



เกษตรกรรม

อุตสาหกรรมไม้



เทคโนโลยีชีวภาพ



อุปกรณ์ ๑ อบแห้ง ในอุตสาหกรรม

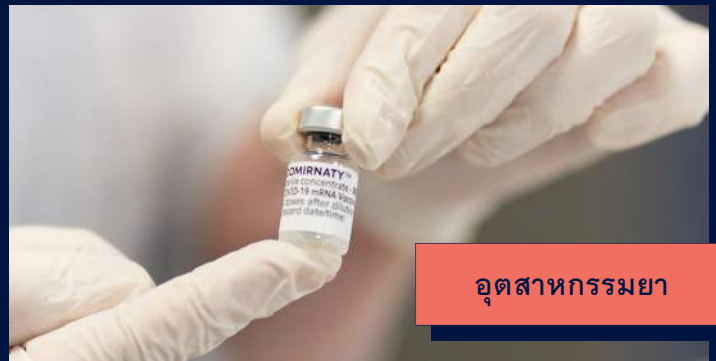
- ฉบับปรับปรุง
เพิ่มเติมใหม่
ปี พ.ศ. 2569

ศ. ดร.เรียวโซ โตเอ
ศ. ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล
ราชบัณฑิต
ศ. ดร.สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา
ราชบัณฑิต

อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม



อุตสาหกรรมยา



อุตสาหกรรมสิ่งทอ



อุตสาหกรรมเคมี



อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม

ฉบับปรับปรุงเพิ่มเติมใหม่ ปี พ.ศ. 2569

ศ. ดร.เรียวไซ โตเอ : ผู้เขียนหลัก (ส่วนที่เขียนเป็นต้นฉบับภาษาญี่ปุ่น)
ศ. ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล : บรรณาธิการ ผู้เขียนร่วม และผู้แปล
เรียบเรียงต้นฉบับส่วนที่มาจากภาษาญี่ปุ่น
ศ. ดร.สั๊กกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา : ผู้เขียนร่วมในฉบับปรับปรุงใหม่นี้

อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม

ศ. ดร.เรียวโซ โทเอ, ศ. ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และ ศ. ดร.สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

National Library of Thailand Cataloging in Publication Data

เรียวโซ โทเอ.

อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม.-- กรุงเทพฯ : [ม.ป.พ.], 2569.

212 หน้า.

1. การอบแห้ง. 2. เครื่องอบแห้ง. I. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, ผู้แต่งร่วม.

II. สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, ผู้แต่งร่วม. III. ชื่อเรื่อง.

660.28426

ISBN (e-book) 978-616-636-017-2

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ. 2558

จำหน่ายในรูปแบบออนไลน์ ครั้งที่ 1: พฤษภาคม 2569

ช่องทางการจำหน่าย : <http://www.chulabook.com>

ราคา : 322 บาท

จัดทำโดย : ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล

เลขที่ 101/1 ถนนลาดพร้าว ซอย 42 แยก 3 แขวงสามเสนนอก เขตห้วยขวาง กทม. 10310

โทร. 087-050-2201 e-mail: wiwut.t@chula.ac.th, wiwutt@yahoo.com

สั่งซื้อได้ที่ : ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กทม. 10330

<http://www.chulabook.com>

โทร. 08-6323-3703-4

customer@cubook.chula.ac.th, info@cubook.chula.ac.th

Apps: CU-eBook Store

คำนำจากบรรณาธิการ

ทุกครั้งที่เราจะเริ่มเขียนหนังสือ เราต้องคำนึงถึงคำถามสำคัญที่ว่า **หนังสือเล่มนี้จะสร้างคุณค่าใด ๆ ให้กับสังคมหรือไม่?** ข้าพเจ้าเชื่อว่า หนังสือเล่มนี้ตอบคำถามนี้ด้วยคำตอบว่า “ใช่” หนังสือเล่มนี้จะได้ตอบคำถามสำคัญว่า จะดำเนินการอบแห้งในอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลได้อย่างไร โดยเราจำเป็นต้องพิจารณาสิ่งต่อไปนี้

- (1) เข้าใจหลักการพื้นฐานของการอบแห้ง
- (2) เลือกประเภทเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม
- (3) เข้าใจลักษณะพิเศษและโครงสร้างของเครื่องอบแห้งแต่ละประเภท
- (4) คำนวณออกแบบขั้นพื้นฐานของเครื่องอบแห้งที่สนใจ
- (5) กำหนดเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งที่สนใจ

ความท้าทายโดยธรรมชาติอยู่ที่ข้อเท็จจริงที่ว่า วัสดุที่อุตสาหกรรมต้องการทำให้แห้งมีหลากหลายประเภท หลากหลายรูปร่าง หลายเฟส และหลายข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น ในทางปฏิบัติ อุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีวิธีการอบแห้งและเครื่องอบแห้งหลากหลายประเภทให้เลือกใช้ นอกจากนี้ การอบแห้งยังเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงมากในการกำจัดความชื้นด้วยการระเหย จึงยังต้องเลือกและใช้งานเครื่องอบแห้งอย่างเหมาะสมถูกต้อง

หนังสือเล่มนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้ช่างเทคนิค วิศวกร และนักวิทยาศาสตร์ที่ปฏิบัติงานด้านการอบแห้ง สามารถเข้าใจหัวข้อต่าง ๆ ข้างต้นได้ ดังนั้น จึงนำเสนอสูตร สมการ ตาราง แผนผัง และภาพกราฟิกจำนวนมาก รวมถึงตัวอย่างการคำนวณอีกด้วย นอกจากนี้ ยังให้ตัวอย่างจริงของกระบวนการอบแห้งในอุตสาหกรรมจำนวนมากไว้เป็นข้อมูลอ้างอิงที่หาได้ยากอีกด้วย

