

การจำลองการอบแห้ง

สำหรับ

เมล็ดพืช และวัสดุชีวภาพ

Drying Modelling for Grains and Biomaterials



รศ. ดร.ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{R^2}\right)$$

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\pi^2 n^2 \frac{D_{eff} t}{R^2}\right)$$

การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ (ฉบับปรับปรุง)

จัดทำโดย รศ. ดร.ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล

ราคา 99 บาท

Matlab เป็นเครื่องหมายการค้าของ The MathWorks, Inc. และเครื่องหมายการค้าอื่น ๆ ที่อ้างถึงเป็นของบริษัทนั้น ๆ

สงวนลิขสิทธิ์ตามกฎหมาย โดย รศ. ดร.ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล © พ.ศ. 2567

ห้ามคัดลอก ลอกเลียน ดัดแปลง ทำซ้ำ จัดพิมพ์ หรือกระทำการอื่นใด โดยวิธีการใด ๆ ในรูปแบบใด ๆ

ไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ เพื่อเผยแพร่ในสื่อทุกประเภท หรือเพื่อวัตถุประสงค์ใด ๆ

นอกจากจะได้รับอนุญาต

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

National Library of Thailand Cataloging in Publication data

ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล.

การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ (ฉบับปรับปรุง). -- ชุมพร : ม.ป.พ.,
2567.

863 หน้า.

1. เมล็ดพืช -- การอบแห้ง. I. ชื่อเรื่อง.

664.0284

ISBN (e-book): 978-616-612-594-8

คำนิยม

ผมอยู่ในแวดวงวิจัยด้านการอบแห้งโดยเฉพาะการอบแห้งผลผลิตการเกษตรและอาหารมานานกว่า 40 ปี ได้เห็นความพยายามของนักวิจัยในประเทศที่เขียนหนังสือเกี่ยวกับการอบแห้งรวมแล้วประมาณ 4-5 เล่ม แต่ละเล่มก็จะมีจุดเน้นที่แตกต่างกันไป หนังสือเล่มนี้เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเขียน โดยเน้นเรื่องการจำลองการอบแห้งโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นงานเขียนที่กลั่นออกมาจากประสบการณ์วิจัยของผู้เขียนแล้วเรียบเรียงอย่างเป็นขั้นตอน ไม่มีความสลับซับซ้อน อย่างไรก็ตาม ผู้อ่านอาจจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานทางด้านวิศวกรรมและวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขอยู่บ้างก็จะสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบเครื่องอบแห้งได้

ผมหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นเครื่องมือหนึ่งที่มีส่วนช่วยผลักดันให้วิทยาการด้านการอบแห้งมีความก้าวหน้ายิ่ง ๆ ขึ้นไป โดยเฉพาะกับการอบแห้งผลผลิตการเกษตรและอาหาร ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญของประเทศ



(ศ. ดร.สมชาติ โสภณรณฤทธิ์)

ราชบัณฑิต

คำนำ

วิชาอุณหพลศาสตร์ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข การถ่ายโอนความร้อนและปรากฏการณ์ถ่ายโอน ล้วนเป็นวิชาหลักที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการพัฒนาการจำลองการอบแห้ง เมื่อย้อนไปครั้งที่ผู้เขียนได้ ทำความเข้าใจวิชาเหล่านี้ในแต่ละวิชาตอนยังเป็นนักศึกษาพบว่า สามารถทำความเข้าใจได้อย่าง ไม่ลำบากมากนัก ตรงกันข้ามกับเมื่อต้องรับผิดชอบในการพัฒนาการจำลองการอบแห้งในงานวิจัย ผู้เขียนไม่สามารถเชื่อมโยงพื้นฐานความรู้ที่มีมาดำเนินการจนสามารถพัฒนาการจำลองได้ในทันที เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวผู้เขียนจึงได้รวบรวมเนื้อหาจากหนังสือ วารสารวิชาการ และประสบการณ์ จากการดำเนินงานวิจัย เรียงลำดับทฤษฎี ตัวอย่าง ขั้นตอน และการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมถึงรายละเอียดการประยุกต์ใช้การจำลองในกรณีศึกษา เพื่อให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจได้ โดยง่าย สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผู้เขียนได้เลือกใช้โปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) ซึ่งเป็น โปรแกรมที่สามารถประยุกต์ใช้ในการจำลองการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อดีของการ เลือกใช้โปรแกรมนี้นี้ เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่หลากหลายในปัจจุบันคือ ผู้อ่าน สามารถศึกษาเพื่อทำความเข้าใจพื้นฐานของการสร้างแบบจำลองการอบแห้งจากขั้นตอนเริ่มต้น จนถึงขั้นตอนสุดท้ายได้ โดยตัวอย่างภายในหนังสือยังได้สอดแทรกโปรแกรมที่ป้อนข้อมูลต่าง ๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้วในคิวอาร์โค้ด (QR Code) ให้ผู้อ่านสามารถคัดลอกและทำการจำลองได้ทันที

ผู้เขียนตั้งใจใช้หนังสือเล่มนี้สำหรับการเรียนการสอนในระดับบัณฑิตศึกษา จึงคาดหวังว่า ผู้อ่านจะต้องมีความรู้พื้นฐานพอสมควร ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ภายหลังจากที่ผู้อ่านได้ ทำการศึกษาข้อมูลจากหนังสือเล่มนี้ จะสามารถพัฒนางานวิจัยหรือนำไปใช้แก้ปัญหาทาง อุทสาหกรรมการอบแห้งในอนาคตได้

6 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผู้ทรงคุณวุฒิจากหลากหลายสถาบัน ที่ได้ประเมินคุณภาพและความถูกต้องทางวิชาการ พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงหนังสือเล่มนี้ ผศ. ดร.อดิเรก สุริยะวงศ์ ที่ได้ตรวจทานต้นฉบับในหัวข้อ การทบทวนทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายเทมวล ศ. ดร.สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ รศ. เสมอขวัญ ตันติกุล ที่ปรึกษาด้านวิชาการและด้านการดำเนินชีวิต รศ. ดร.นิตยา จันกา (ภรรยา) ที่ดูแลครอบครัวได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ผู้เขียนได้ดำเนินการจัดทำหนังสือเล่มนี้อย่างเต็มความสามารถ

ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล

Email: chaiwat.ra@kmitl.ac.th

สารบัญ

บทที่ 1 ความสำคัญของการอบแห้ง.....	13
1.1 บทนำ.....	13
1.2 ความสำคัญด้านปริมาณ.....	14
1.3 ความสำคัญด้านมาตรฐาน	16
1.4 ความสำคัญด้านคุณภาพ	18
1.5 ความสำคัญด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม.....	19
1.6 ความสำคัญด้านการพัฒนางานวิจัย	23
สรุปท้ายบท.....	26
แบบฝึกหัด	27
บรรณานุกรมบท 1	28
บทที่ 2 การทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	31
2.1 บทนำ.....	31
2.2 การทบทวนทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายเทมวล	31
2.3 สมบัติเชิงความร้อนและความหนาแน่น	57
2.4 การทบทวนพื้นฐานการอบแห้ง	61
2.5 รูปแบบของแบบจำลองการอบแห้ง.....	70
สรุปท้ายบท.....	74
แบบฝึกหัด	75
บรรณานุกรมบท 2	80

8 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

บทที่ 3 แบบจำลองการอบแห้ง	83
3.1 บทนำ.....	83
3.2 สมมติฐาน	83
3.3 สมการอนุพันธ์พลังงาน	86
3.4 สมการควบคุม	91
3.5 สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต.....	104
สรุปท้ายบท.....	112
แบบฝึกหัด	113
บรรณานุกรมบท 3	119
บทที่ 4 การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย.....	121
4.1 บทนำ.....	121
4.2 การจำแนกชนิดของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย	122
4.3 ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	123
4.4 ผลเฉลยเชิงตัวเลข	133
สรุปท้ายบท.....	148
แบบฝึกหัด	149
บรรณานุกรมบท 4	155
บทที่ 5 การประมาณค่าอินทิกรัล.....	157
5.1 บทนำ	157
5.2 การประมาณค่าสมการอินทิกรัล.....	157
5.3 กฎจุดกึ่งกลาง	159
5.4 กฎสี่เหลี่ยมคางหมู	160
5.5 กฎเศษหนึ่งส่วนสามของซิมป์สัน	161
5.6 กฎเศษหนึ่งส่วนสามของซิมป์สันแบบหลายช่วง	162
สรุปท้ายบท.....	174
แบบฝึกหัด	175
บรรณานุกรมบท 5	181

บทที่ 6 การประมาณข้อมูลด้วยฟังก์ชัน	183
6.1 บทนำ	183
6.2 รูปแบบสมการถดถอย	184
6.3 วิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุด	184
6.4 สมการเส้นตรง	186
6.5 สมการเอกซ์โพเนนเชียล	190
6.6 สมการพหุนาม	194
6.7 สมการเชิงเส้นหลายตัวแปร	198
สรุปท้ายบท	207
แบบฝึกหัด	208
บรรณานุกรมบท 6	212
บทที่ 7 การจำลองการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ของพิกัดทรงกลม	213
7.1 บทนำ	213
7.2 แบบจำลองเชิงทฤษฎี	213
7.3 แบบจำลองเอมพิริคัล	226
7.4 แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	259
สรุปท้ายบท	289
แบบฝึกหัด	290
บรรณานุกรมบท 7	295
บทที่ 8 การจำลองการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ของพิกัดฉาก	297
8.1 บทนำ	297
8.2 แบบจำลองเชิงทฤษฎี	297
8.3 แบบจำลองเอมพิริคัล	309
8.4 แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	310
สรุปท้ายบท	334
แบบฝึกหัด	335
บรรณานุกรมบท 8	338

10 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

บทที่ 9 การจำลองการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ของพิกัดทรงกระบอก	339
9.1 บทนำ.....	339
9.2 แบบจำลองเชิงทฤษฎี	339
9.3 แบบจำลองเอมพิริคัล	351
9.4 แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	352
สรุปท้ายบท.....	371
แบบฝึกหัด	372
บรรณานุกรมบท 9	377
บทที่ 10 การจำลองการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่ด้วยอากาศร้อน	379
10.1 บทนำ	379
10.2 แบบจำลองเชิงทฤษฎี.....	380
10.3 แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	412
สรุปท้ายบท.....	448
แบบฝึกหัด	449
บรรณานุกรมบท 10	455
บทที่ 11 การจำลองการอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้นและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	459
11.1 บทนำ	459
11.2 แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ ด้วยอากาศร้อนชื้นและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	460
11.3 แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่ ด้วยอากาศร้อนชื้นและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	490
สรุปท้ายบท.....	534
แบบฝึกหัด	535
บรรณานุกรมบท 11	540
บทที่ 12 กรณีศึกษาและแนวทางการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้ง	543
12.1 บทนำ	543
12.2 กรณีศึกษาของแบบจำลองเชิงทฤษฎี.....	544
12.3 กรณีศึกษาของแบบจำลองเอมพิริคัล.....	551

12.4 กรณีศึกษาของแบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	557
12.5 แนวทางการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้ง	565
สรุปท้ายบท	567
แบบฝึกหัด	568
บรรณานุกรมบท 12	570
ภาคผนวก	577
แบบจำลองเชิงทฤษฎีการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ของพิกัดทรงกลม	578
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Newton) ด้วยโปรแกรมแมทแลบ	580
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Page) ด้วยโปรแกรมแมทแลบ	581
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Henderson and Pabis)	
ด้วยโปรแกรมแมทแลบ	582
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Logarithmic) ด้วยโปรแกรมแมทแลบ	583
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Two term) ด้วยโปรแกรมแมทแลบ	584
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Modified Henderson and Pabis)	
ด้วยโปรแกรมแมทแลบ	585
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Newton)	
ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล	586
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Page)	
ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล	587
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Henderson and Pabis)	
ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล	588
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Logarithmic)	
ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล	589
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Two-term)	
ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล	590
แบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Modified Henderson and Pabis)	
ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล	591
แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่	
ของพิกัดทรงกลม	592

12 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

แบบจำลองเชิงทฤษฎีการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ของฟักัดฉาก	595
แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ ของฟักัดฉาก	597
แบบจำลองเชิงทฤษฎีการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ ของฟักัดทรงกระบอก	605
แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ ของฟักัดทรงกระบอก	607
แบบจำลองเชิงทฤษฎีการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่ของฟักัดทรงกลม	613
แบบจำลองเชิงทฤษฎีการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่ของฟักัดฉาก	616
แบบจำลองเชิงทฤษฎีการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่ ของฟักัดทรงกระบอก	619
แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่ ของฟักัดทรงกระบอก	622
แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ ด้วยอากาศร้อนชื้นของฟักัดทรงกระบอก	647
แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งของฟักัดทรงกระบอก	687
แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่ ด้วยอากาศร้อนชื้นของฟักัดทรงกระบอก	722
แบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลขการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่ ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งของฟักัดทรงกระบอก	783
บรรณานุกรม	839
ดัชนี	855
ประวัติผู้เขียน	863

บทที่ ความสำคัญของการอบแห้ง

1

1.1 บทนำ

ในอดีตด้วยข้อจำกัดของการชลประทาน เกษตรกรมักปลูกผลิตผลตามฤดูกาล ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวได้เป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจำเป็นต้องลดความชื้น เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้มีปริมาณเพียงพอต่อการบริโภคภายในครัวเรือนตลอดทั้งปี ซึ่งหากมีปริมาณเกินความต้องการ เกษตรกรจะนำผลิตภัณฑ์นั้นขายในพื้นที่หรือชุมชนใกล้เคียง ในสมัยนั้นการอบแห้งที่ใช้มีเพียงวิธีการตากแดดตามธรรมชาติ แม้มีข้อดีในเรื่องของการประหยัดพลังงาน แต่จำเป็นต้องใช้พื้นที่สำหรับการตากและจัดเก็บในตอนกลางคืนเพื่อป้องกันการควบแน่นของความชื้นในอากาศ ต้องใช้แรงงานคน รวมถึงระยะเวลาในการลดความชื้นที่ยาวนาน อีกทั้งยังมีอุปสรรคทางด้านสภาพอากาศที่ไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีคุณภาพต่ำ จากการปนเปื้อนสิ่งสกปรกจากสิ่งแวดล้อมหรือผลิตภัณฑ์เกิดเชื้อรา (Paulino de Moraes และ Luchese, 2003; Bertuzzi และคณะ, 2019)

เมื่อประชากรของแต่ละประเทศเพิ่มจำนวนมากขึ้นควบคู่ไปกับปริมาณความต้องการผลิตภัณฑ์ในแต่ละพื้นที่หรือแต่ละประเทศที่ไม่เท่ากัน รวมไปถึงการพัฒนากระบวนการชลประทานและการคมนาคม การลดความชื้นผลิตภัณฑ์จึงไม่ได้มีไว้เพื่อการดำรงชีพหรือขายในพื้นที่ใกล้เคียงอีกต่อไป แต่ละประเทศจึงได้นิยามมาตรฐานขึ้นเพื่อเป็นข้อกำหนดในการซื้อขายอุปกรณ์และวิธีการอบแห้งรูปแบบต่าง ๆ จึงเริ่มมีการพัฒนาและประยุกต์ใช้สำหรับการลดความชื้นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากสามารถควบคุมสภาวะการอบแห้งให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้มาตรฐานตามที่ต้องการ

ต่อมาภายหลังจากการปฏิวัติการคำนวณใน ค.ศ. 1969 ประชากรทั่วไปจึงมีโอกาสเข้าถึงคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้มากขึ้น (Welty และคณะ, 2007) กระบวนการอบแห้งจึงเริ่มเข้าสู่ยุคของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงที่มีความซับซ้อน ซึ่งเกี่ยวพันถึงความรู้ทางด้านอุณหพลศาสตร์ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข การถ่ายโอนความร้อน และปรากฏการณ์ถ่ายโอนจำลอง การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง เพื่อให้ได้คุณภาพอยู่ในข้อกำหนดตามมาตรฐานหรือเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดการใช้พลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หรือเพื่อตอบสนองความต้องการเฉพาะด้านอื่น ๆ โดยการจำลองการอบแห้งยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

ในบทนี้จะอธิบายถึงการอบแห้งและการประยุกต์ใช้แบบจำลองการอบแห้งที่มีความสำคัญในด้านปริมาณ มาตรฐาน คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม และด้านการพัฒนางานวิจัย

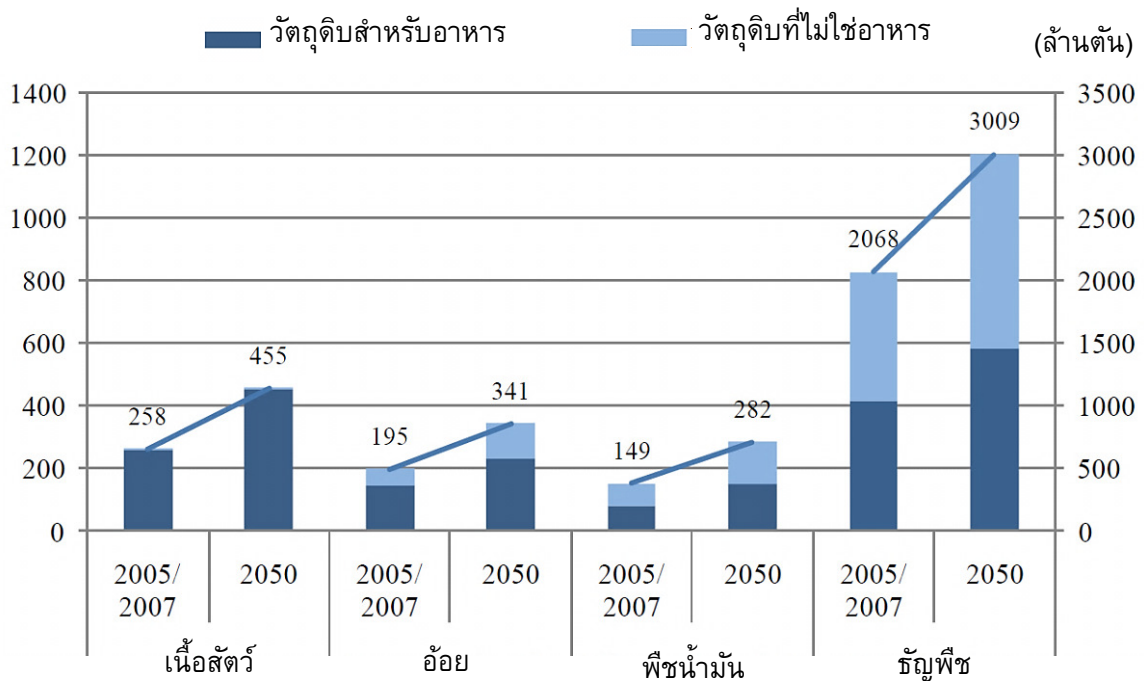
1.2 ความสำคัญด้านปริมาณ

กระบวนการอบแห้งนั้นมีความสำคัญโดยตรงต่อปริมาณการผลิต ซึ่งเกี่ยวพันถึงความมั่นคงทางอาหารของโลก เนื่องจากเป็นกระบวนการแรกที่ต้องดำเนินการในทันทีภายหลังจากการเก็บเกี่ยวผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงให้ความชื้นลดลงอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาและการขนส่ง เพื่อตอบสนองความต้องการของประชากรในแต่ละพื้นที่หรือแต่ละประเทศที่มีไม่เท่ากันให้มีปริมาณเพียงพอต่อการบริโภค

องค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations) หรือ FAO ได้ทำนายข้อมูลประชากรของโลกในอนาคตว่า โลกจะมีจำนวนประชากรประมาณ 9,000 ล้านคนใน ค.ศ. 2050 จำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่อยู่ในประเทศที่กำลังพัฒนา นั้นหมายความว่าปริมาณอาหารที่ต้องการในการบริโภคจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยในรูปที่ 1.1 แสดงความต้องการวัตถุดิบของประชากรโลกทั้งวัตถุดิบสำหรับอาหารและวัตถุดิบที่ไม่ใช่อาหาร โดยสามารถแบ่งวัตถุดิบออกเป็น 4 ประเภทหลักคือ เนื้อสัตว์ อ้อย พืช น้ำมัน และธัญพืช เปรียบเทียบใน ค.ศ. 2005/2007 กับการทำนายใน ค.ศ. 2050

เมื่อเปรียบเทียบความต้องการวัตถุดิบในแต่ละประเภทของปีทำการเก็บข้อมูลพบว่า ธัญพืชเป็นแหล่งพลังงานหลักของประชากรโลก โดยเฉพาะในประเทศที่กำลังพัฒนา ข้อมูลการ

