ←

หมายเหตุ เมื่อทราบค่า r_{mc} สามารถหาค่า r_{mc} ได้ในทำนองเดียวกัน

โดยที่ r_o = ความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของไอโซโพรพานอล
ที่อุณหภูมิ 0 °ซ ความดัน 1 บรรยากาศ มีค่าเท่ากับ 183.96 กิโลแคลอรี/กก. °ซ

ข. การประเมินอุณหภูมิของวัสดุที่ทางออก (t_{m2})

คำนวณค่าอุณหภูมิวัสดุที่ทางออก (t_{m2}) จาก [15 : บรรณานุกรม] ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{t_2 - t_{m2}}{t_2 - t_w} = \frac{r_w F - C_s(t_2 - t_w)(F/F_c)}{r_w F_c - C_s(t_2 - t_w)}$$

แทนค่าตัวแปรลงในสมการ

$$\frac{(80.0 - t_{m2})}{(80.0 - 68.0)} = \frac{(161.63 \times 0.08) - 0.3(80.0 - 68.0)(0.08/0.22)}{(161.63 \times 0.22) - 0.3(80.0 - 68.0)}$$

$$t_{m2} = 75.1 \text{ °ซ}$$

ค. การคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะชื้น (C_H) [15 : บรรณานุกรม]

คำนวณได้จากสมการ $C_H = 0.24 + 0.39H$

$$\text{ดังนั้น } C_{H1} = 0.24 + 0.39H_1$$

$$\begin{aligned} C_{H1} &= 0.24 + 0.39(0.0109) \\ &= 0.2442 \text{ กิโลแคลอรี/กก. °ซ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{H2} &= 0.24 + 0.39H_2 \\ &= 0.24 + 0.39(0) \\ &= 0.2400 \text{ กิโลแคลอรี/กก. °ซ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{HC} &= (C_{H1} + C_{H2})/2 \\ &= 0.2421 \text{ กิโลแคลอรี/กก. °ซ} \end{aligned}$$

ค่า H_1 คำนวณได้จากสมดุลเชิงมวลและสมดุลเชิงความร้อน (ข้อ จ.)

ง. การคำนวณหาค่าเอนทัลปีของอากาศที่มีไอโซโพรพานอล (i)

เอนทัลปีของอากาศที่มีไอโซโพรพานอลสามารถคำนวณได้ดังสมการ [15 : บรรณานุกรม]

$$i = 0.24t + (r_o + 0.39t)H$$

โดยที่

ความร้อนจำเพาะของไอโซโพรพานอลในสถานะก๊าซ (0 °ซ) = 0.39 กิโลแคลอรี/กก.°ซ

ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง = 0.24 กิโลแคลอรี/กก. °ซ

$$\text{ดังนั้น } i_1 = 0.24t_1 + (183.96 + 0.39t_1)H_1$$

$$= (0.24 \times 70.0) + (183.96 + 0.39 \times 70.0)H_1$$

$$= 16.8 + 211.26H_1 \text{ กิโลแคลอรี/กก.อากาศแห้ง}$$

$$i_2 = 0.24t_2 + (183.96 + 0.39t_2)H_2$$

$$= (0.24 \times 80.0) + 0$$

$$= 19.2 \text{ กิโลแคลอรี/กก.อากาศแห้ง}$$

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าเอนทัลปีของลมร้อนขาเข้าและขาออกเมื่อทราบค่า H_1 จะหาค่า i_1 ได้

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าเอนทัลปีของอากาศที่มีไอโซโพรพานอล (i) ที่มีอุณหภูมิของลมร้อนขาเข้า (t_2) ต่าง ๆ

| อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (t_2 , °ซ) | เอนทัลปีลมร้อนขาเข้า (i_2 , กิโลแคลอรี/ กก.อากาศแห้ง) | อุณหภูมิลมร้อนขาออก (t_1 , °ซ) | เอนทัลปีลมร้อนขาออก (i_1 , กิโลแคลอรี/ กก.อากาศแห้ง) |
|---------------------------------------|--|--------------------------------------|---|
| 90 | 21.6 | 80 | $19.2 + 215.16H_1$ |
| 80 | 19.2 | 70 | $16.8 + 211.26H_1$ |
| 70 | 16.8 | 60 | $14.4 + 207.36H_1$ |
| 60 | 14.4 | 50 | $12.0 + 203.46H_1$ |
| 50 | 12.0 | 40 | $9.6 + 199.56H_1$ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ. อัตราการไหลของอากาศแห้ง G_o ที่ต้องการ และความชื้นของอากาศที่ออกมา H_1

จากสมการสมดุลเชิงมวล [15 : บรรณานุกรม]

$$W_o(w_1 - w_2) = \pm G_o(H_2 - H_1)$$

สมการสมดุลเชิงความร้อน [15 : บรรณานุกรม]

$$G_o i_1 \pm W_o(C_s + C_1 w_1) t_{m1} = G_o i_2 \pm W_o(C_s + C_1 w_2) t_{m2}$$

(+ สำหรับการไหลแบบขนาน และ - สำหรับการไหลแบบสวนทาง)

ที่อุณหภูมิสมร้อนขาเข้าที่ 80°C และ เป็นการไหลแบบสวนทาง แทนค่าตัวแปรต่าง ๆ

ลงในสมการสมดุลเชิงมวล และสมดุลเชิงความร้อน ได้ดังนี้

$$7.35(0.70 - 0.08) = - G_o(0 - H_1)$$

$$19.2G_o + 7.35(0.30 + 0.80 \times 0.70)25.0 = G_o(16.8 + 211.26H_1) + 7.35(0.30 + 0.80 \times 0.08)75.1$$

แก้สมการทั้งสองจะหาค่า G_o และ H_1 ได้

$$G_o = 419.06 \text{ กก.อากาศแห้ง/ชม.} \quad \leftarrow$$

$$H_1 = 0.0109 \text{ กก.ไอโซโพรพานอล/กก.อากาศแห้ง} \quad \leftarrow$$

5.2 การหาปริมาณเครื่องอบแห้ง

สำหรับการคำนวณปริมาณเครื่องอบแห้งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้น แก้วสด (ช่วง I) ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ (ช่วง II) ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง (ช่วง III)

5.2.1 ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้น แก้วสด

ความร้อนที่เกี่ยวข้อง

$$q_H = G_o C_{H1} (t_1' - t_1) = W_o(C_s + C_1 w_1)(t_{mc} - t_{m1})$$

ในที่นี้ t_{mc} ก็คือค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของจุด (t_1', H_1) (รูปที่ 5.8)

ผลของการคำนวณโดยวิธี Trial & Error โดยให้ค่า $t_{mc} = 56.0^\circ\text{C}$ และกำหนด $t_1 = 70.0^\circ\text{C}$

แทนค่าต่าง ๆ จะได้

$$(419.06 \times 0.2442)(t_1' - 70.0) = 7.35 (0.30 + 0.80 \times 0.70)(56.0 - 25.0)$$

จะได้ว่า $t_1' = 71.9$ °ซ เมื่อ $t_{mc} = 56.0$ °ซ ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (รูปที่ 5.7) และ $q_I = 195.95$ กิโลแคลอรี/ชม. ←

จาก $q_I = 195.95 = \{h_v V_I (t_1 - t_{m1}) - (t_1' - t_{mc})\} / \ln\{(t_1 - t_{m1}) / (t_1' - t_{mc})\}$ และ
แทนค่า $h_v = 200$ กิโลแคลอรี/ลบ.ม. ชม. °ซ $t_1 = 70.0$ °ซ $t_1' = 71.9$ °ซ $t_{mc} = 56.0$ °ซ
และ $t_{m1} = 25.0$ °ซ

ดังนั้น $V_I = 0.0350$ ลบ.ม. ←

5.2.2 ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่

ความร้อนที่เกี่ยวข้อง

$$q_{II} = G_o C_{HC} (t_c - t_1') = W_o (w_1 - w_2) r_{mc}$$

$$= (419.06 \times 0.2421)(t_c - 71.9) = 7.35(0.70 - 0.08) \times 165.94 = 756.17 \text{ กิโลแคลอรี/ชม.} \leftarrow$$

$$t_c = 79.4 \text{ °ซ} \leftarrow$$

จาก $q_{II} = \{200 V_{II} (t_c - t_1')\} / \ln\{(t_c - t_w) / (t_1' - t_w)\}$

$$756.17 = \{200 V_{II} (79.4 - 71.9)\} / \ln\{(79.4 - 68.0) / (71.9 - 68.0)\}$$

ดังนั้น $V_{II} = 0.1949$ ลบ.ม. ←

5.2.3 ช่วงการการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

ความร้อนที่เกี่ยวข้อง

$$q_{III} = G_o C_{H2} (t_2 - t_c)$$

$$= (419.06 \times 0.2400)(80.0 - 79.4) = 63.65 \text{ กิโลแคลอรี/ชม.}$$

$$q_{III} = h_v V_{III} \{(t_2 - t_{m2}) - (t_c - t_{mc})\} / \ln\{(t_2 - t_{m2}) / (t_c - t_{mc})\}$$

$$63.65 = 200 V_{III} \{(80.0 - 75.1) - (79.4 - 56.0)\} / \ln\{(80.0 - 75.1) / (79.4 - 56.0)\}$$

ดังนั้น $V_{III} = 0.0270$ ลบ.ม. ←

$$V_T = V_I + V_{II} + V_{III}$$

ดังนั้น $V_T = 0.2569$ ลบ.ม.

