



รายงานผลการวิจัย

เงินทุนอุดหนุนเพื่อพัฒนาและพัฒนาระบบการศึกษาทางวิชาการ
คณะกรรมการปฏิบัติการกิจการวิจัยเกี่ยวกับพลังงาน

4
๒๕๖๑

การประหยัดพลังงานในการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตร
โดยเครื่องอบแห้งแบบไหลย่น

สถาบันวิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

โดย

วิวัฒน์ ตันชะทานิชกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงินอุดหนุน เพื่อ ฟื้นฟูและพัฒนาระสิทธิภาพทางวิชาการ



รายงานผลการวิจัย

การประหยัดพลังงานในการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรโดยเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน

วิวัฒน์ ตัดทะพานิชกุล

มิถุนายน 2528

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยพลังงานของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2527 อนึ่ง โครงการนี้จะสำเร็จลุล่วงด้วยดีไม่ได้ ถ้าไม่ได้รับกำลังแรง และกำลังสมองจาก นายกมลรัตน์ พันธุ์อารยะ ผู้ช่วยวิจัยประจำโครงการนี้ ผู้วิจัยขอแสดงความขอบพระคุณต่อความช่วยเหลือเหล่านี้ไว้ ณ ที่นี้



สถาบันวิทย์บริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการ การประหยัดพลังงานในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ เกษตรโดย เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน
 ชื่อผู้วิจัย รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ คัดทะพานิชกุล
 เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ มิถุนายน 2528



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งชิ้นมันสำปะหลัง (ขนาด 3 มม. x 5 มม. x 5 มม.) ทั้งชิ้นบาง (5 ซม.) และชิ้นหนา (40 ซม.) ในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านเพื่อดูอิทธิพลที่ความเร็วลมและอุณหภูมิลมร้อนมีต่อ เส้นลักษณะ เฉพาะของการอบแห้งและพัดหนา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการคำนวณการกระจายความชื้นของชิ้นวัสดุและเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้ง จากการทดลองอบแห้งชิ้นมันสำปะหลัง 3 กรณีคือ กรณีอบแห้งแบบปกติ (ไม่มีการผสมวัสดุหรือสลับทิศทางลมร้อน เป็นครั้งคราว) กรณีผสมวัสดุ เป็นครั้งคราวและกรณีสลับทิศทางลมร้อน เป็นครั้งคราว ได้พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนาย เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งได้ใกล้เคียงกับ ผลการทดลองโดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 5.3 % , 3.2 % และ 7.7 % สำหรับการอบแห้งแบบปกติ แบบผสมวัสดุ เป็นครั้งคราว (ทุกๆ 150 นาที) และแบบสลับทิศทางลมร้อน เป็นครั้งคราว (ทุกๆ 30 นาที) ตามลำดับ

เมื่อ เปรียบเทียบ เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งพบว่า การอบแห้งโดยผสมวัสดุ เป็นครั้งคราว จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าหรือ เท่ากับการอบแห้งแบบปกติ เสมอ (น้อยกว่าถึง 14.8 %) ส่วนการอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อน เป็นครั้งคราวแทบ ไม่มีผลต่อการประหยัด เวลาในการอบแห้ง และในบาง เงื่อนไขอาจเสีย เวลา มากกว่าการอบแห้งแบบปกติ

ในกรณีการอบแห้งโดยผสมวัสดุ เป็นครั้งคราว ช่วงห่างของเวลา θ_m (ช่วงเวลาก่อนการผสมวัสดุแต่ละครั้ง) ที่เหมาะสมที่สุดในการลด เวลาอบแห้งก็คือค่า θ_m ที่สามารถหารเวลา θ_f (เวลาที่ต้องใช้ เพื่อให้ความชื้นเฉลี่ยสุดท้ายของชิ้นวัสดุ เท่ากับค่าที่ต้องการ) ของกรณีการอบแห้งแบบปกติได้ลงตัวหรือ เกือบลงตัวที่สุด

Project Title ENERGY CONSERVATION IN THE DRYING OF AGRICULTURAL
PRODUCTS IN A THROUGH-FLOW DRYER

Name of the Investigator Associate Professor Wiwut Tanthapanichakoon Ph.D.

Year 1985



ABSTRACT

The present work investigated the drying of both thin (5 cm) and thick (40 cm) of tapioca chips (average size 3 mm x 5 mm x 5 mm) in a through-flow dryer to understand the effects of hot air velocity and temperature on the drying characteristic curve and developed a mathematical model to calculate the profile of moisture content in the bed and the required drying time. From the experiments, on 3 cases of tapioca drying, i.e. the case of normal drying (No periodic mixing of material or alternating the hot air current), the case of mixing the material periodically and the case of alternating the hot air current periodically, it was found that the mathematical model was able to predict required drying times that were close to the experimental results with maximum error of 5.3%, 3.2% and 7.7% for the case of normal drying, of mixing the material periodically (every 150 minutes) and of alternating the hot air current periodically (every 30 minutes), respectively.

When the required drying times were compared, it was found that periodic mixing invariably took less (up to 14.8% less) than or equal to the case of normal drying. On the other hand, the case of drying with periodic alternating of the hot air current hardly had

any effect on the drying time and in some instances might take longer than the case of normal drying.

In case of drying with periodic mixing, the optimal time interval θ_m (between mixing operation) that minimized the drying time was such a value of θ_m that could exactly or almost exactly divide $\bar{\theta}_f$ (the drying time required to reduce the average moisture content down to a desired value) of the case of normal drying.



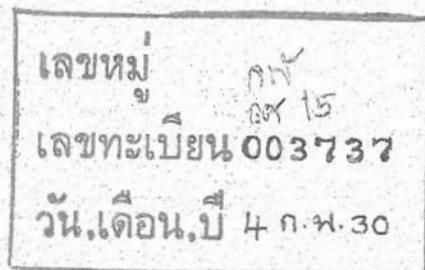
สารบัญ

หน้า

กิจกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อภาษาไทย	iii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iv
สารบัญ	vi
รายการตารางประกอบ	ix
รายการภาพประกอบ	xii
รายการสัญลักษณ์	xv
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
2. สรุปผลการวิจัยในอดีต	
2.1 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งวัสดุ เกษตรใน เครื่องอบแห้ง แบบไหลผ่าน	5
2.2 การออกแบบและแบบจำลองของการอบแห้งใน เครื่องอบแห้ง แบบไหลผ่าน	6
2.3 การประหยัคพลังงานในการอบแห้ง	7
3. ทฤษฎีการอบแห้งแบบไหลผ่าน	
3.1 ความรู้พื้นฐานของการอบแห้ง	11
3.2 กลไกของการอบแห้ง	13
3.3 การแบ่งประเภทและการเลือก เครื่องอบแห้ง ในอุตสาหกรรม...	17

3.4	การอบแห้งแบบไหลผ่าน	27
4.	แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน	
4.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณการกระจายความ ขึ้นในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน	33
4.2	การคำนวณการกระจายความขึ้นในชั้นวัสดุอบแห้งแบบไหลผ่าน.	35
4.3	สมมุติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง	48
5.	วิธีการทดลองและผลการทดลอง	
5.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	49
5.2	ขั้นตอนและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง	51
5.3	ผลการทดลองอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง	54
6.	การวิจารณ์ผลที่ได้จากการทดลอง	
6.1	ผลการอบแห้งมันสำปะหลังชั้นบาง (หนา 5 ซม.)	68
6.2	ผลการอบแห้งมันสำปะหลังชั้นหนา (หนา 40 ซม.)	70
7.	การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง	
7.1	การคำนวณการกระจายความขึ้นในชั้นวัสดุใน เครื่องอบแห้ง แบบไหลผ่าน	71
7.2	การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง	82
8.	การประยุกต์ใช้แบบจำลองในงานวิศวกรรมอบแห้ง	
8.1	การประยุกต์ผลงานในการอบแห้งแบบงวด (Batch) โดยการ ผสมวัสดุเป็นครั้งคราว	86
8.2	การประยุกต์ผลงานในการอบแห้งแบบงวด (Batch) โดยการ สลับทิศทางของลมร้อน	95
8.3	การยืนยันผลการประหยัด เวลาที่ทำนายโดยแบบจำลอง ข้างต้น	98

8.4 ช่วงห่างของเวลา θ_m ที่เหมาะสมที่สุดในกรณีการอบแห้งโดย ผสมวัสดุ เป็นครั้งคราว	99
8.5 ตัวอย่างการคำนวณพื้นที่ของ เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านและการ ประเมินพลังงานที่ประหยัดได้ เมื่อ เปลี่ยนไปทำการอบแห้งแบบ ผสมวัสดุ เป็นครั้งคราว	100
9. บทสรุป	
9.1 ข้อสรุปหลัก	104
9.5 งานวิจัยที่ควรทำต่อไปในอนาคต	105
บรรณานุกรม	106
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก-1	110
ภาคผนวก ก-2	124
ภาคผนวก ข	137
ภาคผนวก ค-1	138
ภาคผนวก ค-2	139
ภาคผนวก ง	140



รายการตารางประกอบ

(List of Tables)

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณและมูลค่าของผลิตภัณฑ์เกษตรที่สำคัญของประเทศไทย 1982/1983	1
2	ปริมาณและมูลค่าการส่งออกสินค้าประมงของประเทศไทย	2
3.1	การเลือกเครื่องอบแห้ง	21-24
3.2	การจำแนกประเภทของเครื่องอบแห้ง	25-26
7.1	เงื่อนไขที่ใช้ในการอบแห้งกับลักษณะสมบัติของชั้นมันสำปะหลัง	71
7.2	ค่า c_c ที่ทำได้และการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่า c_c ดังกล่าวกับผลการทดลอง	74
7.3	การเปรียบเทียบเวลา (θ'_F) ที่ต้องใช้อบแห้งระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลองสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. เพื่อให้วัสดุที่ด้านทางออกของลมร้อนมีความชื้นเท่ากับความชื้นที่ต้องการ (กรณีการอบแห้งแบบปกติ)	81
7.4	การเปรียบเทียบเวลา (θ'_F) ที่ต้องใช้อบแห้งระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลองสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. เพื่อให้วัสดุที่ด้านทางออกของลมร้อนมีความชื้นเท่ากับความชื้นที่ต้องการ (กรณีผสมวัสดุทุกๆ 150 นาที)	81
7.5	การเปรียบเทียบเวลา (θ'_F) ที่ต้องใช้การอบแห้งระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลองสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. เพื่อให้ความชื้นสูงสุดในชั้นวัสดุเหลือค่าเท่ากับความชื้นที่ต้องการ (กรณีสลับทิศทางลมร้อนทุกๆ 30 นาที)	82
8.1	ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก. วัสดุแห้งจนเหลือความชื้น 0.336 กก.น้ำ/กก. วัสดุแห้งสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุ เป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที)	87

ตารางที่

หน้า

- 8.2 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.252 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที) 88
- 8.3 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.168 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที) 89
- 8.4 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.084 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที) 90
- 8.5 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.336 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที แต่เสียเวลาในการผสมวัสดุครั้งละ $\theta_x = 10$ นาที) 91
- 8.6 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุ จากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.252 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที แต่เสียเวลาในการผสมวัสดุครั้งละ $\theta_x = 10$ นาที) 92
- 8.7 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.168 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที แต่เสียเวลาในการผสมวัสดุครั้งละ $\theta_x = 10$ นาที) 93

ตารางที่		หน้า
8.8	ผลการเปรียบเทียบ เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.084 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุ เป็นครั้งคราวทุกๆ θ_m นาที แต่เสียเวลาในการผสมวัสดุครั้งละ $\theta_x = 10$ นาที)	94
8.9	ผลการเปรียบเทียบ เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.336 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อนทุกๆ θ'_m นาที)	96
8.10	ผลการเปรียบเทียบ เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.252 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อนทุกๆ θ'_m นาที)	96
8.11	ผลการเปรียบเทียบ เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.168 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อนทุกๆ θ'_m นาที)	97
8.12	ผลการเปรียบเทียบ เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.084 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อนทุกๆ θ'_m นาที)	97

รายการภาพประกอบ
(List of Figures)

ภาพที่		หน้า
3.1	ตัวอย่างทั่วไปของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งวัสดุภายในกระแสลมร้อน ปริมาณมากที่มีอุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วลมคงที่	11
3.2	เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งที่ได้มาจากรูปที่ 3.1	12
3.3	ผลของคาปิลลารี (Capillary effect)	15
3.4	การกระจายความชื้นภายในเนื้อวัสดุพูนในช่วงแรกของการอบแห้งที่ความเร็วลดลง	15
3.5	การกระจายความชื้นในเนื้อวัสดุพูนในช่วงที่สองของการอบแห้งที่ความเร็วลดลง	16
3.6	การกระจายความชื้นภายในเนื้อวัสดุพูนในช่วงใกล้สิ้นสุดการอบแห้ง	16
3.7	การอบแห้งแบบไหลผ่าน	27
3.8	เครื่องอบแห้งรูปกล่องแบบไหลผ่าน	27
3.9	การจำแนกประเภทตามจำนวนชั้นของแบนด์	28
3.10	การจำแนกประเภทตามทิศทางการไหลผ่าน	28
3.11	การจำแนกประเภทตามการปล่อยอากาศทิ้ง	29
3.12	ชนิดของ seals ด้านข้างของแบนด์	29
3.13	รูปของเครื่องอบแห้งคือเนื่องแบบไหลผ่านชนิดวางตั้ง	30
3.14	รูปของเครื่องอบแห้งคือเนื่องแบบปล่อยอากาศออกทางด้านบน	30
3.15	รูปของเครื่องอบแห้งคือเนื่องแบบลมร้อนเข้าออกผนังด้านข้าง	31
3.16	เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดหมุนและเป่าลมเข้าส่วด้านปลาย	31
3.17	เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดหมุนและเป่าลมเข้าส่วด้านข้าง	32
4.1ก.	การไหลของอากาศร้อนอุณหภูมิ t_i , ความชื้น H_i ออกจากชั้นวัสดุ ความสูง L โดยมีอุณหภูมิ t_L , ความชื้น H_L	33
4.1ข.	เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งเม็ดวัสดุเดี่ยวภายในเงื่อนไขการอบแห้งคงที่	33

ภาพที่	หน้า
4.2	37
ช่วงการอบแห้งภายในชั้นวัสดุโดยที่ระยะ 0 ถึง ξ_c และ ξ_c ถึง ξ_L คือช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงและช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ตามลำดับ	
5.1	50
ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านที่ใช้ในการทดลอง	
5.2	55
การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง (หน้า 5 ชม.)	
5.3	56
การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง (หน้า 5 ชม.)	
5.4	57
การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง (หน้า 5 ชม.)	
5.5	58
การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง (หน้า 5 ชม.)	
5.6	59
การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง (หน้า 5 ชม.)	
5.7	60
การกระจายความชื้นภายในชั้นวัสดุกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหน้า 40 ชม. (กรณีปกติ)	
5.8	61
การกระจายความชื้นภายในชั้นวัสดุกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหน้า 40 ชม. (กรณีผสมวัสดุทุกๆ 150 นาที)	
5.9	62
การกระจายความชื้นภายในชั้นวัสดุกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หน้า 40 ชม. (กรณีผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที)	
5.10	63
อัตราการอบแห้งกับความชื้นในมันสำปะหลังสำหรับลมร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 50°C และ 70°C	
5.11	64
อัตราการอบแห้งกับความชื้นในมันสำปะหลังสำหรับลมร้อน 50°C และ 70°C	
5.12	65
อัตราการอบแห้งกับความชื้นในมันสำปะหลังสำหรับความเร็วลมต่างๆ	
5.13	66
อัตราการอบแห้งกับความชื้นในมันสำปะหลังสำหรับความเร็วลมต่างๆ	

ภาพที่	หน้า
5.14	เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 5 ซม. 67
7.1	การเปรียบเทียบเส้นลักษณะเฉพาะเชิงทฤษฎีกับผลการทดลองอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 5 ซม. 73
7.2	ผลการคำนวณกับผลการทดลองหาการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุกับเวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีปกติ) 76
7.3	ผลการคำนวณกับผลการทดลองหาการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุกับเวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีผสมวัสดุทุกๆ 150 นาที) 77
7.4	ผลการคำนวณกับผลการทดลองหาการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุกับเวลา (เฉพาะเวลาที่ความร้อนเข้าทางด้านล่าง) สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีสลับทิศทางการไหลของความร้อนทุกๆ 30 นาที) 78
7.5	ผลการคำนวณกับผลการทดลองหาการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุกับเวลา (เฉพาะเวลาที่ความร้อนเข้าทางด้านบน) สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีสลับทิศทางการไหลของความร้อนทุกๆ 30 นาที) 79
7.6	เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง 80
ข1	รูปกราฟความชื้นในหน่วยมวล (มาตรฐาน: ความดันรวม 760 mm Hg, อากาศแห้ง 1 kg) 137

สัญลักษณ์

c	:	ความชื้นของวัสดุ (กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง)
c_c	:	ความชื้นวิกฤตของวัสดุ (กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง)
c_e	:	ความชื้นสมดุลของวัสดุ (กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง)
D_p	:	เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ (ม.)
L	:	สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตร.ฟุต/ชม.)
$f(\phi)$:	$\frac{\text{อัตราการอบแห้งต่อน้ำหนักวัสดุแห้ง}(R)}{\text{อัตราการอบแห้งที่ความเร็วคงที่}(R_c)}$
g	:	อัตราเร่งแรงโน้มถ่วงของโลก (9.8 ม./วินาที ²)
g_c	:	ตัวคูณสำหรับแปรหน่วย (9.8 กก.ม/kgforce วินาที ²)
G	:	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศชื้น (กก./ชม.คร.ม.ภาคตัดของชิ้น)
G_o	:	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (กก.อากาศแห้ง/ชม.คร.ม.ภาคตัดของชิ้น)
H	:	ความชื้นของอากาศ (กก.น้ำ/กก.อากาศแห้ง)
H_w	:	ความชื้นของอากาศที่อุณหภูมิระเปาะเปียก (กก.น้ำ/กก.อากาศแห้ง)
ka	:	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลโดยปริมาตร (กก./ชม.ลบ.ม. ΔH)
p	:	ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)
r	:	รัศมีส่วนโค้งของทรงกลม (ม.)
R	:	อัตราการอบแห้ง (กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง.ชม.)
R_c	:	อัตราการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ (กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง.ชม.)
RH	:	ความชื้นสัมพัทธ์
T	:	อุณหภูมิลมร้อน ($^{\circ}C$)
V	:	ความเร็วลมร้อน (ม./วินาที)
V_H	:	ปริมาตรจำเพาะของอากาศ (ลบ.ม./กก.อากาศแห้ง)
W	:	ความชื้นเฉลี่ย (กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง)
x	:	ระยะทาง (ม.)
\bar{x}'	:	ความชื้นที่เวลา θ (กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง)
Z	:	ความสูง (ม.)

- ϵ : อัตราส่วนว่างของพื้นวัสดุ
 ρ_s : ความหนาแน่นของวัสดุแห้ง (กก./ลบ.ม)
 ρ_L : ความหนาแน่นของของเหลว (กก./ลบ.ม)
 ρ_v : ความหนาแน่นของแก๊ส (กก./ลบ.ม)
 μ : ความหนืด (กก./ม.วินาที)
 γ : แรงตึงผิว (ปอนด์/นิ้ว)
 θ : เวลา (ชม.)
 θ'_F : เวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ความชื้นสุดท้าย (ชม.)
 ของวัสดุที่ปลายทางออกของลมร้อน เท่ากับค่าที่ต้องการ
 $\bar{\theta}_F$: เวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ความชื้นเฉลี่ยสุดท้ายของชั้นวัสดุ (ชม.)
 เท่ากับค่าที่ต้องการ
 θ_F : เวลาที่ต้องใช้เพื่อทำให้ตำแหน่งที่มีความชื้นสูงสุดในชั้น (ชม.)
 วัสดุมีความชื้นเท่ากับค่าที่ต้องการ
 θ_m : ช่วงเวลาก่อนการผสมวัสดุแต่ละครั้ง (ชม.)
 θ'_m : ช่วงเวลาก่อนการสลับทิศทางลมร้อนแต่ละครั้ง (ชม.)
 θ_x : ช่วงเวลาที่ใช้ในการผสมวัสดุแต่ละครั้ง (ชม.)
 η : $H_w - H$ (กก.น้ำ/กก.อากาศแห้ง)

ตัวแปรไร้มิติ

$$\begin{aligned}
 \tau &= ka / (1-\epsilon)\rho_s (c_c - c_e) \\
 \xi &= kaZ/G_o \\
 \eta &= \frac{H_w - H}{W} \\
 \phi &= (c - c_e) / (c_c - c_e) \\
 \omega &= (W - c_e) / (c_c - c_e) \\
 \text{Rep} &= GD_p / \mu
 \end{aligned}$$

บทที่ 1

บทนำ



1.1 ที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศกสิกรรม ตารางที่ 1 แสดงปริมาณและมูลค่าของผลิตภัณฑ์เกษตรที่สำคัญบางชนิดที่ผลิตได้ภายในประเทศ

ตารางที่ 1 ปริมาณและมูลค่าของผลิตภัณฑ์เกษตรที่สำคัญของประเทศไทยปี 1982/1983 (เอกสารสถิติการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 1983)

ประเภทผลผลิต	ปริมาณการผลิต (1000 ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
ข้าว	16,879	47,422.3
มันสำปะหลัง	17,788	9,071.8
อ้อย	24,407	11,398.3
ข้าวโพด	3,002.3	6,034.0
ถั่วเขียว	281.3	1,659.4

ในพื้นที่ชนบท เกษตรกรจะนำผลิตภัณฑ์เกษตรมาตากแดด เพื่อลดระดับความชื้นลงก่อนนำผลิตภัณฑ์นั้นไปเก็บรักษาต่อไป เพื่อรอการจำหน่าย ผลิตภัณฑ์เกษตรที่มีระดับความชื้นต่ำจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน เนื่องจากการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (Microorganism) เช่น ราและแบคทีเรีย ซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์เกษตรจะถูกยับยั้งให้ช้าลง

มันสำปะหลัง เป็นวัสดุเกษตรชนิดหนึ่งที่สำคัญของประเทศไทย โดยมีปริมาณและมูลค่าการส่งออกไปยังต่างประเทศสูงเป็นอันดับสองรองจากข้าว ตารางที่ 2 แสดงปริมาณและมูลค่าการส่งออกมันสำปะหลังในทศวรรษ 1981 ถึง 1984

ตารางที่ 2 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกมันสำปะหลังของประเทศไทย (เอกสาร
รายงานการส่งออกวัสดุเกษตร กระทรวงพาณิชย์ 1984)

ปี	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
1981	6,609,211	17,034
1982	7,814,864	19,686
1983	5,471,821	16,038
1984 (มค-สค)	4,444,021	11,820

ในการทำมันสำปะหลัง เม็ด มันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวแล้วจะถูกนำมาหั่น เป็นชิ้นสี่เหลี่ยม มีความกว้าง ความยาว และความสูงเท่าๆ กัน ประมาณ 2-3 มม. (Thanh, 1979) กรรมวิธีการทำแห้งชิ้นมันสำปะหลังที่กลีกรไทยในชนบทมักจะทำ (Thanh, 1976) คือการนำชิ้นมันสำปะหลังไปตากแดดบนลานคอนกรีตกลางแจ้ง โดยใช้เวลาประมาณ 1-2 วัน เพื่อลดความชื้นของมันสำปะหลังจากค่าแรก เริ่มประมาณ 160% ลงเหลือประมาณ 12-15% ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมสำหรับอัด เม็ดมันสำปะหลัง มันสำปะหลังที่มีความชื้นสูงเกิน 15% จะเป็นตัวกลางที่ดีสำหรับการเจริญเติบโตของราและแบคทีเรีย ซึ่งเป็นสาเหตุให้มันสำปะหลังเน่าเสียและเสื่อมคุณภาพลง