ทำนายใน ค.ศ. 2050 แสดงถึงแหล่งพลังงานหลักยังคงเป็นธัญพืช โดยปริมาณที่ต้องการมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3,009 ล้านตันตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น หากวิเคราะห์ถึงผลกระทบในด้านอื่นยังพบอีกว่า เมื่อจำนวนประชากรซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในประเทศที่กำลังพัฒนามีจำนวนเพิ่มขึ้น พื้นที่ทำการเกษตรที่เป็นแหล่งผลิตวัตถุดิบจะลดน้อยลง จากการที่ต้องพัฒนาเป็นที่อยู่อาศัย ปริมาณน้ำที่ใช้สำหรับการเพาะปลูกต้องปรับเปลี่ยนมาใช้ในการอุปโภคและบริโภค ผลกระทบดังกล่าวยังไม่ได้รวมถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ทวีความรุนแรงขึ้นทุกปี และการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรบางประเภท เช่น ข้าวโพด จากเดิมที่เคยเป็นอาหารกลับกลายเป็นพลังงานชีวภาพเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในประเทศที่พัฒนาแล้ว ในการแก้ปัญหาดังกล่าว นอกจากการวางแผนปฏิรูปการผลิตในระยะยาวแล้ว FAO ได้ให้ข้อมูลว่า ผลิตภัณฑ์กว่า 80 เปอร์เซ็นต์ในประเทศที่กำลังพัฒนาสามารถเพิ่มปริมาณให้มากขึ้นได้ หากทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตต่าง ๆ ให้ดีขึ้นหนึ่งในกระบวนการดังกล่าวคือกระบวนการอบแห้ง (Alexandratos และ Bruinsma, 2012)



รูปที่ 1.1 การเปรียบเทียบความต้องการปริมาณอาหารของประชากรโลก (ล้านตัน)
(ที่มา : ปรับปรุงจาก Alexandratos และ Bruinsma, 2012)

สำหรับประเทศไทย กระบวนการอบแห้งนอกจากมีความสำคัญด้านปริมาณแล้ว ยังมีความสำคัญต่อมูลค่าเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากเป็นกระบวนการขั้นต้นในการลดความชื้นผลิตภัณฑ์ภายหลังการเก็บเกี่ยวให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาและการขนส่ง ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับมูลค่าการส่งออกสินค้าเกษตรระหว่างประเทศ ในปี พ.ศ. 2565 ข้าวเป็นสินค้าทางการเกษตรที่มีมูลค่าการส่งออกไปยังต่างประเทศเป็นอันดับ 1 โดยสินค้าข้าวเพียงชนิดเดียวนั้นมีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 124,321 ล้านบาท (กองเศรษฐกิจการเกษตรระหว่างประเทศ, 2566)

1.3 ความสำคัญด้านมาตรฐาน

มาตรฐาน คือเกณฑ์การยอมรับในการซื้อขาย เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เหมาะสมต่อการแปรรูปหรือบริโภค สำหรับการซื้อขายภายในประเทศ มาตรฐานของเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพมักถูกกำหนดโดยกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2562) หากผลิตภัณฑ์นั้นมีการส่งออกไปยังต่างประเทศ การซื้อขายอาจยึดถือตามมาตรฐานของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์หรืออาจมีประกาศเพิ่มเติมเป็นมาตรฐานสินค้าขาออกโดยกระทรวงพาณิชย์ (กระทรวงพาณิชย์, 2562) ข้อกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์มักมีความแตกต่างกันตามสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุ อย่างไรก็ตาม หนึ่งในข้อกำหนดที่ทุกผลิตภัณฑ์มีเหมือนกันคือ ปริมาณความชื้น เนื่องจากค่าดังกล่าวหากมีค่าเกินระดับที่เหมาะสม ปัญหาสำคัญมักเกิดขึ้นจากการก่อตัวของเชื้อรา ซึ่งหากเชื้อราได้ก่อตัวขึ้นที่ผลิตภัณฑ์แล้ว สมบัติด้านอื่น ๆ ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานนั้นจะไม่มีความจำเป็นที่ต้องตรวจสอบอีกต่อไป ความชื้นของผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อการเจริญของเชื้อรา เช่น เชื้อ *Aspergillus flavus* (Segura และคณะ, 2018) เป็นเชื้อที่พบมากโดยเฉพาะในเมล็ดพืช สามารถตรวจพบได้ตามธรรมชาติในดิน จึงเป็นเรื่องยากในการหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนตั้งแต่กระบวนการเพาะปลูก (Oliveira และคณะ, 2014) หากความชื้นของเมล็ดพืชมีค่าเกินระดับที่เหมาะสม เชื้อราที่ปนเปื้อนในขั้นตอนการเก็บเกี่ยวมักเจริญระหว่างกระบวนการเก็บรักษา เชื้อราชนิดนี้สามารถสร้างสารพิษ เช่น อะฟลาทอกซิน (Aflatoxins) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและเป็นสาเหตุสำคัญต่อการเกิดโรคมะเร็งตามมา (Reddy และคณะ, 2008; Asim และคณะ, 2011; Ghasemi-Kebria และคณะ, 2013) นอกจากนี้ หากนำเมล็ดพืชที่มีสารอะฟลาทอกซินปนเปื้อนอยู่ก่อนเป็นวัตถุดิบในการผลิตสารดังกล่าวสามารถตกค้างไปจนถึงผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ เนื่องจากมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงถึง 250 °C กระบวนการแปรรูปโดยทั่วไปจึงไม่สามารถสลายได้ (Shephard, 2003) การลด

ความชื้นของวัสดุให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นมาตรฐานต้นทางที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับความปลอดภัยด้านอาหาร

ในหลายประเทศที่มีพื้นที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการเพาะปลูก เมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพมักต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ประเทศต่าง ๆ จึงได้กำหนดมาตรฐานของสินค้าขาเข้าในประเทศ มาตรฐานดังกล่าวอาจไม่ได้กำหนดความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ แต่มักกำหนดปริมาณสารอะฟลาทอกซิน ซึ่งถือได้ว่าเป็นมาตรฐานปลายทางที่สามารถสะท้อนถึงความเหมาะสมของความชื้นและสภาวะการเก็บรักษาระหว่างการขนส่งได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในตารางที่ 1.1 เป็นตัวอย่างมาตรฐานของปริมาณสารอะฟลาทอกซินสูงสุดในเมล็ดพืช ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 10–20 µg/kg สำหรับผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อการแปรรูปและ 4–10 µg/kg สำหรับผลิตภัณฑ์ที่บริโภคทันที (Ready to Eat) (Chiewchan และคณะ, 2015) กระบวนการอบแห้งเพื่อลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการควบคุมการเจริญของเชื้อราตั้งแต่ต้นทางก่อนสร้างสารอะฟลาทอกซิน

ตารางที่ 1.1 มาตรฐานปริมาณสารอะฟลาทอกซินสูงสุดของผลิตภัณฑ์อบแห้งต่าง ๆ

ที่มาของ มาตรฐาน	ผลิตภัณฑ์	ปริมาณอะฟลาทอกซิน สูงสุด (µg/kg)
Codex	อัลมอนด์ เฮเซลนัท ถั่วลิสง พิสตาชิโอ บราซิลนัท	15*/10**
EU	อัลมอนด์ เฮเซลนัท ถั่วลิสง พิสตาชิโอ บราซิลนัท	15*/4**
EU	ผลไม้อบแห้ง	10*/4**
Canada	ถั่วและผลิตภัณฑ์จากถั่วชนิดต่าง ๆ	15
USA	ถั่วลิสงและผลิตภัณฑ์จากถั่วลิสง บราซิลนัท พิสตาชิโอ	20

* ผลิตภัณฑ์สำหรับวัตถุดิบเพื่อการแปรรูป

** ผลิตภัณฑ์สำหรับการบริโภคทันที (Ready to Eat)

(ที่มา : ปรับปรุงจาก Chiewchan และคณะ, 2015)

1.4 ความสำคัญด้านคุณภาพ

เมื่อกล่าวถึงผลิตภัณฑ์คุณภาพ ในปัจจุบันผู้บริโภคมักนึกถึงผลิตภัณฑ์ที่อยู่เหนือมาตรฐาน มีคุณประโยชน์หรือสมบัติที่ตอบสนองความต้องการเฉพาะ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะที่ไม่เหมาะสมสามารถทำให้คุณภาพนั้นลดลงแม้ว่าสมบัติยังอยู่ในขอบเขตของมาตรฐาน ในทางกลับกัน สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์เนื่องจากคุณภาพสุดท้ายนั้นตอบสนองความต้องการเฉพาะของผู้บริโภค ในการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมนั้นมีความซับซ้อน เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายเทมวลระหว่างผลิตภัณฑ์กับตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมี การทดสอบด้วยการทดลองเพียงอย่างเดียวจึงใช้ระยะเวลานานและเสียค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากต้องทำการสุ่มลองผิดลองถูกและอาศัยประสบการณ์เฉพาะด้าน ด้วยการปฏิบัติการคำนวณของวงจรคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์ภายหลังผ่านการอบแห้ง เพื่อตอบสนองความต้องการเฉพาะได้เป็นอย่างดี

ยกตัวอย่างงานวิจัยของ Rattanamechaiskul และคณะ (2018) ได้พัฒนาการจำลองการอบแห้งเพื่อปรับปรุงสมบัติการหุงของข้าวเหนียวกล้องให้มีความนุ่มและเหนียวไม่แตกต่างจากข้าวเหนียวขาว โดยข้าวเหนียวขาวเป็นอาหารหลักของคนไทยที่บริโภคครองลงมาจกข้าวหอมมะลิ การบริโภคดังกล่าวนิยมสืบเนื่องมาเป็นเวลาช้านาน แม้ว่าในปัจจุบันความต้องการของผู้บริโภคที่ใส่ใจในการดูแลสุขภาพจะมีมากขึ้น แต่การปรับเปลี่ยนพฤติกรรมให้บริโภคข้าวเหนียวกล้องกลับถูกมองข้าม เนื่องจากสมบัติภายหลังการหุงที่ร้อน ไม่เกาะตัวกันและให้เนื้อสัมผัสที่แข็ง ผู้ผลิตจึงขัดสีชั้นรำที่อุดมไปด้วยวิตามิน โปรตีน และสารต้านอนุมูลอิสระออกไป งานวิจัยได้ทำการทดลองและพัฒนาการจำลองการอบแห้งเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ภายหลังจากการตรวจสอบความสมเหตุสมผล (Validation) แบบจำลองสามารถทำนายและแนะนำสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมได้เป็นอย่างดี โดยที่สภาวะดังกล่าวสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวที่มีค่าสูงให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา พร้อมทั้งปรับปรุงสมบัติการหุงของข้าวเหนียวกล้องให้มีความนุ่มและเหนียวไม่แตกต่างจากข้าวเหนียวขาว ซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ได้ในกระบวนการเดียว Junka และ Rattanamechaiskul (2022) ได้ใช้เทคนิคการอบแห้งอุณหภูมิสูงร่วมกับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาสภาวะอบแห้งข้าวสาลีพันธุ์สังข์หยด ซึ่งเป็นสายพันธุ์บ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (Geographical indication หรือ

GI) เพื่อลด Rapidly available glucose หรือ RAG (ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการย่อยคาร์โบไฮเดรตด้วยเอนไซม์ในช่วงระยะเวลา 20 นาที) ของข้าวให้เหมาะแก่การบริโภคกับผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดที่ 2 Vidinamo และคณะ (2022) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิอบแห้งต่อสารต้านอนุมูลอิสระของสับปะรดแผ่น ซึ่งพบว่าการอบแห้งสับปะรดด้วยอุณหภูมิเหมาะสมที่ 60 °C สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ทำลายสารต้านอนุมูลอิสระในผลไม้เมื่อเกิดบาดแผล (จากการปอกเปลือก) ได้ ทำให้ภายหลังการให้ความร้อนสารต้านอนุมูลอิสระของสับปะรดอบแห้งนั้นมีปริมาณที่สูงกว่าสับปะรดที่เป็นตัวอย่างควบคุม

1.5 ความสำคัญด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

กระบวนการอบแห้งเป็นหนึ่งในกระบวนการที่บริโภคพลังงานเป็นอันดับต้น ๆ ของภาคอุตสาหกรรม ตัวเลขสถิติการใช้พลังงานของประเทศฝรั่งเศสและอังกฤษได้รายงานไว้ใน 1 ปีมีการใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งทั้งหมดสูงถึง 169.5×10^9 และ 128×10^9 MJ/Year โดยพลังงานถูกใช้สำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมากกว่า 1 ใน 4 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมดของภาคอุตสาหกรรม (Strumillo และคณะ, 2015) ดังแสดงในตารางที่ 1.2

การใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับกระบวนการพื้นฐาน 2 กระบวนการคือ การอุ่นอากาศแวดล้อมให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยขดลวดความร้อน (Heater) และการถ่ายโอนอากาศร้อนนั้นไปยังผลิตภัณฑ์โดยพัดลม (Blower) ภายในเครื่องอบแห้ง (Tohidi และคณะ, 2017) ภายหลังจากการพิจารณาราคาของเครื่องอบแห้งแล้ว ค่าการใช้พลังงานเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ต้องถูกพิจารณาเช่นกัน บ่อยครั้งที่ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานของการผลิตต่อปีมีค่าสูงกว่าเครื่องอบแห้ง Strumillo และคณะ (2015) ได้รายงานไว้ว่า ค่าการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อนตลอดอายุการใช้งานมีค่าสูงกว่าราคาของเครื่องอบแห้งถึง 5 เท่า ค่าการใช้พลังงานนอกจากเกี่ยวพันถึงค่าใช้จ่ายซึ่งสุดท้ายต้องถูกเพิ่มเข้าไปในราคาขายของผลิตภัณฑ์แล้ว ยังเกี่ยวพันถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย การแปรรูปพลังงานแล้วแต่ผ่านกระบวนการที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Defraeye, 2014) ปัจจุบันในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยมีฉลากที่เรียกว่า คาร์บอนฟุตพริ้นต์ แสดงอยู่บนผลิตภัณฑ์ คาร์บอนฟุตพริ้นต์เป็นตัวเลขที่ได้จากการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากผลิตภัณฑ์สู่ชั้นบรรยากาศ การประเมินจะพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เริ่มตั้งแต่กระบวนการเพาะปลูก

ตารางที่ 1.2 ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ของประเทศฝรั่งเศส และประเทศอังกฤษ

ภาคอุตสาหกรรม	ประเทศฝรั่งเศส	ประเทศอังกฤษ
	(10 ⁹ MJ/Year)	(10 ⁹ MJ/Year)
อาหารและการเกษตร	46.3	35
เคมี	8.6	23
สิ่งทอ	1.9	7
กระดาษ	38.8	45
เซรามิก	15.7	14
ไม้	7.9	4
อุตสาหกรรมอื่น ๆ	50.3	ไม่มีข้อมูล
ค่าพลังงานรวม	169.5	128

(ที่มา : ปรับปรุงจาก Strumillo และคณะ, 2015)

การได้มาของวัตถุดิบ การใช้พลังงานไฟฟ้า การใช้เชื้อเพลิง กระบวนการผลิต การขนส่งและการทำลายสินค้าอื่น ๆ ภายหลังจากเสร็จสิ้นการใช้ประโยชน์ ปัจจุบันคาร์บอนฟุตพริ้นต์ถือเป็นหนึ่งในดัชนีชี้วัดที่ผู้ประกอบการใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2558)

กระบวนการอบแห้งที่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นไปตามที่ต้องการและมีการใช้พลังงานต่ำที่สุดจึงเป็นสภาวะเหมาะสมที่ควรเลือก ในการประหยัดพลังงานของภาคอุตสาหกรรมอบแห้ง มีข้อมูลการประหยัดพลังงานต่อปีของประเทศอังกฤษจากทางเลือกต่าง ๆ ดังในตารางที่ 1.3 จากตารางทางเลือกในการประหยัดพลังงานนั้นมีหลากหลายวิธี บางวิธีเป็นทางเลือกที่ทราบกันดีและอาจได้ดำเนินการไปแล้ว เช่น การนำความร้อนทิ้งของเครื่องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ (Heat Recovery) หรือการหุ้มฉนวน บางทางเลือกมีปริมาณการประหยัดพลังงานที่สูงมาก เช่น การใช้ระบบอัดไอ (Vapor Compression) แต่กลับมีอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return) ต่ำ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรกสูง การใช้แบบจำลองการอบแห้งถูกจัด

อยู่ในหมวดทางเลือกการออกแบบและการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Design and Operation) แม้ว่าปริมาณการประหยัดพลังงานอาจมีค่าไม่สูงเท่ากับบางทางเลือก แต่ทางเลือกนี้ให้อัตราผลตอบแทนภายในสูงหากดำเนินการแล้วเสร็จ เหตุผลที่สนับสนุนคือ เป็นทางเลือกที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรกต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับทางเลือกอื่น ๆ

ตารางที่ 1.3 ปริมาณการประหยัดพลังงานต่อปีของกระบวนการอบแห้งจากทางเลือกต่าง ๆ ในประเทศอังกฤษ

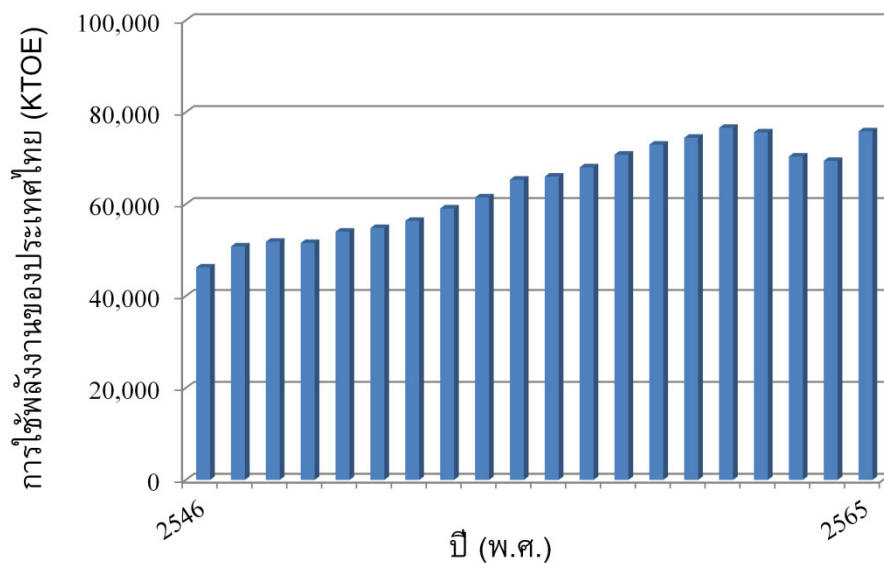
ทางเลือก	ปริมาณการประหยัดพลังงาน
	(10 ⁹ MJ/Year)
การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่	18.9
การหุ้มฉนวน	4.3
การใช้ระบบอัดไอ	35.1
การออกแบบและการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด	11.0

(ที่มา: ปรับปรุงจาก Strumillo และคณะ, 2015)

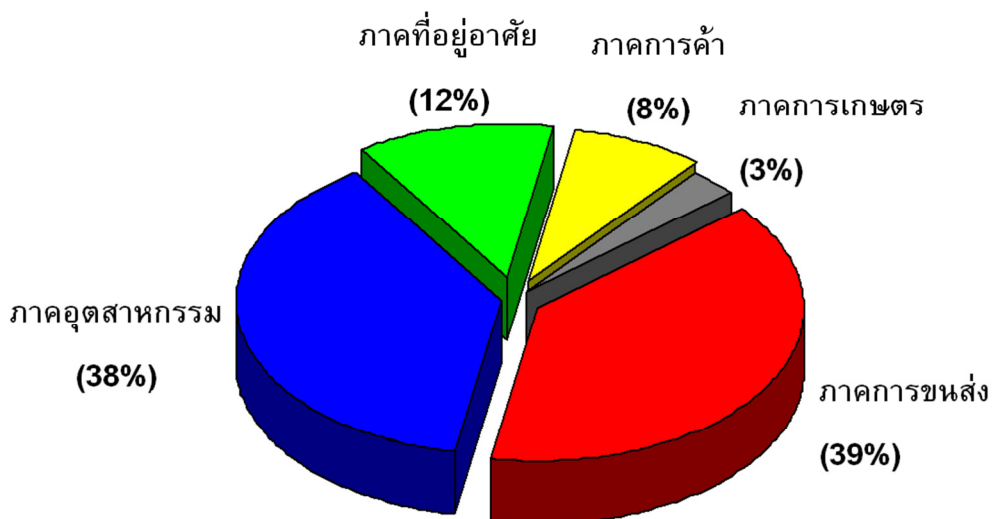
สำหรับสถิติการใช้พลังงานของประเทศไทยในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา ดังแสดงในรูปที่ 1.2 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี จากปี พ.ศ. 2546 ที่มีการใช้พลังงานรวมในประเทศที่ 46,246 kiloton of oil equivalent (KTOE) เป็น 75,874 KTOE ในปี พ.ศ. 2565 การเพิ่มขึ้นนี้ได้ ยกเว้นในช่วงปี พ.ศ. 2562 - 2564 เนื่องจากผลกระทบของโรคระบาด Coronavirus disease 2019 หรือ Covid-19 ที่ทำให้การใช้พลังงานรวมภายในประเทศลดลง เมื่อวิเคราะห์สัดส่วนการใช้พลังงานของประเทศในแต่ละภาคส่วนที่ปี พ.ศ. 2565 ดังแสดงในรูปที่ 1.3 พบว่า ภาคส่วนต่าง ๆ มีการใช้พลังงานเรียงสัดส่วนจากมากไปน้อยดังนี้ ภาคการขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม ภาคที่อยู่อาศัย ภาคการค้าและภาคการเกษตร (กระทรวงพลังงาน, 2566) โดยการใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งนั้นเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับสัดส่วนการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานข้อมูลสัดส่วนการใช้พลังงานของประเทศไทยที่แบ่งย่อยรายละเอียดของข้อมูลเชิงลึกในภาคอุตสาหกรรมแต่ละประเภท รวมไปถึงรายละเอียดปริมาณการประหยัด