ให้แฟคเตอร์ความปลอดภัย (Safety factor) = 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรเครื่องอบแห้งแบบหมุนเมื่อคำนึงถึงแฟคเตอร์ความปลอดภัย (V_S)

$$\text{ดังนั้น } V_S = 2 \times 0.2569 = 0.5138 \text{ ลบ.ม.} \quad \leftarrow$$

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนโดยตรง ความยาว (L) มีค่าประมาณ 5-8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_T) ของทรงกระบอก ดังนั้น กำหนดให้เครื่องอบแห้งมีความยาวของทรงกระบอกเป็น 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง [9]

$$L = 6D_T \Rightarrow \pi D_T^2 L / 4 = 6 \pi D_T^3 / 4 = V_S$$

$$\text{ดังนั้น } D_T^3 = 4V_S / 6 \pi = 4 \times 0.5138 / 6 \pi = 0.1090$$

$$D_T = 0.4777 \text{ เมตร} \quad \leftarrow$$

$$\text{ความยาวของทรงกระบอก } (L) = 6D_T = 2.8662 \text{ เมตร} \quad \leftarrow$$

ผลการคำนวณปริมาตร เส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของเครื่องอบแห้งแบบหมุนเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนเป็น 50, 60, 70, 80 และ 90 °ซ. รวบรวมแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงข้อมูลพื้นฐานการคำนวณหาปริมาตรของเครื่องอบแห้งแบบหมุน

| | | | | | |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|
| อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (t_2 , °ซ) | 50.0 | 60.0 | 70.0 | 80.0 | 90.0 |
| อุณหภูมิลมร้อนขาออก (t_1 , °ซ) | 40.0 | 50.0 | 60.0 | 70.0 | 80.0 |
| อุณหภูมิ (t_1' , °ซ) | 40.4 | 51.0 | 61.5 | 71.9 | 82.6 |
| อุณหภูมิจากฤดู (t_c , °ซ) | 49.4 | 59.5 | 69.4 | 79.4 | 89.6 |
| อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (t_d , °ซ) | 50.0 | 60.0 | 70.0 | 80.0 | 90.0 |
| อุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_w , °ซ) | 39.0 | 48.0 | 55.5 | 68.0 | 72.0 |
| อุณหภูมิวัสดุขาเข้า (t_{m1} , °ซ) | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 |
| อุณหภูมิวัสดุขาออก (t_{m2} , °ซ) | 45.6 | 55.2 | 64.0 | 75.1 | 82.3 |
| อุณหภูมิ (t_{mc} , °ซ) | 30.0 | 40.0 | 48.0 | 56.0 | 68.0 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

| | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| ความชื้นลมร้อนขาออก (H_1 , กก.ไอโซโพรพานอล/ กก.วัสดุแห้ง) | 0.0125 | 0.0119 | 0.0114 | 0.0109 | 0.0105 |
| ความร้อนจำเพาะชื้น (C_{H1} , กิโลแคลอรี/กก.°ซ) | 0.2449 | 0.2447 | 0.2445 | 0.2442 | 0.2441 |
| ความร้อนจำเพาะชื้น (C_{H2} , กิโลแคลอรี/กก.°ซ) | 0.2400 | 0.2400 | 0.2400 | 0.2400 | 0.2400 |
| ความร้อนจำเพาะชื้นเฉลี่ย (C_{HC} , กิโลแคลอรี/กก.°ซ) | 0.2424 | 0.2423 | 0.2422 | 0.2421 | 0.2420 |
| ความร้อนแฝงของการระเหย กลายเป็นไอของไอโซโพรพานอล ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก (r_w , กิโลแคลอรี/กก.) | 171.74 | 168.71 | 166.11 | 161.63 | 160.15 |
| ความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของไอโซโพรพานอลที่ อุณหภูมิ t_{mc} (r_{mc} , กิโลแคลอรี/กก.) | 174.68 | 171.40 | 168.71 | 165.94 | 161.63 |
| อัตราการไหลของอากาศแห้ง (G_o , กก.อากาศแห้ง/ชม.) | 363.93 | 381.98 | 399.25 | 419.06 | 434.41 |
| ปริมาณความร้อน (q_r , กิโลแคลอรี/ชม.) | 31.61 | 94.82 | 145.38 | 195.95 | 271.80 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

| | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| ปริมาณความร้อน (q_{II} กิโลแคลอรี/ชม.) | 796.03 | 781.09 | 768.79 | 756.17 | 736.56 |
| ปริมาณความร้อน (q_{III} กิโลแคลอรี/ชม.) | 54.44 | 50.14 | 53.73 | 63.65 | 45.01 |
| ปริมาตรของเครื่องอบแห้ง (V_P ลบ.ม.) | 0.0126 | 0.0278 | 0.0322 | 0.0350 | 0.0447 |
| ปริมาตรของเครื่องอบแห้ง (V_{II} ลบ.ม.) | 0.2764 | 0.2632 | 0.2240 | 0.1949 | 0.2065 |
| ปริมาตรของเครื่องอบแห้ง (V_{III} ลบ.ม.) | 0.0270 | 0.0239 | 0.0222 | 0.0270 | 0.0167 |
| ปริมาตรรวมของเครื่องอบแห้ง (V_T ลบ.ม.) | 0.3160 | 0.3149 | 0.2784 | 0.2569 | 0.2678 |
| ปริมาตรของเครื่องอบแห้งเมื่อ คำนึงถึงแฟกเตอร์ความปลอดภัย (V_S ลบ.ม.) | 0.6321 | 0.6298 | 0.5569 | 0.5138 | 0.5356 |
| รัศมีของทรงกระบอก (R , เมตร) | 0.2560 | 0.2556 | 0.2453 | 0.2389 | 0.2422 |
| เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของทรง กระบอก (D_T เมตร) | 0.5119 | 0.5112 | 0.4906 | 0.4777 | 0.4843 |
| ความยาวของทรงกระบอก (L , เมตร) | 3.0714 | 3.0672 | 2.9436 | 2.8662 | 2.9058 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การประเมินค่าใช้จ่ายโดยประมาณของการเดินเครื่องอบแห้ง

การคำนวณค่าใช้จ่ายโดยประมาณของการเดินเครื่องอบแห้งของขบวนการผลิตซีเอ็มซี โดยทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน

จากอัตราการป้อนวัสดุเปียก 12.5 กก./วัน ทำการคำนวณย้อนกลับหาปริมาณเซลลูโลสที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตซีเอ็มซี

จากสูตรโครงสร้างของเซลลูโลส แต่ละหน่วยย่อยของเซลลูโลสเรียกว่า Anhydroglucose ($C_6H_{10}O_5$) โดยที่มวลโมเลกุลของแต่ละหน่วยย่อยเท่ากับ 162 และจากสูตรโครงสร้างของซีเอ็มซี ซีเอ็มซีมีค่าองศาการแทนที่สูงสุดเท่ากับ 3 แต่จากการทดลองมีค่าประมาณ 0.9

ค่าองศาการแทนที่ 0.9 แสดงว่ามี CH_2COONa เข้าแทนที่ 0.9 หมู่

โดยมวลโมเลกุลของหมู่แทนที่ $CH_2COONa = 81$

ดังนั้น น้ำหนักของ CH_2COONa 0.9 หมู่ $= 81 \times 0.9 = 72.9$

H 2.1 หมู่ ที่ไม่ถูกแทนที่มีน้ำหนัก 2.1 กรัม

ดังนั้น น้ำหนักของซีเอ็มซีแต่ละหน่วยย่อย ($n = 1$) $= 162 - 3 + 72.9 + 2.1 = 234$ กรัม

จากอัตราการป้อนวัสดุเปียก 12.5 กก./ชม. (%ความชื้น 70% เทียบกับวัสดุแห้ง)

ดังนั้น อัตราการป้อนวัสดุไร้ความชื้น $= 12.5(1 + 0.70) = 7.35$ กก./ชม.

คิดเวลาการเดินเครื่องอบแห้ง 4 ชม. ใน 1 วัน นั่นคือ 50 กก./วัน

ดังนั้น กำลังการผลิตซีเอ็มซีในแต่ละวัน $7.35 \times 4 = 29.40$ กิโลกรัม

ทำการเทียบหาน้ำหนักของเซลลูโลสที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

น้ำหนักของแต่ละหน่วยย่อยซีเอ็มซี 234 กรัม น้ำหนักของซีเอ็มซีที่ป้อนเข้า 29.40 กก.