การอบแห้งมันสำปะหลังโดยวิธีการตากแดดนั้น เป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากแต่ต้องใช้เวลานาน สถานที่กว้างขวางและยังขึ้นกับสภาพดินฟ้าอากาศด้วย จุดเด่นของการลดความชื้นวัสดุเกษตรโดยใช้อุปกรณ์อบแห้งก็คือ สามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าและการเพิ่มความสามารถในการผลิตก็ทำได้ง่าย

ในแง่ของเทคโนโลยี การอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรที่เป็นชิ้นหรือ เม็ดในปริมาณน้อยมักนิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน (Toei, 1982) ในเครื่องแบบนี้วัสดุอบแห้งจะวางอยู่บนแผ่นรูลงหรือคานายาว แล้วเป่าลมร้อนผ่านชั้นวัสดุเพื่อระเหยความชื้นออก โดยทั่วไปถ้าวางชั้นวัสดุที่มีความสูงมากขึ้นก็จะเพิ่มความสามารถในการผลิตต่อหน่วยของพื้นที่ตั้งของเครื่องอบแห้ง แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคืออัตราการแห้งตัวของวัสดุด้านทางเข้าของลมร้อนจะเร็วกว่าของวัสดุด้านทางออกของลมร้อน เพราะอุณหภูมิของลมร้อนจะค่อยๆ ลดลง และความชื้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในขณะที่ลมร้อนไหลผ่านชั้นวัสดุหนา ดังนั้นในขณะที่วัสดุด้านทางเข้าของลมร้อนแห้งตัวจนเหลือความชื้นในระดับที่ต้องการ วัสดุด้านทางออกก็ยังคงมีความชื้นสูงเกินไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นไม่

สม่ำเสมอและสูงเกินไป ถ้าทำการอบแห้งต่อไป เพื่อให้วัสดุด้านทางออกมีความชื้นเหลือตามที่
ต้องการ วัสดุด้านทาง เขาก็จะแห้ง เกินความจำเป็น และอาจมีปัญหारेื่องเสื่อมคุณภาพ เพราะ
ร้อนจัดเกินไป อีกทั้งยังทำให้สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายในการอบแห้งเพิ่มขึ้นด้วย

เนื่องจากปัจจุบันนี้แหล่งพลังงานที่สำคัญของโลก เช่น น้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติมี
ปริมาณจำกัดและค่อยๆ หมดไปจากโลกนี้ ดังนั้นการใช้พลังงานทุกรูปแบบจึงควรใช้ในแบบที่ให้
ประโยชน์สูงสุด วิธีหนึ่งของการใช้ประโยชน์ให้สูงสุดก็คือการประหยัดพลังงาน ในงานวิจัยนี้
เราจะหา เทคนิคการอบแห้งวัสดุ เกษตรใน เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ เกษตร
ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอและใช้ เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ผลก็คือ เป็นการลดพลังงานที่ต้องใช้ใน
การอบแห้งให้น้อยที่สุดนั่นเอง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ

- 1.2.1 ออกแบบอุปกรณ์อบแห้งให้สามารถทดลองหาข้อมูลการอบแห้งทั้งใน
สภาวะปกติ ในสภาวะที่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อน และในสภาวะที่มีการผสมวัสดุอบ
แห้ง เป็นระยะๆ
- 1.2.2 แสวงหาแนวทางทางทฤษฎีสำหรับกำหนดนโยบายสลับทิศทางการไหล
ของลมร้อนหรือการผสมวัสดุอย่างคร้่งคราว เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสม่ำเสมอและประหยัด
พลังงานในการอบแห้ง
- 1.2.3 ทดลองหาสมรรถนะการอบแห้งของ เครื่องอบแห้งภายใต้ นโยบายที่
กำหนดขึ้นในข้อ 1.2.2
- 1.2.4 ศึกษาความ เหมาะสมของทฤษฎีที่ เสนอขึ้น โดยการ เปรียบ เทียบผลทาง
ทฤษฎีที่ได้ในข้อ 1.2.2 กับผลการทดลองในข้อ 1.2.3

วัสดุอบแห้งที่จะศึกษาทดลองอย่างละเอียดในงานวิจัยนี้คือ ชีนมันสำปะหลัง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

- 1.3.1 ศึกษาลักษณะสมบัติการอบแห้งพื้นฐานของชิ้นบางของวัสดุ เกษตร
(ชีนมันสำปะหลัง) โดยการทดลองใน เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน

1.3.2 ทำการอบแห้งชิ้นวัสดุหนาทั้งในกรณีปกติ (ไม่มีการผสมวัสดุอย่างครึ่งคราวหรือสลับทิศทางลม) กรณีที่ผสมวัสดุอย่างครึ่งคราวและกรณีสลับทิศทางลมอย่างครึ่งคราว เพื่อประเมินผลของการประหยัด เวลาและพลังงานที่ได้รับ

1.3.3 เปรียบเทียบผลการทดลองของกรณีต่างๆ ของข้อ 1.3.2 กับผลทำนายทางทฤษฎีภายในเงื่อนไข เหมือนกันและดูความแม่นยำของทฤษฎีที่ใช้

1.3.4 ประยุกต์ใช้ข้อมูลการทดลองที่ได้จากข้อ 1.3.1 และจากทฤษฎีในข้อ 1.3.3 เพื่อกำหนดนโยบายสลับทิศทางลมร้อนหรือนโยบายผสมวัสดุอย่างครึ่งคราวที่ประหยัด เวลาและพลังงานได้มากที่สุด

1.3.5 เสนอแนวทางกว้างๆ สำหรับการประหยัดพลังงานในการอบแห้งแบบไหลผ่าน โดยการผสมวัสดุ เป็นครึ่งคราวหรือสลับทิศทางลม

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปผลการวิจัยในอดีต

ผลการวิจัยในอดีตทางการอบแห้ง แบ่งออกได้เป็นหัวข้อใหญ่ๆ ดังนี้คือ

- ก. เส้นลักษณะ เฉพาะของการอบแห้งวัสดุ เกษตรใน เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน
- ข. แบบจำลองของการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน
- ค. การประหยัดพลังงานในการอบแห้ง

2.1 เส้นลักษณะ เฉพาะของการอบแห้งวัสดุ เกษตรในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน

Marshall และ Hougen (1942) ได้ศึกษาการอบแห้งวัสดุหลายๆ ชนิดที่สภาวะ การทดลองเหมือนกันโดยใช้เครื่องอบแห้งต่อเนื่องแบบไหลผ่าน จากการทดลองพบว่าถ้าทำการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดไหลตัด (Cross-circulation drying) เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะน้อยกว่าการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านธรรมดา

Brown และ Arsdel (1951) ได้ศึกษาการอบแห้งมันฝรั่งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน และแสดงผลการทดลองในรูปของโมโนกราฟ (Monographic form)

Garden และ Mitchell (1953) ได้ศึกษาการอบแห้งสาหร่ายทะเลชนิดต่างๆ โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน

Chirife และ Cachero (1970) ได้ศึกษาเส้นลักษณะ เฉพาะของการอบแห้งของมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน ตัวแปรที่ศึกษาคือ ความสูงของชั้นวัสดุ (2-12 ซม.) ความเร็วลม (2,300-5,200 กก/ชม.ตรม.) และอุณหภูมิของลมร้อน (55-100^oซ) จากการทดลองได้ผลว่าเมื่อความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะลดลง ในกรณีของมันสำปะหลังไม่ควรใช้อุณหภูมิของลมร้อนเกิน 84^oซ เพราะจะทำให้เกิดรอยไหม้เกรียม (Scorch) ขึ้น ในแง่ความสูงของชั้นวัสดุพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักของวัสดุแห้ง/พื้นที่ของเครื่องอบแห้ง (Bone dry solid/m²) มีค่ามากขึ้น

Shanokprasith และ Bunrungsanor (1976) ได้ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน ได้ทำการทดลองหาเส้นลักษณะ เฉพาะของการอบแห้งโดยแปร เปลี่ยน เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองหลาย เงื่อนไข ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่อุณหภูมิของลมร้อน

(37-60⁰ซ) อัตราการไหลของลมร้อน (440-780 ลิตร/นาท) และความสูงของชั้น เมล็ดข้าวเปลือก (10-15 ซม.) ผลการทดลองพบว่า เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งที่ทุกๆ เงื่อนไขอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งที่ความเร็วช้าลง อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มขึ้น ความสูงในช่วง 10-15 ซม. ของชั้นเมล็ดข้าวเปลือกและอัตราการไหลของลมร้อนไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

Rusmitus (1978) ได้ศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความสูงของชั้นมัน (5-20 ซม.) ความเร็วของลมร้อน (1,000-4,000 กก./ชม.ตร.ม.) ความหนาของชั้นมัน (0.3-0.7 ซม.) และอุณหภูมิของลมร้อน (55-100⁰ซ) จากผลการทดลองพบว่า เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งอยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วช้าลงและอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิและความเร็วของลมเพิ่มขึ้น แต่เป็นส่วนกลับกับความหนาของชั้นมันและความสูงของชั้นมัน อุณหภูมิของลมร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดและไม่ควรใช้อุณหภูมิเกิน 80⁰ซ นอกจากนั้นได้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากข้อมูลที่ได้ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ กัน จาก 55-85⁰ซ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 3×10^6 ถึง 8×10^6 ตร.ซม./วินาที

Bakshi และ Singh (1980) ได้ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวโพด และกาแฟในเครื่องอบแห้งซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตร.ฟุต และมีความสูง 3 ฟุต

Tanthapanichakoon และ Loychirakul (1984) ได้ศึกษาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งของผลไม้ 4 ชนิด คือ องุ่น ละครุด พุทรา และมะยม โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านเพื่อดูอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ คือ อุณหภูมิ (55-72⁰ซ) และความเร็วลม (0.9-1.6 ม/วินาที) ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง จากการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์เกษตรที่ศึกษาทั้งหมดอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งที่ช้าลงและอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นขณะที่อุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มขึ้น ส่วนความเร็วลมจะมีอิทธิพลเล็กน้อยต่ออัตราการอบแห้งของพุทรา แต่จะมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งของละครุด องุ่น และ มะยม

2.2 การออกแบบและแบบจำลองของการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน

Chien (1971) ได้ศึกษาและทดลองอบแห้ง เมล็ดพืช เพื่อที่จะพัฒนาในการหาสมการทดลอง (Empirical equations) อย่างง่าย ๆ สำหรับทำนายความชื้นของเมล็ดพืชในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน นอกจากนั้นยังได้ศึกษาหาสมการอย่างง่ายสำหรับทำนายการกระจาย

ความชื้นของ เมล็ดพืชและตำแหน่งของแนวหน้าแห้ง (Drying front) ภายในเครื่องอบแห้ง ที่เวลาต่างๆ ของการอบแห้ง เขาได้ทำการออกแบบ เครื่องอบแห้งขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองอบแห้ง เมล็ดข้าวที่เก็บเกี่ยวใหม่ๆ โดยแปรเปลี่ยนเงื่อนไขของการอบแห้งหลายอย่าง

Roberts และ Brooker (1975) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้คำนวณการกระจายความชื้นของ เมล็ดพืชที่ชั้นความสูงต่างๆ ขณะทำการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบหมุนเวียนกลับ (Recirculation dryer)

Thongswang และคณะ (1980) ได้ออกแบบและสร้าง เครื่องอบแห้ง เมล็ดพืช คอลัมน์ที่ใช้บรรจุเมล็ดพืชมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตร.ฟุตและมีความสูง 3 ฟุต อากาศจะถูกเป่าจาก เครื่อง เป่าลมผ่าน เครื่องทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศ อุณหภูมิของอากาศร้อน จะถูกควบคุมโดย เครื่องควบคุมอัตโนมัติ

Ouhab และ Pourhiet (1984) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง เมล็ดพืช โดยพิจารณาปัจจัย 2 ประการคือ พลังงาน และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยใช้ เครื่องอบแห้งแบบไหลตัด (Cross flow) เขาได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้น สำหรับ เครื่องอบแห้งและคำนวณหาค่าตอบโดยใช้ไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (Dynamic programming) โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 5 ขั้นตอน ผลการคำนวณพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ เวลาในการอบแห้งขั้นตอนละ 30 นาที โดยใช้อุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนเท่ากับ 100, 105, 120, 120 และ 105⁰ สำหรับขั้นตอนที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

Sabbah และคณะ (1977) ได้ศึกษาวิธีการอบแห้ง เมล็ดถั่วเหลือง โดยใช้ เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน ในการอบแห้งได้ทำการสลับทิศทางของลมร้อนที่ไหลเข้าเครื่องอบแห้งในแต่ละช่วงเวลาโดยกำหนดสภาวะการทดลองไว้ที่ค่าหนึ่ง ในการทดลองได้สร้างเครื่องอบแห้งโดยที่มีระบบที่สามารถสลับทิศทางลมร้อน สามารถควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของลมร้อน

2.3 การประหยัดพลังงานในการอบแห้ง

Thompson และ James (1979) ได้ศึกษาการลดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุ เกษตรและได้เสนอ เทคนิคการประหยัดพลังงานสำหรับ เครื่องอบแห้งแบบไหลกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous flow) และแบบวงๆ (Batch) ในกรณีของผลไม้ (Fruit)

และผลไม้เปลือกแข็ง (Nut) ตามลำดับ

Hubble และ Prestion (1982) ได้ศึกษาการใช้ไมโครเวฟ ซึ่งมีความถี่ 2,450 MHz ถึง 915 MHz ในการอบแห้งวัสดุขึ้น จากการศึกษาได้พบว่า การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟมีข้อดีว่าการอบแห้งโดยใช้สุญญากาศ/ไอน้ำ หรือลมร้อนดังนี้คือ

1. ให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงกว่าและประหยัดพลังงานได้ 1 ใน 3 หรือมากกว่า
2. อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำและเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องอบแห้งสั้น เนื่องจากไมโครเวฟถ่ายเทพลังงานได้อย่างรวดเร็ว
3. ให้ผลผลิตที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟได้ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน 32.9% ขณะที่การอบแห้งแบบอื่นๆ ได้เพียง 24.8% นอกจากนี้การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟสามารถประหยัดค่าใช้จ่าย 40.50% ใน 1 ปี เมื่อเทียบกับระบบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน

Ashworth และ Hill (1980) ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบที่เรียกว่าเครื่องอบแห้งตู้เลื่อนแบบไหลผ่าน 4 ขั้นตอน โดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ก๊าซโดยตรง (Direct gas-fired four-stage through-circulation trolley) โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงอัตราการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ข้อมูลต่างๆ ทางด้านสมรรถนะของเครื่องอบแห้งและเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งของวัสดุอบแห้งได้ถูกนำมาใช้ในการหาแบบจำลองของสัมพัทธพารามิเตอร์ (Lumped parameter model) สำหรับเครื่องอบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลองทางด้านความต้องการหากกลยุทธ์ที่ดีที่สุด (Optimum Strategy) และวิธีการต่างๆ ที่ใช้ซึ่งรวมไปถึงการเปลี่ยนหัวเผาไหม้แบบบรรยากาศ (Atmospheric gas burners) เป็นหัวเผาแบบหุ้ด (Packaged burners) การปรับปรุงภาระ (Loading) ของตู้เลื่อน (Trolleys) และการนำความร้อนจากก๊าซทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์อีก จากผลการคำนวณพบว่าอัตราการผลิตและประสิทธิภาพเชิงพลังงานจะมีค่ามากขึ้นถ้าทำการปรับปรุงค่าของภาระตู้เลื่อน (Trolley loading) ให้เหมาะสมจากเทคนิคของการจำลองแบบ (Simulation) เราพบว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้

สูงสุด ๕๘๘,๐๐๐/ปี เพิ่มอัตราการผลิตได้สูงสุด 100% และลดอัตราการใช้พลังงานลงได้มากที่สุด 250%

Hochstetler (1981) ได้ศึกษาการใช้ความร้อนที่ปล่อยทิ้งออกมาจากโรงผลิตไฟฟ้าขนาด 750 กิโลวัตต์ มาใช้ในการอบแห้ง เมล็ดพืช จากการคำนวณพบว่าในการดำเนินการอบแห้ง เมล็ดพืช ซึ่งใช้พลังงาน 195,๐๐๐ บีทียู/ชม. โดยอบแห้ง 24 ชม./วัน, 25 วัน ใน 1 เดือน จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 20,250 ดอลลาร์สหรัฐต่อเดือน เมื่อเทียบกับการอบแห้งซึ่งใช้พลังงานจากก๊าซธรรมชาติ ถ้าราคาของก๊าซธรรมชาติเท่ากับ 2.50 ดอลลาร์สหรัฐต่อพลังงาน 10⁶ บีทียู และพลังงานความร้อนที่ได้มาจากโรงไฟฟ้าได้มาโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย

Svensson (1984) ได้พัฒนาเทคนิคในการอบแห้งแบบที่เรียกว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำ (Steam drying) โดยใช้เครื่องอบแห้งที่เรียกว่า เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำ (Steam dryer) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ เซลล์และท่อ และใช้ไอน้ำยิ่งยวดที่มีความดัน 2 ถึง 6 บาร์ เป็นตัวถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุที่จะนำมาอบแห้ง วัสดุที่นำมาอบแห้งจะผ่านเข้าไปในเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำทางท่อ ส่วนไอน้ำยิ่งยวดจะเข้าไปทางเซลล์ ได้มีการทดลองอบแห้งวัสดุพวกเป็นเยื่อกระดาษ และวัสดุเกษตร จากผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งเฉลี่ย โดยใช้ไอน้ำยิ่งยวดนี้มีค่าสูงกว่ากรณีของลมร้อน 2-3 เท่า เพราะสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่ามากขึ้น จึงช่วยประหยัดพลังงานในการอบแห้งและพบว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 1,188,๐๐๐ USD ต่อปี (USD = เงินตราของสวีเดน)

McGraw และคณะ (1984) ได้ศึกษาการอบ เมล็ดโกโก้ในเครื่องอบแห้งแบบชั้นวัสดุอยู่กับที่ (Fixed bed) เพื่อหาสภาวะการอบแห้งและพารามิเตอร์ของการออกแบบ เครื่องอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดในแง่การประหยัดพลังงานโดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. กรณีที่มีเครื่องอบแห้งอยู่แล้ว ได้ทำการศึกษาหาสภาวะการเดินเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม เพื่อที่จะลดการใช้พลังงานให้มีค่าน้อยที่สุด
2. กรณีที่ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งใหม่ ได้ทำการศึกษาหาพารามิเตอร์ของการออกแบบ เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการอบแห้งต่อ 1 กิโลกรัมของวัสดุแห้งให้มีค่าน้อยที่สุด

ในการศึกษาทั้ง 2 กรณี ได้ใช้ความเร็วลม 0.02 เมตร/วินาที และความหนาของชั้นวัสดุ 0.025 ถึง 4 เมตร ผลการคำนวณพบว่า ในกรณีที่มีเครื่องอบแห้งอยู่แล้วพลังงาน

ที่ต้องใช้ในการอบแห้งต่อ 1 กิโลกรัมของวัสดุแห้งจะลดลงจาก 10,156 กิโลจูล เป็น 2,321 กิโลจูล ถ้าเพิ่มปริมาณของวัสดุแห้งต่อพื้นที่หน้าตัด 1 ตร.ม. จาก 10 กิโลกรัม เป็น 45 กิโลกรัม ส่วนในกรณีที่ทำกรอกแบบเครื่องอบแห้งใหม่ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่อ 1 กิโลกรัมของวัสดุแห้งจะลดลงจาก 0.114 เทเรียสหรัฐ เป็น 0.092 เทเรียสหรัฐ ถ้าเพิ่มพื้นที่ของเครื่องอบแห้งจาก 4.4 ตร.ม. เป็น 22.7 ตร.ม.