หนังสือเล่มนี้ได้ใช้ประโยชน์บ่อยครั้งจากเนื้อหาของหนังสือภาษาไทยเล่มก่อนหน้าของบรรณาธิการคนเดียวกัน ซึ่งร่วมเขียนหนังสือชุดคล้ายกัน และยังคงเป็นหนึ่งในผู้ร่วมเขียนหนังสือเล่มนี้ แต่ยังมีบทนำเกี่ยวกับความสำคัญที่เพิ่มสูงขึ้นของปฏิบัติการอบแห้งขั้นสูงในอุตสาหกรรมอาหาร และเพิ่มเติมบทใหม่อีก 2 บทเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง และเครื่องอบแห้งแบบไอน้ำยวดยิ่ง อย่างไรก็ตาม ฉบับพิมพ์ใหม่นี้ก็สามารถครอบคลุมเพียงเฉพาะเครื่องอบแห้งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมเท่านั้น แม้ว่าแนวทางและความรู้พื้นฐานในหนังสือเล่มนี้ ก็ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการพัฒนาและการใช้งานเครื่องอบแห้งขั้นสูงประเภทอื่น ๆ ได้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.เรียวโซ โทเอ ผู้ล่วงลับ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญา
นิพนธ์ของข้าพเจ้าสมัยที่ศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยเกียวโต และเป็นผู้เขียนต้นฉบับภาษาญี่ปุ่นของฉบับพิมพ์ก่อน
หน้านี้ ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณอย่างจริงใจต่อ ดร.ศิริชาญ จิระพงษ์พันธ์ คุณภักธาวุธ บุญเจริญ และ
คุณสาธิต อำนวยขจร สำหรับความช่วยเหลืออย่างดีในการแปลและผลิตซ้ำต้นฉบับบนกระดาษที่เต็มไปด้วย
สูตรคำนวณทางคณิตศาสตร์ ตาราง และภาพกราฟิก ให้อยู่ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่แก้ไขเพิ่มเติมได้สะดวก
สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ สำนักพิมพ์และศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือใน
การผลิต e-Book เล่มนี้ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์และด้านการตลาด

บรรณาธิการ : ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ราชบัณฑิต

ศาสตราจารย์กิตติคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์เกียรติคุณ Tokyo Institute of Technology

สารบัญ

คำนำจากบรรณาธิการ	ก
บทนำ ความสำคัญของเทคโนโลยีการอบแห้งในอุตสาหกรรม	1
บทที่ 1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง	5
1.1 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (Drying Characteristic Curve)	5
1.2 ความเร็วของการอบแห้งที่คงที่ R_c	7
1.3 ความเร็วของการอบแห้งที่ลดลง R_d (Decreasing Rate of Drying)	11
1.4 อัตราส่วนความชื้นวิกฤต w_c	16
1.5 อัตราส่วนความชื้นสมดุล w_e	16
1.6 รูปกราฟความชื้น (Humidity Chart)	21
บทที่ 2 วิธีการเลือกเครื่องอบแห้ง (Dryers)	23
2.1 หลักการพื้นฐานของการเลือก	23
2.1.1 ลักษณะเด่นของกระบวนการอบแห้ง	23
2.1.2 หัวข้อสำหรับพิจารณาก่อนทำการเลือกประเภทเครื่องอบแห้ง	24
2.2 การเลือกอุปกรณ์อบแห้ง	26
2.3 วิธีประเมินขนาดของเครื่องอบแห้ง	33
บทที่ 3 หลักการออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบต่อเนื่อง	37
3.1 เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดไหลขนาน หรือสวนทาง	37
3.1.1 การประมาณกระบวนการอบแห้งอย่างคร่าว ๆ	38
3.1.2 การประเมินค่าอุณหภูมิที่ทางออกของผลิตภัณฑ์อบแห้ง	39
3.1.3 การกำหนดเงื่อนไขที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องอบแห้ง	40
3.1.4 การคำนวณหาปริมาตรของเครื่องอบแห้งในแต่ละช่วงของการอบแห้ง	41
3.2 เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดการไหลตัด	43
3.2.1 เครื่องอบแห้งต่อเนื่องแบบ fluidized bed	43
3.2.2 เครื่องอบแห้งต่อเนื่องแบบ fluidized bed ที่มีห้องในแนวนระดับหลายห้อง (Horizontal Multi-Chamber Continuous Fluidized Bed Dryer)	46
3.2.3 เครื่องอบแห้งต่อเนื่องแบบ fluidized bed ที่ประกอบด้วยทรงกระบอกเดี่ยว (Single Cylinder Continuous Fluidized Bed Dryer)	48
3.2.4 การกระจายของเวลาที่วัสดุอยู่ใน fluidized bed แบบต่อเนื่อง (Residence Time Distribution in a Continuous Fluidized Bed)	50
3.2.5 เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งสำหรับเครื่องอบแห้งไม่ต่อเนื่องแบบ fluidized bed	53
3.2.6 เครื่องอบแห้งต่อเนื่องแบบไหลผ่าน (Continuous Through Flow Dryers)	54

บทที่ 4 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic Conveying Dryer)	55
4.1 การจำแนกประเภท	55
4.2 จุดเด่นพิเศษ	55
4.3 ชนิดของเครื่องอบแห้ง	55
4.3.1 ชนิดป้อนโดยตรง (Direct Feed Type)	55
4.3.2 ชนิดมีเครื่องกระจายวัสดุ (Disperser-Attached Type)	56
4.3.3 ชนิดมีเครื่อง disintegrator (Disintegrator-Attached Type)	56
4.4 ขอบเขตของการประยุกต์	61
4.5 ตัวอย่างการปฏิบัติงาน	64
4.6 ข้อควรระวังระหว่างปฏิบัติงาน	67
 บทที่ 5 เครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary Dryer)	 69
5.1 การจำแนกประเภท	69
5.1.1 เครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนโดยตรง	69
5.1.2 เครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนโดยทางอ้อม	69
5.1.3 เครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดรับความร้อนทั้งโดยตรงและโดยทางอ้อม	70
5.2 ลักษณะเด่นของเครื่องอบแห้งแบบหมุน	70
5.3 โครงสร้าง	73
5.4 ขอบเขตการประยุกต์	75
5.5 ตัวอย่างการปฏิบัติงาน	75
5.6 ข้อพึงระวังในการปฏิบัติงาน	75
5.7 ตัวแปรที่สำคัญต่อการออกแบบ	76
 บทที่ 6 เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน (Through-Flow Dryer)	 81
6.1 หลักการพื้นฐานของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน	81
6.1.1 อัตราการอบแห้งแบบไหลผ่าน	81
6.1.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ha (สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร ka)	85
6.1.3 ผลลดความดันสำหรับการไหลผ่าน	86
6.1.4 ปริมาตรของเครื่องอบแห้งที่ต้องใช้	87
6.2 เครื่องอบแห้งแบบกล่องไหลผ่าน (Through-Flow Chamber Dryer)	89
6.3 เครื่องอบแห้งแบบแบนด์ไหลผ่าน (Through-Flow Band Dryer)	89
6.3.1 รูปแบบของโครงสร้างและการจำแนกประเภท	89
6.3.2 ลักษณะพิเศษ	92
6.3.3 ตัวอย่างของวิธีป้อนและเครื่องขึ้นรูป	93
6.3.4 หัวข้อที่พึงระวังในการวางแผนและออกแบบ	93