น้ำหนักของแต่ละหน่วยย่อยเซลลูโลส 162 กรัม น้ำหนักของเซลลูโลส (สารตั้งต้น)

$$= (29.40 \times 162)/234$$

$$= 20.35 \text{ กก.}$$

ถ้าทำการสังเคราะห์ด้วยถังปฏิกรณ์ขนาด 24.7 ลิตร ปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อการสังเคราะห์ 1 ครั้ง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.3 ใช้ปริมาณเซลลูโลส 930 กรัม ต่อการสังเคราะห์ 1 ครั้ง ดังนั้น เพื่อที่จะทำการอบแห้งซีเอ็มซีให้ได้ 50 กก. ต้องทำการสังเคราะห์ด้วยถังปฏิกรณ์ขนาด 24.7 ลิตร จำนวน $20.35/0.93 \approx 22$ ครั้ง

ตารางที่ 5.4 แสดงปริมาณสารเคมีที่ใช้และการประเมินราคา

| สารเคมี | ราคา | ปริมาณที่ใช้ ต่อการ สังเคราะห์ 1 ครั้ง | ปริมาณที่ใช้ ทั้งหมด | คิดเป็น เงิน (บาท) |
|-----------------------------|------------------|---|-------------------------|--------------------------|
| เซลลูโลสชนิดผง | 181 บาท/กก. | 930 กรัม | 20.46 กก. | 3,703.26 |
| เทตระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ | 830 บาท/250 กรัม | 11.11 กรัม | 244.42 กรัม | 811.47 |
| ไอโซโพรพานอล | 580 บาท/19 ลิตร | 20.94 ลิตร | 460.68 ลิตร | 14,062.86 |
| โซเดียมไฮดรอกไซด์ | 600 บาท/25 กก. | 837 กรัม | 18.41 กก. | 441.84 |
| กรดคลอโรอะซีติก | 1500 บาท/กก. | 950 กรัม | 20.90 กก. | 31,350.00 |
| กรดอะซีติก | 990 บาท/30 กก. | 0.0525 กก. | 1.155 กก. | 38.12 |
| | | | รวม | 50,407.55 |

ดังนั้นราคาสารเคมีต่อการเดินเครื่องอบแห้ง 4 ชม. (อัตราการป้อนวัสดุเปียก 12.5กก./ชม.)

$$= 50,407.55 \text{ บาท} \quad \leftarrow$$

ถ้าทำการผลิตด้วยถังปฏิกรณ์ขนาด 24.7 ลิตร สังเคราะห์ให้ได้ 50 กก.

จำนวนครั้งของการสังเคราะห์ประมาณ 22 ครั้ง

กำลังของมอเตอร์ (Rotor) ของถังปฏิกรณ์ขนาด 24.7 ลิตร 1.5 กิโลวัตต์

การสังเคราะห์แต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 4 ชม.

จำนวนหน่วยของไฟฟ้าที่ใช้ $1.5 \times 4 \times 22 = 132$ กิโลวัตต์.ชม.

ดังนั้นค่าไฟฟ้าในขั้นตอนการสังเคราะห์ซีเอ็มซีโดยประมาณ $= 132 \times 5 = 660$ บาท \leftarrow

ประเมินค่าไฟฟ้าจากหน่วยเตรียมก๊าซร้อน และกำลังสำหรับขับเคลื่อนการหมุนของ

เครื่องอบแห้ง ดังการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าที่ปริมาตรของเครื่องอบแห้งแบบหมุน 0.5138 ลบ.ม.

โดยมีอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า $= 80$ °ซ ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยเตรียมก๊าซร้อน

จากการคำนวณหาปริมาตรเครื่องอบแห้งแบบหมุนคังกล่าวข้างต้น สามารถหาอัตราการไหลของอากาศแห้ง (G_o) ได้เท่ากับ 419.06 กก./ชม.

โดยที่ Specific mass ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ (10^5 Pa) = $355/(273 + T)$

ดังนั้นที่อุณหภูมิ 25 °ซ Specific mass = $355/(273 + 25) = 1.19$ กก./ลบ.ม.

และอัตราการไหลของอากาศโดยปริมาตร (Airflow) = $419.06/1.19 = 351.77$ ลบ.ม.

สำหรับค่าความดันสูญเสีย (Pressure loss, ΔP) สามารถหาได้จาก [4] ดังสมการ

$$Q = \pi \Delta P R^4 / 8 \mu L$$

โดยที่ Q = อัตราการไหลของลมร้อน โดยปริมาตร = 351.77 ลบ.ม./ชม.

R = รัศมีของทรงกระบอก = 0.2389 เมตร

L = ความยาวของทรงกระบอก = 2.8662 เมตร

μ = ความหนืดของอากาศ = 0.018 เซนติพอยส์

= 0.018×10^{-3} นิวตัน.วินาที/ตร.ม.

ดังนั้น $\Delta P = 8Q\mu L / 3600\pi R^4$

$$= 8 \times 351.77 \times 0.018 \times 10^{-3} \times 2.8662 / 3600\pi (0.2389)^4 = 0.0039 \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

ค่าพลังงานที่ต้องการสำหรับการไหลของลมร้อน (Pow_G) เมื่อคำนึงถึงแฟกเตอร์ความปลอดภัย (Safety factor) = 2 สามารถหาได้จาก [9] ได้ดังสมการ

$$Pow_G = (Airflow)\Delta P / (3600 \times 1000 \times 0.5)$$

$$= (351.77 \times 0.0039) / (3600 \times 1000 \times 0.5)$$

$$= 7.71 \times 10^{-7} \text{ กิโลวัตต์}$$

←

กำลังสำหรับขับเคลื่อนการหมุนของเครื่องอบแห้ง (P)

$$P = D_r L$$

$$= 0.4777 \times 2.8662 = 1.3692 \text{ กำลังม้า}$$

$$= 1.0210 \text{ กิโลวัตต์}$$

←

ดังนั้นค่าไฟฟ้าโดยประมาณ/วัน = $(7.71 \times 10^{-7} + 1.0210) \times 4 \times 5 = 20.42$ บาท

หมายเหตุ ทำการเดินเครื่องอบแห้ง 4 ชม./วัน

ค่าไฟฟ้า 5 บาท/หน่วย

ตารางที่ 5.5 แสดงการประเมินค่าไฟฟ้าโดยประมาณของการเดินเครื่องอบแห้งแบบหมุนต่อวัน

| อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (t_2 , °ซ) | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ปริมาณเครื่องอบแห้งเมื่อคำนึงถึง แฟกเตอร์ความปลอดภัย (V_s , ลบ.ม.) | 0.6321 | 0.6298 | 0.5569 | 0.5138 | 0.5356 |
| อัตราการไหลของลมร้อนโดย ปริมาตร (Q , ลบ.ม./ชม.) | 305.49 | 320.65 | 335.14 | 351.77 | 364.66 |
| ความดันสูญเสีย (ΔP , นิวตัน/ตร.ม.) | 0.0028 | 0.0029 | 0.0035 | 0.0039 | 0.0039 |
| ค่าพลังงานที่ต้องการสำหรับการไหล ของลมร้อน (Pow_G , กิโลวัตต์) | 4.27×10^{-7} | 5.22×10^{-7} | 6.46×10^{-7} | 7.71×10^{-7} | 7.95×10^{-7} |
| กำลังสำหรับขับเคลื่อนการหมุนของ เครื่องอบแห้ง (P , กิโลวัตต์) | 1.5722 | 1.5680 | 1.4441 | 1.3692 | 1.4073 |
| ค่าไฟฟ้าโดยประมาณของการเดิน เครื่องอบแห้งแบบหมุนต่อวัน (บาท) | 23.45 | 23.38 | 21.54 | 20.42 | 20.99 |

ค่าใช้จ่ายรวม โดยประมาณในส่วนของ การสังเคราะห์และ ส่วนของการเดิน
เครื่องอบแห้ง = ค่าสารเคมี + ค่าไฟฟ้า (มอเตอร์ของถังปฏิกรณ์เคมี + หน่วยเตรียมก๊าซร้อน +
กำลังขับเคลื่อนการหมุนของเครื่องอบแห้ง)

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายรวม โดยประมาณในส่วนของ การสังเคราะห์และ ส่วนของการเดิน
เครื่องอบแห้งที่มีปริมาตร (V_s) 0.6321, 0.6298, 0.5569, 0.5138 และ 0.5356 ลบ.ม. เท่ากับ 51,091,
51,090.93, 51,089.09, 51,087.97 และ 51,088.54 บาท ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การคำนวณออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน มีความจำเป็นต้องทราบข้อมูลพื้นฐาน คือ อัตราส่วนความชื้นของวัสดุขาเข้า และความชื้นที่ต้องการหลังการอบแห้ง คุณสมบัติของลมร้อนที่ใช้ ค่าความชื้นสมมูล (w_c) และค่าความชื้นวิกฤติ (w_c) ของวัสดุซึ่งได้จากการทดลอง ในการทดลองครั้งนี้ ค่าความชื้นสมมูล (w_c) มีค่าเท่ากับ 0 กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง ค่าความชื้นวิกฤติ (w_c) มีค่าเท่ากับ 0.22 กก.ไอโซโพรพานอล/กก.ผลิตภัณฑ์แห้ง ส่วนค่าอื่น ๆ ที่จำเป็นต้องทราบและได้จากการคำนวณ ได้แก่

- ความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของไอโซโพรพานอลที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก (r_w)
- ค่าความร้อนจำเพาะชื้น (C_H)
- ค่าอัตราการไหลของอากาศ (G_o)
- ความชื้นลมร้อนขาออก (H_1)
- อุณหภูมิวัสดุขาออก (t_{m2})
- ค่าเอนทัลปีของอากาศที่มีไอโซโพรพานอล (i)

โดยอาศัยสมการสมดุลเชิงมวลและเชิงความร้อน แก้สมการหาค่าตัวแปรในเครื่องอบแห้ง และคำนวณหาปริมาตรเครื่องอบแห้งในช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ และช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง และจากสมการการถ่ายเทความร้อนก็สามารถหาปริมาตรเครื่องอบแห้งรวมได้

จากการคำนวณหาปริมาตรเครื่องอบแห้ง โดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 50, 60, 70, 80 และ 90 °ซ อบแห้งไอโซโพรพานอลจากซีเอ็มซีที่มีความชื้น 0.6836 ปริมาณ 12.5 กก./ชม. ปริมาตรเครื่องอบแห้งที่คำนวณได้เป็น 0.3160, 0.3149, 0.2784, 0.2569 และ 0.2678 ลบ.ม. เมื่อนำนี้ถึงค่าแฟคเตอร์ความปลอดภัยจะได้ปริมาตรเป็น 0.6321, 0.6298, 0.5569, 0.5138 และ 0.5356 ลบ.ม.ตามลำดับ เมื่อทำการประเมินค่าใช้จ่ายโดยประมาณของการเดินเครื่องอบแห้ง โดยคิดค่าไฟฟ้าและค่าสารเคมี จะได้ว่าเครื่องอบแห้งที่มีปริมาตร 0.6321, 0.6298, 0.5569, 0.5138 และ 0.5356 ลบ.ม. ค่าใช้จ่ายมีค่าเท่ากับ 51,091.00, 51,090.93, 51,089.09, 51,087.97 และ 51,088.54 บาท ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการเลือกชนิดเครื่องอบแห้งพบว่า มีข้อจำกัดสำคัญ ๆ ได้แก่ ขนาดของซีเอ็มซี คุณสมบัติตัวทำละลาย และลักษณะเครื่องอบแห้ง จึงมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

ก. ความเป็นไปได้ของการใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง และแบบฟลูอิดซ์เบด

จากการทดลองอบแห้งซีเอ็มซีด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง พบว่าซีเอ็มซีหลังจากทำการอบแห้งมีลักษณะเป็นแผ่นจึงต้องมีส่วนของเครื่องบด เพื่อบดซีเอ็มซีให้เป็นผง นอกจากนี้ในขณะที่อบแห้งก็จะมี การฟุ้งกระจายของตัวทำละลาย (ไอโซโพรพานอล) ดังนั้นเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งต้องเป็นระบบปิด เพื่อป้องกันไอของตัวทำละลายระเหยออกสู่ภายนอก การใช้เครื่องอบแห้งแบบนี้ไม่สามารถนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ได้อีกจึงไม่ประหยัดค่าใช้จ่าย และยังก่อให้เกิดมลภาวะอีกด้วย ดังนั้นการอบแห้งโดยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งจึงไม่เหมาะสม เมื่อนำมาใช้ในระบบนี้

ซีเอ็มซีที่ได้จากการสังเคราะห์มีไอโซโพรพานอลติดอยู่ และซีเอ็มซีมีขนาดเล็กมาก ประมาณ 57 ไมโครเมตร ถ้าจะทำการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด จะทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาค อนุภาคจะเกิดการเสียดสีกันทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต จึงมีโอกาสดังกล่าวระเบิดขึ้นได้ ประกอบกับต้องมีการสร้างไซโคลนเพื่อดักจับผงซีเอ็มซีที่ผ่านการอบแห้ง ดังนั้นการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดจึงไม่เหมาะสม นอกจากนี้จากความรู้ทางเทคโนโลยีอนุภาค (Particle technology) สารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่า 60 ไมโครเมตร จะมีโอกาสดังกล่าวระเบิด (Dust explosion) ได้ด้วยตัวเอง ซีเอ็มซีที่ผลิตได้เข้าอยู่ในข่ายนี้ จึงค่อนข้างจะอันตรายอยู่แล้ว

ข. ความเป็นไปได้ของการใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ แต่จะต้องสร้างเป็นระบบปิดทำงานภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อย เพื่อไม่ให้เกิดการระเบิด (Explosive limits ของไอโซโพรพานอล มีค่า 2 - 12 , vol% in air และ Flash point มีค่า 12 °ซ) ก๊าซไนโตรเจนได้จากไนโตรเจนเหลวซึ่งมีราคาแพงจึงอาจไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ อีกทั้งการสร้างเครื่องอบแห้งที่เป็นระบบปิดที่สมบูรณ์ทำได้ค่อนข้างยาก

ค. ความเป็นไปได้ของการใช้เครื่องอบแห้งแบบสูญญากาศ

มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่สูง จึงลดปัญหาการระเบิดเนื่องจาก Dust explosion หรือถ้ามีโอกาสเกิดการระเบิดก็จะไม่รุนแรงเพราะในระบบมีปริมาณออกซิเจนน้อยและความดันต่ำ คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้ มีความเห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบสูญญากาศน่าจะมีความเหมาะสมต่อการอบแห้งไอโซโพรพานอลจากซีเอ็มซี เพราะการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอบแห้งประเภทนี้ไม่ยากมาก อีกทั้งยังมีความปลอดภัยในการทำงานสูง และก่อนที่จะนำซีเอ็มซีที่ผลิตได้เข้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบสูญญากาศ จะต้องแยกไอโซโทรพานอล โดยส่วนใหญ่ออกก่อน ซึ่งถ้าเป็นการผลิตซีเอ็มซีจำนวนมากจะต้องใช้ Decanter และจะต้องเป็นแบบ Explosive proof ไอโซโทรพานอลที่แยกได้จะต้องนำไปทำให้บริสุทธิ์เพื่อนำกลับไปใช้ในการสังเคราะห์ซีเอ็มซีใหม่ แต่เนื่องจาก Decanter แบบ Explosive proof มีราคาสูงมาก จึงอาจต้องเลือกใช้เครื่องกรองแบบ Filter press แทน เนื่องจากมีราคาถูก แต่จะต้องคัดแปลงเพื่อให้ใช้งานได้กับการกรองซีเอ็มซีอย่างต่อเนื่อง โดยอาจใช้เครื่องกรองแบบนี้ 2 ตัวต่อขนานกันและสลับการใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
การเตรียมสารเคมี

1. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 36% (%โดยน้ำหนัก)
เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 36 กรัม (0.9 โมล) ละลายในน้ำกลั่น 64 กรัม
2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตเข้มข้น 0.25 นอร์มอล
เตรียมจากโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต 12.7344 กรัม (0.0625 โมล) ละลายในน้ำกลั่น 250 มล.
3. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มอล
เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 9.87 กรัม (0.25 โมล) ละลายในน้ำกลั่น 500 มล. ไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตเข้มข้น 0.25 นอร์มอล
4. การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.25 นอร์มอล
ดวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% (%โดยปริมาตร) 5.2 มล. (0.0625 โมล) ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 250 มล. ไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มอล
5. การเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดเข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร
เตรียมจากซิลเวอร์ไนเตรด 1.80 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร
6. การเตรียมสารละลายไคฟีนิลามีน
เตรียมจากไคฟีนิลามีน 0.5 กรัม ละลายในกรดซัลฟูริก 125 มล. ที่เตรียมได้จากกรดซัลฟูริก 9 ส่วนกับน้ำ 2 ส่วน โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การคำนวณหาค่าองศาการแทนที่