22 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

พลังงานจากทางเลือกต่าง ๆ ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์ความสำคัญของการใช้แบบจำลองการอบแห้งที่ส่งผลต่อการประหยัดพลังงานภายในประเทศได้



รูปที่ 1.2 สถิติการใช้พลังงานของประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ. 2546 - 2565
(ที่มา : ปรับปรุงจาก กระทรวงพลังงาน, 2566)



รูปที่ 1.3 สัดส่วนการใช้พลังงานของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2565
(ที่มา : ปรับปรุงจาก กระทรวงพลังงาน, 2566)

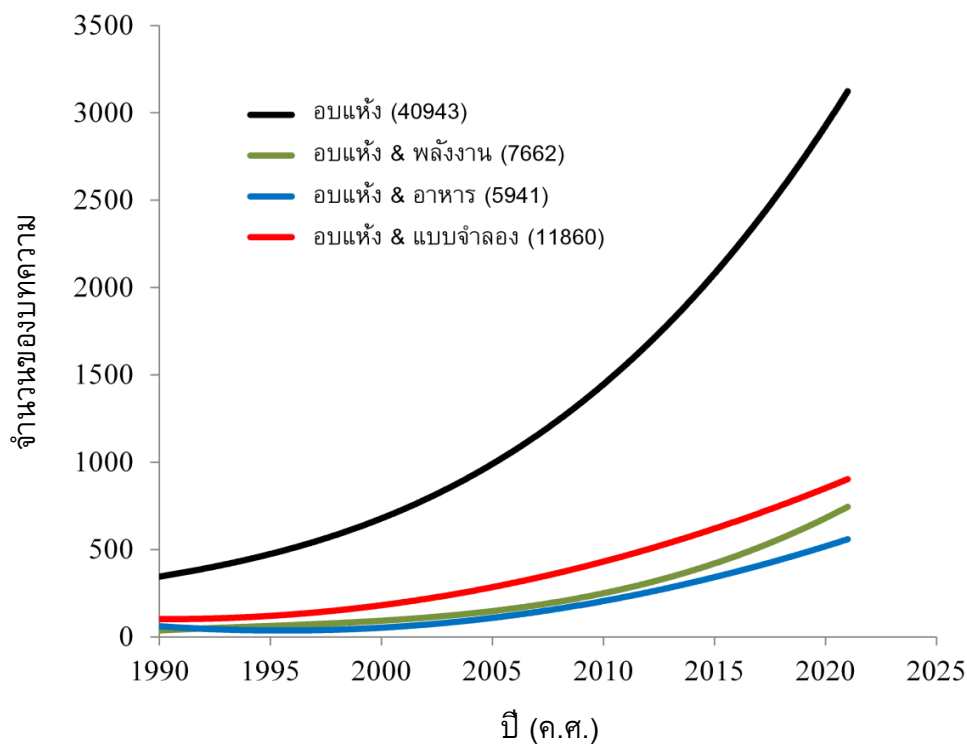
1.6 ความสำคัญด้านการพัฒนางานวิจัย

จากรูปที่ 1.4 แสดงจำนวนบทความวิจัยระดับนานาชาติที่สืบค้นจากฐานข้อมูล Scopus ซึ่งเกี่ยวข้องกับการอบแห้งในช่วงประมาณ 30 ปีที่ผ่านมา เมื่อพิจารณาจากรูป จำนวนบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งนั้นมีจำนวน 40,943 บทความ ด้วยอัตราการตีพิมพ์ที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี ข้อมูลดังกล่าวแสดงถึงแนวโน้มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาเนื้อหาภายในบทความสามารถแบ่งออกได้เพียง 3 กลุ่มใหญ่ ซึ่งมีจำนวนมากกว่าครึ่งหนึ่งของบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งทั้งหมด บทความทั้ง 3 กลุ่มถูกแบ่งเป็น กลุ่มบทความการอบแห้งที่มีจุดประสงค์เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Drying & Energy) จำนวน 7,662 บทความ กลุ่มบทความที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพของอาหาร (Drying & Food) จำนวน 5,941 บทความ และกลุ่มบทความที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาการจำลองการอบแห้ง (Drying & Modelling) จำนวน 11,860 บทความ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาปริมาณบทความที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาการจำลองในปีที่เริ่มเก็บข้อมูลพบว่า มีปริมาณบทความเพียง 100 บทความต่อปีโดยประมาณ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนบทความในช่วงทศวรรษที่ผ่านมากลับพบว่า กลุ่มบทความนี้มีอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนบทความสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบจำนวนบทความของอีกสองกลุ่ม โดยปัจจุบันกลุ่มบทความที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาการจำลองการอบแห้งมีการตีพิมพ์ประมาณ 1,000 บทความต่อปี ข้อมูลดังกล่าวอาจเป็นสิ่งสะท้อนถึงแนวทางการพัฒนางานวิจัยของการอบแห้งระดับนานาชาติในอนาคต

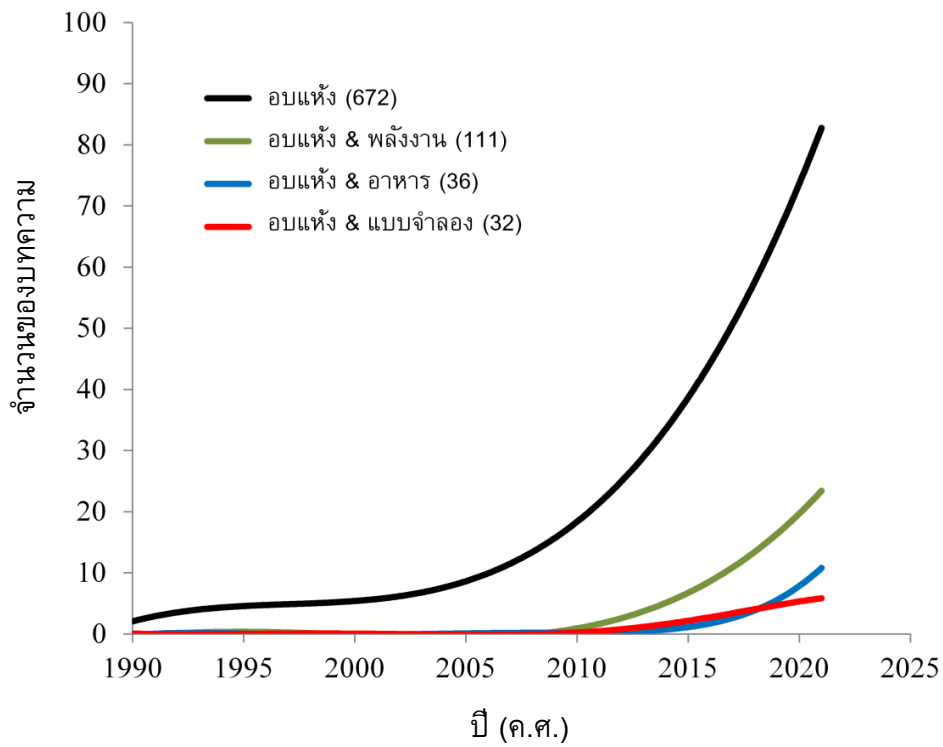
เมื่อพิจารณาบทความวิจัยระดับชาติของประเทศไทยที่สืบค้นจากฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index Centre หรือ TCI) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการอบแห้งในช่วงประมาณ 30 ปีที่ผ่านมา (แสดงในรูปที่ 1.5) พบว่า จำนวนบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งทั้งหมดนั้นมีจำนวน 672 บทความ ด้วยอัตราการตีพิมพ์ที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปีเช่นเดียวกับบทความวิจัยระดับนานาชาติ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจำนวนบทความที่เกี่ยวข้องกับ กลุ่มบทความการอบแห้งที่มีจุดประสงค์เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน กลุ่มบทความที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพของอาหารและกลุ่มบทความที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาการจำลองการอบแห้งกลับพบว่า บทความวิจัยเพิ่งเริ่มมีการตีพิมพ์ในปี

24 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

ค.ศ. 2012 ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนเหตุผลให้เห็นได้ในสองแง่มุมคือ หนึ่ง งานวิจัยระดับชาติของประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งเพิ่งเริ่มเห็นความสำคัญของการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การปรับปรุงคุณภาพของอาหารและการพัฒนาการจำลองการอบแห้งในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา หรือ สอง บทความวิจัยระดับชาติที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งของประเทศไทยในอดีตนั้นมีการตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการภายในประเทศเป็นส่วนมาก ซึ่งบทความในงานประชุมดังกล่าวอยู่นอกเหนือการสืบค้นจากฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย อย่างไรก็ตามด้วยข้อมูลที่มีจากรูปที่ 1.5 สามารถสรุปได้ว่า จำนวนบทความวิจัยทั้งสามกลุ่มนี้มีอัตราการตีพิมพ์ที่เพิ่มมากขึ้นทุกปี โดยบทความวิจัยระดับชาติในประเทศไทยนั้นมุ่งเน้นงานวิจัยการอบแห้งที่มีจุดประสงค์เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่าอีกสองกลุ่ม



รูปที่ 1.4 จำนวนบทความวิจัยของการอบแห้งจากฐานข้อมูล Scopus
(ที่มา : Scopus, 2023)



รูปที่ 1.5 จำนวนบทความวิจัยของการอบแห้งจากฐานข้อมูล TCI
(ที่มา : ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย, 2566)

สรุปท้ายบท 1

ในอดีตการอบแห้งมีจุดประสงค์มุ่งเน้นด้านปริมาณของอาหารเพื่อการดำรงชีพในครัวเรือน เมื่อปริมาณความต้องการอาหารเพิ่มสูงขึ้น การอบแห้งจึงมีส่วนเกี่ยวข้องกับข้อกำหนดในการแลกเปลี่ยน ซึ่งถูกนิยามว่ามาตรฐาน สำหรับแบบจำลองการอบแห้งเป็นการบูรณาการระหว่างสองศาสตร์คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และศาสตร์การอบแห้ง หากเปรียบเทียบทั้งสองศาสตร์นี้เป็นพีระมิด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเป็นส่วนยอด โดยมีศาสตร์การอบแห้งเป็นส่วนฐาน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หากไม่มีศาสตร์ของการอบแห้ง ในขณะเดียวกัน หากพีระมิดอยู่ในรูปทรงที่เหมาะสมดังที่เปรียบเทียบมา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถต่อยอดในการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการอบแห้งที่ซับซ้อน ซึ่งเกี่ยวข้องกับด้านคุณภาพ ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้อย่างรวดเร็วและเหมาะสม แบบจำลองการอบแห้งยังมีส่วนเกี่ยวข้องในด้านการพัฒนางานวิจัย ซึ่งสะท้อนได้จากอัตราการเพิ่มขึ้นของบทความวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา

แบบฝึกหัด

1. จงอธิบายความแตกต่างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การอบแห้ง และแบบจำลองการอบแห้ง
2. จงอธิบายว่าเมื่อประชากรโลกเพิ่มสูงขึ้นควบคู่ไปกับปริมาณความต้องการอาหาร การอบแห้งมีส่วนช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้อย่างไร
3. จงอธิบายถึงความสำคัญของกระบวนการอบแห้งที่มีต่อเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพภายหลังการเก็บเกี่ยว
4. จงอธิบายความเชื่อมโยงและความสำคัญของการอบแห้งต่อความเกี่ยวข้องกับมาตรฐานการซื้อขาย
5. จงอธิบายความจำเป็นและเหตุผลของการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อบแห้งที่นำเข้าไปในประเทศต่าง ๆ
6. จงอธิบายประโยชน์ของแบบจำลองการอบแห้งที่ส่งผลต่อความเกี่ยวข้องกับด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์
7. จงอธิบายว่าแบบจำลองการอบแห้งมีส่วนช่วยในด้านลดการใช้พลังงานและรักษาสິงแวดล้อมได้อย่างไร
8. จงอธิบายว่าการจัดประเภททางเลือกของแบบจำลองการอบแห้งนั้นอยู่ในประเภทใดและมีศักยภาพเป็นเช่นใดของการประหยัดพลังงาน
9. จงอธิบายถึงความเกี่ยวข้องของแบบจำลองการอบแห้งต่อการพัฒนางานวิจัยว่ามีส่วนช่วยในการพัฒนาได้อย่างไร
10. ในอนาคตแบบจำลองการอบแห้งจะมีความสำคัญในด้านปริมาณ ด้านมาตรฐาน ด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม หรือด้านการพัฒนางานวิจัยมากที่สุด เพราะเหตุใด

บรรณานุกรมบท 1

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2562). การปฏิบัติทางการเกษตรที่ดีสำหรับกาแฟ.

http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2561/E/287/T_0004.PDF.

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2562). มาตรฐานสินค้าเกษตร: ข้าว.

https://www.acfs.go.th/standard/download/Thai-Rice_60.pdf.

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2562). มาตรฐานยางพาราแผ่น.

<http://rubber.oie.go.th/Elibrary.aspx?cid=1070>.

กระทรวงพลังงาน. (2566). ภาพรวมพลังงาน.

<https://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/static-energy/summery-energy>

กระทรวงพาณิชย์. (2562). มาตรฐานสินค้าข้าวสาลีไทย.

http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2562/E/056/T_0008.PDF.

กองเศรษฐกิจการเกษตรระหว่างประเทศ. (2566). สถานการณ์การค้าสินค้าเกษตรไทยกับทั่วโลก.

<https://www.bangkokbiznews.com/business/economic/1088549>.

ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย. (2566). *Document Search*.

https://tci-thailand.org/wp-content/themes/magazine-style/tci_search/advance_search.html

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. (2558). คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์.

<http://www.tgo.or.th/2015/thai/content.php?s1=18&s2=61>.

Alexandratos, N., Bruinsma, J. (2012). Food and Agriculture Organization of the United Nations: world agriculture towards 2030/2050.

www.fao.org/esa/Global_persepctives/world_ag_2030_50_2012_rev.

Asim, M., Sarma, P. M., Thayumanavan, L., Kar, P. (2011). Role of Aflatoxin B1 as a risk for primary liver cancer in north Indian population. *Clinical Biochemistry*, 44, 1235-1240.

Bertuzzi, T., Romani, M., Rastelli, S., Giorni, P. (2019). Mycotoxins and related fungi in Italian paddy rice during the growing season and storage. *Toxins*, 11, 1-12.

- Chiewchan, N., Mujumdar, S. A., Devahastin, S. (2015). Application of drying technology to control aflatoxins in foods and feeds: A Review. *Drying Technology*, 33, 1700-1707.
- Defraeye, T. (2014). Advanced computational modelling for drying processes. *Applied Energy*, 131, 323-344.
- Ghasemi-Kebria, F., Joshaghani, H., Taheri, N. S., Semnani, S., Aarabi, M., Salamat, F., Roshandel, G. (2013). Aflatoxin contamination of wheat flour and the risk of esophageal cancer in a high risk area in Iran. *Cancer Epidemiology*, 37, 290-293.
- Junka, N., Rattanamechaikul, C. (2022). Drying modelling of amylose fatty acid complex formation for reducing rapidly available glucose of geographical indication rice during high-temperature fluidisation. *Journal of Food Engineering*, 318, 110899.
- Oliveira, P. M., Zannini, E., Arendt, E. K. (2014). Cereal fungal infection, mycotoxins, and lactic acid bacteria mediated bioprotection: from crop farming to cereal products. *Food Microbiology*, 37, 78-95.
- Paulino de Moraes, H., Luchese, H. (2003). Ochratoxin A in green coffee: influence of harvest and drying processing procedures. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 5824-5828.
- Rattanamechaikul, C., Junka, N., Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S. (2018). Modeling the improved textural properties of purple waxy rice dried through fluidization. *Drying Technology*, 36(9), 1061-1075.
- Reddy, K. R. N., Reddy, C. S., Abbas, H. K., Abel, C. A., Muralidharan, K. (2008). Mycotoxigenic fungi, mycotoxins and management of rice grains. *Toxin Reviews*, 27, 287-317.
- Scopus. (2023). Sources. <https://www.scopus.com/sources.uri?zone=TopNavBar&origin=>.
- Segura, F. R., Paulelli, A. C. C., Braga, G. U. L., Dos Reis Pedreira Filho, W., Silva, F. F., Batista, B. L. (2018). Promising filamentous native fungi isolated from paddy soils for arsenic mitigation in rice grains cultivated under flooded conditions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 3926-3932.
- Shephard, S. G. (2003). Aflatoxin and food safety: recent African perspectives. *Journal of Toxicology-Toxin Reviews*, 22(2-3), 267-286.

- Strumillo, C., Jones, L., Zylta, R. (2015). Energy aspects in drying. In *Handbook of Industrial drying*. Mujumdar A. S., 3rd Ed., CRC Press, USA, 1077-1100.
- Tohidi, M., Sadeghi, M., Torki-Harchegani, M. (2017). Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 70, 519-528.
- Vidinamo, F., Fawzia, S., Karim, A. M. (2022). Investigation of the effect of drying conditions on phytochemical content and antioxidant activity in pineapple (*Ananas comosus*). *Food and Bioprocess Technology*, 15, 72 - 81.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E., Rorrer, G. L. (2007). *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*, 5th Ed., Wiley, New York.



บทที่

การทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2

2.1 บทนำ

การสร้างและพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งต้องใช้พื้นฐานความรู้ทางทฤษฎีในหลากหลายวิชา ทั้งอุณหพลศาสตร์ การถ่ายโอนความร้อน ปฏิกิริยาการถ่ายโอนและทฤษฎีการอบแห้ง ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองยังจำเป็นต้องอาศัยวิธีการคำนวณทางวิศวกรรมหรือระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยในการหาผลเฉลยของปัญหา ปัจจุบันวิชาดังกล่าวมีทั้งหนังสือภาษาอังกฤษและภาษาไทยที่สามารถทำความเข้าใจพื้นฐานความรู้ที่ต้องใช้ได้ไม่ลำบากมากนัก เนื้อหาในบทนี้จึงเป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานที่ต้องใช้เฉพาะการอ่านหนังสือเล่มนี้ โดยเนื้อหานั้นเกี่ยวข้องกับ การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายเทมวล วิธีการคำนวณสมบัติเชิงความร้อนและความหนาแน่น ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการจำลองการอบแห้ง พื้นฐานการอบแห้งที่อธิบายถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้นและกลไกการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุระหว่างการอบแห้ง และรูปแบบของแบบจำลองการอบแห้งที่อธิบายถึงรายละเอียด ข้อดีและข้อเสีย (ข้อจำกัดในการดำเนินการ) ของแบบจำลองเชิงทฤษฎี (Theoretical Models) แบบจำลองเอมพิริคัล (Empirical Models) และแบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Computational Models)

2.2 การทบทวนทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายเทมวล

เนื้อหาในหัวข้อนี้มีจุดประสงค์เพื่อทบทวนทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายเทมวลโดยมุ่งเน้นการอธิบายรายละเอียดที่มาของสมการควบคุม (Governing equation) สมการ

สมภาวะขอบเขต (Boundary condition equation) และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่ใช้ในแบบจำลองการอบแห้ง

2.2.1 สมการการนำความร้อน

สมการการนำความร้อน (Heat conduction equation) เป็นหนึ่งในสมการควบคุมของแบบจำลองการอบแห้ง เมื่อกระบวนการอบแห้งได้เริ่มต้นขึ้น ของไหลซึ่งคืออากาศร้อนอุณหภูมิสูงจะถ่ายโอนความร้อนสู่ผิวของวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำด้วยการพาความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุมีค่าสูงขึ้น ต่อมาที่ขอบเขตบริเวณผิวของวัสดุที่มีอุณหภูมิสูงจะถ่ายโอนความร้อนสู่ขอบเขตบริเวณภายในของวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าด้วยการนำความร้อน ซึ่งอยู่บนพื้นฐานตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) โดยหากการถ่ายโอนนำความร้อนดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลาหรืออยู่ในสภาวะไม่คงตัว สมการการถ่ายโอนโดยการนำความร้อนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการสมดุลพลังงานตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานขององค์ประกอบปริมาตร (Volume element) ขนาดเล็ก สมการการถ่ายโอนโดยการนำความร้อนกรณี 3 มิตินั้น มีที่มาดังนี้

ระบบพิกัดฉาก

จากรูปที่ 2.1 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็กของพิกัดฉากที่มีความยาว Δx ความกว้าง Δy และความสูง Δz ขณะถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อน สมดุลพลังงานขององค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็กในช่วงระยะเวลา Δt คือ

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการนำความร้อน} \\ \text{ที่ } x, y, \text{ และ } z \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการนำความร้อน} \\ \text{ที่ } x + \Delta x, y + \Delta y, \\ \text{และ } z + \Delta z \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการผลิต} \\ \text{ความร้อนภายใน} \\ \text{องค์ประกอบปริมาตร} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{พลังงานของ} \\ \text{องค์ประกอบปริมาตร} \end{array} \right)$$

หรือสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.1)

$$(\dot{Q}_x + \dot{Q}_y + \dot{Q}_z) - (\dot{Q}_{x+\Delta x} + \dot{Q}_{y+\Delta y} + \dot{Q}_{z+\Delta z}) + \dot{E}_{gen, element} = \frac{\Delta E_{element}}{\Delta t} \quad (2.1)$$