6.3.5 ตัวอย่างของการปฏิบัติงาน	94
6.4 เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดวางตั้ง (ชั้นวัสดุเคลื่อนที่)	94
6.4.1 การจำแนกประเภท	94
6.4.2 ลักษณะพิเศษ	94
6.4.3 โครงสร้าง	98
6.4.4 ขอบเขตของการประยุกต์	98
6.4.5 ตัวอย่างของการปฏิบัติงาน	99
6.4.6 ข้อควรระวังในการปฏิบัติงาน	99
6.5 เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดหมุน (Through-Flow Rotary Dryer)	100
6.5.1 การจำแนกประเภท	100
6.5.2 ลักษณะพิเศษ	100
6.5.3 โครงสร้าง	101
6.5.4 ขอบเขตของการประยุกต์ใช้งาน	101
6.5.5 ตัวอย่างการปฏิบัติงาน	102
6.5.6 หัวข้อที่ระวังในการปฏิบัติงาน	102
บทที่ 7 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	105
7.1 คำนำ	105
7.2 โครงสร้างและประเภทของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	105
7.3 ลักษณะสมบัติของเครื่องพ่นฝอย	108
7.4 เส้นโคจรของหยดของเหลว	112
7.5 ลักษณะสมบัติการอบแห้งของหยดของเหลว	117
7.6 การคำนวณออกแบบหอบแห้งแบบพ่นฝอย	117
7.7 ตัวอย่างการปฏิบัติงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	120
บทที่ 8 เครื่องอบแห้งแบบนำความร้อนชนิดรางกวน	121
8.1 คำนำ	121
8.2 ประเภทของเครื่องอบแห้ง	121
8.3 สมบัติการถ่ายเทความร้อน	123
8.4 การคำนวณเวลาที่ต้องใช้หอบแห้ง และปริมาตรของเครื่องอบแห้ง	127
8.5 ตัวอย่างการปฏิบัติงาน	132
บทที่ 9 การอนุรักษ์พลังงานในการอบแห้ง	135
9.1 การไล่น้ำออกก่อนอบแห้ง	135
9.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง	135
9.3 การป้องกันการสูญเสียความร้อน	136

9.4 การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยการนำความร้อนขนาดยักษ์	136
9.5 การเปรียบเทียบการไหลแบบขนานกับการไหลแบบสวนทาง สำหรับเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องที่ใช้ลมร้อน	137
9.6 การอนุรักษ์พลังงานโดยการหมุนเวียนก๊าซที่ปล่อยออก	138
9.6.1 กรณีที่อุณหภูมิและความชื้นค่อนข้างต่ำ (การให้ความร้อนแก่อากาศได้ต่ำกว่า 200°C)	140
9.6.2 การเปรียบเทียบวิธีการคำนวณอย่างคร่าว ๆ (A), (B) กับวิธีคำนวณอย่างละเอียด (C)	147
9.6.3 กรณีอุณหภูมิสูงและความชื้นสูง (การใช้ก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิเกิน 200°C)	149
9.6.4 การเปลี่ยนแปลงค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร h_a	157
9.6.5 การเปรียบเทียบวิธีอย่างคร่าว ๆ (A), (B) และวิธีที่แม่นยำ (C)	159
9.7 การเก็บความร้อนจากลมทิ้งกลับมาใช้อีก	160
9.7.1 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างลมทิ้งกับลมเข้าใหม่	160
9.7.2 การเพิ่มความเข้มข้นของของเหลวโดยใช้ลมทิ้ง	161
9.7.3 การเก็บความร้อนจากแหล่งความร้อนก๊าซทิ้งทั่ว ๆ ไป ($100\text{--}200^{\circ}\text{C}$) กลับมาใช้	161
9.8 การเก็บความร้อนสัมผัสคืนมาจากวัสดุที่อบแห้งแล้ว	161
9.9 การใช้ความร้อนทิ้งที่ได้จากการเผาก๊าซกลั่นเหม็นให้เป็นประโยชน์	161
9.10 การลดพลังงานรวมที่ต้องใช้ในการอบแห้ง	162
9.10.1 การพิจารณาเงื่อนไขของการปฏิบัติการ (การลดเวลาในการปฏิบัติงาน)	162
9.10.2 การอบแห้งแบบสองขั้นตอน	163
บทที่ 10 การอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying)	165
1. บทนำ	165
2. หลักการอบแห้งแบบแช่แข็ง	166
2.1 ขั้นตอนการแช่แข็ง	170
2.2 การอบแห้งปฐมภูมิ	170
2.3 การอบแห้งทุติยภูมิ	172
3. เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง	173
บทส่งท้าย	176
เอกสารอ้างอิง	177
บทที่ 11 การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam Drying)	179
1. บทนำ	179
2. หลักการพื้นฐานของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	180
2.1 ปฏิกิริยาการผกผันในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	185
3. เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	186
3.1 เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันบรรยากาศและที่สูงกว่าความดันบรรยากาศ	186
3.2 เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ	190

บทส่งท้าย	193
เอกสารอ้างอิง	194
ดัชนี	X
ประวัติย่อของคณะผู้เขียน	XIII

บทนำ

ความสำคัญของเทคโนโลยีการอบแห้งในอุตสาหกรรม

ก่อนที่ผู้อ่านจะศึกษาใช้ประโยชน์จากหนังสือเล่มนี้ ผู้เขียนใคร่ขอแนะนำว่า เทคโนโลยีการอบแห้งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดความชื้นเพื่อจุดประสงค์ต่าง ๆ ต่อไปนี้คือรายชื่อตัวอย่างอุตสาหกรรมที่เทคโนโลยีการอบแห้งมีบทบาทสำคัญ พร้อมตัวอย่างลักษณะการใช้งาน :

1. อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม:

- การอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ผลไม้ ผัก ธัญพืช และเนื้อสัตว์ เพื่อถนอมอาหารและเพิ่มอายุการเก็บรักษา
- การอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับการผลิตส่วนผสมและอาหารผง เช่น นมผงและกาแฟผง

2. อุตสาหกรรมยา:

- การอบแห้งผลิตภัณฑ์ยา รวมถึงส่วนประกอบออกฤทธิ์ ผง เม็ด และแท็บเล็ตของยา
- การอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze drying; Lyophilization) เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์ยาและวัคซีนที่มีความอ่อนไหวต่อความร้อน

3. อุตสาหกรรมเคมี:

- การอบแห้งสารประกอบเคมีและสารตัวกลาง เพื่อนำไปแปรรูปหรือจัดเก็บต่อ
- การอบแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อผลิตสารเคมีผงและตัวเร่งปฏิกิริยา

4. อุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษ:

- การอบแห้งกระดาษและวัสดุเยื่อกระดาษในกระบวนการผลิตกระดาษ

5. อุตสาหกรรมสิ่งทอ:

- การอบแห้งผ้า เส้นด้าย และผลิตภัณฑ์สิ่งทอ หลังจากผ่านกระบวนการเปียกต่าง ๆ เช่น การย้อมสีและการตกแต่ง

6. อุตสาหกรรมไม้:

- การอบแห้งผลิตภัณฑ์จากไม้ เช่น ไม้แปรรูปและไม้อัด เพื่อลดความชื้นและป้องกันการผุพัง

7. อุตสาหกรรมเซรามิกและแก้ว:

- การอบแห้งวัสดุเซรามิกและแก้วให้แห้งก่อนทำการเผาหรือหลอมละลาย

8. เกษตรกรรม:

- การอบแห้งพืชผลและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เพื่อเก็บรักษาและส่งแจกจำหน่าย

9. ยานยนต์และยานอวกาศ:

- การทำแห้งส่วนประกอบและชิ้นส่วนในระหว่างกระบวนการผลิตและการทำความสะอาด

10. การทำเหมืองและการแปรรูปแร่:

- การอบแห้งแร่และสินแร่ก่อนการแปรรูปหรือขนส่งเพิ่มเติม

11. เทคโนโลยีชีวภาพ:

- การอบแห้งวัสดุชีวภาพและชีวเภสัชภัณฑ์ รวมถึงโปรตีนและวัคซีน

12. อิเล็กทรอนิกส์:

- การทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แห้ง เพื่อกำจัดความชื้นและป้องกันความเสียหาย

13. การบำบัดสิ่งแวดล้อมและน้ำเสีย:

- การทำแห้งตะกอนกัมมันต์จากโรงงานบำบัดน้ำเสีย เพื่อลดปริมาณและต้นทุนการกำจัด

14. การผลิตพลังงานทดแทน:

- การอบแห้งวัตถุดิบชีวมวล เพื่อลดน้ำหนักและเพิ่มค่าความร้อนในการผลิตพลังงานชีวมวล

15. การก่อสร้าง:

- การทำแห้งของวัสดุก่อสร้าง เช่น คอนกรีต ปูนปลาสเตอร์ และสี

16. การวิจัยอวกาศและการบินอวกาศ:

- เทคโนโลยีการอบแห้งใช้ในการเตรียมอาหารอวกาศสำหรับนักบินอวกาศและเพื่อการวิจัยในอวกาศ

17. การอนุรักษ์ศิลปะและมรดกทางวัฒนธรรม:

- เทคโนโลยีการอบแห้งใช้ในการบูรณะและอนุรักษ์ผลงานศิลปะ ต้นฉบับ และโบราณวัตถุ

เทคโนโลยีการอบแห้งมีความจำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมเหล่านี้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ลดปริมาณของเสีย ปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และตอบสนองข้อกำหนดเฉพาะต่างๆ เช่น การควบคุมและรักษาความชื้น วิธีการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการอบแห้งอาจแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับอุตสาหกรรมและลักษณะการใช้งานเฉพาะ ดังนั้น เครื่องอบแห้งในอุตสาหกรรมจึงมีหลากหลาย เป็นร้อย ๆ รูปแบบ

สรุปแล้ว เครื่องอบแห้งในอุตสาหกรรมมีหลากหลายประเภทและหลากหลายรูปแบบ แต่ละแบบได้รับการออกแบบสำหรับการใช้งานที่เหมาะสมตลอดจนอุตสาหกรรมเฉพาะ ต่อไปนี้คือ ตัวอย่างรายชื่อเครื่องอบแห้งทางอุตสาหกรรมหลัก ๆ 11 ประเภท :

1. **เครื่องอบแห้งแบบหมุน:** เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้กันทั่วไปมากที่สุดประเภทหนึ่ง โดยที่วัสดุชิ้นจะร่วงหล่นในถังหมุน ขณะที่ถูกให้ความร้อนทางอ้อมหรือโดยตรง
2. **เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด:** วัสดุถูกแขวนลอยในกระแสอากาศหรือก๊าซภายในเบดที่มีอนุภาคของแข็งแขวนลอย ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและการทำให้แห้ง
3. **เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย:** วัสดุบ้อนของเหลวจะถูกพ่นออกเป็นละอองและแห้งอย่างรวดเร็วด้วยอากาศร้อน ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ผงหรือเม็ดละเอียดในขั้นตอนเดียว
4. **เครื่องอบแห้งแบบลำเลียงแบบแฟลชหรือแบบพาหะลม:** ใช้ลมร้อนหรือก๊าซความเร็วสูงเพื่อพัดพาและกำจัดความชื้นออกจากวัสดุที่เป็นอนุภาคของแข็งอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เป็นวิธีการทำให้แห้งอย่างรวดเร็วซึ่งมักใช้ในอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องทำให้แห้งอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง เช่น แป้งมัน แป้งข้าว
5. **เครื่องอบแห้งแบบถาด:** วางวัสดุบนถาดและให้ความร้อนจากด้านล่างและหรือด้านบน เพื่อให้สามารถอบแห้งเป็นกะในปริมาณน้อยได้ ในกรณีที่ถาดมีรูพรุน จะเป่าลมร้อนผ่านชั้นวัสดุเม็ดและผง เพื่อลดเวลาที่ต้องใช้อบแห้งและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและความชื้นสม่ำเสมอมากขึ้น
6. **เครื่องอบแห้งแบบสายพาน:** สายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องจะนำวัสดุวิ่งผ่านห้องที่ให้ความร้อนเพื่อการอบแห้งที่สม่ำเสมอ ในทำนองเดียวกับเครื่องอบแห้งแบบถาด ถ้าออกแบบให้สายพานมีรูพรุนคล้ายแผ่นตะแกรง จะสามารถลดเวลาที่ต้องใช้อบแห้งและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและความชื้นสม่ำเสมอขึ้น
7. **เครื่องอบแห้งต่อเนื่องแบบพายหรือสกรู (Paddle or screw dryer):** วัสดุจะถูกกวนและผสมโดยการหมุนพายหรือสกรูภายในภาชนะที่ให้ความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านผนังภาชนะและ/หรือใบกวนที่ออกแบบให้เนือกฉวและของไหลให้ความร้อนไหลผ่านได้ เพื่อให้มั่นใจว่าวัสดุที่ทางออกจะแห้งอย่างสม่ำเสมอ