การหาค่าองศาการแทนที่ [14 : บรรณานุกรม]

$$A_a = (B_v C_c - DE) / F_a$$

เมื่อ

- A_a : กรัมสมมูลของรูปกรดที่ใช้ต่อน้ำหนักเป็นกรัมของสารตัวอย่าง
 B_v : ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มล.)
 C_c : ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)
 D : ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มล.)
 E : ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มอล)
 F_a : น้ำหนักของซีเอ็มซีในรูปกรด (กรัม)
 162 : น้ำหนักเป็นกรัมของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสของเซลลูโลส
 58 : การเพิ่มขึ้นของโมเลกุลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสของแต่ละหมู่คาร์บอกซีเมทิลที่แทนที่

$$\text{องศาการแทนที่} = (0.162 A_a) / (1 - 0.058 A_a)$$

| | | |
|--|--------|---------|
| ข้อมูล ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ | 10 | มล. |
| สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น | 0.4771 | นอร์มอล |
| สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น | 0.5165 | นอร์มอล |

ตารางที่ ข.1 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาแทนที่ (จากการสังเคราะห์ซีเอ็มซีในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร)

| การทดลองครั้งที่ | น้ำหนักซีเอ็มซี (กรัม) | ปริมาตรกรด ไฮโดรคลอริก (มล.) | ค่าองศาการแทนที่ | เฉลี่ย |
|------------------|---------------------------|------------------------------------|------------------|--------|
| 1 | 0.4936 | 5.20 | 0.9065 | 0.9111 |
| | 0.5034 | 5.10 | 0.9123 | |
| | 0.5267 | 4.90 | 0.9146 | |
| 2 | 0.5089 | 5.10 | 0.8992 | 0.9127 |
| | 0.5126 | 5.05 | 0.9049 | |
| | 0.5304 | 4.80 | 0.9341 | |

จากผลการทดลองครั้งที่ 1/1 ในตารางที่ ข.1

$$B_v = 10 \text{ มล.}$$

$$C_c = 0.4771 \text{ นอร์มอล}$$

$$D = 5.2 \text{ มล.}$$

$$E = 0.5165 \text{ นอร์มอล}$$

$$F_a = 0.4936 \text{ กรัม}$$

$$\text{ดังนั้น } A_a = \frac{(10 \times 0.4771 - 5.2 \times 0.5165)}{0.4936}$$

$$= 4.2245$$

$$\text{ดังนั้นค่าองศาการแทนที่} = \frac{(0.162 \times 4.2245)}{1 - (0.058 \times 4.2245)}$$

$$= 0.9065$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์คุณสมบัติอากาศชื้นสำหรับไอโซโทรพานอล

ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง ค่าต่าง ๆ ของคุณสมบัติของอากาศชื้นเป็นสิ่งที่สำคัญ ในกรณีที่เป็นการอบแห้งวัสดุเปียกที่เป็นน้ำ สามารถที่จะใช้แผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) ของไอน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ แต่ในการอบแห้งซีเอ็มซี จะเป็นการอบแห้งเพื่อไล่เอาไอโซโทรพานอล ออกจากซีเอ็มซี ดังนั้นค่าคุณสมบัติของอากาศชื้นสำหรับไอโซโทรพานอล สามารถคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนี้ [1]

1. ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของคุณสมบัติอากาศชื้น

ในการวิจัยหาค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศชื้น ที่ต้องการความถูกต้องเป็นที่ยอมรับมีวิธีการคำนวณที่ยุ่งยาก เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้นจึงสมมติให้อากาศเป็นก๊าซสมบูรณ์ ทำให้สามารถที่จะคำนวณคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศได้ผลใกล้เคียงกัน

ในการคำนวณค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศชื้น ประกอบไปด้วยตัวแปรที่สำคัญ ดังนี้

1. ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity)
2. ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity)
3. เอนทัลปี (Enthalpy)
4. อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet - bulb temperature)
5. อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature)
6. ปริมาตรจำเพาะชื้น (Humid volume)
7. ความร้อนจำเพาะชื้น (Humid heat)

2. กฎของก๊าซสมบูรณ์ (Perfect gas heat)

ที่ความดันบรรยากาศ พิจารณาได้ว่า ส่วนผสมของก๊าซต่าง ๆ ในอากาศชั้นเป็นส่วนผสมของก๊าซอุดมคติ ทำให้สามารถใช้กฎของ Gibbs-Dalton ซึ่งกล่าวว่า “ความดันของอากาศมีค่าเท่ากับผลบวกของความดันย่อย”

ในที่นี้เราสมมติให้อากาศไม่มีไอน้ำ มีเฉพาะอากาศแห้งกับไอโซโทรพานอลเท่านั้น ดังนั้นจะได้

$$P_T = P_a + P_i \quad (1)$$

เมื่อ

P_T = ความดันรวมอากาศ

P_a = ความดันของอากาศแห้ง

P_i = ความดันของไอโซโทรพานอลในอากาศ

ความดันไออิ่มตัวของไอโซโทรพานอล (P_{is}) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว สามารถหาได้จากสมการของ Antoine ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\log_{10}(P_{is}) = A - [B/(C + t)] \quad (2)$$

เมื่อ

A, B และ C = เป็นค่าคงที่สำหรับไอโซโทรพานอล มีค่าเป็น 8.8729, 2010.320 และ 252.636 ตามลำดับ

P_{is} = ความดันไออิ่มตัวของไอโซโทรพานอล, มิลลิเมตรปรอท

t = อุณหภูมิ, °ซ ช่วง $-26 < t < 83$

3. ความชื้นสัมบูรณ์ (H)

ความชื้นสัมบูรณ์ เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของไอโซโทรพานอลในอากาศกับอากาศแห้ง

$$H = W_i / W_a \quad (3)$$

เมื่อ

W_i, W_a = น้ำหนักของไอโซโทรพานอล และอากาศแห้งตามลำดับ

เนื่องจาก น้ำหนักของก๊าซมีค่า เท่ากับ จำนวน โมลคูณกับน้ำหนักโมเลกุล แทนค่าลงใน

สมการ (3)

$$H = (60.0956/28.964)(N_i / N_a) \quad (4)$$

เมื่อ

60.0956 และ 28.964 = น้ำหนักโมเลกุลของไอโซโพรพานอล และอากาศแห้งตามลำดับ

N_i และ N_a = จำนวนโมลของไอโซโพรพานอล และอากาศแห้ง ตามลำดับ

เมื่อคิดว่าอากาศแห้งและไอโซโพรพานอลต่างก็เป็นก๊าซสมบูรณ์ เราสามารถใช้กฎของก๊าซได้ดังนี้

$$P_i V_i = N_i R T_{abe} \quad (5)$$

$$P_a V_a = N_a R T_{abe} \quad (6)$$

แทนค่าสมการที่ (1) ลงสมการที่ (6)

$$(P - P_i) V = N_a R T_{abe} \quad (7)$$

แทนค่าสมการที่ (5) และ (7) ลงในสมการที่ (4)

$$H = 2.0748 [P_i / (P - P_i)] \quad (8)$$

สามารถหาค่า H ได้จากการหาค่า P_{is} จากสมการที่ (3) มาแทนลงใน P_i ในสมการที่ (8) เพื่อหาค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศที่ความดันไออิ่มตัวของไอโซโพรพานอล ซึ่งก็คือค่าความชื้นสัมพัทธ์ 100% นั่นเอง

4. ความชื้นสัมพัทธ์ (R_H)

ความชื้นสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของความดันไอของไอโซโพรพานอลกับความดันไออิ่มตัวของไอโซโพรพานอลของอากาศ

$$R_H = P_i / P_{is} \quad (9)$$

จากความสัมพันธ์ สามารถคำนวณหาความชื้นสัมพัทธ์ใด ๆ ได้ โดยอาศัยข้อมูลของความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ กล่าวคือ นำค่า P_{is} ที่ได้ มาแทนค่าในสมการที่ (9) เพื่อหาค่า P_i และนำค่ามาแทนในสมการที่ (8)

$$H = 2.0748 \{ (R_H \times P_{is}) / [P - (R_H \times P_{is})] \} \quad (10)$$

เมื่อได้ความชื้นสัมพัทธ์ค่า ๆ หนึ่ง จะได้ความชื้นสัมบูรณ์ค่าต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยน P_{is} ไปเรื่อย ๆ

5. ปริมาตรจำเพาะชื้น (v_H)

จากกฎของก๊าซสมบูรณ์

$$P_a V_a = (W_a/M_a)RT_{abs}$$

$$\text{จะได้ } v_H = V_a/W_a = RT_{abs}/M_a P_a = RT_{abs}/[M_a(P - P_i)] \quad (11)$$

เมื่อ v_H = ปริมาตรจำเพาะชื้น

จากสมการ (8) จะได้

$$P_i = 0.4819HP/(1 + 0.4819H) \quad (12)$$

เมื่อแทนค่า P_i ลงใน (1)

$$v_H = (R/M_a)(t_{abs}/P)(1 + 0.4819H) \quad (13)$$

6. ความร้อนจำเพาะชื้น (C_H)

ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้งกับไอโซโทรพานอลหาได้จากสมการ

$$C_H = 1.006 + 1.349H \quad (14)$$

เมื่อ

1.006 = ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, กิโลจูล/กิโลกรัม °ซ