เมื่อ $\Delta E_{element}$ คือการเปลี่ยนแปลงพลังงานขององค์ประกอบปริมาตร (J)
 $\dot{E}_{gen, element}$ คืออัตราการผลิตความร้อนภายในองค์ประกอบปริมาตร (J/s)
 $\dot{Q}_x$ $\dot{Q}_y$ และ $\dot{Q}_z$ คืออัตราการนำความร้อนตามแนวแกน x y และ z (J/s)
 t คือระยะเวลา (s)

หากกำหนดให้องค์ประกอบปริมาตรมีค่าเท่ากับ $\Delta x \Delta y \Delta z$ สมการการเปลี่ยนแปลงพลังงานและอัตราการผลิตความร้อนภายในองค์ประกอบปริมาตร สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.5) โดยที่

$$\Delta E_{element} = E_{t+\Delta t} - E_t = mc(T_{t+\Delta t} - T_t) = \rho V_{element} c(T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (2.2)$$

$$\Delta E_{element} = \rho c \Delta x \Delta y \Delta z (T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (2.3)$$

$$\dot{E}_{gen, element} = \dot{e}_{gen} V_{element} \quad (2.4)$$

$$\dot{E}_{gen, element} = \dot{e}_{gen} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.5)$$

เมื่อ c คือค่าความร้อนจำเพาะ (J/kg K)
 E คือพลังงานภายในองค์ประกอบปริมาตร (J)
 $\dot{e}_{gen}$ คืออัตราการผลิตความร้อนต่อองค์ประกอบปริมาตร (J/s m³)
 m คือมวลขององค์ประกอบปริมาตร (kg)
 T คืออุณหภูมิขององค์ประกอบปริมาตร (K)
 $V_{element}$ คือองค์ประกอบปริมาตร (m³)
 ρ คือความหนาแน่นขององค์ประกอบปริมาตร (kg/m³)

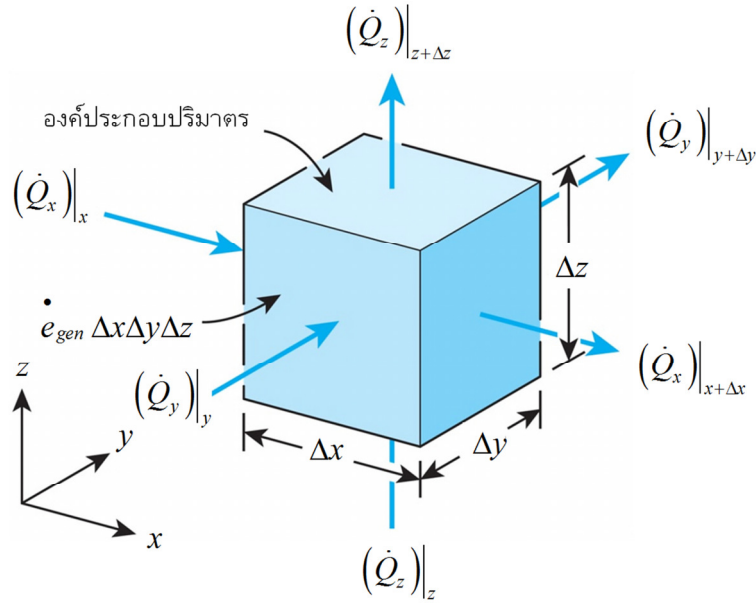
แทนค่าสมการที่ (2.3) และ (2.5) ลงในสมการที่ (2.1) ได้เป็น

$$\dot{Q}_x + \dot{Q}_y + \dot{Q}_z - \dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_{z+\Delta z} + \dot{e}_{gen} \Delta x \Delta y \Delta z = \rho c \Delta x \Delta y \Delta z \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t} \quad (2.6)$$

34 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

นำ $\Delta x \Delta y \Delta z$ หารสมการที่ (2.6) ทั้งสมการและจัดรูปได้เป็น

$$-\frac{1}{\Delta y \Delta z} \frac{\dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_x}{\Delta x} - \frac{1}{\Delta x \Delta z} \frac{\dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_y}{\Delta y} - \frac{1}{\Delta x \Delta y} \frac{\dot{Q}_{z+\Delta z} - \dot{Q}_z}{\Delta z} + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.1 การนำความร้อนใน 3 มิติ ผ่านองค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็กของระบบพิกัดฉาก
(ที่มา : ปรับปรุงจาก Cengel and Ghajar, 2015)

กำหนดพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนขององค์ประกอบปริมาตรสำหรับการนำความร้อนในทิศทาง x y และ z คือ $A_x = \Delta y \Delta z$ $A_y = \Delta x \Delta z$ และ $A_z = \Delta x \Delta y$ และหาค่าลิมิตโดยกำหนดให้ $\Delta x \rightarrow 0$ $\Delta y \rightarrow 0$ $\Delta z \rightarrow 0$ และ $\Delta t \rightarrow 0$ สมการที่ (2.7) เขียนได้เป็น

$$-\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta y \Delta z} \frac{\dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_x}{\Delta x} - \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x \Delta z} \frac{\dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_y}{\Delta y} - \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x \Delta y} \frac{\dot{Q}_{z+\Delta z} - \dot{Q}_z}{\Delta z} + \dot{e}_{gen} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \rho c \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{\Delta y \Delta z} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_x}{\Delta x} - \frac{1}{\Delta x \Delta z} \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_y}{\Delta y} - \frac{1}{\Delta x \Delta y} \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\dot{Q}_{z+\Delta z} - \dot{Q}_z}{\Delta z} + \dot{e}_{gen} \\
 & = \rho c \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t}
 \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$-\frac{1}{\Delta y \Delta z} \frac{\partial Q_x}{\partial x} - \frac{1}{\Delta x \Delta z} \frac{\partial Q_y}{\partial y} - \frac{1}{\Delta x \Delta y} \frac{\partial Q_z}{\partial z} + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

จากกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's Law) กำหนดอัตราการนำความร้อนตามแนวแกน x y และ z ให้มีค่าดังสมการที่ (2.11) ถึงสมการที่ (2.13)

$$\dot{Q}_x = -kA_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.11)$$

$$\dot{Q}_y = -kA_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.12)$$

$$\dot{Q}_z = -kA_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.13)$$

เมื่อ A คือพื้นที่การถ่ายโอนความร้อน (m^2)
 k สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ($W/m \cdot K$)

นำอัตราการนำความร้อนตามแนวแกน x y และ z ดังสมการที่ (2.11) ถึงสมการที่ (2.13) แทนค่าลงในสมการที่ (2.10) ได้เป็น

$$-\frac{1}{\Delta y \Delta z} \frac{\partial}{\partial x} \left(-kA_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{1}{\Delta x \Delta z} \frac{\partial}{\partial y} \left(-kA_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{1}{\Delta x \Delta y} \frac{\partial}{\partial z} \left(-kA_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{\Delta y \Delta z} \frac{\partial}{\partial x} \left(-k \Delta y \Delta z \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{1}{\Delta x \Delta z} \frac{\partial}{\partial y} \left(-k \Delta x \Delta z \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{1}{\Delta x \Delta y} \frac{\partial}{\partial z} \left(-k \Delta x \Delta y \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} \\
 & = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}
 \end{aligned} \quad (2.15)$$

36 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

$$-\frac{\Delta y \Delta z}{\Delta y \Delta z} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta x \Delta z} \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta x \Delta y} \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.17)$$

กำหนดให้ค่าการแพร่ความร้อนมีค่าดังสมการที่ (2.18)

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (2.18)$$

เมื่อ α คือค่าการแพร่ความร้อน (m^2/s)

นำค่าการแพร่ความร้อนดังสมการที่ (2.18) แทนค่าลงในสมการที่ (2.17) ได้เป็นสมการการนำความร้อนทั่วไปในองค์ประกอบปริมาตรของพิกัดฉาก ดังสมการที่ (2.19)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.19)$$

ระบบพิกัดทรงกลม

จากรูปที่ 2.2 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็กของพิกัดทรงกลมขณะถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อน สมดุลพลังงานขององค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็กในช่วงระยะเวลา Δt คือ

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการนำความร้อน} \\ \text{ที่ } x, \phi, \text{ และ } \theta \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการนำความร้อน} \\ \text{ที่ } x + dx, \phi + d\phi, \\ \text{และ } \theta + d\theta \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการผลิต} \\ \text{ความร้อนภายใน} \\ \text{องค์ประกอบปริมาตร} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{พลังงานของ} \\ \text{องค์ประกอบปริมาตร} \end{array} \right)$$

หรือสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.20)

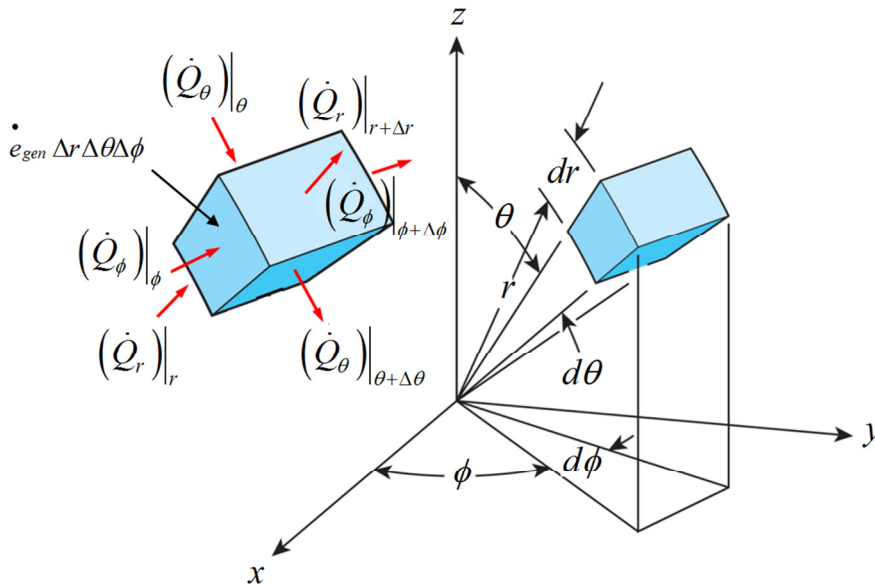
$$(\dot{Q}_r + \dot{Q}_\phi + \dot{Q}_\theta) - (\dot{Q}_{r+\Delta r} + \dot{Q}_{\phi+\Delta\phi} + \dot{Q}_{\theta+\Delta\theta}) + \dot{E}_{gen, element} = \frac{\Delta E_{element}}{\Delta t} \quad (2.20)$$

เมื่อ $\dot{Q}_r$, $\dot{Q}_\phi$ และ $\dot{Q}_\theta$ คืออัตราการนำความร้อนตามแนวแกน r , ϕ และ θ (J/s)

จากสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.4) หากกำหนดให้องค์ประกอบปริมาตรมีค่าเท่ากับ $\Delta r \Delta \phi \Delta \theta$ สมการการเปลี่ยนแปลงพลังงานและอัตราการผลิตความร้อนภายในองค์ประกอบปริมาตรสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.21) และสมการที่ (2.22)

$$\Delta E_{element} = \rho c r^2 (\sin \theta) \Delta r \Delta \phi \Delta \theta (T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (2.21)$$

$$\dot{E}_{gen, element} = \dot{e}_{gen} r^2 (\sin \theta) \Delta r \Delta \phi \Delta \theta \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.2 การนำความร้อนใน 3 มิติ ผ่านองค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็กของระบบฟัดตรงกลม

(ที่มา : ปรับปรุงจาก Cengel and Ghajar, 2015)

38 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

แทนค่าสมการที่ (2.21) และ (2.22) ลงในสมการที่ (2.20) และจัดรูปได้เป็น

$$-\frac{\partial \dot{Q}_r}{\partial r} \Delta r - \frac{\partial \dot{Q}_\phi}{\partial \phi} \Delta \phi - \frac{\partial \dot{Q}_\theta}{\partial \theta} \Delta \theta + \dot{e}_{gen} r^2 (\sin \theta) \Delta r \Delta \phi \Delta \theta = \rho c r^2 (\sin \theta) \Delta r \Delta \phi \Delta \theta \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.23)$$

นำ $r^2 (\sin \theta) \Delta r \Delta \phi \Delta \theta$ หารสมการที่ (2.23) ทั้งสมการได้เป็น

$$-\frac{1}{r^2 (\sin \theta) \Delta \phi \Delta \theta} \frac{\partial \dot{Q}_r}{\partial r} - \frac{1}{r^2 (\sin \theta) \Delta r \Delta \theta} \frac{\partial \dot{Q}_\phi}{\partial \phi} - \frac{1}{r^2 (\sin \theta) \Delta r \Delta \phi} \frac{\partial \dot{Q}_\theta}{\partial \theta} + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.24)$$

กำหนดพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนขององค์ประกอบปริมาตรสำหรับการนำความร้อน คือ $A_r = r^2 (\sin \theta) \Delta \phi \Delta \theta$ $A_\phi = r \Delta r \Delta \theta$ และ $A_\theta = r (\sin \theta) \Delta r \Delta \phi$ กำหนดการหาค่าลิมิตโดยใช้วิธีการตั้งเช่นระบบพิกัดฉากและจากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) กำหนดอัตราการนำความร้อนตามแนวแกน r ϕ และ θ ให้มีค่าดังสมการที่ (2.25) ถึงสมการที่ (2.27)

$$\dot{Q}_r = -k A_r \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.25)$$

$$\dot{Q}_\phi = -k A_\phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \quad (2.26)$$

$$\dot{Q}_\theta = -k A_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad (2.27)$$

นำอัตราการนำความร้อนดังสมการที่ (2.25) ถึงสมการที่ (2.27) แทนค่าลงในสมการที่ (2.24) ได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 (\sin^2 \theta)} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 (\sin \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k (\sin \theta) \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \dot{e}_{gen} \\ = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.28)$$

นำค่าการแพร่ความร้อนดังสมการที่ (2.18) แทนค่าลงในสมการที่ (2.28) ได้เป็นสมการการนำความร้อนทั่วไปในองค์ประกอบปริมาตรของพิกัดทรงกลมดังสมการที่ (2.29)

$$\frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(ar^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(a \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(a \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) \right) + \dot{e}_{gen} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.29)$$

ระบบพิกัดทรงกระบอก

จากรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็กของพิกัดทรงกระบอกขณะถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อน สมดุลพลังงานขององค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็กในช่วงระยะเวลา Δt คือ

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการนำความร้อน} \\ \text{ที่ } x, \phi, \text{ และ } z \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการนำความร้อน} \\ \text{ที่ } x + dx, \phi + d\phi, \\ \text{และ } z + dz \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการผลิต} \\ \text{ความร้อนภายใน} \\ \text{องค์ประกอบปริมาตร} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{พลังงานของ} \\ \text{องค์ประกอบปริมาตร} \end{array} \right)$$

หรือสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.30)

$$(\dot{Q}_r + \dot{Q}_\theta + \dot{Q}_z) - (\dot{Q}_{r+\Delta r} + \dot{Q}_{\theta+\Delta \theta} + \dot{Q}_{z+\Delta z}) + \dot{E}_{gen, element} = \frac{\Delta E_{element}}{\Delta t} \quad (2.30)$$

เมื่อ $\dot{Q}_r$, $\dot{Q}_\theta$ และ $\dot{Q}_z$ คืออัตราการนำความร้อนตามแนวแกน r , θ และ z (J/s)

จากสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.4) หากกำหนดให้องค์ประกอบปริมาตรมีค่าเท่ากับ $\Delta r \Delta \theta \Delta z$ สมการการเปลี่ยนแปลงพลังงานและอัตราการผลิตความร้อนภายในองค์ประกอบปริมาตรสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.31) และสมการที่ (2.32)

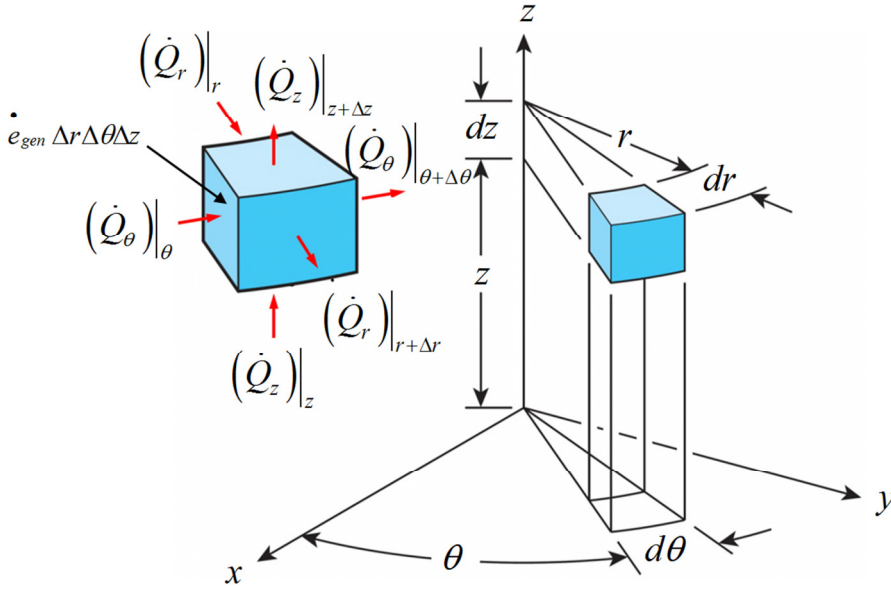
$$\Delta E_{element} = \rho c r \Delta r \Delta \theta \Delta z (T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (2.31)$$

$$\dot{E}_{gen, element} = \dot{e}_{gen} r \Delta r \Delta \theta \Delta z \quad (2.32)$$

40 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

แทนค่าสมการที่ (2.31) และ (2.32) ลงในสมการที่ (2.30) และจัดรูปได้เป็น

$$-\frac{\partial \dot{Q}_r}{\partial r} \Delta r - \frac{\partial \dot{Q}_\theta}{\partial \theta} \Delta \theta - \frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} \Delta z + \dot{e}_{gen} r \Delta r \Delta \theta \Delta z = \rho c r \Delta r \Delta \theta \Delta z \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.3 การนำความร้อนใน 3 มิติ ผ่านองค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็กของระบบพิกัดทรงกระบอก
(ที่มา : ปรับปรุงจาก Cengel and Ghajar, 2015)

นำ $r \Delta r \Delta \theta \Delta z$ หารสมการที่ (2.33) ทั้งสมการได้เป็น

$$-\frac{1}{r \Delta \theta \Delta z} \frac{\partial \dot{Q}_r}{\partial r} - \frac{1}{r \Delta r \Delta z} \frac{\partial \dot{Q}_\theta}{\partial \theta} - \frac{1}{r \Delta r \Delta \theta} \frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.34)$$

กำหนดพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนขององค์ประกอบปริมาตรสำหรับการนำความร้อน คือ $A_r = r \Delta \theta \Delta z$, $A_\theta = \Delta r \Delta z$ และ $A_z = r \Delta r \Delta \theta$ กำหนดการหาค่าลิมิตโดยใช้วิธีการตั้งเช่นระบบพิกัดฉากและจากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) กำหนดอัตราการนำความร้อนตามแนวแกน r , θ และ z ให้มีค่าดังสมการที่ (2.35) ถึงสมการที่ (2.37)

$$\dot{Q}_r = -k A_r \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.35)$$

$$\dot{Q}_\theta = -kA_\theta \frac{\partial T}{r \partial \theta} \quad (2.36)$$

$$\dot{Q}_z = -kA_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.37)$$

นำอัตราการนำความร้อนตั้งสมการที่ (2.35) ถึงสมการที่ (2.37) แทนค่าลงในสมการที่ (2.34) ได้เป็น

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.38)$$

นำค่าการแพร่ความร้อนตั้งสมการที่ (2.18) แทนค่าลงในสมการที่ (2.38) ได้เป็นสมการการนำความร้อนทั่วไปในองค์ประกอบปริมาตรของพิกัดทรงกระบอกตั้งสมการที่ (2.39)

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\alpha}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) + \dot{e}_{gen} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.39)$$

2.2.2 สมการการพาความร้อน

สมการสภาวะขอบเขต (Boundary condition equation) ของแบบจำลองการอบแห้งที่ใช้ อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน สามารถอธิบายด้วยสมการการพาความร้อนซึ่งอยู่บนพื้นฐานทฤษฎีของกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) กฎดังกล่าวคือการอธิบายอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของวัสดุกับของไหลที่เคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวนั้น ดังรูปที่ 2.4 โดยมีสมมติฐานว่าฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวของวัสดุกับของไหลที่เคลื่อนที่ไปบนพื้นผิว สามารถเขียนได้ตั้งสมการ

$$\dot{q}_{conv} \propto (T_a - T_s) \quad (2.40)$$

42 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

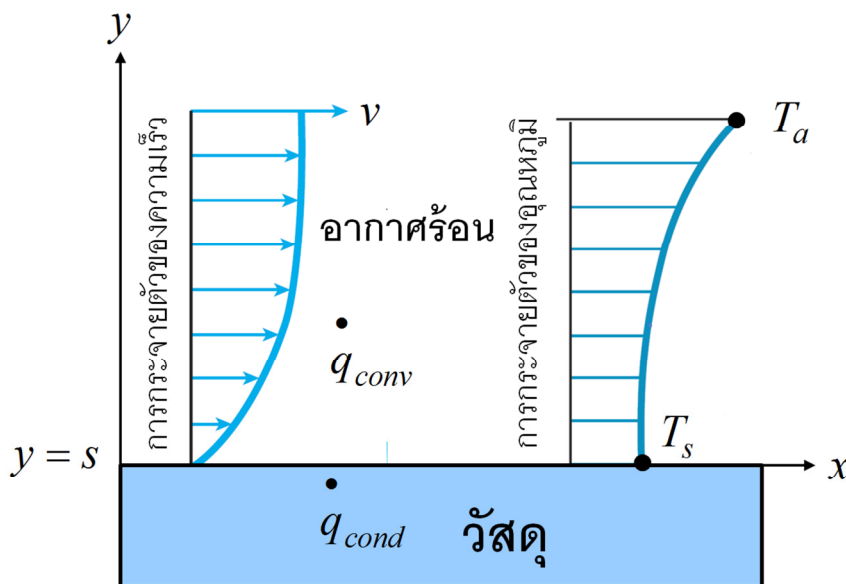
เมื่อ $\dot{q}_{conv}$ คือฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อน (W/m^2)