8. **เครื่องอบแห้งต่อเนื่องแบบชุดลูกกลิ้งหรือชุดดรัมหมุน:** วัสดุถูกทำให้แห้งระหว่างลูกกลิ้งให้ความร้อนที่วางประกบกัน 2 ลูก หรือในลักษณะผืนยาวที่วิ่งพันรอบผิวให้ความร้อนด้านนอกของชุดดรัมหมุนจำนวนหลายลูก ซึ่งมักใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ
9. **เครื่องอบแห้งแบบบรรจุในดรัม:** วัสดุถูกให้ความร้อนบนพื้นผิวด้านในของถังหมุน วัสดุที่อาจแห้งติดผิวในของดรัมจะถูกขูดออกด้วยเครื่องขูด
10. **เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ:** สภาพแวดล้อมความดันต่ำจะช่วยลดจุดเดือด จึงทำให้เหมาะสำหรับวัสดุที่ไวต่อความร้อน แต่มีจุดอ่อนคือ ต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการสร้างและรักษาสุญญากาศไว้ตลอดเวลา
11. **เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze dryer):** แช่แข็งวัสดุขึ้น แล้วกำจัดความชื้นภายใต้สุญญากาศสูง เพื่อให้น้ำระเหิดเป็นไอน้ำ ณ อุณหภูมิน้ำแข็ง โดยไม่ต้องหลอมละลายก่อน ดังนั้น จึงสามารถคงตัวโครงสร้างและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่อ่อนไหวต่อความร้อน แต่ต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการทำมาเย็นจัดและรักษาสุญญากาศไว้ตลอดเวลา

เนื่องจากจำนวนหน้าที่มีจำกัดของหนังสือฉบับก่อนหน้านี้ เนื้อหาและตัวอย่างการคำนวณจึงครอบคลุมเครื่องอบแห้ง 7 กลุ่มแรกข้างต้นเป็นหลัก ส่วนฉบับปรับปรุงใหม่นี้ ได้เพิ่มหัวข้อเกี่ยวกับจุดเด่นจุดด้อย ตลอดจนตัวอย่างการคำนวณพื้นฐานของเครื่องอบแห้งแนวใหม่ที่อบแห้งแบบแช่แข็งและที่ใช้ไอน้ำยิ่งยวดแทนการใช้ก๊าซหรือลมร้อนในการอบแห้ง

อนึ่ง ผู้เขียนได้ใช้โอกาสนี้แนะนำภาพรวมของเทคโนโลยีการอบแห้ง ซึ่งปัจจุบันมีบทบาทสำคัญในการผลิตอาหารและของขบเคี้ยวขั้นสูง เพื่อให้ประโยชน์สำคัญหลายประการแก่ทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค ต่อไปนี้คือประโยชน์สำคัญ ๆ ที่จะได้จากเทคโนโลยีการอบแห้งในการผลิตอาหารและของขบเคี้ยวขั้นสูง:

1. **ยืดอายุการเก็บรักษา:** การอบแห้งช่วยกำจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร ลดกิจกรรมของน้ำ (water activity) และยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เน่าเสีย จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น ลดการสูญเสียปริมาณและคุณภาพอาหาร และลดต้นทุนการจัดจำหน่าย
2. **ปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์:** กระบวนการอบแห้งที่ควบคุมอย่างเหมาะสมที่สุด จะช่วยรักษาคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหาร เช่น เนื้อสัมผัส (texture) รสชาติ สี สัน และคุณค่าทางโภชนาการ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับอาหารและของขบเคี้ยวขั้นสูง ซึ่งการรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์เป็นประเด็นสำคัญที่สุด
3. **บริโภคสะดวก และพกพาสะดวก:** การกำจัดความชื้นออกจากอาหารทำให้น้ำหนักเบาและกะทัดรัดมากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับขนมขบเคี้ยวที่ออกแบบมาเพื่อรับประทานระหว่างเดินทาง ขนมขบเคี้ยวขั้นสูงสามารถบรรจุและขนส่งได้สะดวก ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานรูปแบบต่าง ๆ
4. **การประหยัดต้นทุน:** เทคโนโลยีการอบแห้งสามารถลดน้ำหนักและปริมาตรของผลิตภัณฑ์อาหารจากสภาพเปียกชื้นได้ ซึ่งจะนำไปสู่การประหยัดต้นทุนในแง่ของการขนส่งและการจัดเก็บรักษาโดยไม่ต้องแช่เย็น นอกจากนี้ยังช่วยให้ใช้ประโยชน์จากผลผลิตการเกษตรส่วนเกินหรือที่มีคุณภาพต่ำได้ ซึ่งช่วยลดต้นทุนการผลิตโดยรวม
5. **ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน:** ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการอบแห้งทำให้กระบวนการสามารถใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสามารถช่วยให้ผู้ผลิตลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนการดำเนินงานได้
6. **การปรับแต่งตามความต้องการ (Customization):** สามารถปรับแต่งกระบวนการอบแห้งเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ ผู้ผลิตสามารถปรับพารามิเตอร์การอบแห้งเพื่อสร้างขนมขบเคี้ยวที่มีเนื้อสัมผัสและระดับความชื้นที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหลากหลายและดึงดูดผู้บริโภคมากขึ้น

7. **ลดการพึ่งพาตามฤดูกาล:** การอบแห้งช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลไม้ ผัก และส่วนผสมอื่น ๆ ที่เกิดตามฤดูกาลได้ ทำให้สามารถนำไปผลิตเป็นอาหารว่างได้ตลอดทั้งปี ช่วยลดผลกระทบของฤดูกาลต่อการผลิต
8. **ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลากหลายและเป็นธรรมชาติ:** การอบแห้งมักเป็นวิธีถนอมอาหารที่เป็นธรรมชาติและผ่านการแปรรูปน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ จึงทำให้ผู้ผลิตสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายโดยใช้สารเติมแต่งและสารกันบูดน้อยลงมากได้ ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคสำหรับของขบเคี้ยวที่ดีต่อสุขภาพและเป็นธรรมชาติมากขึ้น
9. **การรักษาคุณค่าทางโภชนาการ:** เทคโนโลยีการอบแห้งขั้นสูง เช่น การอบแห้งแบบแช่แข็ง การอบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งแบบใช้น้ำร้อนยวดยิ่ง สามารถรักษาคุณค่าทางโภชนาการดั้งเดิมในผลิตภัณฑ์อาหารได้สูงกว่าวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม ซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ
10. **นวัตกรรมผลิตภัณฑ์:** เทคโนโลยีการอบแห้งที่สร้างสรรค์ ช่วยให้สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวนวัตกรรม เช่น ขนมผลไม้อบแห้ง ผักทอด และส่วนผสมที่เป็นเอกลักษณ์ ซึ่งส่งเสริมการสร้างความแตกต่างให้กับผลิตภัณฑ์และดึงดูดฐานผู้บริโภคที่กว้างขึ้น
11. **ลดความกังวลด้านความปลอดภัยของอาหาร:** การลดปริมาณความชื้นโดยการอบแห้งสามารถบรรเทาการเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นอันตราย ส่งผลให้ความปลอดภัยของอาหารดีขึ้นและลดการต้องเรียกคืนอาหารลดลง
12. **การเข้าถึงตลาดที่ขยายออกไป:** ขนมขบเคี้ยวแห้งมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้นมาก จึงสามารถส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศได้ และขยายการเข้าถึงตลาดทางไกลของผู้ผลิตอาหารและขนมขบเคี้ยวขั้นสูง
-