1.349 = ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้งกับไอโซโทรพานอล, กิโลจูล/กิโลกรัม °ซ

7. เอนทัลปี (h)

เอนทัลปีของอากาศชื้น มีค่าเท่ากับ ผลบวกของเอนทัลปีของอากาศแห้ง (h_a) และเอนทัลปีของไอโซโทรพานอล (h_i)

$$h = h_a + h_i H \quad (15)$$

ถ้าให้อุณหภูมิอ้างอิงเป็น 0 °ซ สามารถที่จะเขียน h_a และ h_i ได้ดังนี้

$$h_a = 1.006t$$

เมื่อ

1.006 = ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, กิโลจูล/กิโลกรัม °ซ

t = อุณหภูมิ, °ซ

และ $h_i = 2.42t + 568.90$

2.429 = ความร้อนจำเพาะของไอโซโพรพานอล, กิโลจูล/กิโลกรัม °ซ

568.690 = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของไอโซโพรพานอล, กิโลจูล/กิโลกรัม

เมื่อรวมสมการเข้าด้วยกันจะได้

$$h = 1.006t + (2.429t + 568.690)H \quad (16)$$

8. อุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_w)

ที่สถานะสมดุล สมการแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาแสดงได้ดังนี้

$$q = h_A A_r (t - t_w) \quad (17)$$

เมื่อ

q = อัตราการถ่ายเทความร้อน, กิโลจูล/ชม.

h_A = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงพื้นที่, กิโลจูล/ตร.ม. ชม. °ซ

A_r = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน, ตร.ม.

การถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการถ่ายเทมวลนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลที่ผิวกับที่อากาศรอบนอก

$$Z = k_g A_r (C_{iw} - C_{ia}) \quad (18)$$

เมื่อ

Z = อัตราการถ่ายเทมวล, กก./ชม.

k_g = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล, (กิโลจูล/ตร.ม. ชม.) × (กก. ของไอโซโพรพานอล/กก. ของอากาศแห้ง)

C_{iw}, C_{ia} = ความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลที่ผิววัสดุชิ้นและที่อากาศรอบนอก ตามลำดับ

จาก $C = P_i M_i / RT_{abs}$ แทนค่าลงในสมการที่ (18)

$$Z = k_g A_r (M_i / RT_{abs}) (P_{iw} - P_{is}) \quad (19)$$

ความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยไอโซโพรพานอล คือ

$$q = Z r_w = (r_w k_g A_r M_i / RT_{abs}) (P_{iw} - P_{is}) \quad (20)$$

เมื่อ

r_w = ความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของไอโซโพรพานอล, กิโลจูล/กิโลกรัม

ที่สภาวะสมดุล ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของสมการ (17) เท่ากับ ค่า q ในสมการ (20)

จะได้

$$\begin{aligned} \text{ความร้อนเนื่องจากการถ่ายเท} &= \text{ความร้อนเนื่องจากการระเหย} \\ hA_r(t - t_w) &= (r_w K_g A_r M_f / RT_{abs})(P_{iw} - P_{is}) \\ t - t_w &= (r_w K_g M_f / hRT_{abs})(P_{iw} - P_{is}) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } H_w &= (M_f / M_a) (P_{iw} / P_{ia}) \\ H &= (M_f / M_a) (P_f / P_a) \end{aligned}$$

และ $k_a = M_a P_a / RT_{abs}$ แทนค่าลงในสมการที่ (21)

ดังนั้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกหาได้จาก

$$t_w = t - [(r_w k_g k_a / h)(H_w - H)] \quad (22)$$

เมื่อ

h และ k_g มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$h/k_g = k_a C_H (S_c / P_r)^{2/3} \quad (23)$$

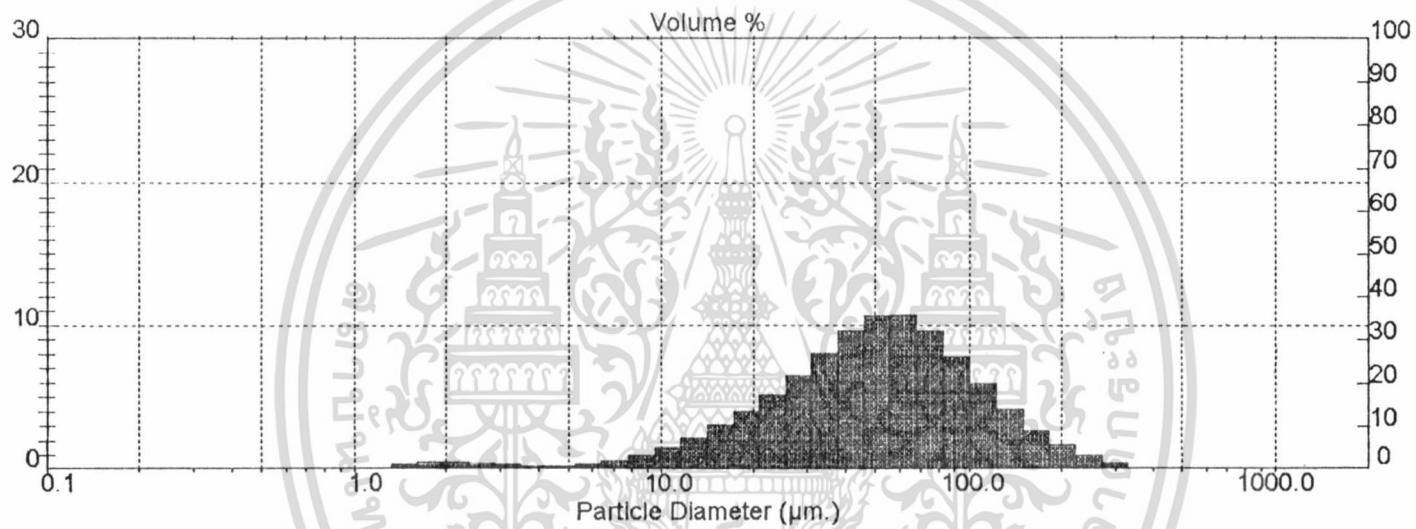
เมื่อ

$$\begin{aligned} S_c &= \text{Schmidt number of isopropanol} &&= 1.604 \\ P_r &= \text{Prandlt number of air} &&= 0.69 \\ k_a &= \text{ความหนาแน่นของอากาศแห้ง} &&= 1.293 \quad \text{กก./ลบ.ม.} \\ C_H &= \text{ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง} &&= 1.006 \quad \text{กิโลจูล/กิโลกรัม °ซ} \end{aligned}$$

| | | |
|--|--|--|
| Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + 0.10000 Polydisperse model | Volume Result | Focus = 300 mm. |
| Residual = 0.441 % d (0.5) = 50.47 μm D [4, 3] = 62.48 μm Sauter Mean (D[3,2]) = 24.76 μm Specific Surface Area = 0.2423 sq. m. / gm | Concentration = 0.088 % d (0.1) = 15.34 μm Span = 2.16 | Obscuration = 23.83 % d (0.9) = 124.18 μm Mode = 56.98 μm Density = 1.00 gm. / c.c. |

| Size (Lo) μm | Result In % | Size (Hi) μm | Result Below % | Size (Lo) μm | Result In % | Size (Hi) μm | Result Below % |
|-----------------|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------|
| 0.50 | 0.12 | 1.32 | 0.12 | 25.46 | 6.49 | 31.01 | 27.48 |
| 1.32 | 0.37 | 1.60 | 0.49 | 31.01 | 8.04 | 37.79 | 35.52 |
| 1.60 | 0.53 | 1.95 | 1.02 | 37.79 | 9.59 | 46.03 | 45.11 |
| 1.95 | 0.57 | 2.38 | 1.60 | 46.03 | 10.68 | 56.09 | 55.79 |
| 2.38 | 0.50 | 2.90 | 2.10 | 56.09 | 10.72 | 68.33 | 66.52 |
| 2.90 | 0.39 | 3.53 | 2.49 | 68.33 | 9.58 | 83.26 | 76.10 |
| 3.53 | 0.29 | 4.30 | 2.78 | 83.26 | 7.81 | 101.44 | 83.91 |
| 4.30 | 0.27 | 5.24 | 3.05 | 101.44 | 5.97 | 123.59 | 89.88 |
| 5.24 | 0.38 | 6.39 | 3.43 | 123.59 | 4.17 | 150.57 | 94.05 |
| 6.39 | 0.62 | 7.78 | 4.05 | 150.57 | 2.73 | 183.44 | 96.78 |
| 7.78 | 1.00 | 9.48 | 5.04 | 183.44 | 1.72 | 223.51 | 98.50 |
| 9.48 | 1.53 | 11.55 | 6.57 | 223.51 | 1.03 | 272.31 | 99.53 |
| 11.55 | 2.22 | 14.08 | 8.79 | 272.31 | 0.47 | 331.77 | 100.00 |
| 14.08 | 3.05 | 17.15 | 11.83 | 331.77 | 0.00 | 404.21 | 100.00 |
| 17.15 | 4.01 | 20.90 | 15.85 | 404.21 | 0.00 | 492.47 | 100.00 |
| 20.90 | 5.14 | 25.46 | 20.99 | 492.47 | 0.00 | 600.00 | 100.00 |