T_a คืออุณหภูมิอากาศร้อน (K)

T_s คืออุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุ (K)

จากสมการที่ (2.40) พบว่าหน่วยสมการระหว่างเทอมทางซ้ายซึ่งเป็นฟลักซ์ความร้อนและเทอมทางขวาซึ่งเป็นผลต่างของอุณหภูมิอากาศร้อนกับพื้นผิวของวัสดุนั้นไม่สัมพันธ์กัน ดังนั้นจึงต้องเพิ่มค่าคงที่ในสมการที่ (2.40) ที่เทอมทางขวาของสมการ เพื่อให้ความสัมพันธ์ของหน่วยสมการนั้นเป็นจริง ค่าคงที่ดังกล่าวคือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_T , $\text{W/m}^2 \text{ K}$) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.41)

$$\dot{q}_{conv} = h_T (T_a - T_s) \quad (2.41)$$



รูปที่ 2.4 การถ่ายโอนความร้อนจากอากาศร้อนสู่ผิวของวัสดุ

(ที่มา : ปรับปรุงจาก Cengel and Ghajar, 2015)

เมื่อความร้อนจากอากาศร้อนถ่ายโอนไปยังที่ผิวของวัสดุจนทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุมีค่าสูงขึ้น พลังงานความร้อนที่บริเวณผิวจะถ่ายโอนสู่ภายในวัสดุด้วยการนำความร้อนตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.42)

$$\dot{q}_{cond} = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=s} \quad (2.42)$$

เมื่อ $\dot{q}_{cond}$ คือฟลักซ์ความร้อนจากการนำความร้อน (W/m^2)

k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ($W/m \cdot K$)

y คือระยะตามแนวแกน (m)

T คืออุณหภูมิของวัสดุ (K)

จากรูปที่ 2.4 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความเร็วอากาศที่บริเวณผิวของวัสดุ ($y = s$) พบว่า การเคลื่อนที่ของอากาศจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($v = 0$ m/s) ดังนั้นพลังงานความร้อนจากชั้นของไหลที่ติดกับพื้นผิวจะถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อนสู่ผิวของวัสดุ ทำให้บริเวณพื้นผิวดังกล่าว ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อน (สมการที่ (2.41)) จะมีค่าเท่ากับ ฟลักซ์ความร้อนจากการนำความร้อน (สมการที่ (2.42)) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\dot{q}_{conv} = \dot{q}_{cond} \quad (2.42)$$

$$h_T (T_a - T_s) = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=s} \quad (2.43)$$

สมการที่ (2.43) คือ สมการสภาวะขอบเขตที่มักพบทั่วไปในแบบจำลองการอบแห้ง เนื่องจากกระบวนการอบแห้งโดยส่วนใหญ่ใช้น้ำอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน นอกจากนี้จากสมการยังพบว่า มีอีกสองตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อนนั้นคือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (รายละเอียดเพิ่มเติมจะอธิบายในหัวข้อถัดไป) และ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยทั่วไปมักเป็นฟังก์ชันของความยาวลักษณะเฉพาะ (Characteristic length) ของรูปทรงเรขาคณิต คุณสมบัติของของไหล การเคลื่อนที่และในบางกรณีอาจขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การพา

44 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

ความร้อนสามารถหาค่าได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและสมการสหสัมพันธ์ (Correlation) โดยใช้ข้อมูลการทดลองที่เขียนอยู่ในรูปแบบของสมการตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Variables) ซึ่งแฝงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไว้ เช่น เลขนัสเซิลต์ (Nusselt number) หรือ เลขพรันด์เทิล (Prandtl number)

เลขนัสเซิลต์ คือ อัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อนต่อฟลักซ์ความร้อนจากการนำความร้อน สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.44)

$$Nu = \frac{h_T L_c}{k_a} \quad (2.44)$$

เมื่อ Nu คือ เลขนัสเซิลต์ (-)

h_T คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2 \text{K}$)

k_a คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล (W/m K)

L_c คือความยาวลักษณะเฉพาะ (m)

โดยความยาวลักษณะเฉพาะคือ ความยาวที่ของไหลสัมผัสผ่านวัสดุหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นความยาวของวัสดุที่มีการถ่ายโอนความร้อน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.45)

$$L_c = \frac{V}{A_s} \quad (2.45)$$

เมื่อ V คือปริมาตรของวัสดุ (m^3)

A_s คือพื้นที่ผิวของวัสดุ (m^2)

เลขสแตนต์ตัน (Stanton number) คืออัตราส่วนระหว่างการถ่ายโอนความร้อนเข้าไปในของไหลต่อความจุความร้อนของของไหล สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.46)

$$St = \frac{h_T}{v \rho_a c_{p,a}} \quad (2.46)$$

เมื่อ $c_{p,a}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของของไหล (J/kg K)

St คือ เลขสแตนต์ัน (-)

v คือความเร็วของของไหล (m/s)

ρ_a คือความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)

จากสมการที่ (2.46) หากจัดรูปแบบของสมการเลขสแตนต์ันให้อยู่ในรูปของสมการตัวแปรไร้มิติทั้งหมด สามารถเขียนได้เป็น

$$St = \frac{Nu}{RePr} \quad (2.47)$$

เมื่อ Pr คือ เลขพรันด์เทิล (-)

Re คือ เลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number) (-)

โดยที่เลขพรันด์เทิลและเลขเรย์โนลด์ส์มีรูปแบบดังสมการที่ (2.48) และสมการที่ (2.49)

$$Pr = \frac{c_{p,a}\mu_a}{k_a} \quad (2.48)$$

$$Re = \frac{v\rho_a L_c}{\mu_a} \quad (2.49)$$

เมื่อ μ_a คือค่าความหนืดของของไหล (kg/m s)

ในการเลือกสมการตัวแปรไร้มิติ สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เหมาะสมเพื่อใช้ในแบบจำลองการอบแห้งนั้น สามารถใช้สมการสหสัมพันธ์จากงานวิจัยก่อนหน้าได้ ซึ่งการเลือกใช้ต้องพิจารณาถึงความสอดคล้องของกระบวนการ ขอบเขตและสภาวะอบแห้งเป็นสำคัญ โดยตัวอย่างรูปแบบของสมการตัวแปรไร้มิติที่แผ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสมการตัวแปรไร้มิติที่แปลงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวิธีการอบแห้งบางประเภท

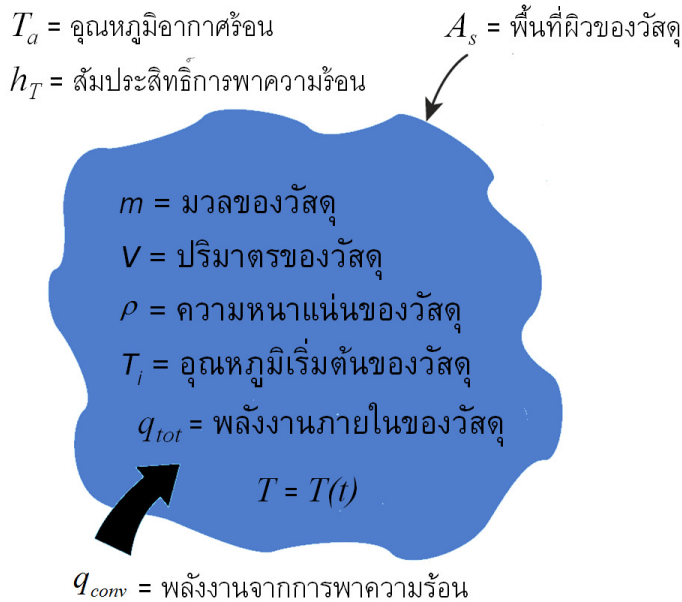
วิธีการอบแห้ง	สมการ	ขอบเขต
Flat Plate	$StPr^{2/3} = 0.036Re^{-0.2}$	$500,000 < Re$
Flat Plate	$Nu = 0.036(Re^{0.8} - 9,200)Pr^{0.43}$	$1.0 \times 10^5 < Re < 5.5 \times 10^6$
Fluidized Bed	$Nu = 0.0133Re^{1.6}$	$0 < Re < 80$
Fluidized Bed	$Nu = 0.316Re^{0.8}$	$80 < Re < 500$
Packed Bed	$StPr^{2/3} = 1.06Re^{-0.41}$	$350 < Re < 4,000$
Pneumatic	$Nu = 2 + 1.05Re^{1/2} Pr^{1/3} Gu^{0.175}$	$Re < 1,000$
Rotary Dryer	$StPr^{2/3} = 1.0Re^{-0.5} Pr^{0.33}$	ไม่มีข้อมูล
Rotary Dryer	$Nu = 0.33Re^{0.6}$	ไม่มีข้อมูล

(ที่มา : ปรับปรุงจาก Marinou-Kouris และ Maroulis, 2007)

2.2.3 การนำความร้อนชั่วครู่

เนื้อหาในส่วนนี้ได้อธิบายเพื่อทบทวนทฤษฎีการนำความร้อนชั่วครู่ (Transient heat conduction) หรือเรียกอีกอย่างว่า การนำความร้อนในสภาวะไม่คงตัว ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับการจำลองการอบแห้งกรณีอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของวัสดุมีค่าเปลี่ยนแปลงหรือมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตลอดระหว่างการอบแห้งจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนชั้นประสิทธิภาพมีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการอบแห้งเช่นกัน ดังนั้นการจำลองการอบแห้งจึงต้องเชื่อมโยงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุลงในสมการการคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนประสิทธิภาพระหว่างการจำลองการอบแห้ง โดยการคำนวณอุณหภูมิของวัสดุระหว่างการอบแห้งมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อวัสดุตั้งรูปที่ 2.5 ถูกอบแห้งด้วยอากาศร้อนโดยมีสมมติฐานให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าสม่ำเสมอและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุเป็นฟังก์ชันเฉพาะกับเวลา การคำนวณการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุระหว่างช่วงเวลาอบแห้ง (dt) สามารถใช้การวิเคราะห์แบบ Lumped system ในการคำนวณได้



รูปที่ 2.5 วัสดุและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนชั่วคราว
(ที่มา : ปรับปรุงจาก Cengel and Ghajar, 2015)

จากรูป การถ่ายโอนความร้อนจากการพาความร้อนของอากาศร้อน (q_{conv}) สู่วัสดุจะมีค่าเท่ากับการเพิ่มขึ้นของพลังงานภายในของวัสดุ (q_{tot}) ระหว่างช่วงเวลา ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการสมดุลพลังงานได้เป็น

$$h_T A_s (T_a - T) dt = mc_p dT \quad (2.50)$$

หากกำหนด $m = \rho V$ และ $dT = d(T - T_a)$ สมการที่ (2.50) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{d(T - T_a)}{T - T_a} = \frac{h_T A_s}{\rho V c_p} dt \quad (2.51)$$

ทำการอินทิกรัลสมการที่ (2.51) ที่ $t = 0$ เมื่อ $T = T_i$ และ $t > 0$ เมื่อ $T = T(t)$ ได้เป็น

$$\ln \frac{T(t) - T_a}{T_i - T_a} = -\frac{h_T A_s}{\rho V c_p} t \quad (2.52)$$

48 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

ทำการประยุกต์เอกซ์โพเนนเชียลเข้าไปในสมการที่ (2.52) ได้เป็น

$$\frac{T(t) - T_a}{T_i - T_a} = \exp(-bt) \quad (2.53)$$

โดยที่

$$b = \frac{h_T A_s}{\rho V c_p} \quad (2.54)$$

เมื่อ b คือค่าคงที่ของเวลา (time constant, s^{-1})

c_p คือค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ ($J/kg \text{ K}$)

m คือมวลของวัสดุ (kg)

T_i คืออุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุ (K)

ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

ในการใช้สมการที่ (2.53) คำนวณอุณหภูมิของวัสดุระหว่างการอบแห้ง มีเงื่อนไขการคำนวณคือเลขไบโอท (Biot number) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการพาความร้อนที่ผิวของวัสดุต่อการนำความร้อนภายในวัสดุ ดังสมการที่ (2.56) ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1

$$Bi = \frac{h_T}{k / L_c} \frac{\Delta T}{\Delta T} \quad (2.55)$$

$$Bi = \frac{h_T L_c}{k} \quad (2.56)$$

เมื่อ Bi คือเลขไบโอท (-)

ในกรณีเลขไบโอทมีค่ามากกว่า 0.1 ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าไม่สม่ำเสมอ โดยหากกำหนดสมมติฐานให้วัสดุพิกัดจากกว้างและยาวมาก วัสดุพิกัดทรงกลมและวัสดุพิกัดทรงกระบอกยาวอนันต์มีการถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นเฉพาะตามแนวรัศมี อุณหภูมิภายในวัสดุที่ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.57) ถึงสมการที่ (2.59)

วัสดุฟัดฉาก

$$\frac{T(x,t) - T_a}{T_i - T_a} = A_1 \exp(-\lambda_1^2 \tau) \cos(\lambda_1 x / L) \quad (2.57)$$

วัสดุฟัดทรงกลม

$$\frac{T(r,t) - T_a}{T_i - T_a} = A_1 \exp(-\lambda_1^2 \tau) \frac{\sin(\lambda_1 r / R)}{\lambda_1 r / R} \quad (2.58)$$

วัสดุฟัดทรงกระบอก

$$\frac{T(r,t) - T_a}{T_i - T_a} = A_1 \exp(-\lambda_1^2 \tau) J_0(\lambda_1 r / R) \quad (2.59)$$

สมการที่ (2.57) ถึงสมการที่ (2.59) มีเงื่อนไขการคำนวณคือเลขฟูเรียร์ (Fourier number) ดังสมการที่ (2.60) ต้องมีค่ามากกว่า 0.2

$$\tau = \frac{\alpha t}{L_c^2} \quad (2.60)$$

เมื่อ A_1 คือค่าคงที่ของเลขไบโอท (-)

J_0 คือฟังก์ชันเบสเซลอันดับศูนย์ (zeroth-order Bessel function)

r คือระยะตามแนวแกน (m)

R คือรัศมีของวัสดุ (m)

τ คือเลขฟูเรียร์ (Fourier number)

λ_1 คือค่าคงที่ของเลขไบโอท (-)

โดยค่าความยาวลักษณะเฉพาะของวัสดุฟัดฉากคือ $L/2$ วัสดุฟัดทรงกลมและวัสดุฟัดทรงกระบอกคือ R (จากเดิมค่าความยาวลักษณะเฉพาะของวัสดุฟัดทรงกลมในการวิเคราะห์แบบ Lumped system คือ $R/3$)

หาค่าของ $\cos(0) = J_0(0) = 1$ และ $(\sin x)/x = 1$ สมการการคำนวณอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.61) ถึงสมการที่ (2.63)

วัสดุพิกัดฉาก

$$\frac{T_0 - T_a}{T_i - T_a} = A_1 \exp(-\lambda_1^2 \tau) \quad (2.61)$$

วัสดุพิกัดทรงกลม

$$\frac{T_0 - T_a}{T_i - T_a} = A_1 \exp(-\lambda_1^2 \tau) \quad (2.62)$$

วัสดุพิกัดทรงกระบอก

$$\frac{T_0 - T_a}{T_i - T_a} = A_1 \exp(-\lambda_1^2 \tau) \quad (2.63)$$

2.2.4 สมการการแพร่ความชื้น

สมการการแพร่ความชื้น (Mass diffusion equation) เป็นสมการควบคุมหลักของแบบจำลองการอบแห้ง เมื่อกระบวนการอบแห้งได้เริ่มต้นขึ้น ความชื้นที่บริเวณผิวของวัสดุจะระเหยโดยการพาความชื้นสู่อากาศร้อน ความชื้นบริเวณภายในของวัสดุที่มีค่าสูงจะถ่ายเทโดยการแพร่ไปสู่บริเวณผิวที่มีค่าความชื้นต่ำกว่า โดยกลไกการแพร่ความชื้นนั้นเป็นไปตามกฎของฟิคส์ (Fick's Law) ซึ่งหากการแพร่ความชื้นดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลาหรืออยู่ในสภาวะไม่คงตัว สมการการแพร่ความชื้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ตามกฎของสมดุลมวล (Crank, 1975; Welty และคณะ, 2008) เมื่อพิจารณาสมดุลมวลขององค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็ก สมการความต่อเนื่องกรณี 3 มิติของระบบพิกัดต่าง ๆ นั้นมีที่มาดังนี้

ระบบพิกัดฉาก

จากรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็กของพิกัดฉากที่มีความยาว Δx ความกว้าง Δy และความสูง Δz ขณะของไหลไหลผ่านและหากกำหนดฟลักซ์มวล (Mass flux) คือผลคูณระหว่างความหนาแน่นกับความเร็วของของไหลตามแนวแกน สมดุลมวลขององค์ประกอบปริมาตรขนาดเล็กในช่วงระยะเวลา Δt คือ

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราของมวลที่} \\ x, y \text{ และ } z \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราของมวลที่} \\ x+\Delta x, y+\Delta y \\ \text{และ } z+\Delta z \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราของ} \\ \text{ผลิตภัณฑ์จาก} \\ \text{ปฏิกิริยาเคมี} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการ} \\ \text{เปลี่ยนแปลงมวลของ} \\ \text{องค์ประกอบปริมาตร} \end{array} \right)$$

หรือสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.64)

$$\begin{aligned} \Delta y \Delta z \left[(\rho v_x)|_x - (\rho v_x)|_{x+\Delta x} \right] + \Delta z \Delta x \left[(\rho v_y)|_y - (\rho v_y)|_{y+\Delta y} \right] \\ + \Delta x \Delta y \left[(\rho v_z)|_z - (\rho v_z)|_{z+\Delta z} \right] + \dot{R}_m = \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.64)$$

เมื่อ $\dot{R}_m$ คืออัตราของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมี (kg/s)

t คือระยะเวลา (s)

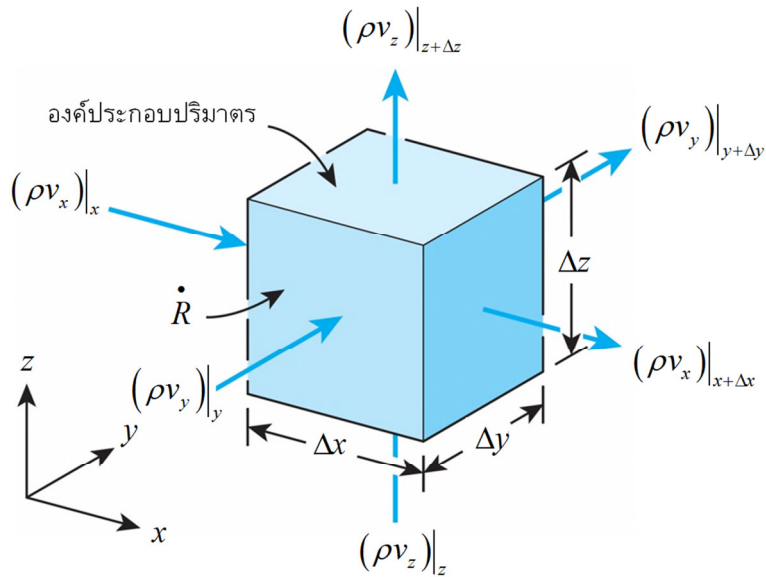
v_x , v_y และ v_z คือความเร็วของของไหลตามแนวแกน x , y และ z (m/s)

ρ คือความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)

นำ $\Delta x \Delta y \Delta z$ หารสมการที่ (2.64) และหาค่าลิมิตโดยกำหนดให้ $\Delta x \rightarrow 0$, $\Delta y \rightarrow 0$, $\Delta z \rightarrow 0$ และ $\Delta t \rightarrow 0$ สามารถเขียนสมการความต่อเนื่องได้เป็น

$$-\left(\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right) + \dot{R}_v = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.65)$$

เมื่อ $\dot{R}_v$ คืออัตราของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีต่อปริมาตร (kg/s m³)



รูปที่ 2.6 วัสดุและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมการความต่อเนื่อง
(ที่มา : ปรับปรุงจาก Bird และคณะ, 2002)

เมื่อวัสดุถูกอบแห้ง โมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นของเหลวจะมีการเคลื่อนที่จากบริเวณภายในของวัสดุที่มีค่าความชื้นสูงไปสู่บริเวณผิวของวัสดุที่มีค่าความชื้นต่ำกว่าโดยการแพร่ โดยกลไกการแพร่ความชื้นดังกล่าวนี้เป็นไปตามกฎของฟิกซ์ หากพิจารณาการแพร่ความชื้นในแนวแกน x , y และ z ของวัสดุ การแพร่ความชื้นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.66)

$$J = - \left(D_{eff} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{eff} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{eff} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (2.66)$$