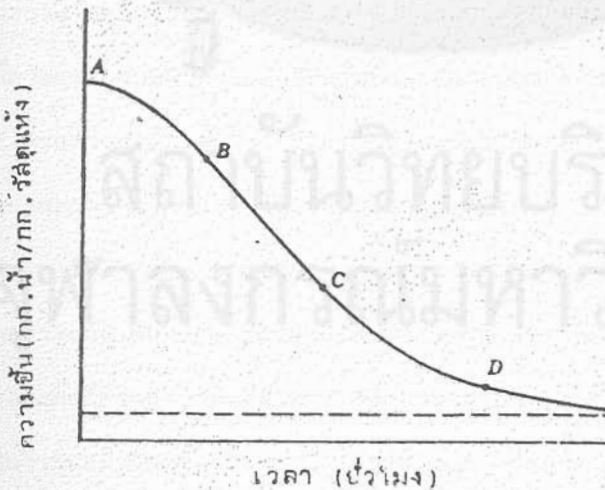


สถาบันวิทยบริการ
ศาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

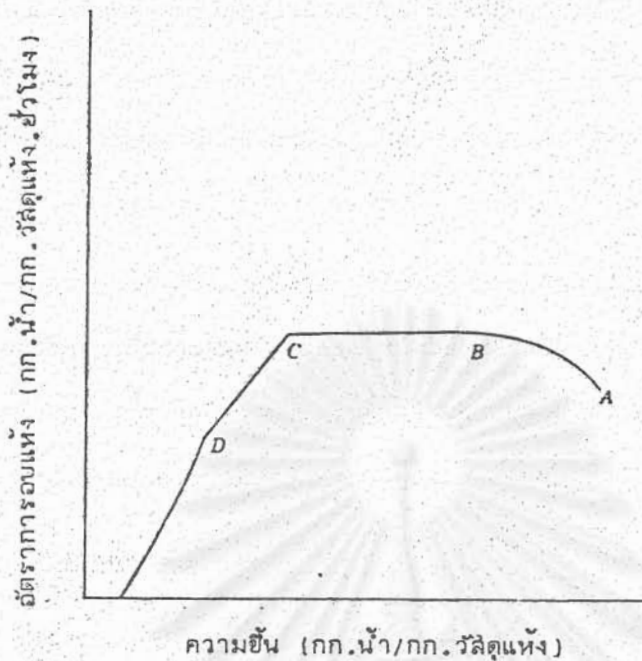
ทฤษฎีการอบแห้งแบบไหลผ่าน

3.1 ความรู้พื้นฐานของการอบแห้ง

ในการอบแห้งวัสดุขึ้นด้วยลมร้อนที่มีเงื่อนไขของอุณหภูมิและความชื้นคงที่ ในทันทีที่ลมร้อนสัมผัสกับวัสดุขึ้น อุณหภูมิของวัสดุขึ้นจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งเข้าสู่ค่าๆ หนึ่งที่สภาวะคงที่ (Steady state) อุณหภูมิของวัสดุขึ้นและอัตราการอบแห้งอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่สภาวะคงที่นี้ อุณหภูมิของวัสดุขึ้นจะมีค่า เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนและในช่วงนี้อัตราการอบแห้งของวัสดุขึ้นจะมีค่าคงที่ซึ่ง เราเรียกช่วงนี้ว่าช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ ช่วง เวลานี้จะสิ้นสุดลง เมื่อความชื้นของวัสดุมีค่า เท่ากับความชื้นวิกฤต หลังจากนั้นอุณหภูมิที่ผิวหน้าวัสดุจะเพิ่มขึ้นและอัตราการอบแห้งจะช้าลงเรื่อยๆ ช่วงเวลานี้เรียกว่าช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง อัตราการอบแห้งจะมีค่า เท่ากับศูนย์ เมื่อวัสดุมีความชื้น เท่ากับความชื้นสมดุล ซึ่งเป็นความชื้นต่ำสุดของวัสดุภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งนั้น รูปที่ 3.1 และ 3.2 แสดงเส้นกราฟของการอบแห้ง รูปที่ 3.1 เป็นกราฟของความชื้นกับเวลา และรูปที่ 3.2 เป็นกราฟของอัตราการอบแห้งกับความชื้น



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างทั่วไปของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งวัสดุภายในกระแสลมร้อน ปริมาณมากที่มีอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมคงที่



รูปที่ 3.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งที่ได้มาจากรูปที่ 3.1

ในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ช่วง AB เป็นช่วงที่วัสดุขึ้นอยู่ในสถานะที่ไม่คงที่ (Unsteady state) และกำลังปรับตัวเพื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ที่จุด B ช่วง BC เป็นช่วงของการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ ในช่วงนี้มีผิวหนังทั้งหมดของวัสดุขึ้นจะอึดด้วยน้ำ ที่ผิวหนังของวัสดุจะมีน้ำห่อหุ้ม เป็นฟิล์มอยู่โดยรอบและมีอุณหภูมิ เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะ เบี่ยงของลมร้อน น้ำที่ระเหยออกจากผิวหนังของวัสดุขึ้นจะถูกแทนที่ตลอด เวลาด้วยน้ำที่อยู่ภายในวัสดุ กลไกของการถ่ายเทน้ำจากภายในเนื้อวัสดุออกมาที่ผิวหนังของวัสดุนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของวัสดุ ในกรณีของวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นใย (fibrous) หรืออสัณฐาน (amorphous) การถ่ายเทน้ำจะเป็นไปในลักษณะการแพร่จากภายในเนื้อวัสดุออกมาที่ผิวหนัง วัสดุที่มีอัตราส่วนว่างเปิดที่ผิว (Open void space) กว้าง การถ่ายเทน้ำจะถูกควบคุมโดยแรงตึงผิวและแรงโน้มถ่วงภายในวัสดุ เนื่องจากการถ่ายเทน้ำด้วยการแพร่มีอัตราการถ่ายเทช้ามาก วัสดุที่มีการถ่ายเทน้ำโดยวิธีนี้จะมีช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่สั้นมาก หรืออาจจะไม่มีเลย ที่จุด C ผิวหนังของวัสดุเริ่มจะมีน้ำห่อหุ้มไม่สม่ำเสมอทั่วผิวหนัง ช่วง CD ในรูปที่ 3.2 เรียกว่า ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงช่วงแรก ในช่วงนี้ผิวหนังของวัสดุเริ่มมีน้ำมาห่อหุมน้อยลงๆ ทุกที เนื่องจากอัตราการถ่ายเทน้ำจากภายในเนื้อวัสดุช้ากว่าอัตราการระเหยของน้ำออกจากผิวหนังของวัสดุ จนกระทั่งถึงจุด D ทั่วทั้งผิวหนังของวัสดุจะไม่มีฟิล์มของน้ำเหลืออยู่เลย น้ำที่อยู่ภายในวัสดุจะต้องแพร่ออกมาที่ผิวหนัง

ซึ่งไม่อึดด้วยน้ำแล้วจึงแพร่ออกไปสู่กระแสลมร้อน กลไกการแพร่ของน้ำที่ผิวหน้าออกไปสู่กระแสลมร้อนจะมีอัตราการระเหยน้ำที่ต่ำกว่าที่ผิวหน้าของวัสดุอึดด้วยน้ำ ซึ่งในกรณีนี้การระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของวัสดุจะเป็นไปในลักษณะการพา (convective transfer) ออกไปสู่กระแสลมร้อน

เมื่อวัสดุมีความชื้นต่ำกว่าจุด D ในรูปที่ 3.2 การระเหยทั้งหมดจะเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ในขณะที่ความชื้นของวัสดุมีค่าลดลง ระยะทางสำหรับการนำความร้อนและการแพร่ของมวลก็จะมากขึ้นจนกระทั่งวัสดุมีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุล ซึ่งเป็นจุดซึ่งจะไม่เกิดการอบแห้งอีกต่อไป ช่วงการอบแห้งช่วงนี้เรียกช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงช่วงที่สอง

3.2 กลไกของการอบแห้ง

ในการอบแห้งวัสดุด้วยลมร้อน ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลพร้อมกัน (Simultaneous heat mass transfer) ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทเข้าไปภายในวัสดุโดยผ่านความต้านทานของฟิล์ม (Film resistance) และความต้านทานภายใน (Internal resistance) ของวัสดุตามลำดับ เมื่อความร้อนถ่ายเทเข้าไปภายในวัสดุ น้ำภายในวัสดุจะรับความร้อนและเกิดการระเหย มวลของน้ำที่ระเหยจะถ่ายเทออกสู่ภายนอกวัสดุโดยผ่านความต้านทานภายในวัสดุและความต้านทานของฟิล์มตามลำดับ

ในช่วงแรกของการอบแห้ง บริเวณผิวหน้าและเนื้อวัสดุใกล้ผิวหน้าวัสดุจะมีฟิล์มของน้ำหุ้มอยู่ ดังนั้นในช่วงการอบแห้งนี้ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ผิววัสดุจะเป็นปัจจัยควบคุมอัตราการอบแห้ง แต่ในช่วงหลังของการอบแห้ง ความชื้นที่ระเหยทั้งหมดจะมาจากส่วนลึกภายในเนื้อวัสดุ ดังนั้นอัตราการแพร่ของน้ำภายในวัสดุจะเป็นปัจจัยควบคุมอัตราการอบแห้ง

3.2.2 การเคลื่อนที่ของความชื้น - กลไกแบบการแพร่

วัสดุประเภทที่เป็นของแข็งเนื้อเดียว (Homogeneous solid) เช่น สารอินทรีย์ที่เป็นเส้นใย (Fibrous organics) สารที่มีลักษณะเป็นเจล (Gellike substances) หรือ สารที่มีลักษณะรูพรุน (Porous cakes) การเคลื่อนที่ของความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุออกมาที่ผิวหน้าส่วนใหญ่จะเป็นไปในลักษณะการแพร่เชิงโมเลกุล (Molecular diffusion) โดยที่อัตราการแพร่ของความชื้นแสดงได้โดยกฎของฟิกค์ (Fick's law)

$$\frac{dx}{d\theta} = \omega_L^* \frac{\partial^2 x}{\partial x^2}$$

3.2.3 การเคลื่อนที่ของความขึ้น - กลไกแบบคาปิลารี

ในกรณีที่วัสดุมีโครงสร้างของรูพรุนใหญ่ กลไกของการเคลื่อนที่ของความขึ้นจะไม่เป็นไปในลักษณะการแพร่ ในกรณีนี้การเคลื่อนที่ของของเหลวภายในวัสดุจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงผลักดันที่เป็นผลต่างของไฮโดรสแตติกเฮด (Hydrostatic head) กับแรงตึงผิว (Surface tension effect) แรงตึงผิวมีผลทำให้ความดันภายใต้ผิวหน้าที่โค้งของของเหลว (curved liquid surface) แตกต่างจากความดันภายใต้ผิวหน้าที่แบนราบ (Flat surface) สำหรับทรงกลมที่มีรัศมี r ผลต่างนี้สามารถแสดงได้ ดังสมการ

$$-\Delta P = \frac{2\gamma}{r}$$

รัศมี r นี้จะมีค่าเป็นบวกในกรณีของช่องที่ล้อมรอบโดยของเหลว และมีค่าเป็นลบในกรณีของหยดของเหลวในก๊าซ ถ้าเราจุ่มหลอดแก้วเล็กๆ ลงไปในของเหลว ดังแสดงในรูป 3.3 ปริมาณของของเหลว เข้านั้นไปในหลอดแก้วสามารถหาได้จากการทำสมดุลของแรงที่จุด A ผิวหน้าโค้งของของเหลวในหลอดแก้วจะมีรัศมี เท่ากับรัศมีของหลอดแก้วก็ต่อ เมื่อมุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับผิวของหลอดแก้วมีค่าเท่ากับศูนย์และของเหลว เบี่ยงผิวของหลอดแก้วอย่างทั่วถึง ในกรณีนี้สมดุลของแรงจะเป็น

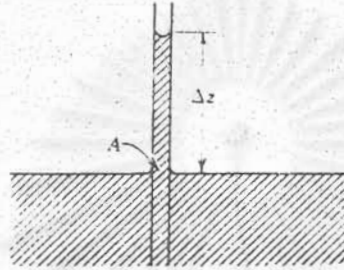
$$\Delta P = \Delta Z \frac{g}{g_c} (\rho_L - \rho_V) = \frac{2\gamma}{r}$$

$$\Delta Z = \frac{g_c 2\gamma}{rg(\rho_L - \rho_V)}$$

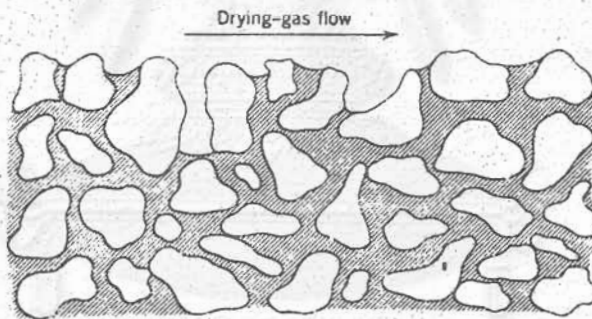
โดยที่ r เป็นรัศมีภายในของหลอดแก้ว โดยทั่วไปขนาดของรูภายในวัสดุอบแห้งจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและการเบี่ยงตัวของของเหลวที่ผิวด้านข้างของรูภายในวัสดุ อาจเบี่ยงตัวได้ไม่สมบูรณ์หรือไม่ทั่วถึง แต่กลไกของการเคลื่อนที่ของของเหลวจะเป็นไปในทำนองเดียวที่กล่าวไว้ข้างต้น

เมื่อความขึ้นของวัสดุมีค่าต่ำนั้นคือในช่วงแรกของการอบแห้งที่ความเร็วลดลง สัดส่วนของผิวหน้าที่ของเหลวสัมผัสกับลมร้อนจะลดต่ำลง ของเหลวที่อยู่ในรูที่ใหญ่กว่าจะถูกดึง

กลับเข้าไปในเนื้อวัสดุเพื่อไปป้อนให้กับของเหลวที่อยู่ในรูที่เล็กกว่าโดยการกระทำของแรงตึงผิว ขณะที่ทำการอบแห้งไปเรื่อยๆ ของเหลวในรูที่ใหญ่กว่าจะลดระดับลงเรื่อยๆ รูปที่ 3.4 แสดงการกระจายของความชื้นภายในวัสดุในช่วงแรกของการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

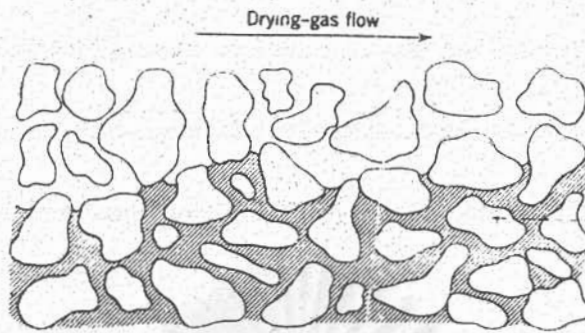


รูปที่ 3.3 ผลของคาปิลลารี (Capillary effect)



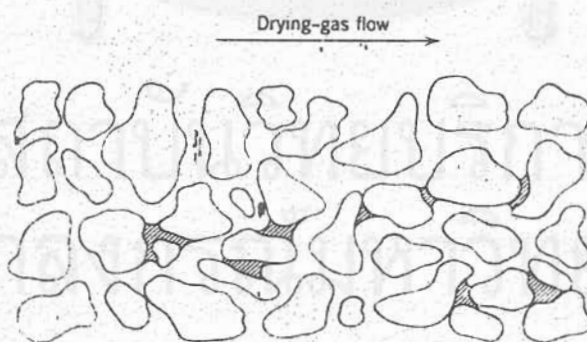
รูปที่ 3.4 การกระจายความชื้นภายในเนื้อวัสดุพูนในช่วงแรกของการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

เมื่อวัสดุมีความชื้นลดต่ำลงจนถึงช่วงที่สองของการอบแห้งที่ความเร็วลดลง ของเหลวภายในรูทุกรูของเนื้อวัสดุจะมีระดับต่ำกว่าผิวหน้าวัสดุ เมื่อทำการอบแห้งต่อไป ระยะทางสำหรับการแพร่ (Diffusion path) ของความร้อนและมวลจะมีความมากขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การกระจายความชื้นในเนื้อวัสดุพูนในช่วงที่สอง
ของการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

เมื่อการอบแห้งดำเนินต่อไป ผิวหน้าของวัสดุอบแห้งจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับของลมร้อนแต่ที่ตำแหน่งที่เกิดการระเหยจะยังคงมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิประเปาะเปียกของลมร้อน แต่ในช่วงการอบแห้งใกล้จะสิ้นสุดลง ของเหลวที่เหลืออยู่ในเนื้อวัสดุจะกระจายแทรกตัวอยู่ตามซอกของรูภายในเนื้อวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 นั่นคือผิวหน้าของการอบแห้งจะกระจัดกระจายและขาดความต่อเนื่อง ดังนั้นกลไกที่ควบคุมอัตราการอบแห้งในช่วงนี้ก็คือการแพร่ของความชื้นและมวล เข้าไปถึงของเหลวที่อยู่ในซอกเล็กซอกน้อยของรูในเนื้อวัสดุ



รูปที่ 3.6 การกระจายความชื้นภายในเนื้อวัสดุพูนในช่วง
ใกล้สิ้นสุดการอบแห้ง

3.3 การแบ่งประเภทและการเลือก เครื่องอบแห้งในอุตสาหกรรม

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาจแบ่งออกได้ เป็นประเภทใหญ่ๆ คือ

1. เครื่องอบแห้งแบบค้อน เนื่องชนิดไหลขนานหรือสวนทาง
2. เครื่องอบแห้งแบบค้อน เนื่องชนิดการไหลตัด เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิด-ไลซ์เบด (Fluidized bed dryer)
3. เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic conveying dryer)
4. เครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary dryer)
5. เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน (Through-flow dryer)
6. เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer)
7. เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze dryer)
8. เครื่องอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรด (Infared dryer)
9. เครื่องอบแห้งแบบนำความร้อน (Heat conduction dryer)

หัวข้อที่ควรพิจารณาก่อนทำการเลือกประเภท เครื่องอบแห้งอาจแบ่งออกได้ดังนี้คือ

1. หัวข้อ เกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง
- ก. การเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

จากการพิจารณาถึงความไวของวัสดุต่อความร้อน เราสามารถกำหนดอุณหภูมิสูงสุดของวัสดุที่ยอมให้ได้ในระหว่างการอบแห้ง อุณหภูมินี้เป็นเงื่อนไขแรกของการกำหนดอุณหภูมิของลมร้อน โดยทั่วไปแล้วระดับของการเสื่อมคุณภาพจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัสดุในระหว่างอบแห้งและเวลาที่ใช้ออบแห้ง ในหลายกรณีการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงแต่ช่วงเวลาสั้นอาจให้ผลิตภัณฑ์ที่คุณภาพดีกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำแต่เวลานาน สรุปแล้วเงื่อนไขของการอบแห้งที่กำหนดได้ในห้องทดลองควรถือเป็นเพียงข้อมูลประกอบการพิจารณาเท่านั้น ส่วนการเลือกประเภทอุปกรณ์อบแห้งและเงื่อนไขของการอบแห้งควรกระทำโดยมองจากแง่วิศวกรรมอบแห้ง

- ข. รูปร่างและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คุณค่าทางการค้า

ในกรณีของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง คุณภาพและคุณค่าทางการค้ามักจะขึ้นโดยตรงกับรูปร่างและคุณสมบัติเชิงเทคโนโลยีอนุภาค (powder technology) ของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ในกรณี

ของการอบแห้งน้ำมัน, สบู่ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยวิธีพ่นฝอย เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะ เปลี่ยนไปตาม เงื่อนไขที่ใช้ในการพ่นฝอยและอบแห้ง ในกรณีของวัสดุ เพราะ การร้าวหรือแตกกระจุยของผลิตภัณฑ์ในระหว่างอบแห้งอาจ เป็นปัญหาที่สำคัญด้วย

ค. การทำให้ผลิตภัณฑ์มีมลทิน (contamination)

การทำให้มีมลทิน เป็นปัญหาสำคัญสุดยอดอันหนึ่งสำหรับบริโภคภัณฑ์และเวชภัณฑ์ ปัญหาของการเกิดมลทินระหว่างอบแห้ง ตลอดจนการทำสเตอริไลเซชัน (sterilization) และการฆ่าเชื้อโรคของตัวเครื่องอบแห้งเอง เป็นเรื่อง ที่ควรมีการศึกษาไว้ล่วงหน้า ในกรณีของบริโภคภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อน อาจมีกลิ่นเหม็นไหม้เนื่องจากวัสดุที่เกาะติดผนังเครื่องหรือตกค้าง อยู่ในเครื่องเป็นเวลานานจนไหม้เกรียมไป ผลคือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะลดลง

2. หัวข้อเกี่ยวกับความสามารถในการอบแห้งและโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง

ก. คุณสมบัติอบแห้งของวัสดุ เปียกชื้น

เพื่อตั้งเงื่อนไขของการอบแห้งสำหรับวัสดุ เปียกที่อยู่ในความสนใจ เราจำต้องรู้คุณสมบัติอบแห้งของวัสดุนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งจำเป็นสำหรับการประเมินเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้ง แม้แต่ในกรณีที่ไม่สามารถหาเส้นกราฟนี้ได้ ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราส่วนความชื้นต่ำสุด (minimum water content) ของวัสดุและอัตราส่วนความชื้นวิกฤต (critical water content) ยังเป็นสิ่งที่ขาดเสียไม่ได้ สมควรที่จะกล่าวเน้น ณ ที่นี้ว่าปริมาณความชื้นวิกฤตของน้ำและ เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งขึ้นอยู่กับลักษณะการสัมผัสระหว่างวัสดุกับลมร้อน (ลักษณะสัมผัสนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องอบแห้ง) และขนาดและรูปทรงของวัสดุอบแห้งอย่างมาก

ยกตัวอย่าง กรณีของวัสดุที่เป็นอนุภาค ถ้าอนุภาคทุกชิ้นอยู่กระจัดกระจายในระหว่างอบแห้ง ดังในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (pneumatic conveying dryer) หรือแบบหมุน (rotary dryer) ไม่เพียงแต่พื้นที่ของการอบแห้งจะเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น แต่โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนความชื้นวิกฤตจะมีค่าน้อยลงด้วย ผลก็คือสามารถทำการอบแห้งให้เสร็จในช่วงระยะเวลาอันสั้น ในทางตรงข้ามถ้าวัสดุอนุภาคนี้อาจรวมกันเพื่ออบแห้งโดยการเป่าลมร้อนขนานกับผิวบนอัตราส่วนความชื้นวิกฤตจะมีค่าสูงกว่า และความเร็วของการอบแห้งจะลดลงอย่างมากด้วย สรุปแล้ว ถ้าหาก เป็นไปไม่ได้ที่จะทำการทดลองใน เครื่องอบแห้งตัวจริง เพื่อหาค่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤตและเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง ข้อมูลเหล่านี้ควรหามาจากห้องทดลอง โดยใช้สภาพการสัมผัสระหว่างวัสดุกับลมร้อนที่ใกล้เคียงกับของใน เครื่องจริงที่สุด เท่าที่จะทำได้

ข. คุณสมบัติการ เกาะติดของวัสดุอบแห้ง

ในช่วงการขนถ่ายและดูแลวัสดุใน เครื่องอบแห้ง ข้อมูลที่เพียงพอ เกี่ยวกับคุณสมบัติ การ เกาะติดหรือความ เหนียว เหนอะหนะของวัสดุตั้งแต่จากสภาพ เปียกจนถึงสภาพแห้ง เป็นสิ่งที่ขาด เสียไม่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของ เครื่องอบแห้งแบบค้อนเนื่อง การไหลของวัสดุอย่างราบ- รื่นตั้งแต่ เวลาที่ เริ่มป้อน เข้า เครื่องและ เคลื่อนย้ายภายใน เครื่องจนถึง เวลาที่ไหลผ่านออกมาเป็น ปัจจัยที่สำคัญที่สุด มิฉะนั้นแล้ว การเดิน เครื่องอบแห้งอย่างค้อนเนื่องย่อมทำไม่ได้ การ เกาะติดของ วัสดุบนผนัง เครื่องและการรวมตัว เป็นก้อนใหญ่ๆ เป็นปัญหาที่พบเห็นอยู่เสมอๆ

ค. การขับน้ำออกล่วงหน้า

โดยทั่วไปแล้วค่าใช้จ่ายของการขับน้ำออกจากวัสดุโดย เครื่องมือกลจะต่ำกว่าค่า ใช้จ่ายของการ เดิน เครื่องอบแห้งอย่างมาก ในกรณีที่มิกระบวนการขับน้ำออกก่อนหน้ากระบวนการ อบแห้ง สมควรที่จะใคร่ครวญและนิคค้นวิธีขับน้ำออกให้มากที่สุดอีกครั้งหนึ่ง ถึงแม้ว่าการทำเช่นนั้น จะ เป็นการ เพิ่มค่าใช้จ่ายของการลงทุนให้สูงขึ้นบ้าง

ง. อื่นๆ

เราควรจะพยายามทุกวิถีทางที่จะรักษาอัตราส่วนความชื้นของวัสดุที่ป้อน เข้า เครื่อง อบแห้งให้สม่ำเสมอ ถ้าหากทำไม่ได้ อัตราส่วนความชื้นที่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์จะต้องได้มาจากการ อบแห้ง เรื่องๆ นี้เป็นสิ่งที่ต้องจำใส่ใจไว้ในเวลาเลือกประเภท เครื่องอบแห้งและคำนวณความ สามารถในการอบแห้งของ เครื่อง นอกจากนี้จะต้องให้ความสนใจอย่างเพียงพอต่อความ เป็นพิษ ความไม่สม่ำเสมอ การแข็งตัวของผิว การหดตัว การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นต้น ของวัสดุที่ต้อง การอบแห้ง

3. หัวข้อเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายรวมของการอบแห้ง

ค่าใช้จ่ายของการอบแห้งอาจแบ่งได้ เป็นค่าใช้จ่ายลงทุนและค่าใช้จ่ายของการ เดินเครื่อง เป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องลดผลบวกของค่าใช้จ่ายเหล่านี้ให้มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจาก เครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับงานแต่ละชิ้นมักมีอยู่ 2-3 ประเภท ดังนั้น เป็นสิ่งสำคัญที่จะไม่กำหนด ประเภทของเครื่องให้ตายตัวตั้งแต่ต้น แต่ควรพิจารณาไตร่ตรองทั้ง 2-3 ประเภท โดยประเมิน ค่าใช้จ่ายลงทุนและค่าใช้จ่ายของการ เดินเครื่องขึ้นสำหรับทำการ เปรียบเทียบ ในการประเมิน ค่าใช้จ่ายประเภทที่สอง ควรคำนึงถึงการขึ้นราคาพลังงาน (พลังงานความร้อน, พลังงานไฟฟ้า) และการขึ้นค่าแรงงานในอนาคตด้วย