ตารางที่ ง.1 แสดงการกระจายของขนาดของอนุภาคซีเอ็มซี



รูปที่ ง.1 แสดงการกระจายของขนาดของอนุภาคซีเอ็มซี

ผลการทดลองครั้งที่ 1

| | | |
|---|---------|------|
| น้ำหนักงานเปล่า = | 15.0160 | กรัม |
| น้ำหนักงานเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = | 19.4966 | กรัม |
| น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = | 4.4806 | กรัม |

ตารางที่ ง.2 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของซีเอ็มซีที่เวลาในการอบแห้งต่าง ๆ

| เวลา (นาที) | น้ำหนักงานเปล่า + ซีเอ็มซี (กรัม) | น้ำหนักซีเอ็มซี (กรัม) | % ความชื้น |
|-------------|-----------------------------------|------------------------|------------|
| 0 | 22.5596 | 7.5436 | 68.36 |
| 5 | 21.9787 | 6.9627 | 55.40 |
| 10 | 21.4816 | 6.4656 | 44.30 |
| 15 | 21.0357 | 6.0197 | 34.35 |
| 20 | 20.7147 | 5.6987 | 27.19 |
| 25 | 20.5456 | 5.5296 | 23.41 |
| 30 | 20.4682 | 5.4522 | 21.68 |
| 35 | 20.3932 | 5.3772 | 20.01 |
| 40 | 20.3231 | 5.3071 | 18.45 |
| 45 | 20.2528 | 5.2368 | 16.88 |
| 50 | 20.1901 | 5.1741 | 15.48 |
| 55 | 20.1287 | 5.1127 | 14.11 |
| 60 | 20.0703 | 5.0543 | 12.80 |
| 65 | 20.0175 | 5.0015 | 11.63 |
| 70 | 19.9653 | 4.9493 | 10.46 |
| 75 | 19.9160 | 4.9000 | 9.36 |
| 80 | 19.8652 | 4.8492 | 8.23 |
| 85 | 19.8219 | 4.8059 | 7.26 |
| 90 | 19.7809 | 4.7649 | 6.35 |
| 95 | 19.7461 | 4.7301 | 5.57 |
| 100 | 19.7126 | 4.6966 | 4.82 |
| 105 | 19.6828 | 4.6668 | 4.16 |
| 110 | 19.6543 | 4.6383 | 3.52 |
| 115 | 19.6284 | 4.6124 | 2.94 |
| 120 | 19.6074 | 4.5914 | 2.47 |

ตารางที่ ๓.๓ แสดงค่าความเร็วในการอบแห้ง (R_d) ที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่าง ๆ

(ผลการทดลองครั้งที่ 1)

| % ความชื้น | R_d | % ความชื้น | R_d |
|------------|-------|------------|-------|
| 61.88 | -2.59 | 12.21 | -0.24 |
| 49.85 | -2.22 | 11.04 | -0.23 |
| 39.33 | -1.99 | 9.91 | -0.22 |
| 30.77 | -1.43 | 8.79 | -0.23 |
| 25.30 | -0.75 | 7.74 | -0.19 |
| 22.55 | -0.35 | 6.80 | -0.18 |
| 20.85 | -0.33 | 5.96 | -0.16 |
| 19.23 | -0.31 | 5.19 | -0.15 |
| 17.66 | -0.31 | 4.49 | -0.13 |
| 16.18 | -0.28 | 3.84 | -0.13 |
| 14.79 | -0.27 | 3.23 | -0.12 |
| 13.46 | -0.26 | 2.71 | -0.09 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองครั้งที่ 2

| | | |
|---|---------|------|
| น้ำหนักงานเปล่า = | 13.9440 | กรัม |
| น้ำหนักงานเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = | 18.4262 | กรัม |
| น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = | 4.4822 | กรัม |

ตารางที่ ๓.4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของซีเอ็มซีที่เวลาในการอบแห้งต่าง ๆ

| เวลา (นาท) | น้ำหนักงานเปล่า + ซีเอ็มซี (กรัม) | น้ำหนักซีเอ็มซี (กรัม) | % ความชื้น |
|------------|-----------------------------------|------------------------|------------|
| 0 | 21.5764 | 7.6324 | 70.28 |
| 5 | 20.9732 | 7.0292 | 56.82 |
| 10 | 20.4634 | 6.5194 | 45.45 |
| 15 | 20.0325 | 6.0885 | 35.84 |
| 20 | 19.8467 | 5.7986 | 29.37 |
| 25 | 19.4327 | 5.5532 | 23.89 |
| 30 | 19.3443 | 5.4003 | 20.48 |
| 35 | 19.2732 | 5.3292 | 18.90 |
| 40 | 19.203 | 5.259 | 17.33 |
| 45 | 19.1482 | 5.2042 | 16.11 |
| 50 | 19.0845 | 5.1405 | 14.69 |
| 55 | 19.0231 | 5.0791 | 13.32 |
| 60 | 18.9705 | 5.0265 | 12.14 |
| 65 | 18.9169 | 4.9729 | 10.95 |
| 70 | 18.8606 | 4.9166 | 9.69 |
| 75 | 18.8117 | 4.8677 | 8.60 |
| 80 | 18.763 | 4.819 | 7.51 |
| 85 | 18.7205 | 4.7765 | 6.57 |
| 90 | 18.6803 | 4.7363 | 5.67 |
| 95 | 18.6441 | 4.7001 | 4.86 |
| 100 | 18.6106 | 4.6666 | 4.11 |
| 105 | 18.5844 | 4.6404 | 3.53 |
| 110 | 18.5556 | 4.6116 | 2.89 |
| 115 | 18.5297 | 4.5857 | 2.31 |
| 120 | 18.5032 | 4.5592 | 1.72 |

ตารางที่ ๓.5 แสดงค่าความเร็วในการอบแห้ง (R_i) ที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่าง ๆ
(ผลการทดลองครั้งที่ 2)

| % ความชื้น | R_i | % ความชื้น | R_i |
|------------|-------|------------|-------|
| 63.55 | -2.69 | 11.55 | -0.24 |
| 51.14 | -2.27 | 10.32 | -0.25 |
| 40.64 | -1.92 | 9.15 | -0.22 |
| 32.60 | -1.29 | 8.06 | -0.22 |
| 26.63 | -1.09 | 7.04 | -0.19 |
| 22.19 | -0.68 | 6.12 | -0.18 |
| 19.69 | -0.32 | 5.27 | -0.16 |
| 18.11 | -0.31 | 4.49 | -0.15 |
| 16.72 | -0.24 | 3.82 | -0.12 |
| 15.40 | -0.28 | 3.21 | -0.13 |
| 14.00 | -0.27 | 2.60 | -0.12 |
| 12.73 | -0.23 | 2.01 | -0.12 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองครั้งที่ 3

| | | |
|---|---------|------|
| น้ำหนักงานเปล่า = | 15.0116 | กรัม |
| น้ำหนักงานเปล่า + น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = | 19.4398 | กรัม |
| น้ำหนักซีเอ็มซีหลังอบ = | 4.4282 | กรัม |

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของซีเอ็มซีที่เวลาในการอบแห้งต่าง ๆ

| เวลา (นาที) | น้ำหนักงานเปล่า + ซีเอ็มซี (กรัม) | น้ำหนักซีเอ็มซี (กรัม) | % ความชื้น |
|-------------|-----------------------------------|------------------------|------------|
| 0 | 22.5738 | 7.5622 | 70.77 |
| 5 | 21.9924 | 6.9808 | 57.64 |
| 10 | 21.4971 | 6.4855 | 46.46 |
| 15 | 21.0514 | 6.0398 | 36.39 |
| 20 | 20.7154 | 5.7038 | 28.81 |
| 25 | 20.4590 | 5.4474 | 23.02 |
| 30 | 20.3623 | 5.3507 | 20.83 |
| 35 | 20.2784 | 5.2668 | 18.94 |
| 40 | 20.2063 | 5.1947 | 17.31 |
| 45 | 20.1307 | 5.1191 | 15.60 |
| 50 | 20.0644 | 5.0528 | 14.11 |
| 55 | 20.0024 | 4.9908 | 12.70 |
| 60 | 19.9426 | 4.9310 | 11.35 |
| 65 | 19.8899 | 4.8783 | 10.16 |
| 70 | 19.8378 | 4.8262 | 8.99 |
| 75 | 19.7880 | 4.7764 | 7.86 |
| 80 | 19.7369 | 4.7253 | 6.71 |
| 85 | 19.6946 | 4.6830 | 5.75 |
| 90 | 19.6525 | 4.6409 | 4.80 |
| 95 | 19.6180 | 4.6064 | 4.02 |
| 100 | 19.5844 | 4.5728 | 3.27 |
| 105 | 19.5544 | 4.5428 | 2.59 |
| 110 | 19.5260 | 4.5144 | 1.95 |
| 115 | 19.5006 | 4.4890 | 1.37 |
| 120 | 19.4790 | 4.4674 | 0.89 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 วิศวกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อบุคคลอื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗.7 แสดงค่าความเร็วในการอบแห้ง (R_d) ที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่าง ๆ
(ผลการทดลองครั้งที่ 3)