เมื่อ D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)

J คือฟลักซ์เชิงมวล (mass flux, $kg/s \ m^2$)

C คือความเข้มข้นเชิงมวลต่อปริมาตร (kg/m^3)

นำฟลักซ์เชิงมวลจากสมการที่ (2.66) แทนค่าในเทอม ρv_x , ρv_y และ ρv_z ของสมการความต่อเนื่องที่ (2.65) ได้เป็น

$$- \left(\frac{\partial J}{\partial x} + \frac{\partial J}{\partial y} + \frac{\partial J}{\partial z} \right) + \dot{R} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.67)$$

จัดรูปสมการที่ (2.67) ได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \dot{R}_v = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.68)$$

ความเข้มข้นเชิงมวลต่อปริมาตรในสมการที่ (2.68) สามารถเขียนอยู่ในรูปของสัดส่วนมวล (Mass fraction) ได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial z} \right) + \dot{R} = \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2.69)$$

เมื่อ M คือสัดส่วนมวล (-)

$\dot{R}$ คืออัตราของปฏิกิริยาเคมี (s^{-1})

สมการที่ (2.69) คือสมการการแพร่ความชื้นของระบบพิกัดฉาก โดยตัวแปรสัดส่วนมวล (M) ของสมการเมื่อใช้คำนวณในการจำลองการอบแห้งคือ ความชื้นของวัสดุ (kg/kg dry basis)

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสมการการนำความร้อนที่ (2.19) กับสมการการแพร่ความชื้นที่ (2.69) พบว่ามีความคล้ายกันอย่างมากหากแทนที่ T ด้วย M แทนที่ α ด้วย D_{eff} และแทนที่ $\dot{e}_{gen}$ ด้วย $\dot{R}$ จากความคล้ายกันของสมการทั้งสองของระบบพิกัดฉาก ดังนั้นสามารถอุปมา (analogy) สมการการแพร่ความชื้นของระบบพิกัดทรงกลมจากสมการการนำความร้อนที่ (2.29) และระบบพิกัดทรงกระบอกจากสมการการนำความร้อนที่ (2.39) ได้เป็น

ระบบพิกัดทรงกลม

$$\frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(D_{eff} r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(D_{eff} \sin \theta \frac{\partial M}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial \phi} \right) \right) + \dot{R} = \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2.70)$$

ระบบพิกัดทรงกระบอก

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{eff} \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{D_{eff}}{r} \frac{\partial M}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r D_{eff} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \right) + \dot{R} = \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2.71)$$

2.2.5 สมการการพาความร้อน

สมการการพาความร้อนเกี่ยวข้องโดยตรงกับสมการสถานะขอบเขตของแบบจำลองการอบแห้งที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เมื่อกระบวนการอบแห้งได้เริ่มขึ้น อากาศร้อนจะไหลผ่านพื้นผิวของวัสดุดังรูปที่ 2.7 ความร้อนสูงที่บริเวณผิวของวัสดุจะระเหยสู่ชั้นขอบเขตโดยการพาความร้อน ที่บริเวณดังกล่าวฟลักซ์เชิงมวลจะมีค่าเท่ากับผลคูณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกับความแตกต่างของความเข้มข้นเชิงมวลที่ผิวของวัสดุกับชั้นขอบเขต สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.72)

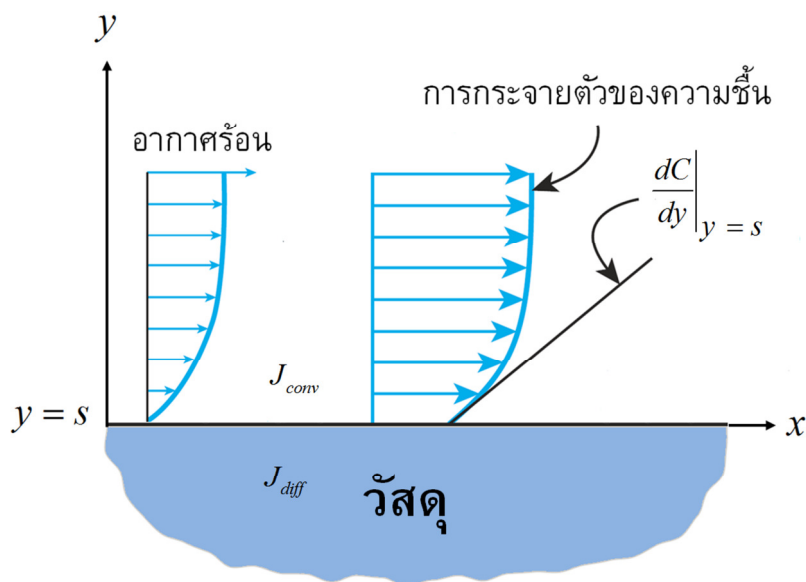
$$J_{conv} = h_m (C_s - C_e) \quad (2.72)$$

เมื่อ C_e คือความเข้มข้นเชิงมวลต่อปริมาตรที่ชั้นขอบเขต (kg/m^3)

C_s คือความเข้มข้นเชิงมวลต่อปริมาตรที่ผิวของวัสดุ (kg/m^3)

h_m คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (m/s)

J_{conv} คือฟลักซ์เชิงมวลจากการพา (kg/s m^2)



รูปที่ 2.7 การถ่ายเทมวลที่ผิวของวัสดุสู่อากาศร้อน
(ที่มา : ปรับปรุงจาก Cengel and Ghajar, 2015)

เมื่อความชื้นที่ผิวของวัสดุถ่ายเทไปยังอากาศร้อน ความชื้นภายในวัสดุที่มีค่าสูงจะแพร่ไปสู่บริเวณผิวที่มีค่าความชื้นต่ำกว่า กลไกการแพร่ความชื้นนั้นเป็นไปตามกฎของฟิกซ์ ซึ่งฟลักซ์เชิงมวลจะมีค่าเท่ากับผลคูณของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับความแตกต่างของความเข้มข้นเชิงมวลที่ผิวและภายในของวัสดุ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.73)

$$J_{diff} = -D_{eff} \left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{y=s} \quad (2.73)$$

เมื่อ J_{diff} คือฟลักซ์เชิงมวลจากการแพร่ (kg/s m^2)

จากรูปที่ 2.7 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความเร็วอากาศร้อนที่บริเวณผิวของวัสดุ ($y = s$) พบว่า การเคลื่อนที่ของอากาศจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ที่บริเวณดังกล่าวฟลักซ์เชิงมวลจากการพาจะมีค่าเท่ากับฟลักซ์เชิงมวลจากการแพร่ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$J_{conv} = J_{diff} \quad (2.74)$$

$$h_m (C_s - C_e) = -D_{eff} \left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{y=s} \quad (2.75)$$

จากสมการที่ (2.75) ความเข้มข้นเชิงมวลต่อปริมาตร สามารถเขียนอยู่ในรูปของสัดส่วนมวลได้เป็นสมการที่ (2.76)

$$h_m (M_s - M_e) = -D_{eff} \left. \frac{\partial M}{\partial y} \right|_{y=s} \quad (2.76)$$

สมการที่ (2.76) คือ สมการสภาวะขอบเขตพื้นฐานที่มักพบทั่วไปในแบบจำลองการอบแห้ง เนื่องจากกระบวนการอบแห้งโดยส่วนใหญ่เน้นใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความชื้น นอกจากนี้จากสมการยังพบว่า มีอีกสองตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความชื้นนั้นคือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (รายละเอียดเพิ่มเติมจะอธิบายในบทที่ 3) และสัมประสิทธิ์การพามวล

ค่าสัมประสิทธิ์การพามวลเป็นค่าที่แฝงอยู่ในรูปแบบของสมการตัวแปรไร้มิติ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและสมการสหสัมพันธ์เหมือนเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สมการตัวแปรไร้มิติที่มีค่าแฝงของค่าสัมประสิทธิ์การพามวลคือเลขเชอร์วูด (Sherwood number)

เลขเชอร์วูดคืออัตราส่วนระหว่างอัตราการถ่ายเทมวลจากการพาต่ออัตราการถ่ายเทมวลจากการแพร่ความร้อน สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.77)

$$Sh = \frac{h_m L_c}{\rho_a D_a} \quad (2.77)$$

เมื่อ D_a คือค่าการแพร่ไอน้ำในอากาศ (m^2/s)

Sh คือเลขเชอร์วูด (-)

ρ_a คือความหนาแน่นของอากาศ

ในการเลือกใช้สมการตัวแปรไร้มิติ สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพามวลที่เหมาะสมเพื่อใช้ในแบบจำลองการอบแห้ง สามารถใช้สมการสหสัมพันธ์จากงานวิจัยก่อนหน้าได้ ซึ่งการเลือกใช้หลักการพิจารณาเกี่ยวกับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคือ ต้องพิจารณาถึงความสอดคล้องของกระบวนการ ขอบเขตและสภาวะอบแห้ง ตัวอย่างรูปแบบของสมการตัวแปรไร้มิติที่แฝงค่าสัมประสิทธิ์การพามวลแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสมการตัวแปรไร้มิติที่แฝงค่าสัมประสิทธิ์การพามวลของวิธีการอบแห้งบางประเภท

วิธีการอบแห้ง	สมการ	ขอบเขต
Fluidized Bed	$Sh = 0.374Re^{1.18}$	$0.1 < Re < 15$
Fluidized Bed	$Sh = 2.01Re^{0.5}$	$15 < Re < 250$
Packed Bed	$(h_m / v_a \rho_a) Sc^{2/3} = 1.82Re^{-0.51}$	$40 < Re < 350$
Pneumatic	$Sh = 2 + 1.05Re^{1/2} Pr^{1/3} Gu^{0.175}$	$Re < 1,000$

(ที่มา : ปรับปรุงจาก Marinou-Kouris และ Maroulis, 2007)

จากตารางที่ 2.2 ค่าของ Gukhman number และเลขชมิตต์ (Schmidt number) คำนวณได้จากสมการที่ (2.78) และสมการที่ (2.79)

$$Gu = \frac{(T_a - T)}{T_a} \quad (2.78)$$

$$Sc = \frac{\mu_a}{\rho_a D_a} \quad (2.79)$$

เมื่อ Gu คือ Gukhman number (-)

Sc คือ เลขชมิตต์ (-)

v_a คือความเร็วของอากาศ (m/s)

μ_a ค่าความหนืดของอากาศ (kg/m s)

2.3 สมบัติเชิงความร้อนและความหนาแน่น

2.3.1 ความร้อนจำเพาะ

ความร้อนจำเพาะคือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศาที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ โดยมากการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะในเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพมักขึ้นอยู่กับระดับความชื้นของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง วิธีการหาค่าความร้อนจำเพาะสามารถทำได้โดยการนำผลิตภัณฑ์ที่ทราบค่าความชื้นที่ระดับต่าง ๆ ใส่ในอุปกรณ์ที่เรียกว่าแคลอริมิเตอร์ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งบรรจุน้ำร้อนและหุ้มฉนวนอย่างดี จากนั้นทำการบันทึกอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ แคลอริมิเตอร์และน้ำร้อน ทั้งที่สภาวะเริ่มต้นและที่สภาวะสมดุล ค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์สามารถคำนวณได้จากสมมูลพลังงานคือ ความร้อนที่ผลิตภัณฑ์และแคลอริมิเตอร์ได้รับมีค่าเท่ากับความร้อนสูญเสียจากน้ำร้อน โดยสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการได้เป็น

$$m_p c_{p,p} (T_{p,eq} - T_{p,i}) + m_c c_{p,c} (T_{c,eq} - T_{c,i}) = m_w c_{p,w} (T_{w,i} - T_{w,eq}) \quad (2.80)$$

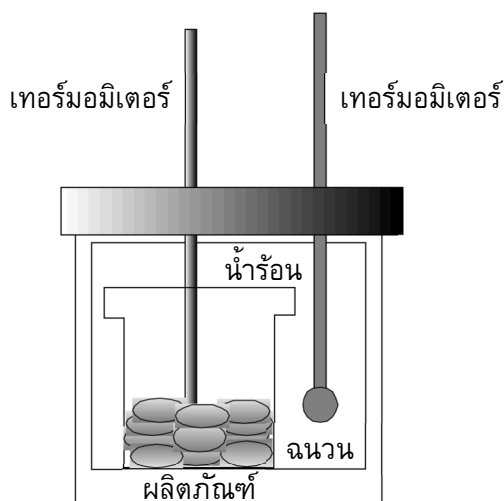
$$c_{p,p} = \frac{m_w c_{p,w} (T_{w,i} - T_{w,eq}) - m_c c_{p,c} (T_{c,eq} - T_{c,i})}{m_p (T_{p,eq} - T_{p,i})} \quad (2.81)$$

เมื่อ $c_{p,p}$ $c_{p,c}$ และ $c_{p,w}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ แคลอรีมิเตอร์และน้ำ ตามลำดับ (J/kg K)

m_p m_c และ m_w คือมวลของผลิตภัณฑ์ แคลอรีมิเตอร์และน้ำ ตามลำดับ (kg)

$T_{p,eq}$ $T_{c,eq}$ และ $T_{w,eq}$ คืออุณหภูมิที่สภาวะสมดุลของผลิตภัณฑ์ แคลอรีมิเตอร์และน้ำ ตามลำดับ (K)

$T_{p,i}$ $T_{c,i}$ และ $T_{w,i}$ คืออุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ แคลอรีมิเตอร์และน้ำ ตามลำดับ (K)



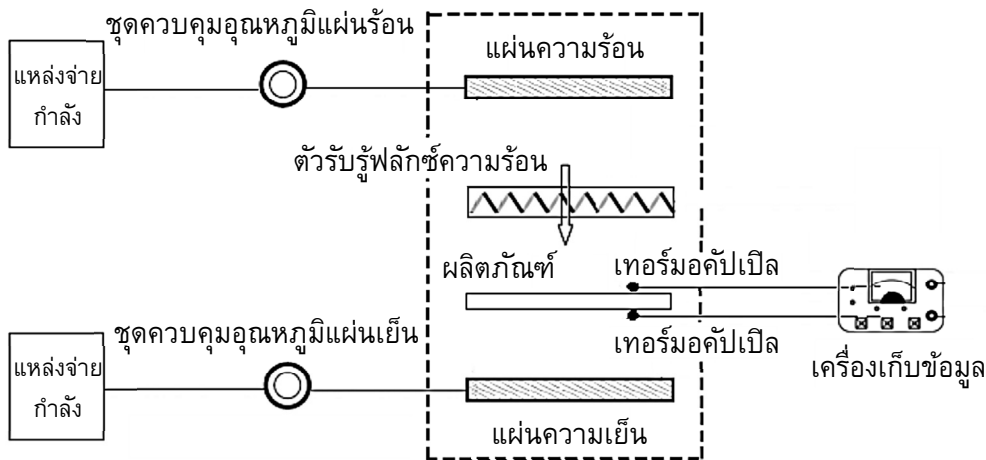
รูปที่ 2.8 การหาค่าความร้อนจำเพาะด้วยแคลอรีมิเตอร์
(ที่มา : ปรับปรุงจาก อติศักดิ์ และ สมเกียรติ, 2541)

2.3.2 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เป็นสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่บอกถึงอัตราการส่งผ่านพลังงานความร้อนภายในโมเลกุลของสาร จากโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงไปยังระดับที่มีพลังงานต่ำโดยการนำความร้อน

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ให้ค่าแม่นยำสามารถหาได้ด้วยหลักการให้ความร้อนแบบสถานะคงตัว (Steady-state) เป็นวิธีการรักษาอุณหภูมิในระบบให้คงตัวโดย

แหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนภายใน เช่น แหล่งจ่ายกำลัง (Power supply) จากนั้นทำการบันทึกผลต่างระหว่างอุณหภูมิสองจุดที่ระยะใด ๆ ของผลิตภัณฑ์ รูปที่ 2.9 แสดงอุปกรณ์สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีหลักการให้ความร้อนแบบสถานะคงตัวจากแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ไปยังผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์ที่ทราบความหนา โดยที่ด้านล่างมีแผ่นความเย็นควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าคงที่เช่นกัน ทำให้ฟลักซ์ความร้อนที่ส่งผ่านผลิตภัณฑ์นั้นมีค่าคงที่ซึ่งสามารถบันทึกค่าได้โดยใช้ตัวรับรู้ค่าฟลักซ์ความร้อน จากนั้นทำการบันทึกผลต่างของอุณหภูมิ เพื่อนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
(ที่มา : ปรับปรุงจาก กันต์ธรรณ, 2563)

หลักการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่บนพื้นฐานกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) โดยฟลักซ์ความร้อนมีค่าเท่ากับพลังงานจากการนำความร้อนต่อพื้นที่ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.82

$$\dot{q} = \frac{q}{A} \quad (2.82)$$

โดยที่

$$q = kA \left(\frac{\Delta T}{Th} \right) \quad (2.83)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.83 แทนค่าในสมการ 2.82 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$k = q \frac{\dot{A} Th}{\Delta T} \quad (2.84)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ของการถ่ายโอนความร้อน (m^2)
 k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ($W/m K$)
 q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
 $\dot{A}$ คือ ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2)
 Th คือ ความหนาของผลิตภัณฑ์ (m)
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (K)

2.3.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพสามารถแบ่งได้ออกเป็นสองชนิดคือ ความหนาแน่นจริงและความหนาแน่นปรากฏ ความหนาแน่นจริงคือ อัตราส่วนของมวลวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุ ส่วนความหนาแน่นปรากฏคือ อัตราส่วนมวลของวัสดุต่อปริมาตรทั้งหมด โดยที่ปริมาตรทั้งหมดนั้นได้รวมปริมาตรของวัสดุและปริมาตรของอากาศที่แทรกตัวอยู่ตามช่องว่างรวมอยู่ด้วย สำหรับความสัมพันธ์ของสัดส่วนช่องว่างอากาศ ความหนาแน่นจริงและความหนาแน่นปรากฏ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_t} \quad (2.85)$$

เมื่อ ε คือ สัดส่วนช่องว่างอากาศ (-)
 ρ_b คือ ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)
 ρ_t คือ ความหนาแน่นจริง (kg/m^3)

วิธีการหาค่าความหนาแน่นจริงนั้น เริ่มจากการเตรียมเมล็ดพืชหรือวัสดุชีวภาพที่มีความชื้นต่าง ๆ ใส่ลงในบีกเกอร์ที่ทราบปริมาตรแน่นอนในปริมาณที่กำหนด นำไปชั่งน้ำหนักจะ

สามารถคำนวณความหนาแน่นปรากฏได้ จากนั้นตวงน้ำมันพืชในหลอดทดลองที่ทราบปริมาตร แล้วเทใส่ในปิกลูกแก้วที่บรรจุเมล็ดพืชหรือวัสดุชีวภาพอยู่จนเต็ม คำนวณหาปริมาตรของน้ำมันพืชที่ใช้ไปซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาตรของช่องว่างอากาศที่แทรกตัวอยู่ เมื่อได้ค่าความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศก็จะสามารถคำนวณหาความหนาแน่นจริงได้ ค่าดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญที่ต้องใช้ในการจำลองการอบแห้ง

2.4 การทบทวนพื้นฐานการอบแห้ง

2.4.1 กลไกการเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้น

กลไกการเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้นเป็นหนึ่งในพื้นฐานความรู้สำคัญในการทำความเข้าใจกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากกระบวนการอบแห้งโดยทั่วไปนั้นใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง อากาศนั้นประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำปะปนอยู่ อากาศที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งจึงมีสมบัติเป็นอากาศชื้น ดังนั้นสามารถใช้แผนภูมิอากาศชื้นในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงสมบัติระหว่างการอบแห้งได้ รูปที่ 2.10 แสดงแผนภูมิอากาศชื้น ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรที่ต้องทำความเข้าใจ ดังนี้

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (RH) คือ อัตราส่วนของความดันไอของไอน้ำในอากาศต่อความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและบรรยากาศเดียวกัน เส้นสีฟ้าดังรูปคือเส้นอากาศอิ่มตัว เป็นเส้นที่แสดงถึงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 หากคำนวณเป็นอัตราส่วนหรือหากคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์จะมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature หรือ T_{db}) คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่ระบุค่าโดยเทอร์โมมิเตอร์ ค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้งคือค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

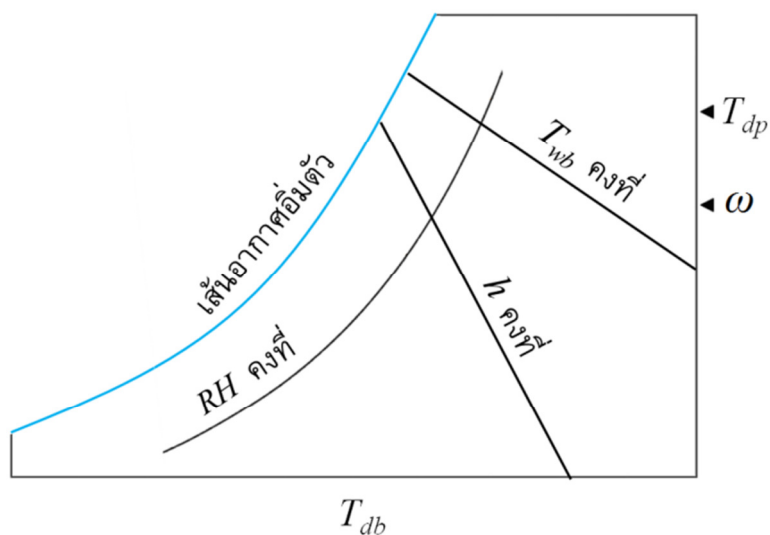
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-bulb temperature หรือ T_{wb}) คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่ระบุค่าโดยเทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะถูกหุ้มด้วยผ้ากอสมเปียก และมีลมเป่าผ่านด้วยความเร็วอย่างน้อย 4.6 m/s อุณหภูมิกระเปาะเปียกนี้เรียกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงไซโครเมตริก

อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio หรือ ω) คือ มวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อมวลของอากาศแห้ง

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-point temperature หรือ T_{dp}) คือ อุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศเกิดการควบแน่นที่อัตราส่วนความชื้นและความดันบรรยากาศคงที่ โดยทั่วไปในกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศร้อน อุณหภูมิจุดน้ำค้างจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเสมอ เนื่องจากอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าน้อยกว่า 1 กระบวนการควบแน่นจึงไม่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง ทั้งนี้ยกเว้นกรณีที่มีการฉีดมวลไอน้ำอิมิตัวเข้าไปในระบบปริมาณมากจนทำให้อากาศอิมิตัว อุณหภูมิจุดน้ำค้างถึงมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

เอนทัลปี (Enthalpy หรือ h) ของอากาศชื้น คือ ปริมาณความร้อนของอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลรวมของเอนทัลปีของอากาศแห้ง (h_a) และผลคูณของอัตราส่วนความชื้นกับเอนทัลปีของไอน้ำในอากาศ (h_v) ดังสมการที่ 2.86 นอกจากนี้การคำนวณค่าเอนทัลปีหากทราบค่าตัวแปรในแผนภูมิอากาศชื้นจำนวนสองตัวแปรก็สามารถคำนวณค่าเอนทัลปีของอากาศชื้นได้เช่นกัน (สมชาติ, 2540)

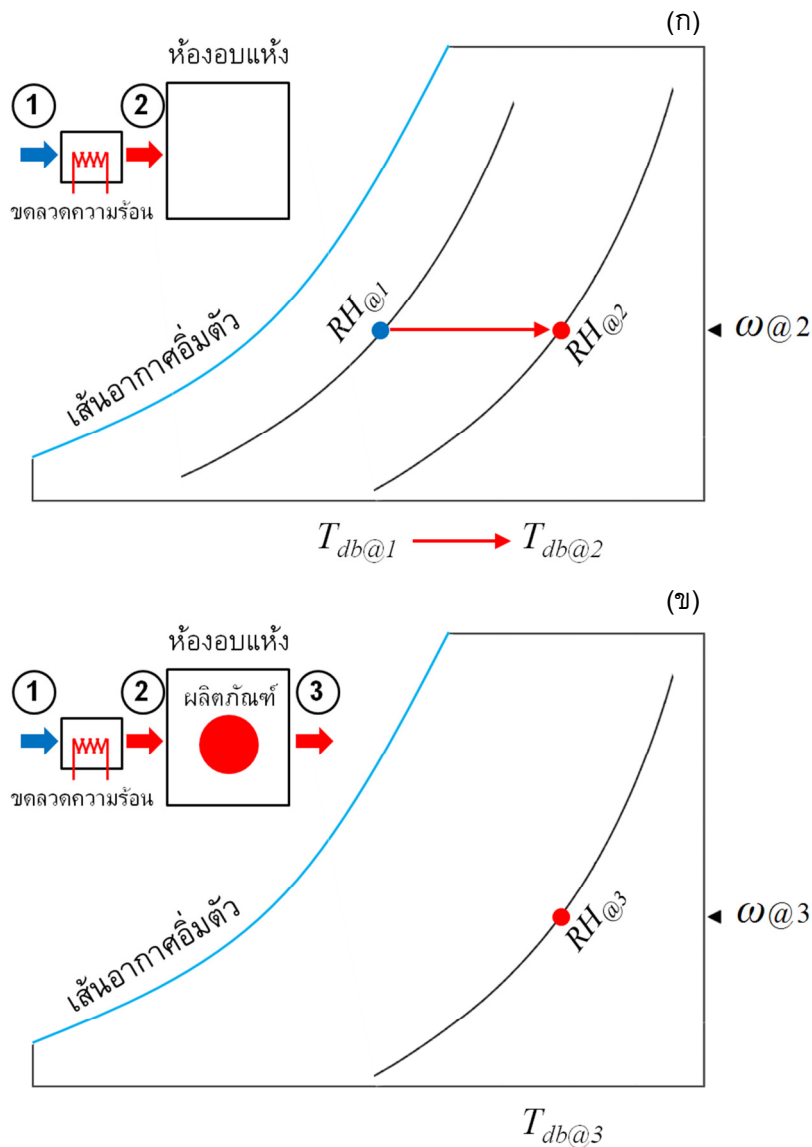
$$h = h_a + \omega h_v \quad (2.86)$$



รูปที่ 2.10 แผนภูมิอากาศชื้น

รูปที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้นระหว่างการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ (Isothermal Drying) ของผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง เมื่อเริ่มต้นกระบวนการอบแห้ง (จากจุด 1 ไปจุด 2 ดังรูปที่ 2.11ก) อากาศอุณหภูมิต่ำจะไหลผ่านขดลวดความร้อนทำให้อุณหภูมิกระเปาะแห้งหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นจนถึงระดับที่ต้องการ ผลของการเพิ่มขึ้นของ

อุณหภูมิส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าลดลงตามเส้นของอัตราส่วนความชื้นคงที่ ส่วนค่าเอนทัลปีมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่ออากาศร้อนได้ไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งเป็นแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนคงที่เท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง นอกจากนี้มวลของไอน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์เมื่อเปรียบเทียบกับมวลของอากาศชื้นจะมีค่าน้อยมาก ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศขาออก ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อัตราส่วนความชื้นและเอนทัลปีที่จุด 3 จะมีค่าเท่ากับจุด 2 ดังรูปที่ 2.11ข

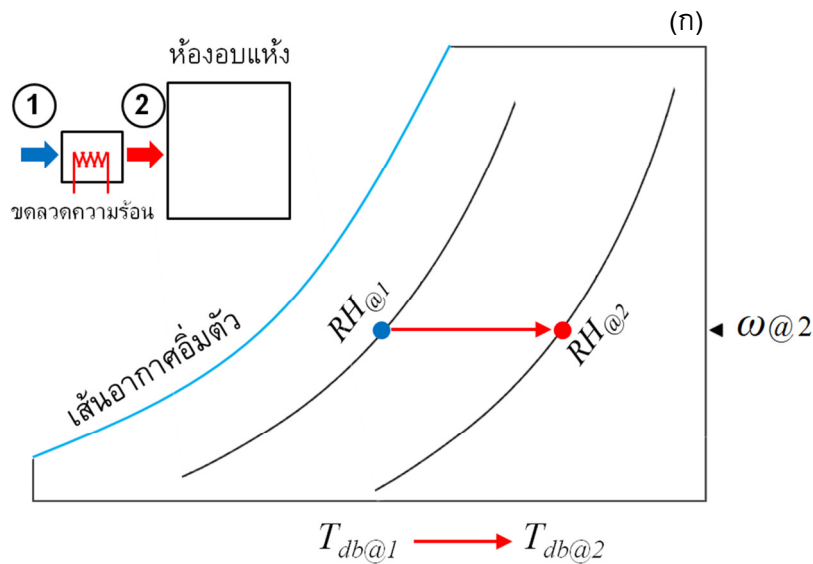


รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้น (ก) เมื่อผ่านขดลวดความร้อนและ (ข) ผ่านห้องอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่

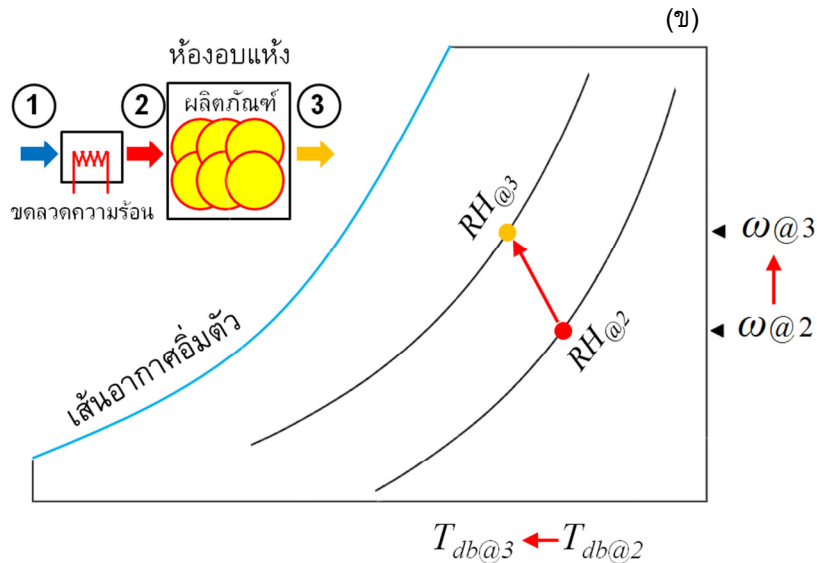
64 การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ

รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้นระหว่างการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่ (Non-isothermal Drying) ของผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง เมื่อเริ่มต้นกระบวนการอบแห้ง (จากจุด 1 ไปจุด 2 ดังรูปที่ 2.12ก) การเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้นมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่ดังที่กล่าวมาแล้ว จากนั้นอากาศร้อนได้ไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง อากาศร้อนจะถ่ายโอนความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์โดยที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการอบแห้ง นอกจากนี้ระหว่างการอบแห้งมวลของไอน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์มีปริมาณมากเมื่อเปรียบเทียบกับมวลของอากาศชื้น ด้วยปัจจัยดังที่กล่าวมา ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศขาออกและเอนทัลปีมีค่าลดลง ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและอัตราส่วนความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.12ข จากจุด 2 ไปจุด 3

สำหรับการพิจารณาการอบแห้งว่าเป็นแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่หรือเป็นแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่นั้น สามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ในหัวข้อที่ 3.3



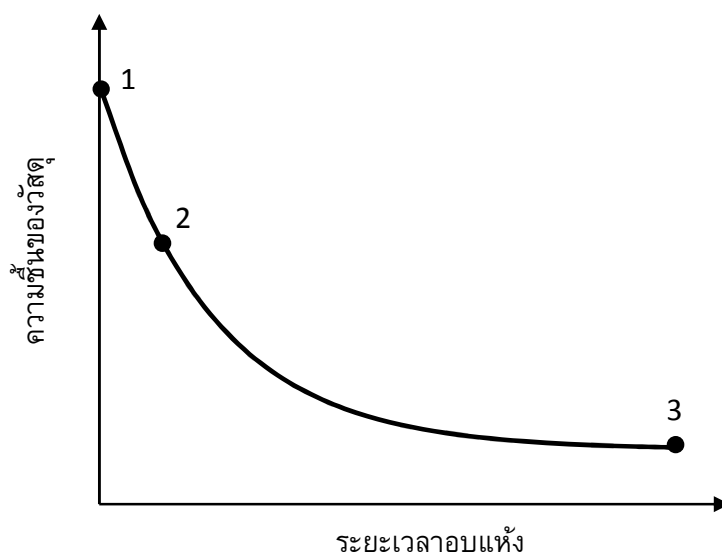
รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้น (ก) เมื่อผ่านขดลวดความร้อนและ (ข) ผ่านห้องอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่



รูปที่ 2.12 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้น (ก) เมื่อผ่านขดลวดความร้อนและ (ข) ผ่านห้องอบแห้งแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่

2.4.2 กลไกการการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ

การอบแห้งหรือกระบวนการลดความชื้น เป็นการระเหยความชื้นออกจากวัสดุที่ต้องการให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง ทั้งนี้ยกเว้นกรณีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Drying) เนื่องจากเป็นการระเหยของของแข็ง (น้ำแข็ง) ไปเป็นไอโดยตรง เมื่อกระบวนการอบแห้งเริ่มต้นในช่วงแรกของกระบวนการวัสดุยังคงมีความชื้นสูง ที่ผิวของวัสดุนั้นมีน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลา ช่วงของการอบแห้งนี้ความชื้นของวัสดุจะลดลงอย่างรวดเร็วด้วยอัตราการอบแห้งคงที่ (จุดที่ 1 ไป 2) ดังในรูปที่ 2.13 อุณหภูมิของวัสดุในช่วงนี้มีค่าคงที่อยู่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง ต่อมาเมื่อความชื้นที่ผิวของวัสดุไม่มีน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลา การลดลงของความชื้นจะมีการเปลี่ยนแปลงจากอัตราการอบแห้งคงที่เป็นอัตราการอบแห้งลดลง ค่าความชื้นของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้ง (จุดที่ 2) ดังกล่าวเรียกว่า ค่าความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content) การลดลงของความชื้นจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งความชื้นของวัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลง (จุดที่ 3) ค่าความชื้นดังกล่าวเรียกว่า ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content)



รูปที่ 2.13 จลนพลศาสตร์การอบแห้งของวัสดุชนิดหนึ่ง

ค่าความชื้นวิกฤติ มีความสำคัญต่อการปรับสภาวะการอบแห้งให้มีความเหมาะสมกับวัสดุ ซึ่งเกี่ยวพันถึงการลดระยะเวลาในการอบแห้งและการประหยัดพลังงาน ทั้งนี้ในการปรับสภาวะการอบแห้งต้องพิจารณาถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังการอบแห้งเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามในการอบแห้งเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ ส่วนใหญ่พบเพียงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ดังนั้นการอบแห้งจึงมักดำเนินการภายใต้สภาวะคงตัว

สำหรับค่าความชื้นสมดุลคือ ค่าความชื้นของวัสดุที่สภาวะสมดุลเมื่อทำการอบแห้งในสภาวะคงตัว ความชื้นของวัสดุจะลดลงจนถึงค่าหนึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ที่สภาวะดังกล่าวจะไม่มี ความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำที่บริเวณผิวของวัสดุกับอากาศโดยรอบ ค่าความชื้นสมดุลนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ การหาค่าความชื้นสมดุลส่วนใหญ่ได้มาจากการทดลอง โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธีได้แก่ วิธีเชิงสถิติคือ การปล่อยให้วัสดุนั้นสัมผัสกับอากาศแวดล้อมที่สภาวะคงที่ในระบบปิดจนความชื้นเกิดความสมดุล และอีกหนึ่งวิธีคือ วิธีเชิงจลน์ โดยความแตกต่างของวิธีที่สองเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแรกคือ จะมีอากาศที่สภาวะควบคุมไหลผ่านวัสดุที่ทดสอบจนความชื้นเกิดความสมดุล (สั๊กมัน, 2555; สมชาติ, 2540) ภายหลังจากการทดลอง ข้อมูลความเข้มข้นของน้ำของวัสดุที่สภาวะสมดุลจะถูกวิเคราะห์ เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ในรูปของความชื้นกับอุณหภูมิอากาศหรือตัวกลางอบแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ ดังสมการที่ (2.87) เป็นตัวอย่างสมการการหาค่าความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก (Lague และ Jenkins, 1991)

ค่าความชื้นสมมูลนี้หากสภาวะที่ใช้ในการอบแห้งมีอุณหภูมิสูง จะส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งนั้นมีค่าน้อยมาก ความชื้นสมมูลที่คำนวณได้จึงมีค่าน้อยมากตามไปด้วย ทำให้การจำลองการอบแห้งสามารถใช้สมมติฐานให้ความชื้นสมมูลนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ (Uengkimbuan และคณะ, 2006)

$$M_e = \left(\frac{1}{100} \right) \times \left[\frac{\log(1 - RH)}{(-3.2184e^{-6}) \times (T_d + 198.1434)} \right]^{(1/2.660)} \quad (2.87)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมมูล (kg/kg dry basis)

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ช่วงขอบเขต 0.1 ถึง 0.9) และ

T_d คือ อุณหภูมิของอากาศ (ช่วงขอบเขต 280 ถึง 310 K)

เมื่อพิจารณาถึงกลไกการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายเทมวลของวัสดุระหว่างกระบวนการอบแห้ง การถ่ายโอนความร้อนอาจเกิดขึ้นได้โดยการนำ การพา และการแผ่รังสีจากแหล่งให้ความร้อน ความร้อนจะถ่ายโอนมาอยู่ที่ผิวของวัสดุและถ่ายโอนต่อมายังภายในวัสดุโดยการนำและการแผ่รังสี เพื่อใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ซึ่งโดยทั่วไปผ่านกลไกการแพร่ของของเหลว (Liquid Diffusion) และการแพร่ของไอ (Vapor Diffusion) ไปยังแหล่งรับความชื้น กลไกที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากผลต่างของความดันอุทกสถิต (Hydrostatic Pressure) กรณีที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam) เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน

สำหรับเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่ในปัจจุบัน ยังคงเป็นเครื่องอบแห้งแบบการพาความร้อน โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง จากรูปที่ 2.14 แสดงกลไกการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายเทมวลของวัสดุระหว่างการอบแห้ง เมื่ออากาศร้อนไหลผ่านผิวของวัสดุ ที่บริเวณดังกล่าวจะมีชั้นขอบเขตอยู่โดยรอบผิวของวัสดุนั้น ความหนาของชั้นขอบเขตนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วลมของอากาศ อุณหภูมิของชั้นขอบเขตจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศร้อน การถ่ายโอนความร้อนโดยการพาเกิดขึ้นผ่านชั้นขอบเขตสู่ผิวของวัสดุ ดังสมการที่ (2.88)

$$q = h_T A (T_\infty - T_s) \quad (2.88)$$

- เมื่อ A คือ พื้นที่ของการถ่ายโอนความร้อน (m^2)
 h_T คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 K$)
 q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
 T_s คือ อุณหภูมิผิวของวัสดุ (K) และ
 T_∞ คือ อุณหภูมิของอากาศ (K)

จากนั้นความร้อนที่ผิวของวัสดุจะถ่ายโอนต่อมายังภายในวัสดุโดยการนำความร้อน ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) ดังสมการที่ (2.89) (พิจารณาการถ่ายโอนความร้อนเพียงหนึ่งมิติในแนวแกน y)

$$q = -kA \frac{dT}{dy} \quad (2.89)$$

- เมื่อ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ($W/m K$)
 T คือ อุณหภูมิของวัสดุ (K) และ
 y คือ ระยะตามแนวแกน (m)

วัสดุจะใช้พลังงานความร้อนที่ได้รับขับเคลื่อนมวลโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุเพื่อการระเหย ซึ่งหากกำหนดสมมติฐานให้ ความชื้นภายในวัสดุเริ่มต้นมีค่าไม่แตกต่างกัน วัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุเป็นไปโดยการแพร่ในทิศทางเดียว สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเป็นค่าคงที่ และไม่มีการหดหรือขยายตัวของวัสดุ สมการอัตราการถ่ายเทมวลสามารถเขียนได้โดยใช้หลักการแพร่ด้วยกฎของฟิกซ์ (Fick's Law) ดังสมการที่ (2.90)

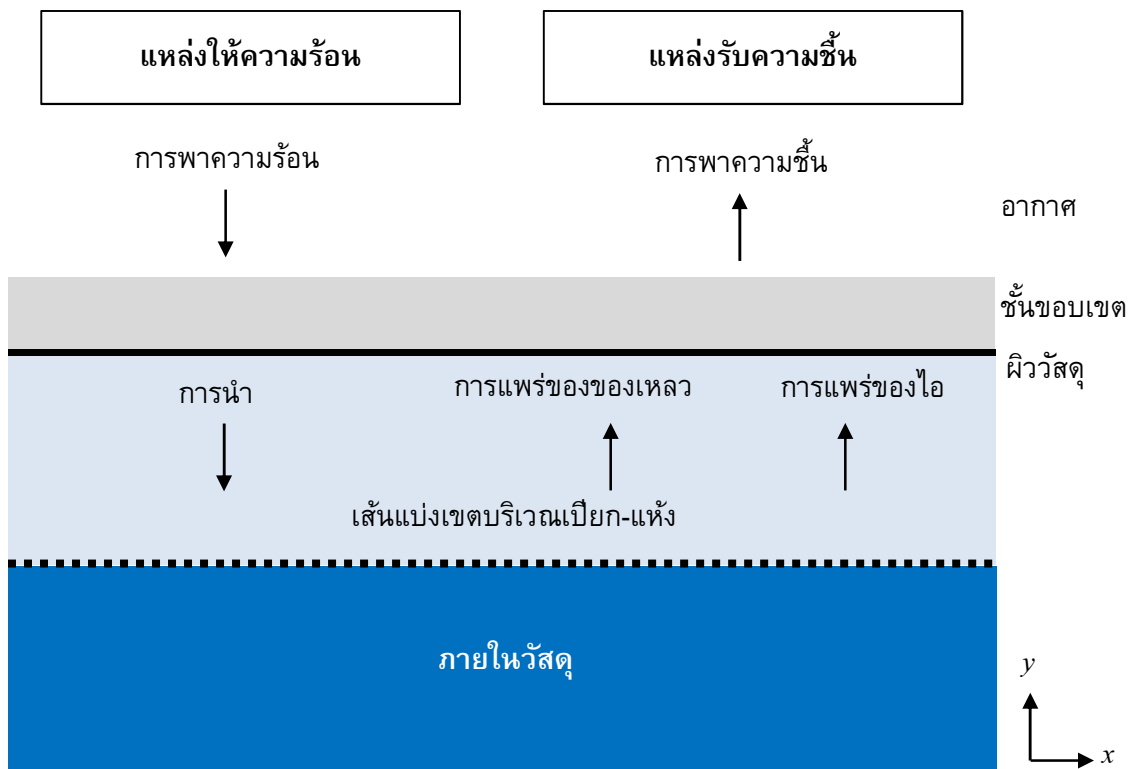
$$N = -DA \frac{dC}{dy} \quad (2.90)$$

- เมื่อ A คือ พื้นที่ของการถ่ายเทมวล (m^2)
 C คือ ความเข้มข้นของน้ำ (mol/m^3)
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s) และ
 N คือ อัตราการถ่ายเทมวล (mol/s)