การเลือกอุปกรณ์อบแห้ง

ในยามเปียก วัสดุอบแห้งอาจแบ่งออกได้อย่างหยาบๆ ตามรูปร่างลักษณะเป็นจำพวกใหญ่ๆ ดังนี้

1. ของเหลวและสเลอรี (Slurry)
2. วัสดุที่แช่แข็ง
3. วัสดุคล้ายพวกแป้งเปียก
4. วัสดุที่เป็นเม็ด
5. วัสดุที่เป็นก้อน
6. วัสดุที่เป็นสะเก็ด
7. วัสดุเส้นใยสั้น
8. วัสดุที่มีมิติคงที่
9. วัสดุที่เป็นแผ่นยาวต่อเนื่อง
10. สีและของเหลวที่ใช้ทา

ลำดับที่ 1 ถึง 4 จะเปลี่ยนสภาพเป็นเม็ดหลังจากอบแห้ง ส่วนลำดับที่ 5 ขึ้นไปจะไม่เปลี่ยนรูปร่างเมื่อแห้ง ขั้นตอนในการเลือกอุปกรณ์อบแห้งมีดังนี้ ในขั้นแรกของการเลือกอุปกรณ์อบแห้งเราจะพิจารณารูปแบบของวัสดุเปียก ปริมาณที่ต้องการและวิธีปฏิบัติการ จากนั้นจึงค่อยพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุอบแห้ง การเลือกประเภท เครื่องอบแห้งจะต้องคำนึงถึงสภาพที่ตั้งและปัญหาของแหล่งพลังงานความร้อนด้วย หลังจากนั้นจึงจะประเมินขนาดของ เครื่องอบแห้ง

ตารางที่ 3.1 จำแนก เครื่องอบแห้งตามความเหมาะสมกับรูปแบบของวัสดุเปียก ประคิแล้วควรเลือกประเภท เครื่องที่เหมาะสมจากรายชื่อที่ปรากฏใน A ส่วนรายชื่อใน B จะเลือกใช้ในกรณีพิเศษเท่านั้น ในทางตรงข้ามตารางที่ 3.2 รวบรวมวัสดุอบแห้งที่เหมาะสมกับ เครื่องอบแห้งแต่ละประเภทไว้

ตารางที่ 3.1 การเลือกเครื่องอบแห้ง

สภาวะของวัสดุ เปียก	ตัวอย่างของวัสดุ	แบบของการปฏิบัติการ	ประเภทของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม	
			A (กรณีทั่วไป)	B (กรณีเฉพาะ)
1. สารละลายและ สเลอรี	สารละลายเกลือ, สารสกัดจากพืช ผงซักฟอก, สารละลายของ เรซิน(resin), วุ้นแผ่น, น้ำมัน	แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก	a. แบบพ่นฝอย (spray)	
		แบบต่อเนื่องปริมาณ น้อย	b. แบบดรัม (drum) (ดรัมสุญญากาศ)	
2. วัสดุแช่แข็ง	ยา, อาหาร (ก้อน, ผง)	ไม่ต่อเนื่อง batch ปริมาณน้อย	a. แบบแช่แข็ง (freeze dry)	
		กึ่งต่อเนื่อง (semibatch) ปริมาณมาก		
3. วัสดุคล้ายแป้ง เปียก	ซิลิ่อม, วุ้นทราย (silica gel), แป้ง, ดินเหนียว, ออกไซด์แดง, สี ผง, โทเทเนียม ขาว, ผงถ่าน, เค้ก กรอง, ตะกอน, แคล- เซียมคาร์บอเนต ฯลฯ	แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก	a. แบบพาหะลม (pneumatic conveying) b. แบบแบนด์ไหล ผ่าน(through flow band) หรืออุโมงค์ (tunnel)	c. แบบอุโมงค์ ไหลขนาน d. แบบพ่นฝอย
		แบบต่อเนื่องปริมาณ น้อย	c. แบบทรงกระ- บอกนำความ ร้อนและแบบ รางกวนนำ ความร้อน e. แบบดรัม (ดรัมสุญญากาศ)	

สภาวะของวัสดุ เปียก	ตัวอย่างของวัสดุ	แบบของการปฏิบัติการ	ประเภทของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม	
			A (กรณีทั่วไป)	B (กรณีเฉพาะ)
		แบบไม่ต่อเนื่องปริมาณ น้อย	g. แบบทรงกระบอก นำความร้อนและ แบบรางกาน้ำ ความร้อน (รวมสูญญากาศ) h. แบบกล่องไหล ผ่าน ผ่าน (through flow chamber type)	i. แบบกล่องไหล ขนาน (parallel- flow box type) j. แบบกล่องสูญญ ากาศ
4. วัสดุชนิดผงและ เม็ด	ยิบซั่ม, ilmenite, ข้าว, ข้าวโพด, ยางสังเคราะห์ของ พีวีซีและอื่นๆ activated car- bon, ทราย, บั๊ย- เคมี, บั๊ยฟอสเฟต หลอมรูป	แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก	a. แบบพวทนะลย b. แบบรางกาน้ำ อากาศร้อน (Air-heated, agitated trough) c. แบบหมุน (ro- tary) d. แบบหมุนและมี ท่อไอน้ำ e. แบบ fluidized bed แบบไหลผ่านชนิด หมุน (through flow rotary) f. แบบไหลผ่านชนิด ตั้ง (through- flow vertical type)	g. แบบแบนด์ (อุโมงค์ ไหลผ่าน แบบจานหลายชั้น (multi disk) i. แบบกึ่งตัน (เทอร์- โบ) ตั้งและแบบ ตั้ง

สภาวะของวัสดุ เปียก	ตัวอย่างของวัสดุ	แบบของการปฏิบัติการ	ประเภทของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม	
			A (กรณีทั่วไป)	B (กรณีเฉพาะ)
		แบบต่อเนื่องปริมาณ	j. แบบทรงกระบอก นำความร้อนและ แบบรางกวนนำ ความร้อน k. แบบ fluid- dized bed	
		แบบไม่ต่อเนื่องปริมาณ น้อย	i. แบบfluidized bed m. แบบทรงกระบอก นำความร้อน และแบบรางกวน นำความร้อน (รวมสูญญากาศ)	n. แบบกล่องไหล ผ่าน o. แบบแบนด์ (อุ- โมงค์) ไหลผ่าน
5. วัสดุที่เป็นก้อน	ถ่านบดย่อย, ไม้, ไม้, แร่, เค้กกรองบาง ประเภท, ตะกอน	แบบต่อเนื่องปริมาณ มาก	a. แบบหมุน b. แบบไหลผ่านชนิด หมุน, แบบไหล ผ่านชนิดตั้ง c. แบบหมุนและมีท่อ ไอน้ำ	d. แบบอุโมงค์ไหล ขนาน (แบนด์) e. แบบแบนด์ไหล ผ่าน (อุโมงค์)
		แบบไม่ต่อเนื่องปริมาณ น้อย		f. แบบกล่องไหล ขนาน g. แบบกล่องไหลผ่าน
6. วัสดุที่เป็นสะเก็ด	ใบยาสูบ, ถั่ว- เหลืองอัดแบน, ขึ้น มันฝรั่งทอด	แบบต่อเนื่องปริมาณมาก	a. แบบแบนด์ไหล ผ่าน b. แบบหมุนและมี ท่อไอน้ำ c. แบบไหลผ่านชนิด แบน	d. แบบอุโมงค์ไหล ขนาน
		แบบไม่ต่อเนื่องปริมาณ น้อย	e. แบบกล่องไหล ผ่าน	

สภาวะของวัสดุ เป็ยก	ตัวอย่างของวัสดุ	แบบของการปฏิบัติการ	ประเภทของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม	
			A (กรณีทั่วไป)	(กรณีเฉพาะ)
7. วัสดุเส้นใยสั้น	เส้นใยสั้น, linter, เส้นแบ่ง, เซลลูโลสชนิดเอซิติคและไนเตรด	แบบคั่ว เนื่องจากปริมาณมาก	a. แบบแบนด์ไหลผ่าน	
		แบบคั่ว เนื่องจากปริมาณน้อย	b. แบบกล่องไหลผ่าน	
8. วัสดุเม็ดคองกี้	ใบยาสูบ, เครื่องใช้ เซรามิก, เส้นไหม, กระดาษหนังสือ, เครื่องสูบกัญชา เซรามิก, ผนังพอก, ไม้อัด, เส้าไม้, กระดาษชนิดหนาและบาง	แบบคั่ว เนื่องจากปริมาณมาก	a. แบบอุโมงค์ (แบนด์) ไหลขนาน	b. แบบอุโมงค์ (แบนด์) ไหลผ่าน
		แบบไม่คั่ว เนื่องจากปริมาณมากหรือน้อย	c. แบบกล่องไหลขนาน	d. dielectric
		แบบไม่คั่ว เนื่องจากปริมาณน้อย		e. แบบกล่องไหลผ่าน
9. วัสดุแบบแผ่นยาวคั่วเนื่อง	ผ้าทอ, กระดาษ, กระดาษพิมพ์, sliver	แบบคั่ว เนื่องจากปริมาณมาก	a. แบบฉีดพ่น (nozzle jet)	
		แบบคั่ว เนื่องจากปริมาณน้อย	b. แบบไหลขนาน c. แบบทรงกระบอกหลายลูก (multicylinder)	
			d. แบบทรงกระบอกลูกเดี่ยวหรือหลายลูก	e. แบบรังสีอินฟราเรด
10. สีและของเหลวที่ใช้ทา		แบบคั่ว เนื่องจากและไม้คั่วเนื่อง	a. แบบรังสีอินฟราเรด b. แบบฉีดพ่น (nozzle jet)	c. แบบไหลขนาน



หมายเหตุ

ลำดับ a,b,c,... ใน A และ B ไม่ได้แสดงลำดับขั้นของความเหมาะสมแต่ประการใด แต่ความเหมาะสมของเครื่องใน A จะมีมากกว่าของใน B

- 1) รวมทั้งผง(เล็กกว่า 100 ไมครอน), เม็ดขนาดเล็ก (0.1 ถึง 1 มม.), เม็ดขนาดกลาง (1 ถึง 5 มม.) และเม็ดขนาดใหญ่ (5 ถึง 20 มม.)
- 2) รวมทั้งก้อนขนาดเล็ก (2 ถึง 5 ซม.) และก้อนขนาดใหญ่ (5 ถึง 10 ซม.)

ตาราง 3.2 การจำแนกประเภทของเครื่องอบแห้ง

ชนิดของวัสดุ 1. ของเหลวและสเลอรี่(Slurry) 2. วัสดุคล้ายแป้งเปียก 3. วัสดุผงและเม็ด 4. วัสดุก้อน 5. วัสดุสะเก็ด 6. วัสดุเส้นใยสั้น 7. วัสดุที่มีสัณฐาน 8. วัสดุแผ่นยาวต่อเนื่อง 9. ผีที่ทาสี 10. วัสดุแข็งแข็ง

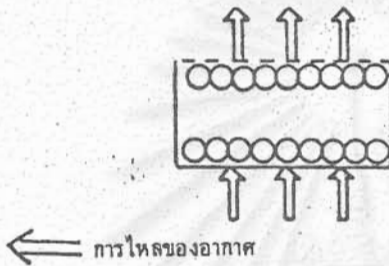
	สภาวะของวัสดุ	ประเภทของเครื่องอบแห้ง	วิธีปฏิบัติการ	การไหลของลมร้อน	ปริมาณที่อบแห้ง	วัสดุที่เหมาะสม (ลำดับขั้นของความเหมาะสม)	
						ดีมาก	ดี
ให้ความร้อน	อยู่นิ่ง	แบบกล่อง(chamber)	ไม่ต่อเนื่อง	ขนานไหลผ่าน	น้อย	7	2,4
						2,5,6	3,4,7
ด้วยลมร้อน	เคลื่อนที่	แบบอุโมงค์(tunnel)	ต่อเนื่อง	ขนาน	มาก	2,7,8	4,5,9
		ฉีดพ่น(nozzle jet)	ต่อเนื่อง	สวนทาง	มาก	8,9	
		แบบแบนด์(band)	ต่อเนื่อง	ไหลผ่าน	มาก	2,5,6	3,4,7
		แบบกึ่งตันตั้ง	ต่อเนื่อง	ไหลผ่าน	มาก	3	
		แบบตั้ง				3,4	
	กวน	แบบหมุน(rotary) แบบไหลผ่านชนิดหมุน (through flow rotary)	ต่อเนื่อง	ขนาน, ไหลผ่าน, กระจาย	มาก	3,4,5	
		แบบรางกวน (agitated trough)	ต่อเนื่อง	(ขนาน) ไหลผ่าน	มาก	3	

	สภาวะ ของวัสดุ	ประเภทของเครื่อง อบแห้ง	วิธีปฏิบัติ การ	การไหลของ ลมร้อน	ปริมาณ ที่อบแห้ง	วัสดุที่เหมาะสม (ลำดับ ชั้นของความเหมาะสม)		
						ดีมาก	ดี	
พาไหล โดย ลมร้อน		แบบ fluidized bed	ต่อเนื่อง หรือไม่ต่อ เนื่อง	กระจัดกระจาย (disperse)	มาก	3		
		แบบจานหลายชั้น (multidisk)	ต่อเนื่อง	ขนาน	มาก		3	
		แบบพ่นฝอย (spray)	ต่อเนื่อง	กระจัดกระจาย	มาก	1, 2		
		แบบพาหะลม (pneumatic convey ing)	ต่อเนื่อง	กระจัดกระจาย	มาก	2, 3		
ให้ความ ร้อน โดย การนำ ความร้อน	อยู่นิ่ง	freeze dryer หรือ แบบกล่องสุญญากาศ	ไม่ต่อเนื่อง		น้อย	10	2, 3	
		เคลื่อนที่	แบบดรัม (drum)	ต่อเนื่อง		น้อย	1, 2	
	แบบทรงกระบอก หลายลูก (multicylinder)		ต่อเนื่อง		มาก	8		
	กวน	แบบทรงกระบอกกวน และแบบรางกวน (ความดันบรรยากาศ, สุญญากาศ)	ไม่ต่อเนื่อง หรือ ต่อเนื่อง			น้อย	2, 3	
		แบบหมุนและมีมัดท่อ ไอน้ำ	ต่อเนื่อง		มาก	3, 4, 5		
	อื่นๆ	เครื่องอบแห้งแบบ อินฟราเรด	ต่อเนื่อง หรือไม่ต่อ เนื่อง			น้อย, มาก	9	8
	เครื่องอบแห้งแบบ dielectric	ต่อเนื่องหรือ ไม่ต่อเนื่อง			น้อย, มาก		7	

3.4 การอบแห้งแบบไหลผ่าน

3.4.1 การจำแนกการอบแห้งแบบไหลผ่าน

ในขบวนการอบแห้งแบบไหลผ่าน วัสดุอบแห้ง เช่น วัสดุเม็ด ((5-6 mm) - (300-500 μm)) หรือวัสดุที่เป็นเส้นใยจะถูกวางบนแผ่นที่มีรูทึบหรือตาข่ายที่ลมผ่านกันได้ ส่วนลมร้อนจะถูกเป่าตั้งฉากกับชั้นวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

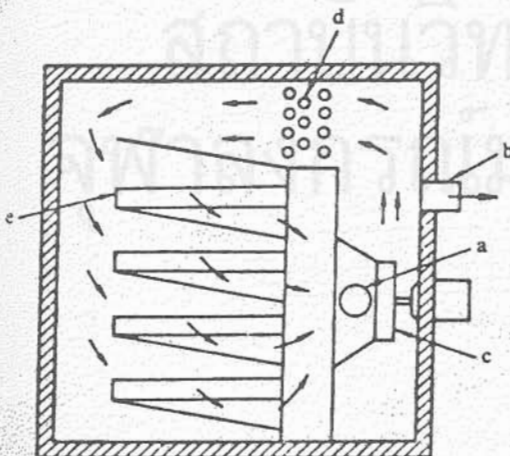


รูปที่ 3.7 การอบแห้งแบบไหลผ่าน

เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านสามารถจำแนกได้ดังนี้คือ

ก. เครื่องอบแห้งรูปกล่องแบบไหลผ่าน (Through-Flow chamber dryer)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้ใช้สำหรับการอบแห้งปริมาณค่อนข้างน้อย วัสดุอบแห้งจะวางอยู่บนถาดซึ่งกันทำด้วยตะแกรงหรือแผ่นรูทึบ ถาดและกรอบของถาดจะต้องแนบกันสนิทจนอากาศไม่รั่วไหล เพื่อให้ลมร้อนไหลผ่านชั้นวัสดุเท่านั้น รูป 3.8 แสดงโครงสร้างของเครื่องอบแห้งประเภทนี้



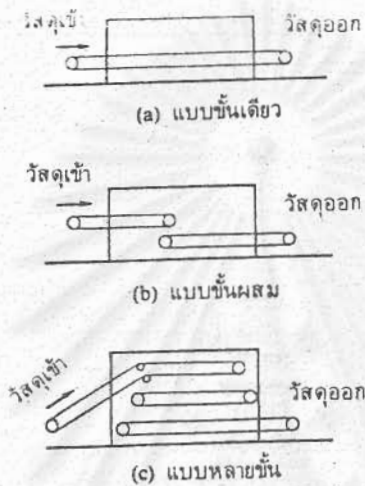
- a: ทางเข้าของอากาศจากภายนอก
- b: ทางออกของอากาศที่ทิ้ง
- c: เครื่องเป่าลม
- d: เครื่องทำอากาศร้อน
- e: ถาด

รูป 3.8 เครื่องอบแห้งรูปกล่องแบบไหลผ่าน

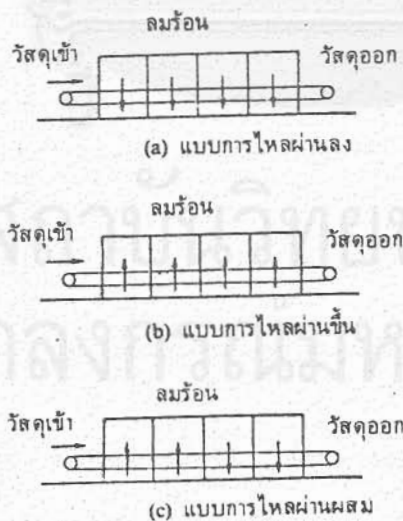
ข. เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านแบนด์

เครื่องอบแห้งแบบนี้เป็นแบบไหลผ่านที่นิยมใช้กันมากที่สุด เช่นในอุตสาหกรรม

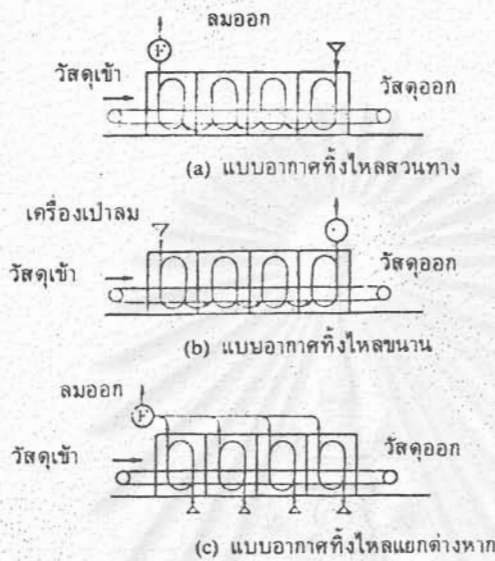
สิ่งทอ เคมีภัณฑ์ เวชภัณฑ์ เหมืองแร่ เป็นต้น รูปที่ 3.9 - 3.12 แสดงการจำแนกประเภทของเครื่องอบแห้งแบบนี้



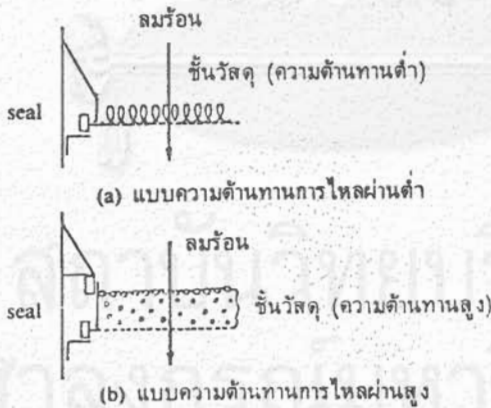
รูปที่ 3.9 การจำแนกประเภทตามจำนวนชั้นของแบนด์



รูปที่ 3.10 การจำแนกประเภทตามทิศทางการไหลผ่าน

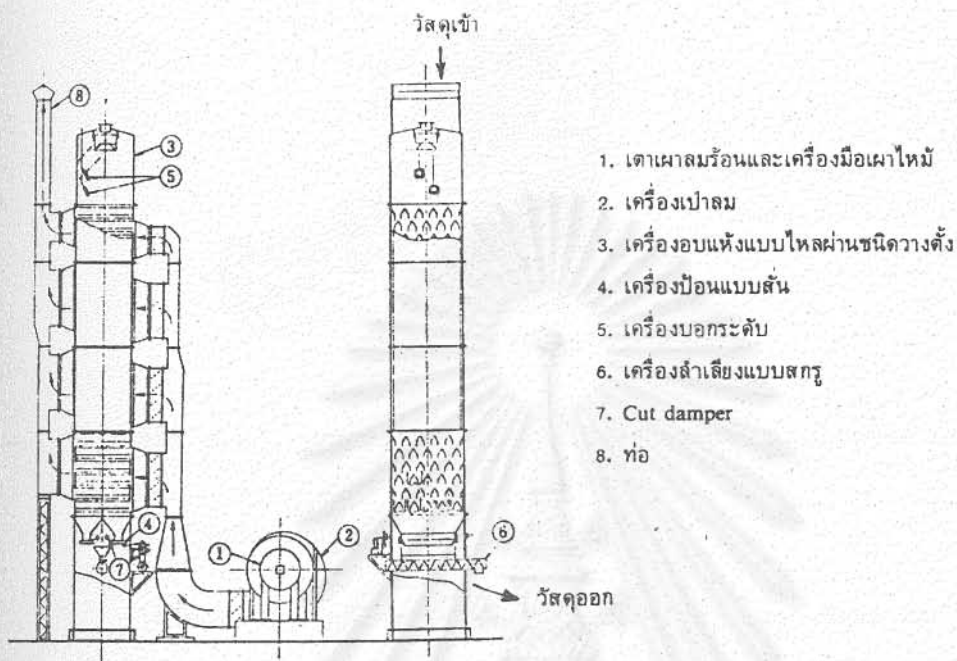


รูปที่ 3.11 การจำแนกประเภทตามการปล่อยอากาศทิ้ง

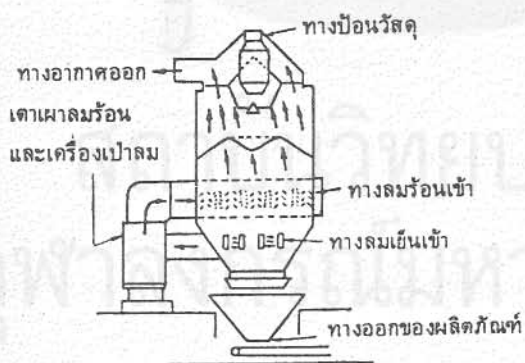


รูปที่ 3.12 ชนิดของ seals ด้านข้างของแบนด์

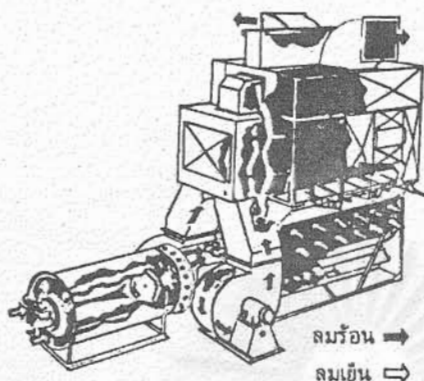
ค. เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดวางตั้ง (ชั้นวัสดุเคลื่อนที่) ในเครื่องอบแห้งแบบนี้ ชั้นวัสดุจะถูกปล่อยให้เคลื่อนลงมาโดยน้ำหนักของตัวเอง ในขณะที่เดียวกันลมร้อนจะไหลผ่านชั้นวัสดุที่กำลังเคลื่อนที่ เครื่องอบแห้งชนิดนี้ใช้สำหรับงานอบแห้งวัสดุประเภท เม็ดที่มีอัตราส่วนความชื้นค่อนข้างน้อยอย่างต่อเนื่องในปริมาณมาก รูป 3.13 - 3.15 แสดงการจำแนกประเภทของเครื่องอบแบบนี้