บทที่ 1

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง (Drying Fundamentals)

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออก โดยการระเหยโดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย หัวข้อที่สำคัญที่สุดในการอบแห้ง คือ การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่เนื่องจากเหตุผลต่าง ๆ ทางภาคปฏิบัติของการออกแบบและการเดินเครื่อง การที่จะนำหลักการที่เห็นได้ชัดแจ้งนี้มาใช้อย่างเต็มที่ เป็นสิ่งที่ทำได้ไม่ง่ายเลย

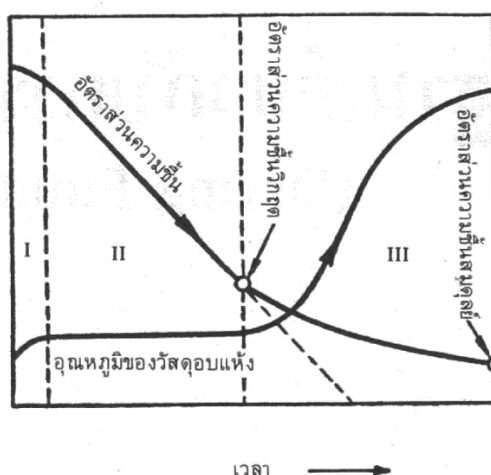
โดยทั่วไปแล้ว ปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ(อบแห้ง) มักจะถูกให้ค่านิยามในรูปของอัตราส่วนของน้ำต่อมวลทั้งหมด นั่นคือ โดยใช้มวลของวัสดุขึ้นเป็นมาตรฐานของการคำนวณความชื้น w_w แต่ในกระบวนการอบแห้ง มวลของวัสดุขึ้นจะเปลี่ยนค่าอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น จึงเป็นการสะดวกกว่าที่จะใช้มวลของวัสดุแห้งเป็นมาตรฐานในการคำนวณความชื้น w_d ความชื้น w_d และ w_w มีความสัมพันธ์กันดังต่อไปนี้

$$w_d = \frac{w_w}{1 - w_w} , \quad w_w = \frac{w_d}{1 + w_d} \quad (1.1)$$

เพื่อไม่ให้เกิดความสับสน จะเรียก w_d ว่าอัตราส่วนความชื้น (moisture content) และเรียก w_w ว่าปริมาณความชื้น (moisture) ยกเว้นในกรณีที่บ่งเป็นอย่างอื่น จะใช้ w แทน w_d จากนั้นไป

1.1 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (Drying Characteristic Curve)

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการอบแห้งวัสดุที่เปียกชื้นมากภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งที่คงที่ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่วางวัสดุเปียกชื้นภายในกระแสลมร้อนปริมาณมากที่มีอุณหภูมิ ความชื้น (humidity) และความเร็วลมคงที่ ถ้าเราลองวัดการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งนี้กับเวลา จะได้เส้นกราฟคล้ายคลึงกับของใน รูป 1.1



รูป 1.1

การอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

I : ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ

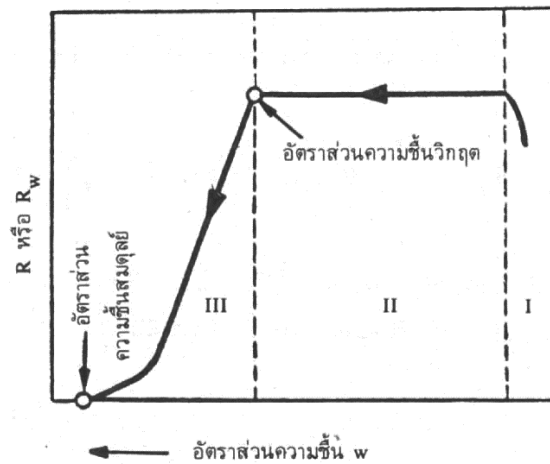
- II : ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่
 III : ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

ที่ผิวของวัสดุที่เปียกชื้น ความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature) t_w ของกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้ คือ ช่วง I ในรูป 1.1 ในช่วงเวลา II ที่ถัดไป อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ประมาณ t_w ตราบใดที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น ดังเห็นได้จากรูป อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย w ของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วง II นี้ ดังนั้น ความเร็วของการระเหยจะมีค่าคงที่ (constant drying rate) ในช่วง III ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิวของวัสดุ ดังนั้น ผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น ๆ สรุปแล้วความเร็วของการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลงเพราะปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับ นอกจากจะลดลงแล้ว ความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วยการอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล w_e (equilibrium moisture content) ค่าของอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่จุดต่อระหว่างช่วง II และ III มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นวิกฤต w_c (critical moisture content) ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย w ใด ๆ และ w_e มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นอิสระ F (free moisture content) F คือ ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไปได้โดยการอบแห้ง ในกรณีของวัสดุที่มีช่วง II และ III ยาวนานมาก จะไม่คำนึงถึงช่วง I ก็ได้ อนึ่ง ในกรณีของวัสดุที่ไม่เปียกชื้นหรือในกรณีของวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะบางอย่าง อาจไม่มีช่วง II เลยก็ได้