เมื่อความชื้นของวัสดุเกิดการแพร่ ความชื้นภายในวัสดุที่มีค่าสูงจะแพร่ไปสู่บริเวณผิวที่มีค่าต่ำกว่า จากนั้นความชื้นที่ผิวของวัสดุจะถ่ายเทสู่ชั้นขอบเขตโดยการพาความชื้น ความสามารถในการพาความชื้นนี้ขึ้นอยู่กับค่าของสัมประสิทธิ์การพามวลและความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของน้ำที่ผิวของวัสดุกับความเข้มข้นของน้ำที่ชั้นขอบเขต โดยความเข้มข้นของน้ำที่ชั้นขอบเขตนั้นจะมีค่าเท่ากับเข้มข้นของน้ำที่สภาวะสมดุลของวัสดุ กลไกการพาความชื้นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.91)

$$N = h_M A (C_s - C_e) \quad (2.91)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของน้ำที่สภาวะสมดุล (mol/m^3)
 C_s คือ ความเข้มข้นของน้ำที่ผิวของวัสดุ (mol/m^3) และ
 h_M คือ สัมประสิทธิ์การพามวล (m/s)



รูปที่ 2.14 กลไกการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายเทมวลของวัสดุกับอากาศระหว่างการอบแห้ง

2.5 รูปแบบของแบบจำลองการอบแห้ง

ในปัจจุบันแบบจำลองการอบแห้งสำหรับการจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบหลักคือ แบบจำลองเชิงทฤษฎี แบบจำลองเอมพิริคัล และแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

แบบจำลองเชิงทฤษฎี เป็นแบบจำลองที่ใช้ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytical Solution) หาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุด้วยกฎของฟิคส์ ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์นี้มีรูปแบบที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับรูปทรงของวัสดุและสภาวะขอบเขตที่พิจารณา ตัวอย่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ในการจำลองวัสดุพิกัดฉากโดยมีสมมติฐานให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นเกิดขึ้นเฉพาะตามแนวความหนาสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.92) (สมชาติ, 2540; Crank, 1975) สำหรับที่มาของสมการผลเฉลยของแบบจำลองเชิงทฤษฎีดังกล่าวได้อธิบายเพิ่มเติมในบทที่ 4 การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

พิกัดฉาก (Rectangular Coordinate)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (2.92)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)

L คือ ความหนาของวัสดุ (m) และ

t คือ ระยะเวลาอบแห้ง (s)

แบบจำลองเอมพิริคัลเป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดความซับซ้อนในการจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงทฤษฎี การจำลองเริ่มจากการเลือกรูปแบบซึ่งเขียนอยู่ในรูปของสมการที่ได้จากการทดลองต่าง ๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.3 จากนั้นทำการปรับค่าคงที่ในสมการ เพื่อจำลองความชื้นและนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าความชื้นที่ได้จากการทดลอง โดยแบบจำลองใดให้ค่าความชื้นที่ใกล้เคียงกับค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองมากที่สุด แบบจำลองนั้นคือแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อใช้จำลองความชื้นของเมล็ดพืชหรือวัสดุชีวภาพนั้น ๆ (Phitakwinai และคณะ, 2019; Ndisya และคณะ, 2020; Roman และคณะ, 2020; Tun และคณะ, 2020)

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสมการของแบบจำลองเอมพิริคัล

แบบจำลองเอมพิริคัล	สมการ*
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Two-term	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$
Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + n \exp(-ct)$
Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
Modified Midilli	$MR = \exp(-kt^n) + bt$

* ตัวอักษร a b c g k และ n คือค่าคงที่ของสมการ

(ที่มา : ปรับปรุงจาก Phitakwinai และคณะ, 2019)

โดยที่

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (2.93)$$

เมื่อ MR คืออัตราส่วนความชื้น (-)

M_i คือความชื้นเริ่มต้น (kg/kg dry basis) และ

M_t คือความชื้นของวัสดุที่ระยะเวลาต่าง ๆ (kg/kg dry basis)

สำหรับแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เป็นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงทฤษฎีและแบบจำลองเอมพิริคัล ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุจำเป็นต้องหาผลเฉลย ออกแบบขั้นตอนการคำนวณและผ่านขั้นตอนต่าง ๆ หลากหลายขั้นตอน โดยสามารถศึกษารายละเอียดได้จากเนื้อหาในบทถัดไป

หากทำการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสีย (หรือข้อจำกัด) ของแบบจำลองการอบแห้งทั้ง 3 รูปแบบนั้นมีรายละเอียดดังนี้ ข้อดีของการใช้แบบจำลองเชิงทฤษฎีคือ มีความซับซ้อนในการ

จำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุน้อยกว่าแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข นอกจากนี้ ยังสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยในกรณีที่กระบวนการอบแห้งเป็นแบบอุณหภูมิของวัสดุคงที่ (Isothermal Drying) หรือกรณีที่กระบวนการอบแห้งเป็นแบบอุณหภูมิของวัสดุไม่คงที่ (Non-isothermal Drying) (Tirawanichakul และ Tirawanichakul, 2008; Silva และคณะ, 2013) อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของการใช้แบบจำลองเชิงทฤษฎีคือสามารถใช้จำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นได้เพียงค่าเฉลี่ยตามสมมติฐานที่กำหนด ค่าที่ได้จากผลเฉลยไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นหรืออุณหภูมิภายในวัสดุที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งอาจมีความจำเป็นต้องใช้เป็นข้อมูลในการทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ เพื่อหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดได้ สำหรับข้อดีของแบบจำลองเอมพิริคัลคือ สามารถใช้งานง่ายโดยผู้ใช้อาจไม่จำเป็นต้องเข้าใจทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งอย่างลึกซึ้ง สำหรับข้อเสียของแบบจำลองนี้คือ สามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นได้เพียงค่าเฉลี่ยทั้งวัสดุ ไม่สามารถใช้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นหรืออุณหภูมิภายในวัสดุของแต่ละตำแหน่งได้เช่นเดียวกับแบบจำลองเชิงทฤษฎี นอกจากนี้การจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นยังทำได้เพียงกรณีกระบวนการอบแห้งเป็นแบบอุณหภูมิของวัสดุคงที่เท่านั้น ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิภายในวัสดุแต่ละตำแหน่งต้องใช้แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการหาค่า ซึ่งเป็นข้อดีของแบบจำลองรูปแบบนี้ที่สามารถอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลง ทั้งในกรณีที่กระบวนการอบแห้งเป็นแบบอุณหภูมิของวัสดุคงที่หรือไม่คงที่ได้ ส่วนข้อเสียคือเป็นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงทฤษฎีและแบบจำลองเอมพิริคัล โดยการสรุปความสามารถในการดำเนินการของแบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบดังที่กล่าวมา ได้แสดงในตารางที่ 2.4

ในบทที่ 7 - 11 ผู้เขียนได้สอดแทรกตัวอย่างพร้อมโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งแบบจำลองเชิงทฤษฎี แบบจำลองเอมพิริคัลและแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ป้อนข้อมูลต่าง ๆ เป็นที่เรียบร้อยใน QR Code ให้ผู้อ่านสามารถคัดลอกและทำการจำลอง เพื่อถ่ายทอดการทำทำความเข้าใจ

ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการดำเนินการของแบบจำลองเชิงทฤษฎี แบบจำลองเอมพิริคัลและแบบจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

แบบจำลอง	Iso	Non-iso	$\bar{M}$	$\bar{T}$	$M_{profile}$	$T_{profile}$
เชิงทฤษฎี	O	O	O	O	X	X
เอมพิริคัล	O	X	O	X	X	X
ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	O	O	O	O	O	O

O หมายถึงดำเนินการได้และ X หมายถึงดำเนินการไม่ได้

Iso คือ กระบวนการอบแห้งแบบอุณหภูมิของวัสดุคงที่และ Non-iso คือ กระบวนการอบแห้งแบบอุณหภูมิของวัสดุไม่คงที่

$\bar{M}$ คือ ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุ (kg/kg dry basis) และ $\bar{T}$ คืออุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุ (K)

$M_{profile}$ คือ ความชื้นของวัสดุที่ตำแหน่งใด ๆ (kg/kg dry basis) และ $T_{profile}$ คืออุณหภูมิของวัสดุที่ตำแหน่งใด ๆ (K)

สรุปท้ายบท 2

การอบแห้งเป็นการระเหยความชื้นออกจากวัสดุที่ต้องการให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง โดยทั่วไปตัวกลางในการอบแห้งคืออากาศร้อน โดยอากาศร้อนนั้นประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำปะปนอยู่ อากาศที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งจึงมีสมบัติเป็นอากาศชื้น เมื่ออากาศได้ไหลผ่านขดลวดความร้อน สมบัติของอากาศชื้นจะมีการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิกระเปาะแห้งและค่าเอนทัลปีมีค่าสูงขึ้น ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าลดลงตามเส้นของอัตราส่วนความชื้นคงที่ จากนั้นเมื่ออากาศร้อนได้ไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง กลไกการถ่ายโอนความร้อนเป็นแบบการนำและการพาความร้อน ส่วนการถ่ายเทมวลเป็นแบบการแพร่และการพามวลระหว่างอากาศกับวัสดุในห้องอบแห้ง ผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิภายในวัสดุส่งผลให้สมบัติเชิงความร้อนและความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลง สำหรับการเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้นขาออกจากห้องอบแห้งขึ้นอยู่กับการอบแห้งนั้นเป็นแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่หรืออุณหภูมิวัสดุไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ระหว่างการอบแห้ง มีความสำคัญต่อการปรับสภาวะและกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในการจำลองการอบแห้งให้เหมาะสม สำหรับรูปแบบของแบบจำลองการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบหลักคือ แบบจำลองเชิงทฤษฎี แบบจำลองเอมพิริคัล และแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข แต่ละรูปแบบของแบบจำลองนั้นมีข้อดีและข้อเสีย (หรือข้อจำกัด) ที่แตกต่างกันไป แบบจำลองเอมพิริคัลสามารถใช้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยในกรณีที่กระบวนการอบแห้งเป็นแบบอุณหภูมิของวัสดุคงที่ แบบจำลองเชิงทฤษฎีสามารถใช้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยในกรณีที่กระบวนการอบแห้งเป็นแบบอุณหภูมิของวัสดุคงที่และไม่คงที่ ส่วนแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถใช้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นหรืออุณหภูมิภายในวัสดุแต่ละตำแหน่งและหาค่าเฉลี่ย ทั้งกรณีที่กระบวนการอบแห้งเป็นแบบอุณหภูมิของวัสดุคงที่และไม่คงที่ได้

แบบฝึกหัด

1. จงอธิบายสมดุลพลังงานตามกฎหมายของเทอร์โมไดนามิกส์ ระหว่างการอบแห้งวัสดุด้วยอากาศร้อน มาพอสังเขป
2. จงอธิบายกลไกการถ่ายโอนความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับวัสดุระหว่างการอบแห้ง มาพอสังเขป
3. จงอธิบายกลไกการถ่ายเทมวลระหว่างอากาศร้อนกับวัสดุระหว่างการอบแห้ง มาพอสังเขป
4. จงอธิบายว่าทฤษฎีกฎการเย็นตัวของนิวตันเกี่ยวข้องกับอย่างไรต่อสมการสภาวะขอบเขตของแบบจำลองการอบแห้ง
5. จงอธิบายว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การพามวล สามารถคำนวณจากสมการตัวแปรไร้มิติได้อย่างไร มาพอสังเขป
6. จงอธิบายหลักการหาค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุด้วยแคลอริมิเตอร์
7. จงอธิบายหลักการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุด้วยหลักการให้ความร้อนแบบสถานะคงตัว
8. จงอธิบายความแตกต่างของความหนาแน่นจริงและความหนาแน่นปรากฏของวัสดุที่มีความแตกต่างกันอย่างไร และความหนาแน่นใดเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการอบแห้ง
9. จากเนื้อหาในหัวข้อกลไกการเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้น จงอธิบายความสำคัญของแผนภูมิอากาศชื้นที่มีต่อการจำลองการอบแห้ง
10. จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้นระหว่างการอบแห้ง จงอธิบายความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงสมบัติดังกล่าว กรณีที่การอบแห้งเป็นแบบอุณหภูมิวัสดุคงที่เปรียบเทียบกับกรณีที่การอบแห้งเป็นแบบอุณหภูมิวัสดุไม่คงที่
11. จงอธิบายความแตกต่างของอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง พร้อมทั้งอธิบายถึงตัวแปรที่สำคัญ ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราการอบแห้งดังกล่าว
12. รูปแบบของแบบจำลองการอบแห้งสามารถแบ่งได้เป็นกี่รูปแบบ แต่ละรูปแบบมีความแตกต่างในการหาผลเฉลยและมีข้อดี ข้อเสียอย่างไร

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

A	พื้นที่ของการถ่ายโอนความร้อนหรือการถ่ายเทมวล (m^2)
A_s	พื้นที่ผิวของวัสดุ (m^2)
A_i	ค่าคงที่ของเลขไบโอท (-)
Bi	เลขไบโอท (-)
b	ค่าคงที่ของเวลา (s^{-1})
C	ความเข้มข้นเชิงมวลต่อปริมาตรหรือความเข้มข้นของน้ำ (mol/m^3)
C_e	ความเข้มข้นเชิงมวลต่อปริมาตรที่ชั้นขอบเขต (kg/m^3) หรือความเข้มข้นของน้ำที่สภาวะสมดุล (mol/m^3)
C_s	ความเข้มข้นเชิงมวลต่อปริมาตรที่ผิวของวัสดุ (kg/m^3) หรือความเข้มข้นของน้ำที่ผิวของวัสดุ (mol/m^3)
c	ค่าความร้อนจำเพาะ ($J/kg\ K$)
c_p	ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ ($J/kg\ K$)
$c_{p,a}$	ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล ($J/kg\ K$)
$c_{p,c}$	ค่าความร้อนจำเพาะของแคลอริมิเตอร์ ($J/kg\ K$)
$c_{p,p}$	ค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ ($J/kg\ K$)
$c_{p,w}$	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ($J/kg\ K$)
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)
D_{eff}	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)
D_a	ค่าการแพร่ไอน้ำในอากาศ (m^2/s)
E	พลังงานภายในองค์ประกอบปริมาตร (J)
$\Delta E_{element}$	การเปลี่ยนแปลงพลังงานขององค์ประกอบปริมาตร (J)
$\dot{E}_{gen, element}$	อัตราการผลิตความร้อนภายในองค์ประกอบปริมาตร (J/s)
$\dot{e}_{gen}$	อัตราการผลิตความร้อนต่อองค์ประกอบปริมาตร ($J/s\ m^3$)
Gu	Gukhman number (-)
h_M	สัมประสิทธิ์การพามวล (m/s)
h_T	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2\ K$)

k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (W/m K)
J	ฟลักซ์เชิงมวล (mass flux, kg/s m ²)
J_{conv}	ฟลักซ์เชิงมวลจากการพา (kg/s m ²)
J_{diff}	ฟลักซ์เชิงมวลจากการแพร่ (kg/s m ²)
J_0	ฟังก์ชันเบสเซลอันดับศูนย์ (-)
k_a	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล (W/m K)
L	ความหนาของวัสดุ (m)
L_c	ความยาวลักษณะเฉพาะ (m)
M	สัดส่วนมวล (-) หรือความชื้นที่ตำแหน่งใด ๆ (kg/kg dry basis)
m	มวลขององค์ประกอบปริมาตรหรือมวลของวัสดุ (kg)
m_c	มวลของแคลอริมิเตอร์ (kg)
m_p	มวลของผลิตภัณฑ์ (kg)
m_w	มวลของน้ำ (kg)
MR	อัตราส่วนความชื้น (-)
M_e	ความชื้นสมดุล (kg/kg dry basis)
M_i	ความชื้นเริ่มต้น (kg/kg dry basis)
M_t	ความชื้นของวัสดุที่ระยะเวลาต่าง ๆ (kg/kg dry basis)
N	อัตราการถ่ายเทมวล (mol/s)
Nu	เลขนัสเซิลต์ (Nusselt number) (-)
Pr	เลขพรันด์เทิล (Prandtl number) (-)
$\dot{Q}_r$	อัตราการนำความร้อนตามแนวแกน r (J/s)
$\dot{Q}_x$	อัตราการนำความร้อนตามแนวแกน x (J/s)
$\dot{Q}_y$	อัตราการนำความร้อนตามแนวแกน y (J/s)
$\dot{Q}_z$	อัตราการนำความร้อนตามแนวแกน z (J/s)
$\dot{Q}_\phi$	อัตราการนำความร้อนตามแนวแกน ϕ (J/s)
$\dot{Q}_\theta$	อัตราการนำความร้อนตามแนวแกน θ (J/s)
$\dot{q}_{cond}$	ฟลักซ์ความร้อนจากการนำความร้อน (W/m ²)
$\dot{q}_{conv}$	ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อน (W/m ²)
q	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

$\dot{q}$	ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2)
R	รัศมีของวัสดุ (m)
$\dot{R}$	อัตราของปฏิกิริยาเคมี (s^{-1})
$\dot{R}_m$	อัตราของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมี (kg/s)
$\dot{R}_v$	อัตราของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีต่อปริมาตร (kg/s m^3)
Re	เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number) (-)
RH	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%)
r	ระยะตามแนวแกน (m)
Sc	เลขชมิตต์ (Schmidt number) (-)
Sh	เลขเชอร์วูด (Sherwood number) (-)
St	เลขสแตนตัน (Stanton number) (-)
T	อุณหภูมิขององค์ประกอบปริมาตรหรืออุณหภูมิของวัสดุ (K)
T_a	อุณหภูมิอากาศร้อน (K)
T_d	อุณหภูมิของอากาศ (K)
T_i	อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุ (K)
$T_{c,i}$	อุณหภูมิเริ่มต้นของแคลอริมิเตอร์ (K)
$T_{p,i}$	อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (K)
T_s	อุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุ (K)
$T_{w,i}$	อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ (K)
T_∞	อุณหภูมิของอากาศ (K)
Th	ความหนาของผลิตภัณฑ์ (m)
t	ระยะเวลาอบแห้ง (s)
V	ปริมาตรของวัสดุ (m^3)
$V_{element}$	องค์ประกอบปริมาตร (m^3)
v	ความเร็วของของไหล (m/s)
v_a	ความเร็วของอากาศ (m/s)
v_x	ความเร็วของของไหลตามแนวแกน x (m/s)
v_y	ความเร็วของของไหลตามแนวแกน y (m/s)
v_z	ความเร็วของของไหลตามแนวแกน z (m/s)

x	ระยะตามแนวแกน (m)
y	ระยะตามแนวแกน (m)
z	ระยะตามแนวแกน (m)
τ	เลขฟูเรียร์ (Fourier number)
ρ	ความหนาแน่นขององค์ประกอบปริมาตรหรือความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)
ρ_a	ความหนาแน่นของของไหลหรือความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
ρ_b	ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)
ρ_t	ความหนาแน่นจริง (kg/m^3)
μ_a	ค่าความหนืดของของไหลหรือค่าความหนืดของอากาศ (kg/m s)
ε	สัดส่วนช่องว่างอากาศ (-)
α	ค่าการแพร่ความร้อน (m^2/s)
λ_1	ค่าคงที่ของเลขไบโอท (-)
β	รากของฟังก์ชันเบสเซล

การจำลองการอบแห้ง

สำหรับ

เมล็ดพืช และวัสดุชีวภาพ

Drying Modelling for Grains and Biomaterials

หนังสือเล่มนี้ผู้เขียนได้รวบรวมเนื้อหาจากหนังสือและวารสารวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศ รวมถึงประสบการณ์จากการทำงานวิจัย เรียบเรียงลำดับของทฤษฎี ตัวอย่าง ขั้นตอนการคำนวณ การประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และรายละเอียดการประยุกต์ใช้การจำลองการอบแห้งในกรณีศึกษา สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลอง ผู้เขียนได้เลือกใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถประยุกต์ใช้ได้มีประสิทธิภาพ ภายในหนังสือยังได้สอดแทรกตัวอย่างและโปรแกรมที่ป้อนข้อมูลต่าง ๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้วใน QR Code โดยสามารถคัดลอกและทำการจำลองได้ทันที เพื่อให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจได้อย่างรวดเร็ว

ISBN 978-616-61-2594-8



9 786166 125948
99 บาท