รูปที่ 3.13 รูปของเครื่องอบแห้งคั่วเนื้อแบบไหลผ่านชนิดวางตั้ง



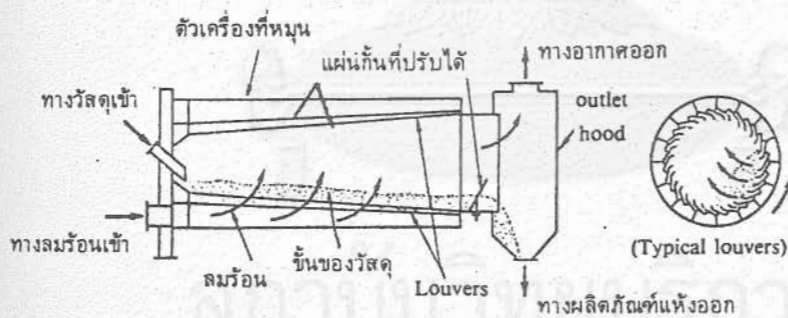
รูปที่ 3.14 รูปของเครื่องอบแห้งคั่วเนื้อแบบปล่อยอากาศออกทางด้านบน



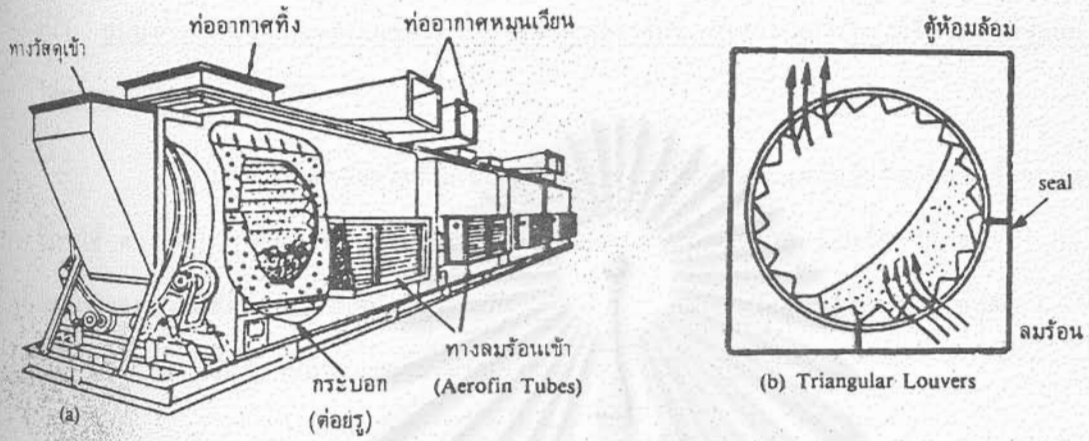
รูปที่ 3.15 รูปของ เครื่องอบแห้งคั่ว เนื้อแบบลมร้อน เข้าออกหนึ่งด้านข้าง

ง. เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดหมุน

เครื่องอบแห้งชนิดนี้ เหมาะสำหรับวัสดุประเภท เม็ด, ก้อน หรือสะเก็ด, วัสดุที่มีความหนาแน่นรวมค่า เช่น เศษไม้, เยื่อกระดาษ เป็นต้น รูป 3.16 - 3.17 แสดงการจำแนกเครื่องอบแห้งแบบนี้



รูป 3.16 เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดหมุนและ เป่าลม เข้าพิวด้านปลาย



รูป 3.17 เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดหมุนและ เป่าลม เข้าผิวด้านข้าง

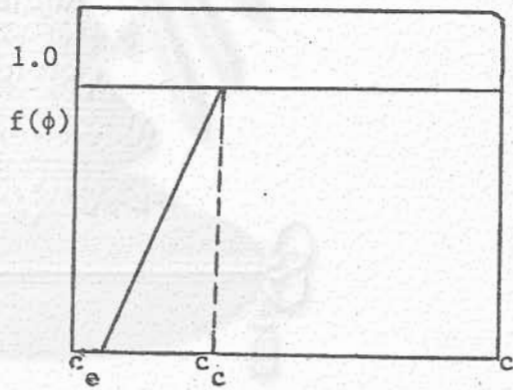
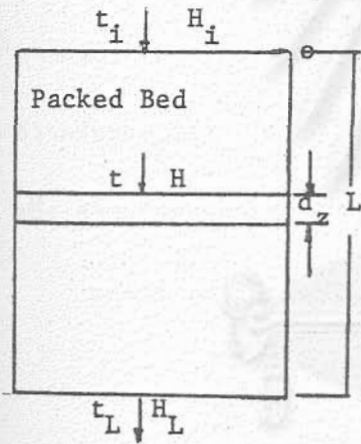
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน

4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณการกระจายความชื้นในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน (Toei, 1972)

การอบแห้งวัสดุในที่นี้กระทำโดยการเป่าลมร้อนทะลุผ่านชั้นวัสดุในเครื่องอบแห้ง ในรูปที่ 4.1 (ก) กำหนดให้อุณหภูมิและความชื้นของลมร้อนก่อนเข้าชั้นวัสดุเท่ากับ t_i , H_i อุณหภูมิและความชื้นที่ออกจากชั้นวัสดุเท่ากับ t_L , H_L และความสูงของชั้นวัสดุเท่ากับ L รูปที่ 4.1 (ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\phi)$ กับ C



รูปที่ 4.1ก. การไหลของอากาศร้อน
อุณหภูมิ t_i , ความชื้น H_i
ออกจากชั้นวัสดุ ความสูง L
โดยมีอุณหภูมิ t_L , ความ
ชื้น H_L

รูปที่ 4.1ข. เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง
เมื่อวัสดุเดี่ยวภายในเงื่อนไขการ
อบแห้งคงที่

จากรูปที่ 4.1 (ข)

$$f(\phi) = 1 \quad \text{เมื่อ } \phi > 1$$

$$f(\phi) = \phi \quad \text{เมื่อ } \phi < 1 \quad (4.1)$$

จากรูปที่ 4.1 (ข) เมื่อทำสมดุลของมวลในช่วงความสูงเล็ก dz จะได้

$$-(1-\epsilon) \rho_s (\partial c / \partial \theta) dz = ka(H_w - H) f(\phi) dz \quad (4.2)$$

$$-(1-\epsilon) \rho_s (\partial c / \partial \theta) dz = G_o (\partial H / \partial z) dz \quad (4.3)$$

จากสมการ (4.2) และ (4.3) เราสามารถกำหนดตัวแปรแต่ละตัวให้อยู่
ในรูปตัวแปรไร้มิติดังนี้คือ

เวลา $\tau = ka\theta / \{(1-\epsilon)\rho_s (c_c - c_e)\}$

ความยาว $\xi = ka Z / G_o$

ความชื้นของวัสดุ $\phi = (c - c_e) / (c_c - c_e)$

อนึ่ง ความชื้นของอากาศ $\pi = H_w - H$

สมการ (4.2) และ (4.3) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$-\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \pi f(\phi) \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\partial \pi}{\partial \xi} \quad (4.5)$$

เมื่อคิดเพื่อเรนซีเอทสมการ (4.4) ด้วย ξ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \tau \partial \xi} &= - \left[\pi \frac{\partial f(\phi)}{\partial \xi} + \frac{\partial \pi}{\partial \xi} f(\phi) \right] \\ &= - \pi \frac{\partial f(\phi)}{\partial \xi} - f(\phi) \frac{\partial \pi}{\partial \xi} \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่า $\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\partial \pi}{\partial \xi}$

$$\text{จะได้} \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial \tau \partial \xi} = - \pi \frac{\partial f(\phi)}{\partial \xi} - f(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \quad (4.6)$$



$$\text{จากสมการ (4.4) } \Pi = -\frac{\partial \phi}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{f(\phi)}$$

$$\text{และ } \frac{\partial f(\phi)}{\partial \xi} = \frac{\partial f(\phi)}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \xi}$$

ดังนั้น (4.6) จะเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \tau \partial \xi} - \frac{f'(\phi)}{f(\phi)} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + f(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = 0 \quad (4.7)$$

เมื่ออินทิเกรตทั้งสองข้าง จะได้

$$\phi + \frac{1}{f(\phi)} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \xi} = p(\xi) \quad (4.8)$$

โดยที่ $p(\xi)$ เป็นการกระจายความชันแรก เริ่มที่ขึ้นกับความสูง (ξ) และ

$$0 < \xi < \xi_L ; \xi_L = \frac{kaL}{G_0}$$

4.2 การคำนวณการกระจายความชันในชั้นวัสดุคอบแห้งแบบไหลผ่าน

เราสามารถแบ่งลักษณะการคำนวณออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- ก. กรณีที่วัสดุที่นำมาอบแห้งมีความชันแรก เริ่มอยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่
- ข. กรณีที่วัสดุที่นำมาอบแห้งมีความชันแรก เริ่มอยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

4.2.1 กรณีที่วัสดุมีความชันแรก เริ่มอยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่

ในกรณีนี้เมื่อเราทำการอบแห้งวัสดุไปเรื่อยๆ จะพบว่าสามารถแบ่งสภาวะของวัสดุออกได้เป็น 3 สภาวะ คือ

4.2.1.1 กรณีที่ชั้นวัสดุทั้งหมดอยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่

4.2.1.2 กรณีที่ชั้นวัสดุบางส่วนอยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

และบางส่วนอยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่

4.2.1.3 กรณีที่ชั้นวัสดุทั้งหมดอยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

ขั้นตอนการอนุพันธ์สมการเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณการกระจายความชื้นของ
วัสดุในแต่ละกรณี เป็นดังต่อไปนี้

4.2.1.1 กรณีที่วัสดุทั้งหมดอยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่

ในกรณีนี้ $f(\phi) = 1$ ดังนั้นจากสมการ (4.4) และ (4.5) จะได้

$$\frac{\partial \eta}{\partial \xi} = -\eta$$

$$\frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial \xi} d\xi = -d\xi$$

เมื่ออินทิเกรตทั้งสองข้าง จะได้

$$\ln \eta = -(\xi + c)$$

$$\eta = e^{-(\xi + c)}$$

$$= e^{-\xi} e^{-c}$$

$$= C_1 e^{-\xi}$$

$$\text{ที่ } \xi = 0, \eta = \eta_0$$

$$\text{ดังนั้น } C_1 = \eta_0$$

$$\eta(\xi, \tau) = \eta_0 e^{-\xi}$$

$$\text{โดยที่ } \eta_0 = \eta(0, \tau) = H_w - H_1$$

แทนค่า η ลงในสมการ (4.4) จะได้

$$-\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \eta_0 e^{-\xi}$$

$$\int \partial \phi = \eta_0 e^{-\xi} \int \partial \tau$$

$$\phi = -\eta_0 e^{-\xi} \tau + C_2$$

กรณีที่ $\tau = 0, \phi = p(\xi)$

$$C_2 = p(\xi)$$

$$\phi = p(\xi) - \pi_0 e^{-\xi/\tau} \tag{4.9}$$

ในกรณีที่ความชื้นแรกเริ่มมีค่าสม่ำเสมอ = ϕ_0

นั่นคือ $p(\xi) = \phi_0$

$$\text{ดังนั้น } \phi = \phi_0 - \pi_0 e^{-\xi/\tau} \tag{4.10}$$

ที่ $\tau = \tau_c, \phi(0, \tau) = 1$

$$\phi(0, \tau) = 1$$

ดังนั้นจาก (4.10)

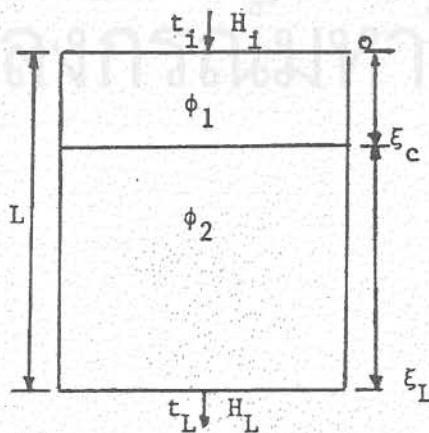
$$1 = \phi_0 - \pi_0 e^{-\tau_c/\tau}$$

$$\tau_c = \frac{\phi_0 - 1}{\pi_0} \tag{4.11}$$

$$\omega = (W - c_e) / (c_c - c_e) \tag{4.12}$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{1}{\xi_0} \int_0^{\xi_L} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} d\xi = (\pi_0 / \xi_L) (e^{-\xi_L/\tau} - 1) \tag{4.13}$$

4.2.1.2 กรณีที่วัสดุบางส่วนอยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงและ
บางส่วนอยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่



รูปที่ 4.2 ช่วงการอบแห้งภายในชั้นวัสดุโดยที่ระยะ 0 ถึง ξ_c และ ξ_c ถึง ξ_L คือช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงและช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ตามลำดับ

เมื่อเราทำการรอบแท่งไปเรื่อยๆ ความชื้นของวัสดุที่ด้านทางเข้าของลมร้อนจะลดลงเร็วกว่าความชื้นของวัสดุที่ด้านทางออกของลมร้อน ดังนั้นความชื้นของวัสดุที่ด้านทางเข้าของลมร้อนจะเข้าสู่การรอบแท่งที่ความเร็วลดลง ในขณะที่ความชื้นของวัสดุในส่วนถัดไปยังอยู่ในระหว่างการรอบแท่งที่ความเร็วคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 วัสดุในช่วง $0 - \xi_c$ มีความชื้นอยู่ในระหว่างการรอบแท่งที่ความเร็วลดลง ส่วนวัสดุในช่วง $\xi_c - \xi_L$ มีความชื้นอยู่ในระหว่างการรอบแท่งที่ความเร็วคงที่ เมื่อการรอบแท่งดำเนินต่อไประยะ ξ_c จะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อ $\xi_c = \xi_L$ วัสดุทั้งชิ้นจะมีความชื้นอยู่ในระหว่างการรอบแท่งที่ความเร็วลดลง

$$\text{ที่ตำแหน่ง } \xi < \xi_c \quad \text{จะได้} \quad \phi < 1$$

$$\xi = \xi_c \quad \text{จะได้} \quad \phi = 1$$

$$\xi > \xi_c \quad \text{จะได้} \quad \phi > 1$$

การคำนวณการกระจายความชื้นของวัสดุที่อยู่ในช่วง $0 - \xi_c$ และ $\xi_c - \xi_L$ ต้องทำแยกต่างหากกัน สมการที่จะนำมาใช้ในกรณีการกระจายความชื้นก็แตกต่างกันด้วย

$$\text{ก. สำหรับ } \xi > \xi_c, \quad \phi > 1, \quad f(\phi) = 1$$

จากสมการ (4.8)

$$\phi + \frac{1}{f(\phi)} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \xi} = p(\xi)$$

$$\phi = C(\tau) \ell^{-\int_0^\xi d\beta} + \ell^{-\int_0^\xi d\beta} \int_0^\xi \int_0^\eta p(\xi) d\eta d\beta$$

$$\phi = C(\tau) \ell^{-\xi} + \ell^{-\xi} \int_0^\xi \ell^\eta p(\eta) d\eta$$

$$\text{เนื่องจากที่ } \xi = \xi_c \quad \phi = 1$$

$$1 = C(\tau) \ell^{-\xi_c} + \ell^{-\xi_c} \int_0^{\xi_c} \ell^\eta p(\eta) d\eta$$

$$c(\tau) = \frac{1-l^{-\xi_c} \int_0^{\xi_c} l^\eta p(\eta) d\eta}{l^{-\xi_c}} = l^{\xi_c} - \int_0^{\xi_c} l^\eta p(\eta) d\eta$$

$$= l^{\xi_c} - \int_0^{\xi_c} l^\eta p(\eta) d\eta$$

$$\phi = \phi_1 = l^{\xi_c} l^{-\xi} - l^{-\xi} \int_0^{\xi_c} l^\eta p(\eta) d\eta + l^{-\xi} \int_0^{\xi} l^\eta p(\eta) d\eta$$

(4.14)

ในกรณีที่วัสดุมีความชื้นแรกเริ่มสม่ำเสมอ = ϕ_0

แทนค่า $p(\eta) = \phi_0$

$$\phi_1 = l^{\xi_c} l^{-\xi} - l^{-\xi} \phi_0 (l^{\xi_c} - 1) + l^{-\xi} \phi_0 (l^\xi - 1)$$

$$\phi_1 = l^{\xi_c} l^{-\xi} - l^{-\xi} \phi_0 l^{\xi_c} + l^{-\xi} \phi_0 + \phi_0 - l^{-\xi} \phi_0$$

$$\phi_1 = \phi_0 - (\phi_0 - 1) l^{(\xi_c - \xi)}$$

(4.15)

ข. กรณี $\xi < \xi_c$, $\phi < 1$, $f(\phi) = \phi$

จากสมการ (4.8)

$$\phi + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} = p(\xi)$$

$$\frac{1}{\phi} = c(\tau) l^{-\int_0^\xi p(\beta) d\beta} + l^{-\int_0^\xi p(\beta) d\beta} \int_0^\xi \int_0^\eta p(\beta) d\beta d\eta$$

(4.16)

$$\text{ที่ } \xi = \xi_c \quad \phi = 1$$

$$1 = c(\tau) l^{-\int_0^{\xi_c} p(\beta) d\beta} + l^{-\int_0^{\xi_c} p(\beta) d\beta} \int_0^{\xi_c} \int_0^\eta p(\beta) d\beta d\eta$$

$$C(\tau) = \frac{1 - e^{-\int_0^{\xi} c p(\beta) d\beta} \int_0^{\xi} \int_0^{\eta} p(\beta) d\beta d\eta}{\int_0^{\xi} p(\beta) d\beta}$$

$$C(\tau) = e^{-\int_0^{\xi} p(\beta) d\beta} \int_0^{\xi} \int_0^{\eta} p(\beta) d\beta d\eta$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\phi} &= \frac{1}{\phi_2} = e^{-\int_0^{\xi} p(\beta) d\beta} \int_0^{\xi} c p(\beta) d\beta - e^{-\int_0^{\xi} p(\beta) d\beta} \int_0^{\xi} \int_0^{\eta} p(\beta) d\beta d\eta \\ &\quad + e^{-\int_0^{\xi} p(\beta) d\beta} \int_0^{\xi} \int_0^{\eta} p(\beta) d\beta d\eta \end{aligned} \quad (4.17)$$

ในกรณีที่วัสดุมีความชื้นแรกเริ่มสม่ำเสมอ = ϕ_0

แทนค่า $p(\eta) = \phi_0$ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{\phi_2} &= e^{-\phi_0 \xi} \int_0^{\xi} \phi_0 d\beta - \frac{e^{-\phi_0 \xi} (\phi_0 \xi - 1)}{\phi_0} + \frac{e^{-\phi_0 \xi} (\phi_0 \xi - 1)}{\phi_0} \\ \frac{\phi_0}{\phi_2} &= \phi_0 e^{-\phi_0 \xi} \int_0^{\xi} \phi_0 d\beta - e^{-\phi_0 \xi} (\phi_0 \xi - 1) + e^{-\phi_0 \xi} (\phi_0 \xi - 1) \\ \frac{\phi_0}{\phi_2} &= \phi_0 e^{-\phi_0 \xi} (\xi - \xi) - e^{-\phi_0 \xi} (\xi - \xi) + e^{-\phi_0 \xi} + 1 - e^{-\phi_0 \xi} \\ \frac{\phi_0}{\phi_2} &= e^{-\phi_0 \xi} (\xi - \xi) (\phi_0 - 1) + 1 \\ \phi_2 &= \frac{\phi_0}{(\phi_0 - 1) e^{-\phi_0 \xi} (\xi - \xi) + 1} \end{aligned} \quad (4.18)$$

จากสมการ (4.15) และ (4.18)

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial \tau} = -(\pi_0 / \phi_0) (\phi_0 - 1 + \lambda^{-\phi_0} \xi_c)$$

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial \tau} = \frac{-\pi_0 \phi_0 \lambda^{\phi_0} (\xi_c - \xi) (\phi_0 - 1 + \lambda^{-\phi_0} \xi_c)}{\left\{ (\phi_0 - 1) \lambda^{\phi_0} (\xi_c - \xi) + 1 \right\}^2}$$

$$\omega = \frac{1}{\xi_L} \left\{ \int_0^{\xi_c} \phi_2 d\xi + \int_{\xi_c}^{\xi_L} \phi_1 d\xi \right\}$$

$$\omega = \frac{1}{\xi_L} \left\{ \ln \frac{\phi_0}{1 + (\phi_0 - 1) \lambda^{\phi_0} \xi_c} + \phi_0 \xi_L - (\phi_0 - 1) (1 - \lambda^{(\xi_c - \xi_L)}) \right\}$$

(4.19)

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{1}{\xi_L} \left\{ \int_0^{\xi_c} \frac{\partial \phi_2}{\partial \tau} d\xi + \int_{\xi_c}^{\xi_L} \frac{\partial \phi_1}{\partial \tau} d\xi \right\}$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{\pi_0}{\xi_L \phi_0} (\phi_0 - 1 + \lambda^{-\phi_0} \xi_c) \left\{ \lambda^{(\xi_c - \xi_L)} - 1 + \frac{1 - \lambda^{\phi_0} \xi_c}{(\phi_0 - 1) \lambda^{\phi_0} \xi_c + 1} \right\}$$

(4.20)

ค. $\xi_c > \xi_L$, $\phi < 1$, $f(\phi) = \phi$

ในกรณีนี้ สมการที่ใช้ในการคำนวณการกระจายความชื้นคือ (4.18) อนึ่ง

$$\omega = \frac{1}{\xi_L} \int_0^{\xi_L} \phi_2 d\xi$$

$$\omega = \frac{1}{\xi_L} \left\{ \phi_0 \xi_L + \ln \frac{1 + (\phi_0 - 1) \lambda^{\phi_0 (\xi_c - \xi_L)}}{1 + (\phi_0 - 1) \lambda^{\phi_0 \xi_c}} \right\} \quad (4.21)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{1}{\xi_L} \int_0^{\xi_L} \frac{\partial \phi_2}{\partial \tau} d\xi = \frac{1}{\xi_L} \frac{\lambda^{-\phi_0 \xi_L} - 1}{1 + (\phi_0 - 1) \lambda^{\phi_0 (\xi_c - \xi_L)}}$$

(4.22)