| % ความชื้น | R_d | % ความชื้น | R_d |
|------------|-------|------------|-------|
| 64.21 | -2.63 | 10.76 | -0.24 |
| 52.05 | -2.24 | 9.58 | -0.24 |
| 41.43 | -2.01 | 8.43 | -0.22 |
| 32.60 | -1.52 | 7.29 | -0.23 |
| 25.91 | -1.16 | 6.23 | -0.19 |
| 21.92 | -0.44 | 5.28 | -0.19 |
| 19.89 | -0.38 | 4.41 | -0.16 |
| 18.12 | -0.33 | 3.64 | -0.15 |
| 16.46 | -0.34 | 2.93 | -0.14 |
| 14.85 | -0.30 | 2.27 | -0.13 |
| 13.40 | -0.28 | 1.66 | -0.11 |
| 12.03 | -0.27 | 1.13 | -0.10 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

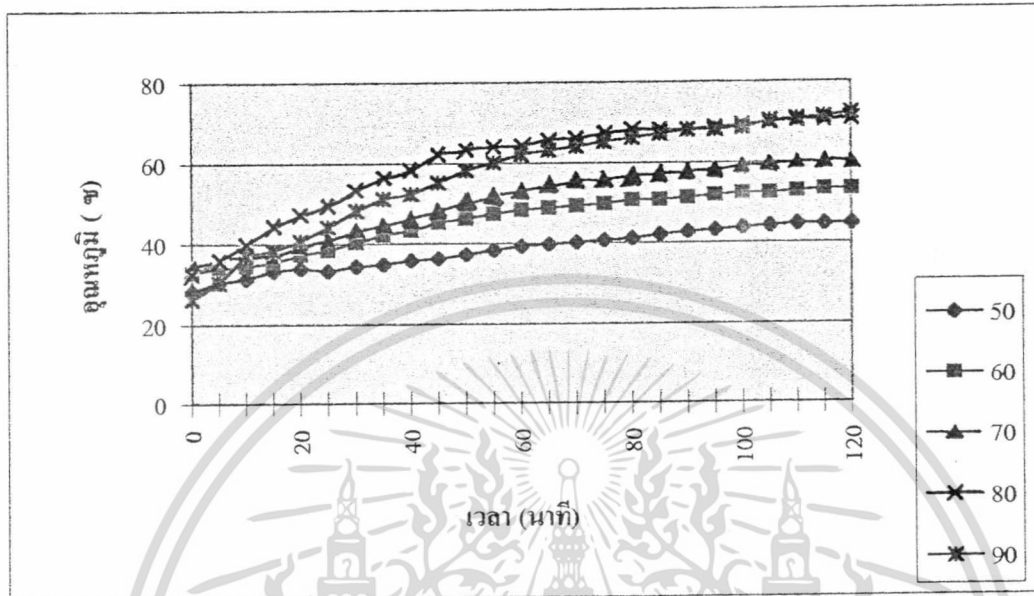
ผลการทดลอง หาค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของไอโซโพรพานอลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ ๖.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_w) กับเวลา

ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

| เวลา (นาที) / อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|---|------|------|------|------|------|
| 0 | 28 | 32.5 | 34 | 32 | 26 |
| 5 | 30 | 33.5 | 36 | 35.5 | 30 |
| 10 | 31 | 34 | 37 | 39.5 | 37 |
| 15 | 33 | 35 | 37 | 44 | 38 |
| 20 | 33.5 | 37 | 39 | 47 | 40.5 |
| 25 | 33 | 38 | 41 | 49 | 44 |
| 30 | 34 | 40 | 43 | 53 | 48 |
| 35 | 34.5 | 42 | 44.5 | 56 | 51 |
| 40 | 35.5 | 43 | 46 | 58 | 52 |
| 45 | 36 | 45 | 48 | 62 | 55 |
| 50 | 37 | 46 | 50 | 63 | 58 |
| 55 | 38 | 47 | 51.5 | 64 | 60 |
| 60 | 39 | 48 | 53 | 64 | 62 |
| 65 | 39.5 | 48.5 | 54 | 65.5 | 63 |
| 70 | 40 | 49 | 55.5 | 66 | 64 |
| 75 | 40.5 | 49.5 | 55.5 | 67 | 65 |
| 80 | 41 | 50.5 | 56.5 | 68 | 66 |
| 85 | 42 | 50.5 | 57 | 68 | 67 |
| 90 | 42.5 | 51 | 57.5 | 68 | 68 |
| 95 | 43 | 51.5 | 58 | 68.5 | 68 |
| 100 | 43.5 | 52 | 59 | 69 | 68.5 |
| 105 | 44 | 52 | 59.5 | 69.5 | 70 |
| 110 | 44.5 | 52.5 | 60 | 70 | 70.5 |
| 115 | 44.5 | 53 | 60 | 70 | 71 |
| 120 | 44.5 | 53 | 60 | 70.5 | 72 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.๒ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียกกับเวลาที่อุณหภูมิความร้อนต่าง ๆ

ตารางที่ ๓.๑ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_w , °ซ)
กับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (t_d , °ซ)

| อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (t_d , °ซ) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_w , °ซ) |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 90 | 72 |
| 80 | 68 |
| 70 | 55.5 |
| 60 | 48 |
| 50 | 39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม

เอกสารอ้างอิง

1. ธวัชชัย ศิริรัตน์, ธวัชชัย อธิพูนธนกร และนงลักษณ์ ชินชุมากร "การศึกษาเพื่อการออกแบบโรงงานต้นแบบในการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส" วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2535
2. Abbott, M.M., Smith, J.M. and Van Ness, H.C., Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 5th ed., pp. 628-685, McGraw-Hill International, 1996
3. Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., Transport Phenomena, pp. 8-9, 46-47, John Wiley & Sons, New York, 1960
4. Felder, R.M. and Rousseau, R.W., Elementary Principles of Chemical Processes, 2nd ed., pp. 364-365, John Wiley & Sons, New York, 1986
5. Geankoplis, C.J., Transport Processes and Unit Operations, 3rd ed., Prentice-Hall International, Inc., 1993
6. Hewitt, G.F., Shires, G.L. and Bott, T.R., Process Heat Transfer, pp. 998, CRC Press, Inc., London, 1994
7. Himmelblau, D.M., Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering, 6th ed., pp. 420-421, Prentice-Hall International, Inc., 1996
8. Hougen, O.A., Watson, K.M. and Ragatz, R.A., Chemical Process Principles, Part I Material and Energy Balances, 2nd ed., pp. 278-279, John Wiley & Sons, New York, 1954
9. Land, C.M. van't, Industrial Drying Equipment, pp. 106-109, Marcel Dekker, Inc., 1991
10. Nonhebel, G. and Moss, A.A.H., Drying of Solids in the Chemical Industry, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd., 1971
11. Perry, R.H. and Green, D.W., Eds., Perry's Chemical Engineers' Handbook, 6th ed., pp. (20)-20, (20)-22, (20)-25, (20)-55, (20)-62, McGraw-Hill Book Company, New York, 1984
12. Reid, R.C., Prausnitz, J.M. and Poling, B.E., The Properties of Gases and Liquids, 4th ed., pp. 230-231, McGraw-Hill Book Company, New York, 1989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

13. กุลธนา การุณยานนท์ นุศรา บุญประเสริฐ และสุนันท์ อินทรปรีชา"จลนพลศาสตร์ของ
ปฏิกิริยาการผลิตโซเดียมคาร์บอเนตซีเมตลเซลลูโลสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเฟสทรานเฟอร์"
วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2536
14. เตชา วลีเกียรติกุล ประพันธ์ ศรีคุณ และพัฒนพงศ์ สิทธิสาร"การศึกษาผลของกำลังบิดต่อ
ปริมาตรที่มีต่อการขยายขนาดของปฏิกรณ์เคมีในการสังเคราะห์คาร์บอเนตซีเมตลเซลลูโลส"
วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2538
15. เรียวโซ โทเอ อุปกรณ์อบแห่งในอุตสาหกรรม แปลโดย วิวัฒน์ ตัณฑะพาณิชกุล พิมพ์ครั้งที่ 3
หน้า 1-3, 40-43, 71-81 สำนักพิมพ์ กรุงเทพฯ 2529
16. สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ การอบแห้งอาหาร พิมพ์ครั้งที่ 4 หน้า 15-37
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี 2532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้