เงื่อนไขของการอบแห้งอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เงื่อนไขภายนอกวัสดุที่ก่อให้เกิดการอบแห้งและเงื่อนไขภายในตัววัสดุเอง เงื่อนไขภายนอกจะเกี่ยวข้องกับวิธีถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุและวิธีกำจัดไอน้ำที่ระเหยออกมา ส่วนเงื่อนไขภายใน ได้แก่ องค์ประกอบและรูปร่าง, อัตราส่วนความชื้นวิกฤต, อัตราส่วนความชื้นสมดุลของวัสดุอบแห้ง เป็นต้น สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความเร็วของการอบแห้งมี อาทิ เช่น R (kg water/hr•m² drying area), R_w (kg water/hr•kg dry solid) เป็นต้น ถ้าให้ W เป็นมวล (kg) ของวัสดุแห้ง และ A เป็นพื้นที่ (m²) ของการอบแห้ง เราจะได้

$$R = R_w (W/A)$$

เส้นกราฟที่ได้จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการอบแห้ง และ w มีชื่อเรียกว่า เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (Drying characteristic curve) อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยกับเวลาในรูป 1.1 คือ R_w นั่นเอง ถ้าเขียนกราฟของ R_w (หรือ R) กับ w จะได้รูป 1.2 (ในกรณีที่ไม่นับถึงการหดตัวของพื้นผิววัสดุ บางทีจะหาช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ไม่พบ)



รูป 1.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

1.2 ความเร็วของการอบแห้งที่คงที่ R_c

ส่วนใหญ่แล้ว R_c จะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขของการอบแห้งภายนอกวัสดุ ในกรณีที่วัสดุได้รับความร้อนจากลมร้อนเท่านั้น อุณหภูมิของวัสดุจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก t_w ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ได้รับต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยจะเท่ากับ $h_c (t - t_w)$ และคำนวณ R_c ($\text{kg/hr} \cdot \text{m}^2$) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_c = \frac{h_c(t - t_w)}{\lambda_w} \quad (1.2)$$

ในที่นี้ h_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์ม ($\text{kcal/hr} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$),

t คือ อุณหภูมิของลมร้อน ($^\circ\text{C}$), λ_w คือ ความร้อนแฝงของการระเหย (kcal/kg) ที่อุณหภูมิ t_w

ถ้าเพ่งความสนใจไปที่การถ่ายเทของมวลจะได้

$$R_c = k (H_w - H) \quad (1.3)$$

ในที่นี้ k คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ($\text{kg/hr} \cdot \text{m}^2 \cdot \Delta H$),

H คือ ความชื้น (humidity) ของลมร้อน ($\text{kg steam/kg dry gas}$),

H_w คือ ความชื้นอิ่มตัว (saturated humidity) ของลมร้อนที่อุณหภูมิ t_w

หนึ่ง สมการต่อไปนี้ของลูอิส (Lewis) สามารถใช้ได้อย่างคร่าว ๆ สำหรับระบบของอากาศและไอน้ำ

$$\frac{h_c}{k} = C_H \quad (1.4)$$

ในที่นี้ C_H คือ ความร้อนจำเพาะชื้น (humid heat) ของลมร้อน ($\text{kcal/kg dry gas} \cdot ^\circ\text{C}$) ดังนั้น

$$R_c = \frac{h_c}{\lambda_w} (t - t_w) = k (H_w - H) = \frac{h_c}{C_H} (H_w - H) \quad (1.5)$$

ในกรณีที่ทำการอบแห้งโดยใส่วัสดุไว้ในถาด แล้ววางไว้ในกระแสมร่อน วัสดุจะได้รับความร้อนจากทั้งผิวด้านบนและด้านล่าง แต่การอบแห้งจะเกิดขึ้นที่ผิวด้านบนเท่านั้น ในกรณีนี้

$$R_c = (t - t_m) \left\{ h_c + \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{\ell_t}{k_t} + \frac{\ell}{k_e}} \right\} \frac{1}{\lambda_m}$$

$$= k (H_m - H) = \frac{h_c}{C_H} (H_m - H) \quad (1.6)$$

t_m คือ อุณหภูมิของผิววัสดุซึ่งสูงกว่า t_w , H_m คือ ความชื้นอิ่มตัวที่อุณหภูมิ t_m ,

λ_m คือ ความร้อนแฝงของการระเหยที่อุณหภูมิ t_m , ℓ_t และ ℓ คือความหนาของถาดบรรจุ และของชั้นวัสดุ (m),

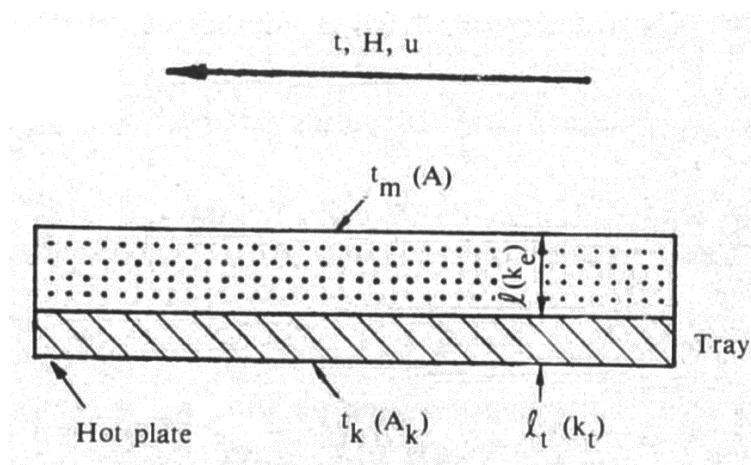
k_t และ k_e คือ ความนำความร้อน (thermal conductivity) ของถาดบรรจุและของชั้นวัสดุ (kcal/hr·m·°C)

เนื่องจาก t_m และ H_m ในสมการ (1.6) เกี่ยวข้องซึ่งกันและกันในสภาพอิ่มตัว เราสามารถแก้สมการ (1.6) โดยวิธีสุ่มคำตอบ (trial-and-error method) โดยทั่วไปแล้ว ค่าของ k_e จะประมาณ 1.5 ~ 3 kcal/hr·m·°C

ในกรณีที่วัสดุได้รับความร้อนโดยทั้งการพาความร้อน (convection) และการนำความร้อน (conduction) ดังในรูป 1.3 จะได้

$$R_c = \left\{ h_c(t - t_m) + \left(\frac{t_k - t_m}{\frac{\ell_t}{k_t} + \frac{\ell}{k_e}} \right) \frac{A_k}{A} \right\} \frac{1}{\lambda_m}$$

$$= k(H_m - H) = \frac{h_c}{C_H} (H_m - H) \quad (1.6)$$



รูป 1.3

t_k คือ อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน, A_k คือ พื้นที่ของการให้ความร้อนโดยการนำ, A คือ พื้นที่ของการให้ความร้อนโดยการพา (หรือพื้นที่ของการอบแห้ง) ยิ่งกว่านั้น ในกรณีที่มีการให้ความร้อนโดยการแผ่รังสี (radiation) อีกด้วย จะได้

$$R_c = \left\{ h_c(t - t_m) + \left(\frac{1}{\frac{f_i}{k_i} + \frac{f}{k_e}} \right) (t_k - t_m) \frac{A_k}{A} + h_r(t_r - t_m) \frac{A_r}{A} \right\} \frac{1}{\lambda_m}$$

$$= \frac{h_c}{C_H} (H_m - H) \quad (1.8)$$

A_r คือ พื้นที่รับความร้อนโดยการแผ่รังสี, h_r คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (kcal/hr·m²·°C) ส่วนใหญ่แล้ว สามารถใช้ค่าประมาณ 0.9 ~ 0.95 สำหรับความค่าของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณ h_r