ความสัมพันธ์ระหว่าง ξ_c กับ τ

ในกรณีที่ว่าสควมีความชื้นแรกเริ่มสม่ำเสมอเป็น ϕ_0

จากสมการ (4.8)

$$\phi_0 + \frac{1}{f(\phi)} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} = p(\xi) = \phi_0$$

$$\int_1^\phi \frac{d\phi}{f(\phi) (\phi_0 - \phi)} = \int_c^\xi d\xi$$

$$\int_1^\phi \frac{d\phi}{f(\phi) (\phi_0 - \phi)} = \xi - \xi_c$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \int_1^\phi \frac{d\phi}{f(\phi) (\phi_0 - \phi)} \right\} = \frac{\partial \xi}{\partial \tau} - \frac{\partial \xi_c}{\partial \tau}$$

$$\int_1^\phi \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \frac{d\phi}{f(\phi) (\phi_0 - \phi)} \right\} = \frac{-\partial \xi_c}{\partial \tau}$$

$$\int_1^\phi d \left\{ \frac{\partial \phi / \partial \tau}{f(\phi) (\phi_0 - \phi)} \right\} = \frac{-\partial \xi_c}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial \phi / \partial \tau}{f(\phi) (\phi_0 - \phi)} \Big|_1^\phi = \frac{-\partial \xi_c}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} \frac{1}{f(\phi) (\phi_0 - \phi)} - 0 = \frac{-\partial \xi_c}{\partial \tau}$$

$$\frac{\eta}{\phi_0 - \phi} = \frac{\partial \xi_c}{\partial \tau}$$

$$\eta = (\phi_0 - \phi) \frac{\partial \xi_c}{\partial \tau} \quad (4.23)$$

ที่ $\xi = 0, \eta = \eta_0$

และที่ $\xi = 0, \phi = \phi(0, \tau)$

$$\frac{d\xi_c}{\partial \tau} = \frac{\eta_0}{\{\phi_0 - \phi(0, \tau)\}} \quad (4.24)$$

จากสมการ (4.18)

$$\phi_2 = \frac{\phi_0}{(\phi_0 - 1) \phi_0 (\xi_c - \xi) + 1}$$

ที่ $\xi = 0, \phi_2 = \phi_2(0, \tau)$

$$\phi_2(o, \tau) = \frac{\phi_o}{(\phi_o - 1)l^{\phi_o \xi_c} + 1}$$

แทนลงในสมการ(4.24)

$$\frac{d\xi_c}{d\tau} = \frac{\pi_o}{\phi_o - \frac{\phi_o}{(\phi_o - 1)l^{\phi_o \xi_c} + 1}}$$

$$\frac{d\xi_c}{d\tau} = \frac{\pi_o}{\phi_o} (\phi_o - 1 + l^{-\phi_o \xi_c})$$

$$\frac{\phi_o(\phi_o - 1)}{\phi_o - 1 + l^{-\phi_o \xi_c}} d\xi_c = \pi_o d\tau$$

$$\phi_o(\phi_o - 1) \int_0^{\xi_c} \frac{1}{\phi_o - 1 + l^{-\phi_o \xi_c}} d\xi_c = \pi_o \int_{\tau_c}^{\tau} d\tau$$

$$- \frac{\phi_o(\phi_o - 1)}{\phi_o(\phi_o - 1)} \left\{ -\phi_o \xi_c - \ln(\phi_o - 1 + l^{-\phi_o \xi_c}) \right\} \Big|_0^{\xi_c} = \pi_o(\tau - \tau_c)$$

$$\xi_c = \frac{1}{\phi_o} \ln \left\{ (\phi_o l^{\pi_o(\tau - \tau_c)} - 1) / (\phi_o - 1) \right\} \quad (4.25)$$

4.2.2 กรณีที่วัสดุมีความขึ้นแรก เริ่มในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

ในกรณีนี้ $f(\phi) = \phi$, $\phi < 1$

จากสมการ (4.9)

$$\phi + \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \frac{1}{f(\phi)} = p(\xi)$$

$$\frac{1}{\phi} = C(\tau) \ell^{-\int_0^{\xi} p(\beta) d\beta} + \ell^{-\int_0^{\xi} p(\beta) d\beta} \int_0^{\xi} \ell^{\int_0^{\eta} p(\beta) d\beta} d\eta$$

$$\xi = 0 \quad \phi = \phi(0, \tau) = \phi_1$$

$$\frac{1}{\phi(0, \tau)} = \frac{1}{\phi_1} = C(\tau) \ell^0 + \ell^0 \cdot 0 = C(\tau)$$

$$C(\tau) = \frac{1}{\phi_1}$$

$$\frac{1}{\phi} = \frac{1}{\phi_1} \ell^{-\int_0^{\xi} p(\beta) d\beta} + \ell^{-\int_0^{\xi} p(\beta) d\beta} \int_0^{\xi} \ell^{\int_0^{\eta} p(\beta) d\beta} d\eta$$

(4.26)

กรณีวิเศษมีความชันแรกเริ่มสม่ำเสมอ = ϕ_0

แทนค่า $p(\eta) = \phi_0$ จะได้

$$\frac{1}{\phi} = \frac{1}{\phi_1} \ell^{-\phi_0 \xi} + \ell^{-\phi_0 \xi} \int_0^{\xi} \ell^{\phi_0 \eta} d\eta$$

$$= \frac{1}{\phi_1} \ell^{-\phi_0 \xi} + \ell^{-\phi_0 \xi} \frac{1}{\phi_0} \ell^{\phi_0 \eta} \Big|_0^{\xi}$$

$$= \frac{1}{\phi_1} \ell^{-\phi_0 \xi} + \ell^{-\phi_0 \xi} \frac{1}{\phi_0} (\ell^{\phi_0 \xi} - 1)$$

$$= \frac{1}{\phi_1} \ell^{-\phi_0 \xi} + \frac{1}{\phi_0} (1 - \ell^{-\phi_0 \xi})$$

$$\frac{1}{\phi} = \frac{\phi_0 - \phi_1 (\ell^{\phi_0 \xi} - 1)}{\phi_0 \phi_1 \ell^{\phi_0 \xi}}$$



$$\phi = \frac{\phi_0 \phi_i l \phi_0 \xi}{\phi_0 \phi_i + l \phi_0 \xi} \quad (4.27)$$

จากสมการ (4.4)

$$\frac{-\partial \phi}{\partial \tau} = \nabla f(\phi) = \nabla \phi$$

$$\text{และ } \nabla = H_w - H_i$$

$$\phi_i(\tau) = \phi(0, \tau)$$

$$\nabla_0(\tau) = \nabla(0, \tau) \quad H_w - H_i = \text{ค่าคงที่}$$

$$\frac{-\partial \phi(0, \tau)}{\partial \tau} = \frac{d\phi_i(\tau)}{d\tau} = \nabla_0(\tau) \phi_i(\tau)$$

$$\frac{d\phi_i}{d\tau} = -\nabla_0 \phi_i$$

$$\phi_i(\tau) = C e^{-\nabla_0 \tau}$$

$$\tau = 0; \quad \phi_i(\tau) = \phi_i(0) = p(0) = \phi_{i0}$$

$$\phi_i(0) = C e^{-\nabla_0(0)} = C = \phi_{i0} \quad (4.28)$$

$$\phi_i(\tau) = \phi_{i0} e^{-\nabla_0 \tau}$$

แทนค่า $\phi_0(\tau)$ ลงใน (4.26)

$$\phi(\xi, \tau) = \frac{\int_0^\xi p(n) dn}{\frac{1}{\phi_{i0}} \left[\frac{\tau}{\tau_0} + \int_0^\xi \int_0^\tau p(\beta) d\beta dn \right]} \quad (4.29)$$

ถ้าวัสดุมีความชื้นแรกสม่ำเสมอ = ϕ_0

แทนค่า $p(n) = \phi_0$ จะได้

$$\phi(\xi, \tau) = \frac{\phi_0 \xi}{\left\{ \frac{\tau}{\tau_0} + (\phi_0 \xi - 1) \right\}} \quad (4.30)$$

เวลาที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม ϕ_{i0} จนกระทั่งเหลือความชื้น ϕ_{if} คำนวณได้จาก (4.28)

$$\phi_{if} = \phi_{i0} e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}$$

$$\tau_f = \frac{1}{\tau_0} \ln \frac{\phi_{i0}}{\phi_{if}} \quad (4.31)$$

$$\omega(\tau) = \frac{1}{\xi} \int_0^{\xi_L} \phi(\xi, \tau) d\xi$$

แทนค่า ϕ จากสมการ (4.27) จะได้

$$\omega(\tau) = \frac{1}{\xi_L} \left\{ \phi_0 \xi_L + \ln \frac{\phi_i}{\phi_0} + \frac{(\phi_0 - \phi_i) \xi_L e^{-\phi_0 \xi_L}}{\phi_0} \right\}$$

แทนค่า $\phi_i = \phi_{i0} e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}$ และ $\phi_{i0} = \phi_0$

$$\omega(\tau) = \frac{1}{\xi_L} \frac{\phi_0 \xi_L + \ln \phi_0 e^{-\eta_0 \tau} + (\phi_0 - \phi_0 e^{-\eta_0 \tau}) e^{-\phi_0 \xi_L}}{\phi_0}$$

(4.32)

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{\eta_0 \phi_0 e^{-\eta_0 \tau} e^{\phi_0 \xi_L}}{\xi_L (\phi_0 - \phi_0 e^{-\eta_0 \tau} + \phi_0 e^{-\eta_0 \tau} e^{\phi_0 \xi_L})} \\ &= \frac{\eta_0}{\xi_L} \frac{e^{-\eta_0 \tau} (1 - e^{\phi_0 \xi_L})}{(1 - e^{-\eta_0 \tau} + e^{-\eta_0 \tau} e^{\phi_0 \xi_L})} \\ &= \frac{\eta_0}{\xi_L} \frac{e^{-\eta_0 \tau} (1 - e^{\phi_0 \xi_L})}{1 - e^{-\eta_0 \tau} (1 - e^{\phi_0 \xi_L})} \end{aligned}$$

(4.33)

4.3 สมมุติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเราสามารถใช่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 4.2

ในการคำนวณการกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ ของชั้นวัสดุ ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุและอัตราการอบแห้งของชั้นวัสดุที่เวลาต่างๆ ได้ นอกจากนั้นแบบจำลองนี้ก็ยังสามารถใช้ร่วมกับวัสดุที่มีอัตราการอบแห้งที่คงที่และที่มีแค่อัตราการอบแห้งที่ความเร็วช้าลง

อย่างไรก็ดีสมมุติฐานของแบบจำลองนี้มีดังนี้

1. ใช้ได้เฉพาะเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน
2. ใช้ได้เฉพาะวัสดุที่มีเส้นลักษณะ เฉพาะของการอบแห้งชั้นบาง เป็นเส้นตรงในช่วง

อัตราช้าลง

3. แบบจำลองนี้ไม่ได้คำนึงถึงความร้อนสัมผัสที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ

แต่คำนึงถึง เฉพาะความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยความชื้นออกจากวัสดุ

บทที่ 5

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองคือ เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.1

ซึ่งมีอุปกรณ์หลักดังนี้คือ

5.1.1 เครื่อง เป่าลม (Blower)

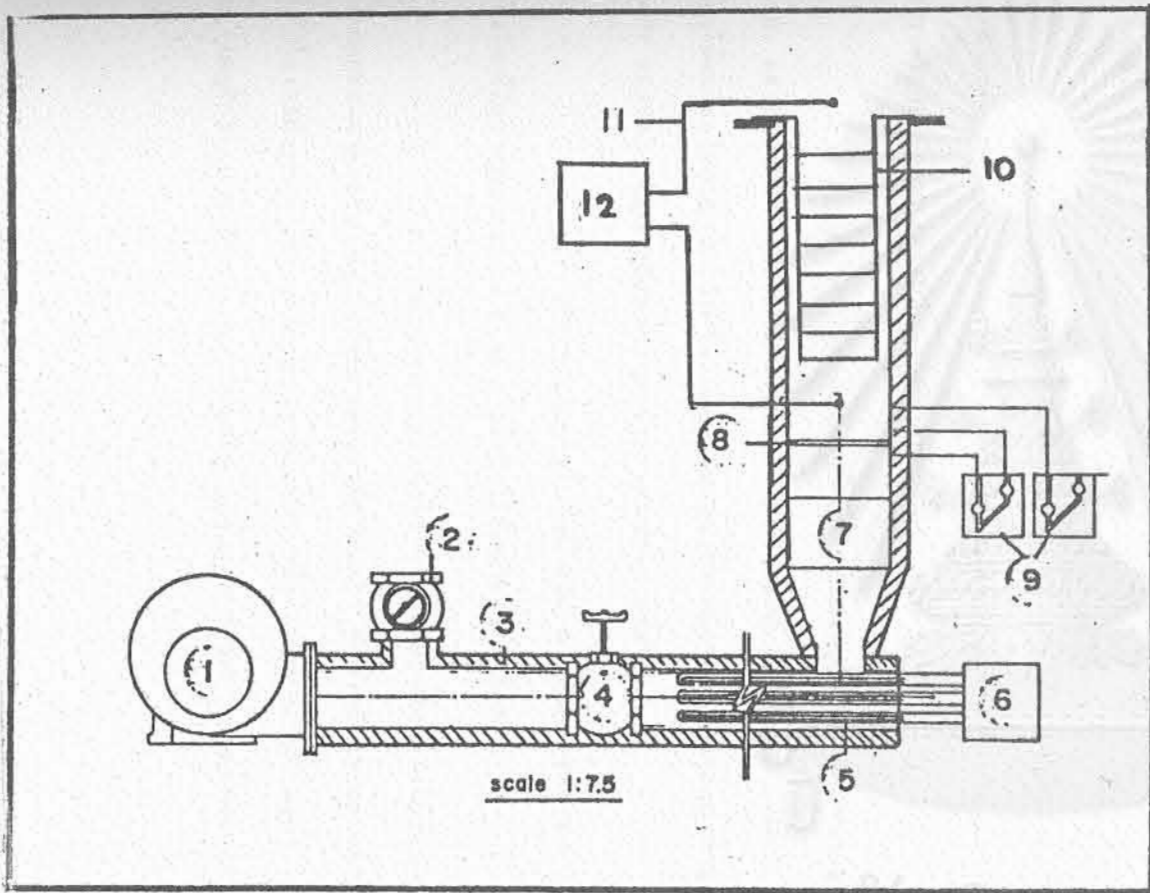
5.1.2 อุปกรณ์ผลิตลมร้อน ซึ่งประกอบด้วยลวดไฟฟ้าขนาด 4.5 กิโลวัตต์ ใช้ไฟ 3 เฟส ควบคุมโดยไตรแอก (Triac)

5.1.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของลมร้อน ซึ่งประกอบด้วยคอปเปอร์-คอนสแตนแตน เทอร์โมคัปเปิล (Copper-constantan thermocouples) สัญญาณไฟฟ้าจาก เทอร์โมคัปเปิล จะถูกส่งไปยัง เครื่องบันทึก (Recorder) และแสดงค่าออกมา เป็นมิลลิโวลต์

5.1.4 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของลมร้อน ซึ่งประกอบด้วยวาล์วหลัก (Main valve) และวาล์วลัดทาง (By-pass valve)

5.1.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมร้อน ซึ่งประกอบด้วยออริฟิสมิเตอร์ (Orifice meter) และวัดความแตกต่างของความดันโดยใช้โมนามิเตอร์น้ำแบบเอียง (Inclined manometer)

5.1.6 อุปกรณ์บรรจุวัสดุอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยภาชนะสแตนเลส (Stainless steel container) ด้านล่างภาชนะติดตาข่ายที่ทำด้วยสแตนเลสเช่นกัน ภาชนะแต่ละใบมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10.5 ซม. และมีความสูง 5 ซม. ภาชนะแต่ละใบสามารถนำมา ซ้อนและประกบติดกันโดยใช้หูเกี่ยวติดที่ด้านข้างของภาชนะ จำนวนภาชนะที่นำมาซ้อนกันจะขึ้น กับความสูงของชั้นวัสดุที่ต้องการ ภาชนะใบที่อยู่ด้านบนสุดจะมีหูหิ้วเพื่อความสะดวกในการยกชั้น วัสดุเข้าและออกจาก เครื่องอบแห้ง



1. BLOWER
2. BY PASS VALVE
3. INSULATOR
4. MAIN VALVE
5. HEATER
6. WATT CONTROLLER
7. GLASS BEADS
8. ORIFIC PLATE
9. INCLINED MANOMETER
10. STAINLESS STEEL CONTAINER
11. THERMOCOUPLES
12. MILLIVOLTS RECORDER

รูปที่ 5.1 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ขั้นตอนและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

5.2.1 วิธีการเตรียมชั้นมันสำปะหลัง

วิธีการเตรียมทำโดยการนำมันสำปะหลังมาปอกเปลือก แล้วนำมาหั่นเป็นสี่เหลี่ยมโดยมีขนาดประมาณ $0.5 \times 0.5 \times 0.3$ ซม.ซม.

5.2.2 ขั้นตอนการอบแห้งวัสดุชั้นบาง

ขั้นตอนการอบแห้งมีดังนี้คือ

1. เดินเครื่องเป่าอากาศ (Blower) ของเครื่องอบแห้ง

2. ปรับความเร็วของลมที่ไหลเข้าเครื่องอบแห้งโดยใช้วาล์ว , วัดความเร็วของลมโดยใช้ออร์ทิสมิเตอร์วัดความแตกต่างของความดันโดยใช้มาโนมิเตอร์แบบเอียงปรับให้ระดับความแตกต่างของน้ำในมาโนมิเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ และรักษาระดับนั้นไว้ให้คงที่

3. เปิดสวิตซ์ไฟให้กับหลอดไฟฟ้า เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของลมที่มาจาก เครื่องเป่าลม ควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนโดยไทรแอก วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล และบันทึกค่าที่วัดได้ลงในเครื่องบันทึกอย่างต่อเนื่อง ตลอดเวลาทดลอง

4. ลมร้อนจะไหลเข้าไปในชั้นบรรจุลูกแก้ว ซึ่งมีความสูงประมาณ 1.5 ซม. และมีหน้าที่ทำให้ลมร้อนมีลักษณะการไหลสม่ำเสมอ (Uniform flow) ในช่วงแรกจะปล่อยให้ลมร้อนไหลเข้าไปในเครื่อง เป่า เป็น เวลาช่วงหนึ่งจนกระทั่งระบบ เข้าสู่ภาวะคงที่ (Steady state) ที่อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนตามต้องการ

5. นำภาชนะบรรจุไปยังน้ำหนัก จากนั้นบรรจุวัสดุลงไปให้เต็มภาชนะจะได้ชั้นวัสดุที่มีความสูงประมาณ 5 ซม. แล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง

6. นำภาชนะหย่อนลงไปเครื่องอบแห้งแล้วเริ่มจับเวลาอบแห้ง น้ำหนักภาชนะออกมาจาก เครื่องอบแห้งที่ทุกช่วงเวลาที่กำหนดไว้ ซึ่งน้ำหนักภาชนะ แล้วหย่อนภาชนะกลับลงไปใน เครื่องอบแห้ง ขณะดึงภาชนะออกมาจาก เครื่องอบแห้งจะบันทึก เวลา , น้ำหนักของภาชนะ, อุณหภูมิกระแสเป่าเป็ยก, อุณหภูมิกระแสเป่าแห้งของอากาศภายในห้องทดลอง

7. ชั้นตอนที่ 6 จะถูกทำซ้ำจากจนกระทั่งวัสดุในภาชนะมีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) นั่นคือ น้ำหนักของภาชนะจะมีค่าคงที่แม้ว่าจะทำการอบแห้งต่อไปอีกหลายชั่วโมง

8. นำวัสดุที่อบแห้งบางส่วนไปอบคั่วในตู้อบที่อุณหภูมิ 85°C ประมาณ 48 ชั่วโมง เพื่อจะหาน้ำหนักวัสดุแห้ง (bone dry solid)

5.2.3 ขั้นตอนการอบแห้งวัสดุขึ้นหนา

5.2.3.1 กรณีของการอบแห้งปกติ (ไม่มีการผสมวัสดุและไม่มีการสลับทิศทางของลมร้อน)

ขั้นตอนการอบแห้งมีดังนี้คือ

1. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 4 ในข้อ 5.2.2

2. นำภาชนะบรรจุไปยังน้ำหนัก จากนั้นบรรจุวัสดุลงไป แล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่งให้มีน้ำหนักของวัสดุ เท่ากันทุก ภาชนะ นำภาชนะที่บรรจุวัสดุแล้วมาวางซ้อนและประกบภาชนะแต่ละใบ เข้าด้วยกันโดยใช้หูเกี่ยวติดคานข้างของภาชนะ

3. นำชั้นภาชนะหย่อนลงในเครื่องอบแห้งแล้ว เริ่มจับเวลาอบแห้ง ยกชั้นภาชนะออกมาจาก เครื่องอบแห้งที่ทุกช่วง เวลาที่กำหนดไว้ แยกชั้นภาชนะออกจากกัน แล้วชั่งภาชนะแต่ละใบ จากนั้นซ้อนและประกบภาชนะ เข้าด้วยกันแล้วหย่อนชั้นภาชนะกลับลงไปในเครื่องอบแห้ง ในตอนที่ดึงชั้นภาชนะออกมาจาก เครื่องอบแห้ง จะบันทึก เวลา น้ำหนักของภาชนะแต่ละใบ อุณหภูมิกระเปาะเปียก อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายในห้องทดลอง

4. ชั้นตอนที่ 3 จะถูกทำซ้ำจากจนกระทั่งวัสดุในภาชนะทุกใบมีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุล นั่นคือน้ำหนักของภาชนะแต่ละใบจะมีค่าคงที่แม้ว่าจะทำการอบแห้งต่อไปอีกหลายชั่วโมง

5. นำวัสดุที่อบแห้งแล้วบางส่วนไปอบคั่วในตู้อบที่อุณหภูมิ 85°C ประมาณ 48 ชั่วโมง เพื่อที่จะหาน้ำหนักของวัสดุแห้ง (bone dry solid)

5.2.3.2 กรณีของการอบแห้งโดยมีการผสมวัสดุเป็นครั้งคราว

1. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 4 ในข้อ 5.2.2

2. นำภาชนะบรรจุไปซังน้ำหนัก จากนั้นบรรจุวัสดุลงไปแล้วนำไปซัง น้ำหนักอีกครั้งหนึ่งให้มีน้ำหนักของวัสดุ เท่ากันทุกๆ ภาชนะ นำภาชนะที่บรรจุวัสดุแล้วมาวางซ้อน และประกบภาชนะแต่ละใบ เข้าด้วยกัน โดยใช้หูเกี่ยวติดด้านข้างของภาชนะ

3. นำชั้นภาชนะออกจาก เครื่องอบแห้ง เมื่อถึง เวลาที่กำหนดไว้ที่จะ ทำการผสมวัสดุ แยกชั้นภาชนะออกจากกันแล้วซังน้ำหนักภาชนะแต่ละใบ เทวัสดุออกจากภาชนะ บรรจุทุกใบลงไปในภาชนะที่ใช้ในการผสมวัสดุ ผสมวัสดุให้เข้ากันอย่างทั่วถึง แล้วบรรจุกลับ เข้าไปในภาชนะบรรจุให้มีน้ำหนักวัสดุ เท่าๆ กันทุกภาชนะ

4. ชั้นตอนที่ 3 จะถูกทำซ้ำๆ ทุกช่วง เวลาที่กำหนดไว้จนกระทั่ง วัสดุในภาชนะทุก ใบมีความชื้น เท่ากับความชื้นสมดุลย์

5. นำวัสดุที่อบแห้งแล้วบางส่วนไปอบต่อในตู้อบที่อุณหภูมิ 85°C ประมาณ 48 ชั่วโมง เพื่อที่จะหาน้ำหนักของวัสดุแห้ง (bone dry solid)

5.2.3.3 กรณีอบแห้งโดยมีการสลับทิศทางลมร้อน

1. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 4 ในข้อ 5.2.2

2. นำภาชนะบรรจุไปซังน้ำหนัก จากนั้นบรรจุวัสดุลงไป แล้วนำไปซัง น้ำหนักอีกครั้งหนึ่งให้มีน้ำหนักของวัสดุ เท่ากันทุกๆ ภาชนะ นำภาชนะที่บรรจุวัสดุแล้วมาวางซ้อน และประกบภาชนะแต่ละใบ เข้าด้วยกัน โดยใช้หูเกี่ยวติดด้านข้าง

3. ดึงชั้นภาชนะออกจาก เครื่องอบแห้ง เมื่อถึง เวลาที่กำหนดไว้ แยก ชั้นภาชนะออกจากกันแล้วซังน้ำหนักภาชนะแต่ละใบ ซ้อนและประกบภาชนะ เข้าด้วยกันในลักษณะ ตรงข้ามกับที่ เคยซ้อนก่อนหน้าเช่น ในกรณีที่มีภาชนะ 8 ใบ ถ้าลำดับในการซ้อนภาชนะก่อนหน้า นี้มีลำดับ เป็น 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 การซ้อนภาชนะ เพื่อจะนำกลับ เข้าไปใน เครื่องอบ แห้งจะมีลำดับ เป็น 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 อนึ่ง ในครั้งต่อไปลำดับของการซ้อนภาชนะ จะ เป็น 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เป็นต้น

4. ชั้นตอนที่ 3 จะถูกทำซ้ำๆ ที่ทุกช่วง เวลาที่กำหนดไว้ จนกระทั่งวัสดุ ในภาชนะทุก ใบมีความชื้น เท่ากับความชื้นสมดุลย์

5. นำวัสดุที่อบแห้งแล้วบางส่วน ไปอบต่อในตู้อบที่อุณหภูมิ 85°C ประมาณ 48 ชั่วโมง เพื่อที่จะหาน้ำหนักของวัสดุแห้ง (bone dry solid)

อนึ่ง ในการทดลองอบแห้งวัสดุขึ้นบาง ได้ทำการชั่งน้ำหนักทุก ๆ 5 นาที โดยใช้เวลาในการชั่งน้ำหนักครั้งละประมาณ 1 นาที

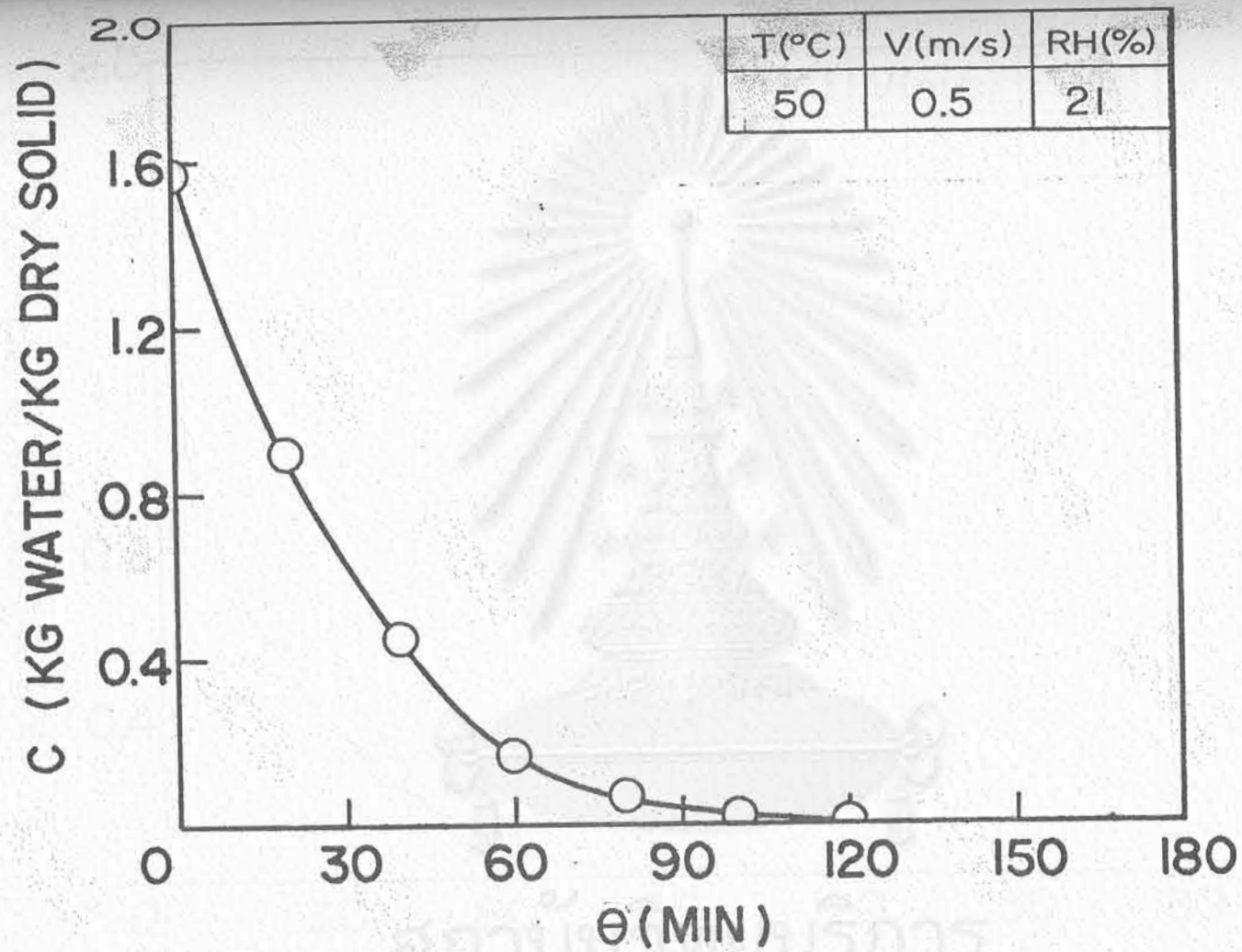
ในการทดลองอบแห้งวัสดุขึ้นหนาในกรณีการอบแห้งแบบปกติ เวลาในการชั่งน้ำหนักชั้นวัสดุแต่ละครั้งจะประมาณ 5 นาที กรณีผสมวัสดุ เป็นครั้งคราวใช้เวลาในการชั่งน้ำหนักและผสมวัสดุครั้งละประมาณ 8 นาที กรณีสลับทิศทางลมร้อน เป็นครั้งคราวใช้เวลาในการชั่งน้ำหนักชั้นวัสดุครั้งละประมาณ 5 นาที

ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่แสดงไว้ในผลการทดลอง เป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ เฉลี่ยตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดลองแต่ละครั้ง จากผลการทดลองส่วนใหญ่พบว่า ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่วงที่ทำการทดลองแต่ละครั้ง เปลี่ยนแปลงไม่มากและแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 1\%$

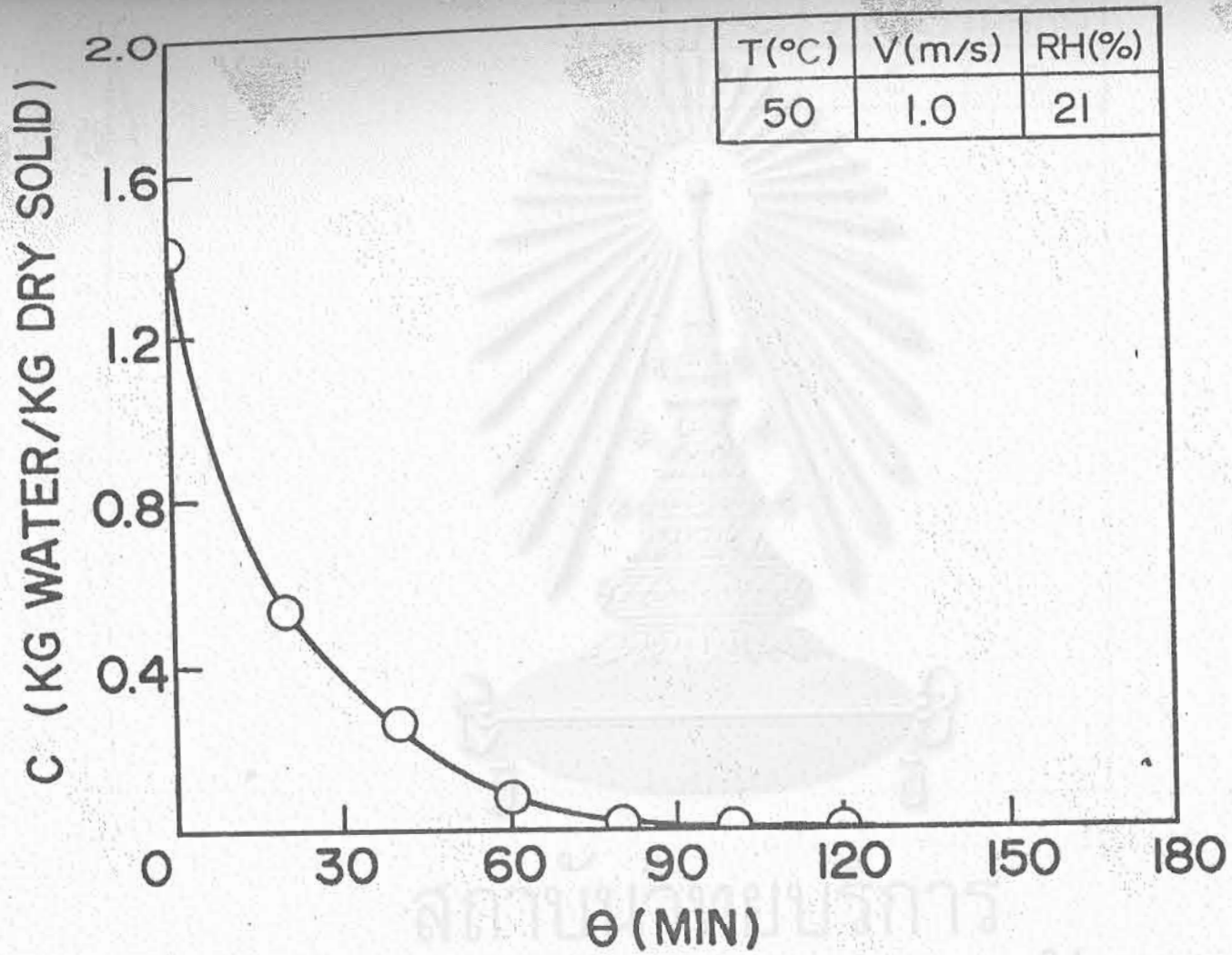
5.3 ผลการทดลองอบแห้งขึ้นมันสำปะหลัง

รูปที่ 5.2 - 5.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของขึ้นมันสำปะหลัง (หนา 5 ซม.) กับเวลาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการทดลอง (ความเร็วลม , อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางเข้าของลมร้อน) ต่างๆ ส่วนรูปที่ 5.7 - 5.9 แสดงการกระจายความชื้นภายในชั้นมันสำปะหลัง (หนา 40 ซม.) สำหรับกรณีปกติ (ไม่มีการสลับทิศทางของลมร้อนหรือผสมวัสดุ เป็นครั้งคราว) กรณีผสมวัสดุอบแห้งทุกๆ 150 นาที และกรณีที่สลับทิศทางของลมร้อนทุกๆ 30 นาที ตามลำดับ

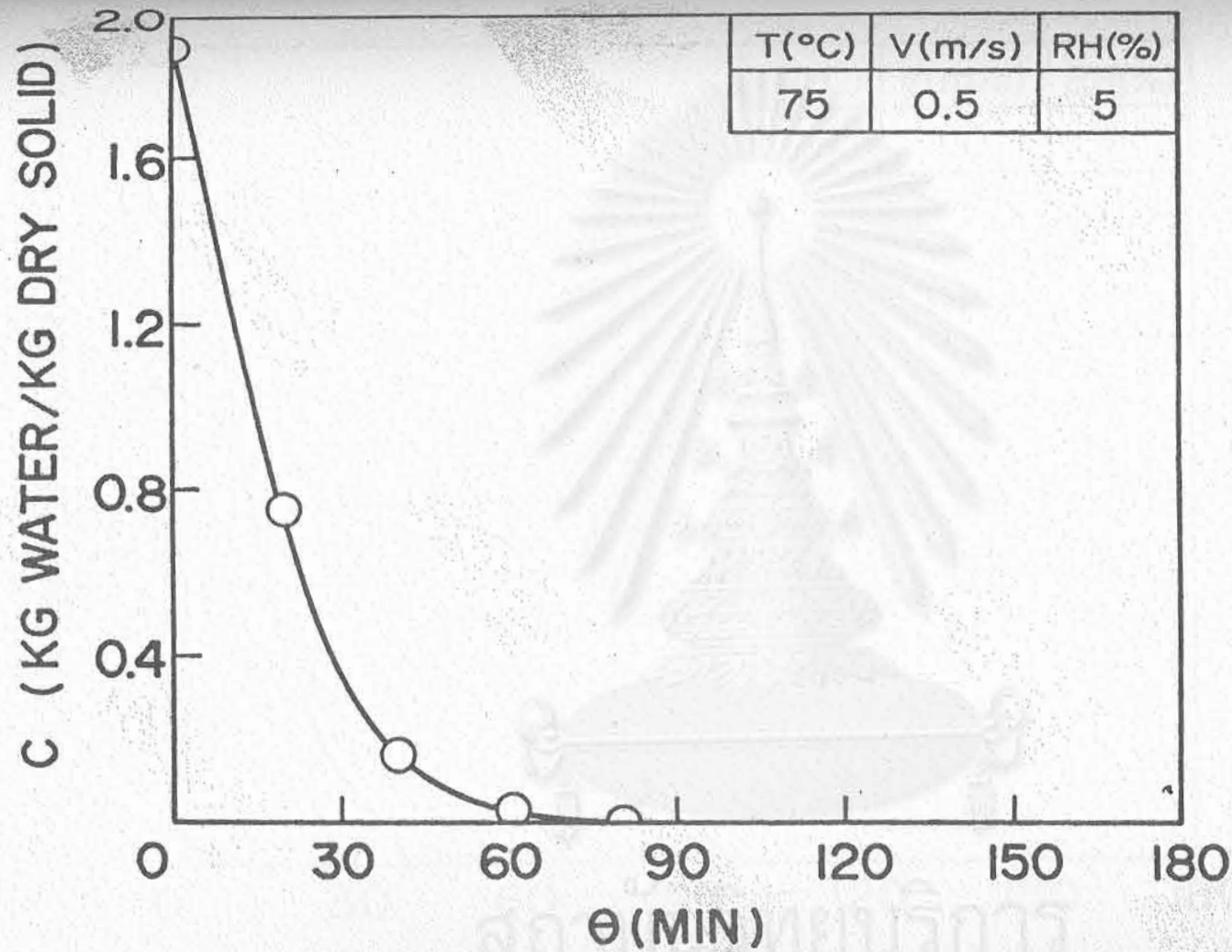
รูปที่ 5.2 - 5.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาของการอบแห้งที่อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลมต่างๆ กันสำหรับขึ้นมันสำปะหลังหนา 5 ซม. เส้นกราฟในรูปที่ 5.2 - 5.6 สามารถใช้คำนวณหาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งได้โดยการอ่านค่าของความชื้น ซึ่งก็คืออัตราการอบแห้งของวัสดุที่จุดต่างๆ ของเส้นกราฟ เมื่อนำค่าของอัตราการอบแห้งมาลัดกับความชื้นก็จะได้เส้นกราฟลักษณะเฉพาะของการอบแห้งดังในรูปที่ 5.10 -



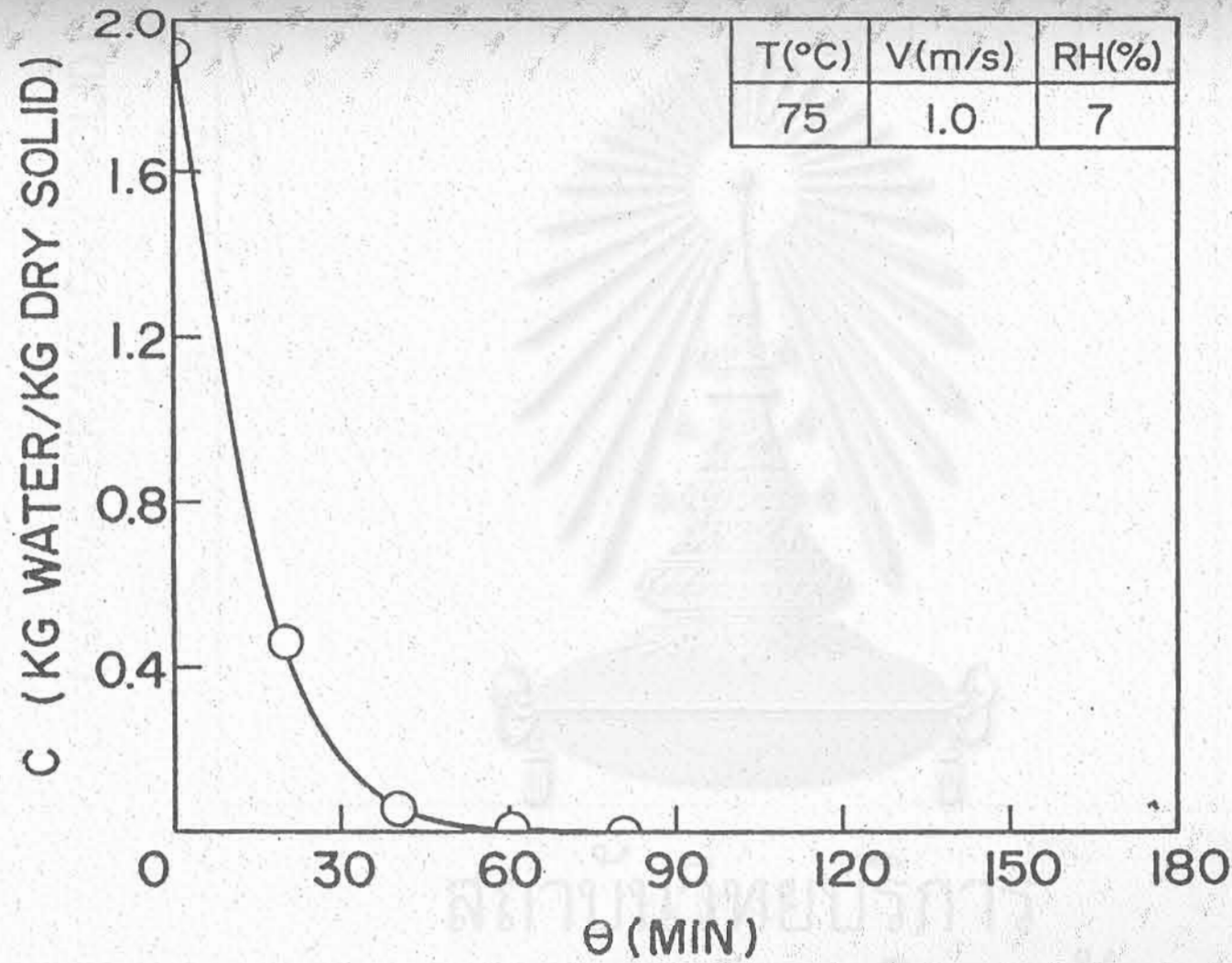
รูปที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง (หนา 5 ซม.)



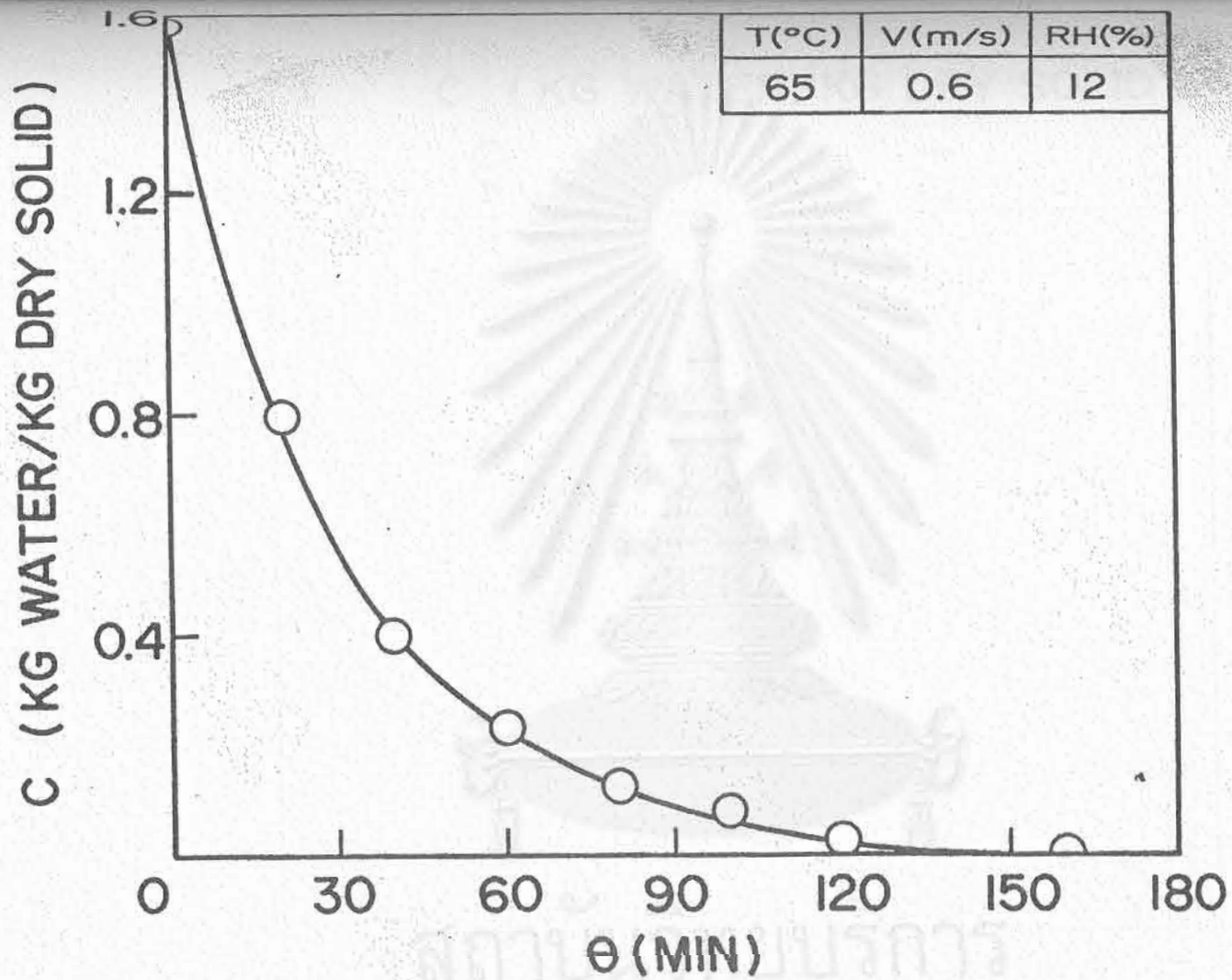
รูปที่ 5.3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง (หนา 5 ซม.)