ค่าของ h_c จะขึ้นกับสภาพการสัมผัสระหว่างวัสดุและลมร้อนดังต่อไปนี้

(i) ในกรณีที่ลมร้อนไหลขนานกับแผ่นวัสดุ

$$h_c = CG_m^{0.8} \quad (\text{ในที่นี้ } C = 0.013 \sim 0.0176) \quad (1.9)$$

G_m คือ ความเร็วเชิงมวล (mass velocity) ของลมร้อน (= $u \rho_g$) (kg/hr·m²), u คือ ความเร็วลมร้อน (m/hr), ρ_g คือ ความหนาแน่นของลมร้อน (kg/m³)

(ii) ในกรณีของลูกกลิ้งกลมโดดเดี่ยวกับลมร้อน

$$Nu = 2 + 0.65 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (1.10)$$

Nu = ตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) = ($h_c D_p / k_g$),

Re = ตัวเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number) = ($D_p u \rho_g / \mu_g$),

Pr = ตัวเลขพรานด์ทัล (Prandtl number) = ($C_p \mu_g / k_g$) = 0.7 (สำหรับก๊าซ 2 อะตอมและอากาศ)

D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้ง (m),

k_g = ความนำความร้อนของลมร้อน (kcal/hr·m·°C),

μ_g = ความหนืด (viscosity) ของลมร้อน (kg/m·hr),

C_p = ความจุความร้อนที่ความดันคงที่ของลมร้อน (constant-pressure heat capacity) (kcal/kg·°C)

ในกรณีที่ลมร้อนไหลผ่านชั้นของเม็ดวัสดุ (packed bed) ให้อ้างอิงหนังสือเกี่ยวกับอุปกรณ์เครื่องอบแห้ง เช่น Kanso Sochi (Drying Equipment) โดย Ryozo Toei ตีพิมพ์โดย Nikkan Kogyo Shimbunsha ปี 1966 หน้า 16

ตัวอย่าง 1.1 จงคำนวณความเร็วที่คงที่ของการอบแห้งในกรณีต่อไปนี้ แล้วเปรียบเทียบความสามารถในการอบแห้งด้วย

(1) กรณีที่ทำการอบแห้งโดยวางแผ่นวัสดุหนา 3 cm บนตาข่ายโลหะ แล้วเป่าลมร้อนที่อุณหภูมิ 65°C และ $H = 0.02$ kg steam/kg dry air ให้ไหลขนานด้วยความเร็ว $u = 3$ m/sec

(2) กรณีที่ทำการอบแห้งโดยวางแผ่นวัสดุนี้บนภาชนะเหล็กไร้สนิม (Stainless steel) หนา 2 mm. (สมมติให้ค่านำความร้อน (thermal conductivity) ของเหล็กไร้สนิมและของวัสดุเท่ากับ 22 และ 2.0 kcal/hr•m•°C ตามลำดับ)

(3) กรณีที่วางภาชนะนี้บนสันทนแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 130°C อีกด้วย

วิธีทำ จากกราฟความชื้น (humidity chart) ในรูป 1.10 อ่านค่าปริมาตรชื้น (humid volume) ของลมร้อนที่ 65°C และ $H = 0.02$ ได้ค่า $v_H = 0.988$ ดังนั้น ความเร็วเชิงมวล G_m คือ

$$G_m = 3 \times 3,600 (1 + 0.02) / 0.988 = 11,150 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$$

จากสมการ (1.9)

$$h_c = 0.013 (11,150)^{0.8} = 0.013 \times 1,720 = 22.4$$

จากรูป 1.10 คุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศนี้มีดังต่อไปนี้

$$v_H = 0.988, \quad t_w = 33.8^\circ\text{C}, \quad H_w = 0.0336, \quad \lambda_w = 577, \quad C_H = 0.249$$

(1) จากสมการ (1.2)

$$R_{c1} = 22.4 (65 - 33.8) / 577 = 1.21 \text{ kg/hr} \cdot \text{m}^2$$

จากสมการ (1.5)

$$R_{c1} = (22.4 / 0.249) (0.0336 - 0.020) = 1.22 \text{ kg/hr} \cdot \text{m}^2 \text{ เห็นได้ว่าค่าทั้งสองเท่ากัน}$$

(2) จากสมการ (1.6)

$$\begin{aligned} R_{c2} &= [22.4 + 1 / (1/22.4 + 0.002/22 + 0.03/2.0)] (65 - t_m) / \lambda_m \\ &= (22.4/0.249)(H_m - 0.02) \end{aligned}$$

จากการสุ่มคำตอบโดยอาศัยรูป 1.10 พบว่า ที่ $t_m = 37.0$, $H_m = 0.0412$ และ $\lambda_m = 575.2$ สมการข้างบนจะเท่ากัน นั่นคือ

$$R_{c2} = 1.90 \text{ kg/hr} \cdot \text{m}^2$$

(3) จากสมการ (1.7) โดยให้ $A_k = A$

$$\begin{aligned} R_{c3} &= [22.4 (65 - t_m) + (120 - t_m) / (0.002/22 + 0.03/2.0)] / \lambda_m \\ &= (22.4/0.249)(H_m - 0.02) \end{aligned}$$

โดยวิธีสุ่มคำตอบดังใน (2) พบว่าสองสมการนี้จะเท่ากันเมื่อ $t_m = 54.5$, $H_m = 0.110$ และ $\lambda_m = 565.3$ ดังนั้น

$$R_{c3} = 8.10 \text{ kg/hr} \cdot \text{m}^2$$

เนื่องจากการอบแห้งเกิดขึ้นที่ผิวทั้งสองด้านในกรณี (1) แต่เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวด้านเดียวในกรณีอื่น ๆ อัตราส่วนของความสามารถในการอบแห้งต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยของฐานรอง คือ

$$R_{c1} \times 2 : R_{c2} : R_{c3} = 1.21 \times 2 : 1.90 : 8.10$$