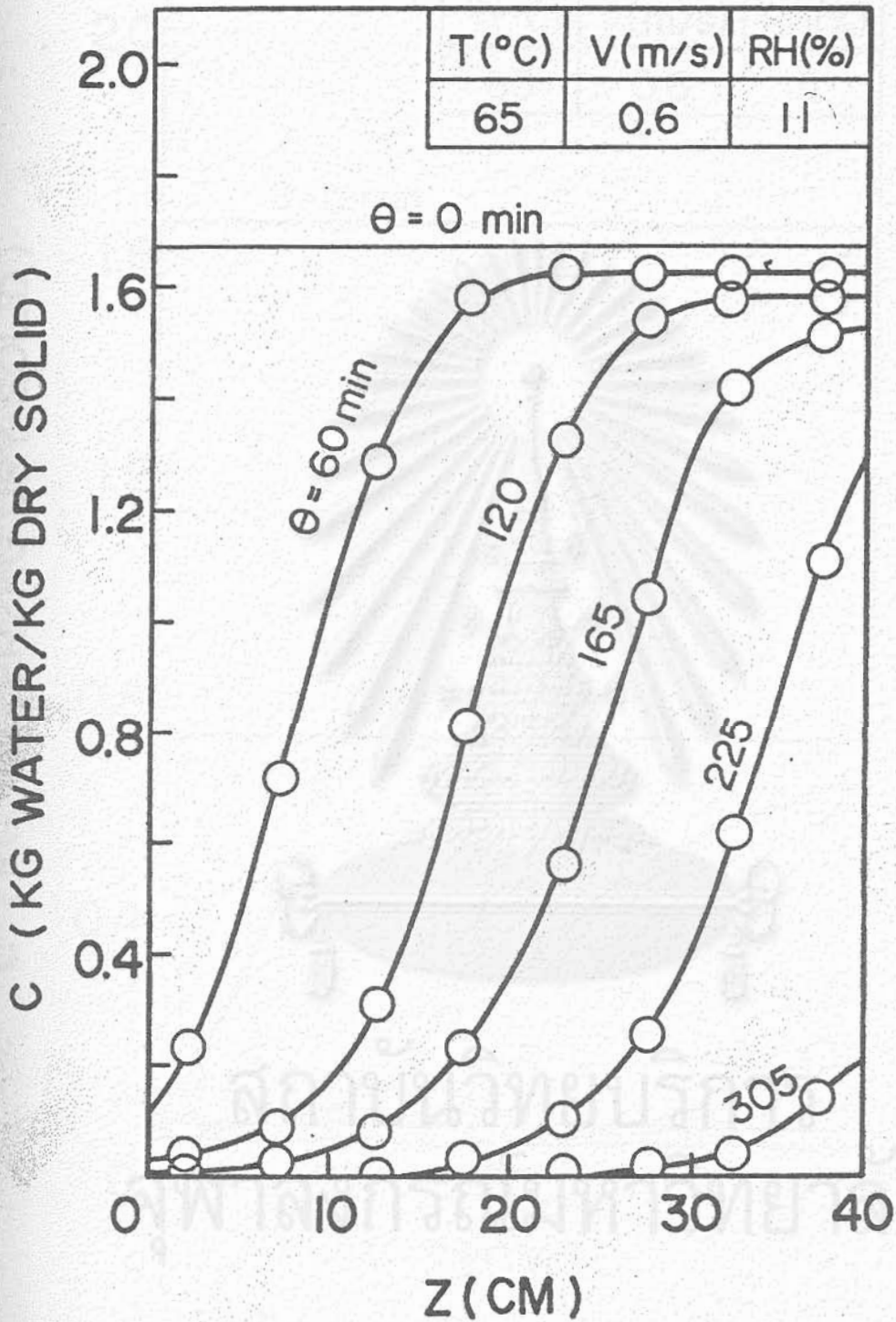
รูปที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาสำหรับการอบแห้งชิ้นมันสำปะหลัง (หนา 5 ซม.)



รูปที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาสำหรับการอบแห้งชิ้นมันสำปะหลัง (หนา 5 ซม.)

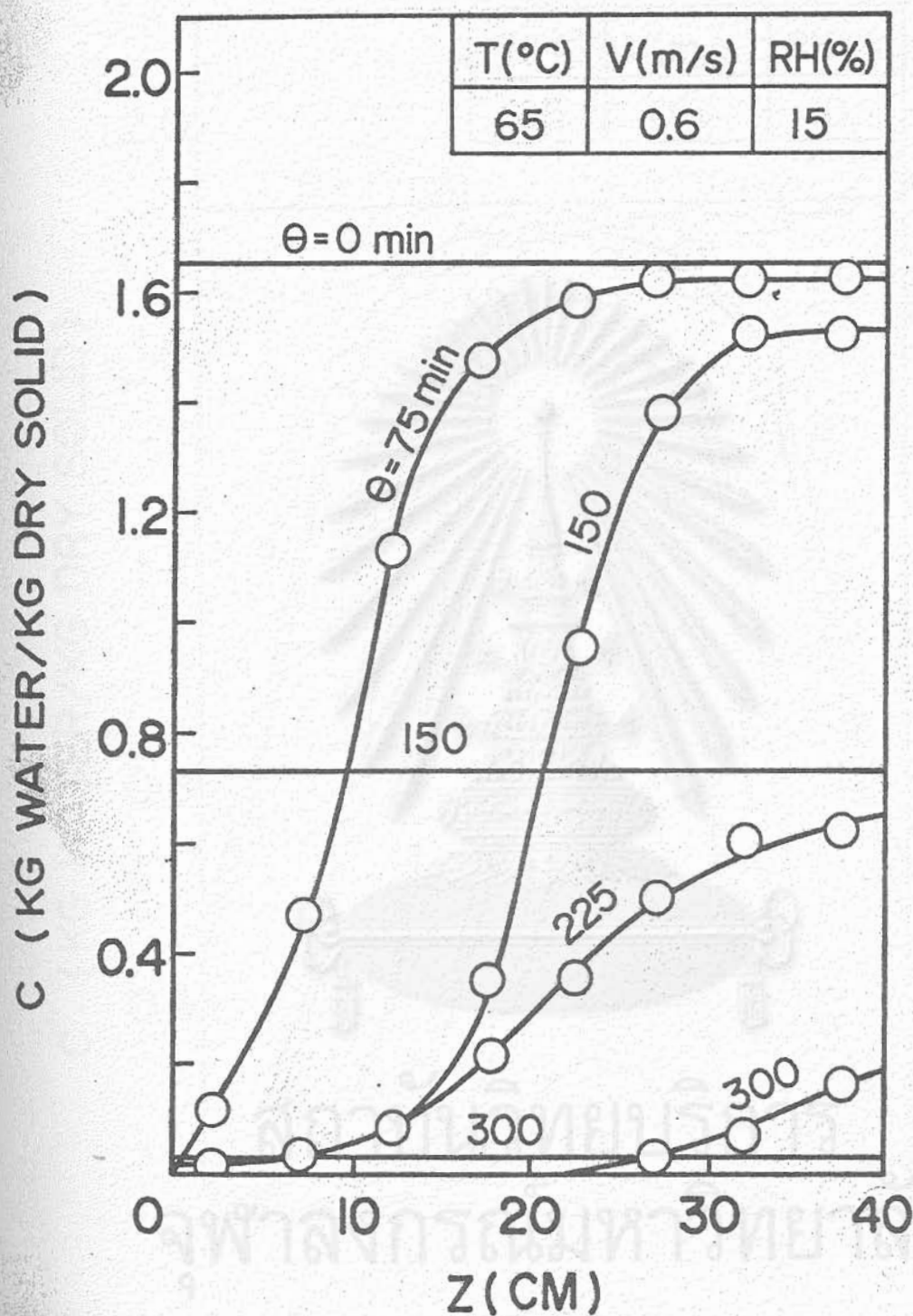


รูปที่ 5.6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง (หนา 5 ซม.)

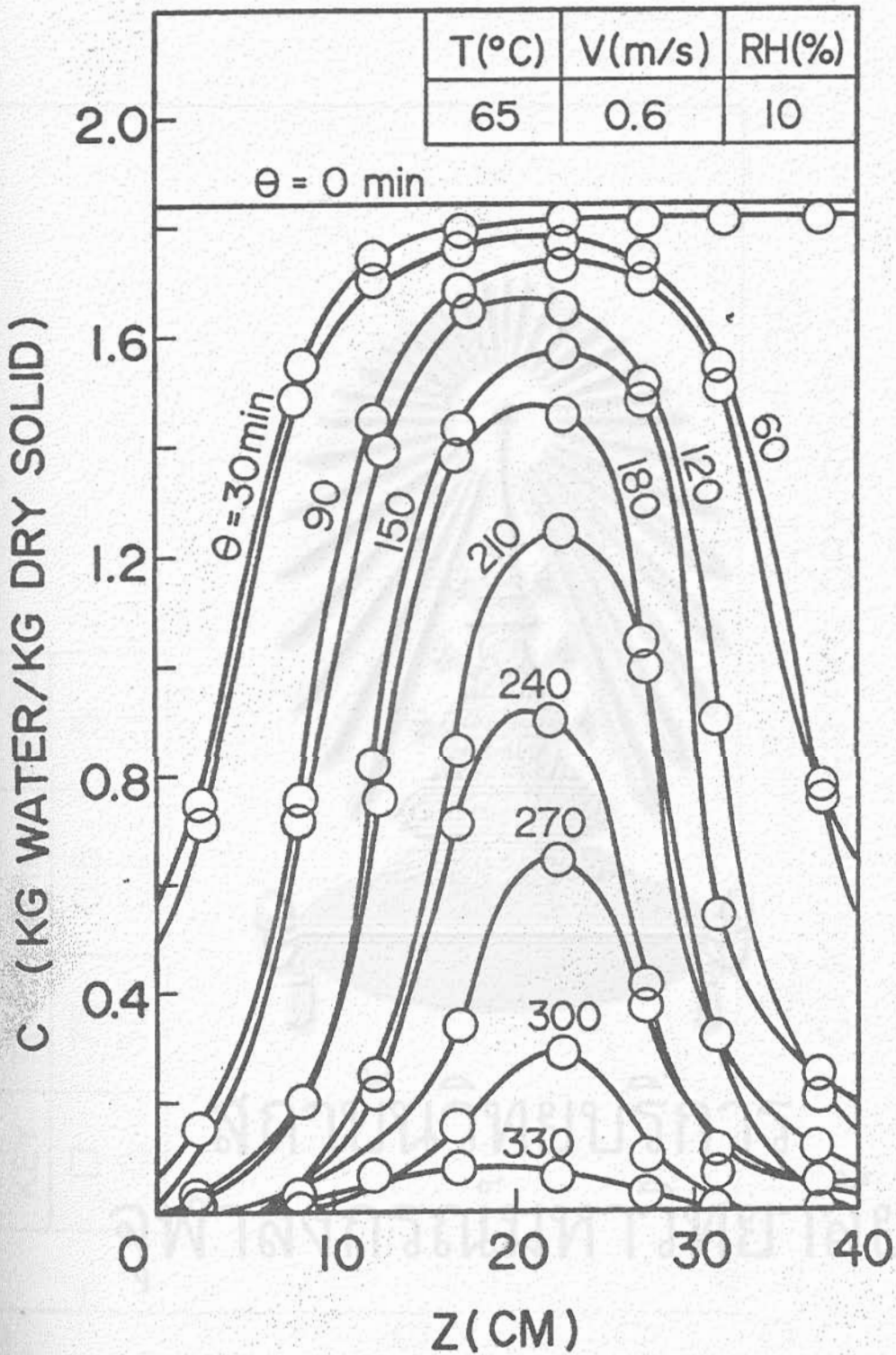


รูปที่ 5.7 การกระจายความชื้นภายในที่วัสดุกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง

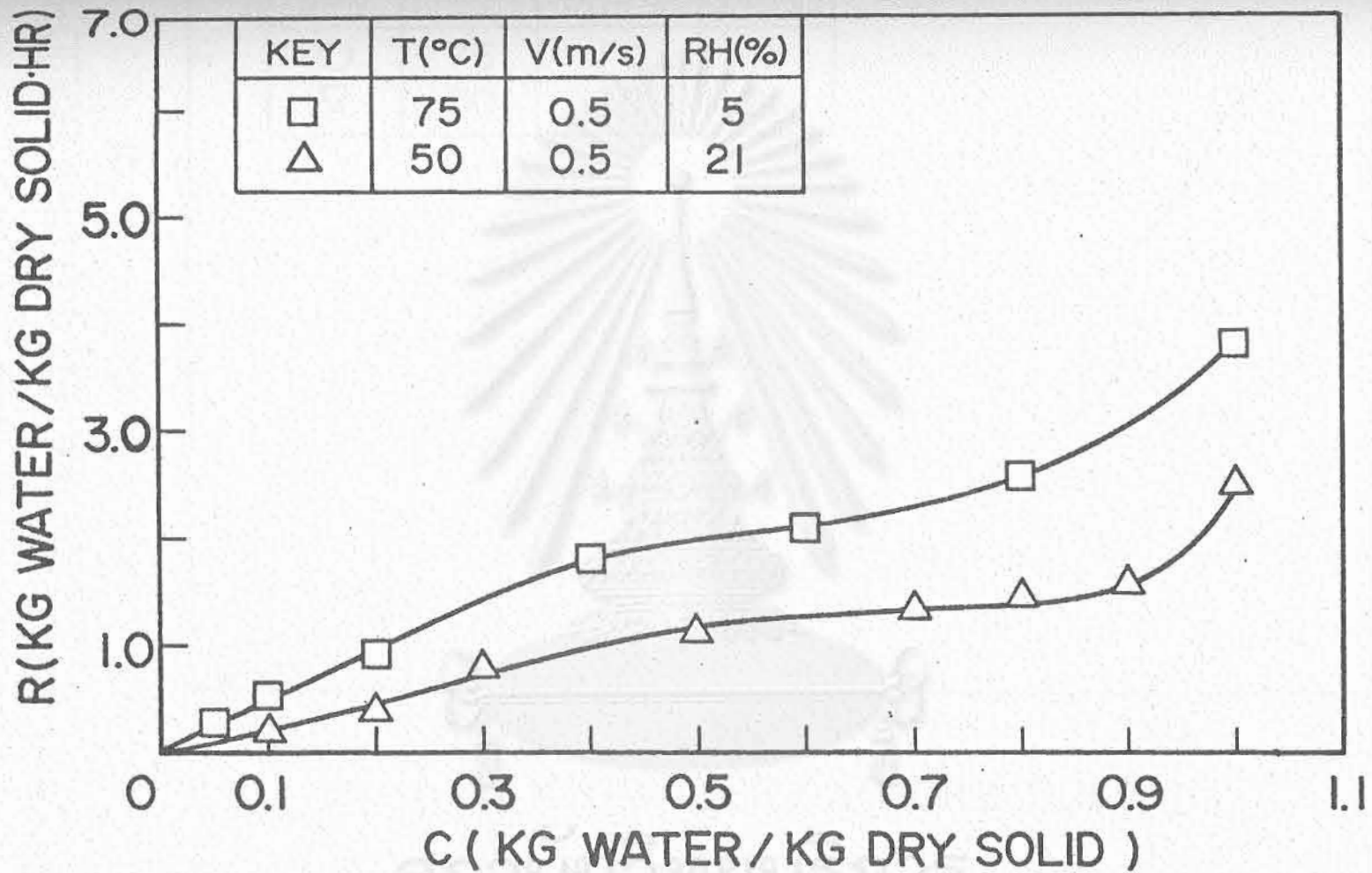
หนา 40 ซม. (กรณีปกติ)



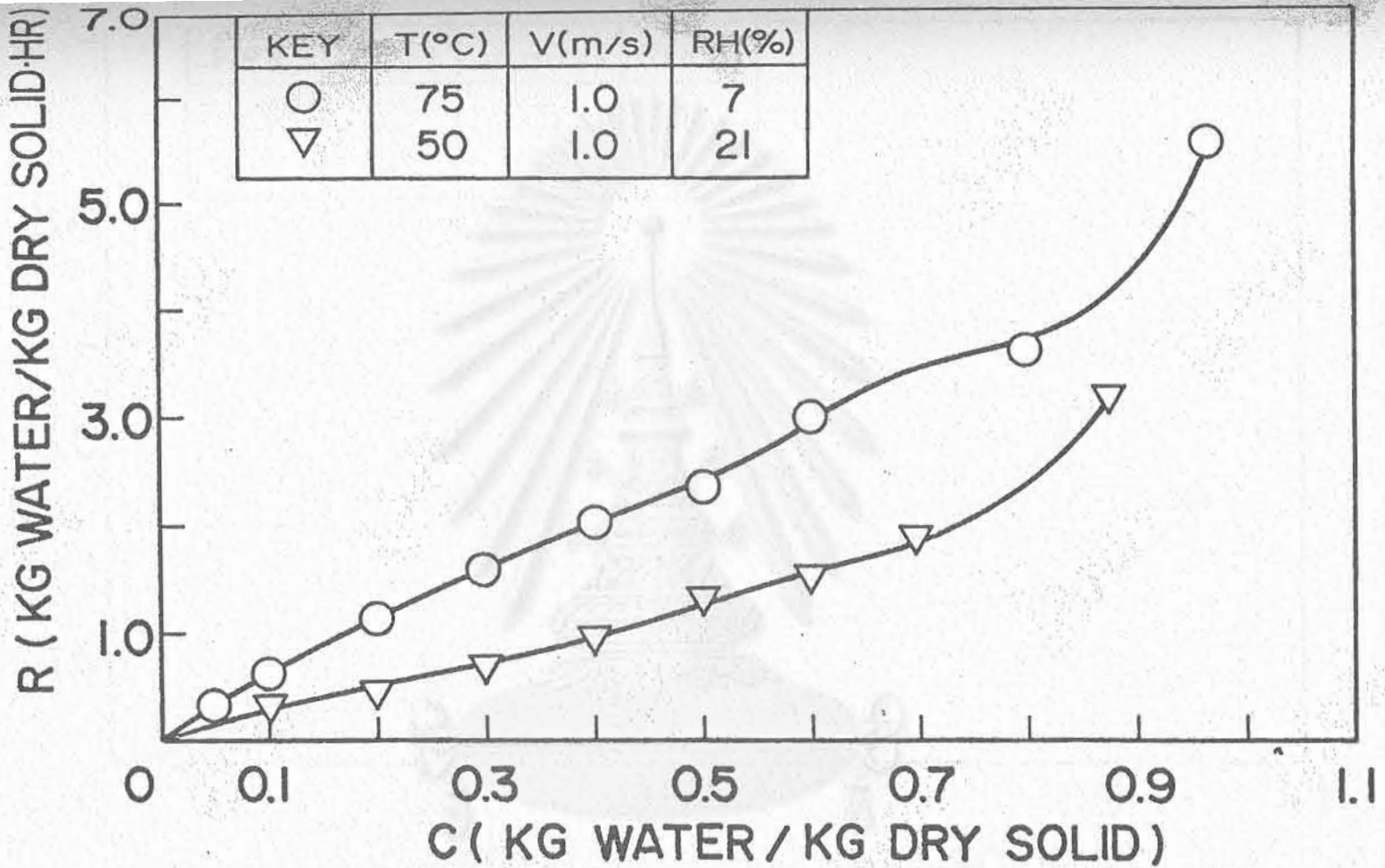
รูปที่ 5.8 การกระจายความชื้นภายในชั้นวัสดุกับเวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง
หนา 40 ซม. (กรณีผสมวัสดุทุก ๆ 150 นาที)



รูปที่ 5.9 การกระจายความชื้นภายในชั้นวัสดุกับเวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง
หนา 40 ซม. (กรณีสลับทิศทางการลมร้อนทุกๆ 30 นาที)

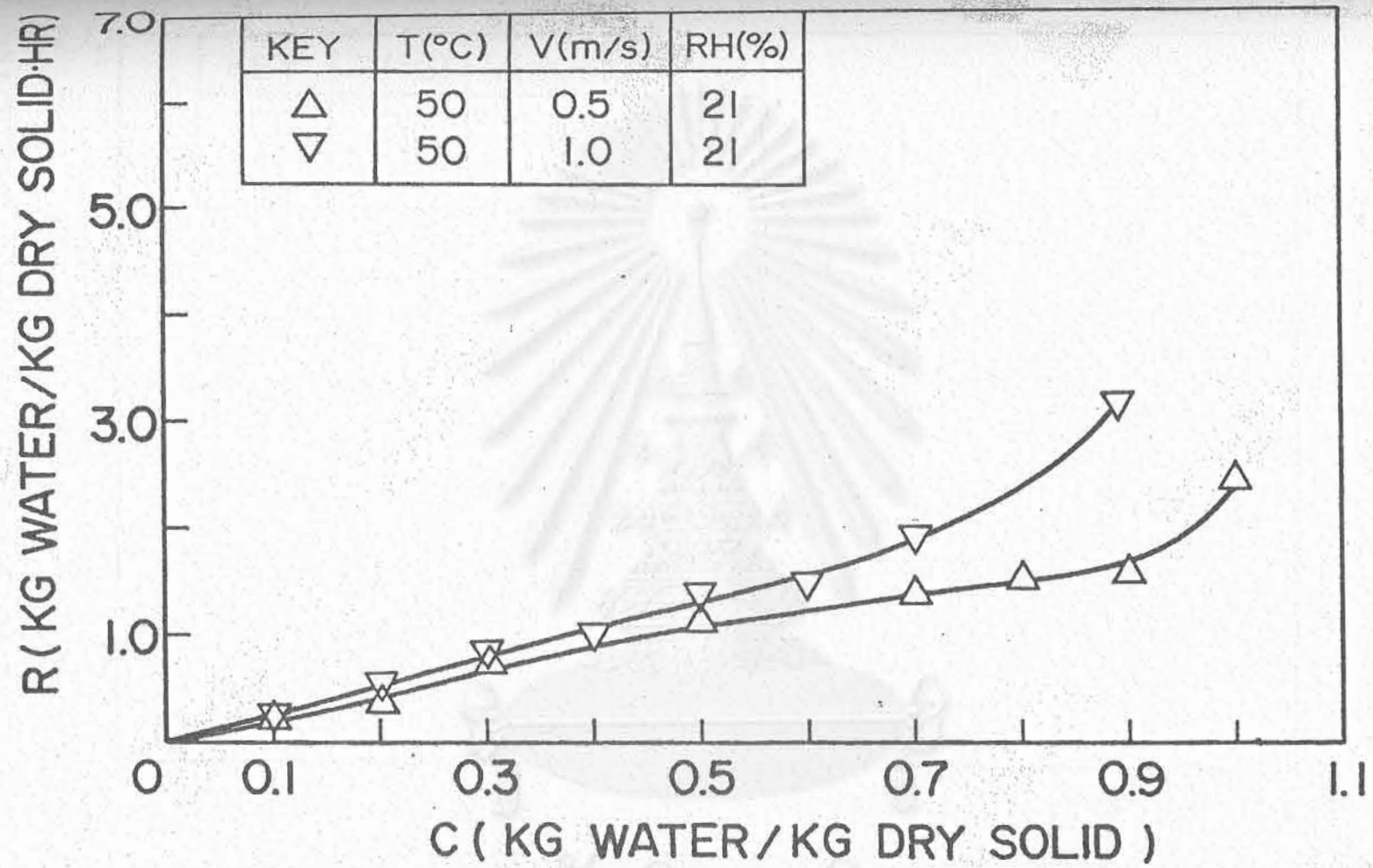


รูปที่ 5.10 อัตราการอบแห้งกับความชื้นในมันสำปะหลังสำหรับลมร้อนอุณหภูมิ 50^oซ และ 70^oซ



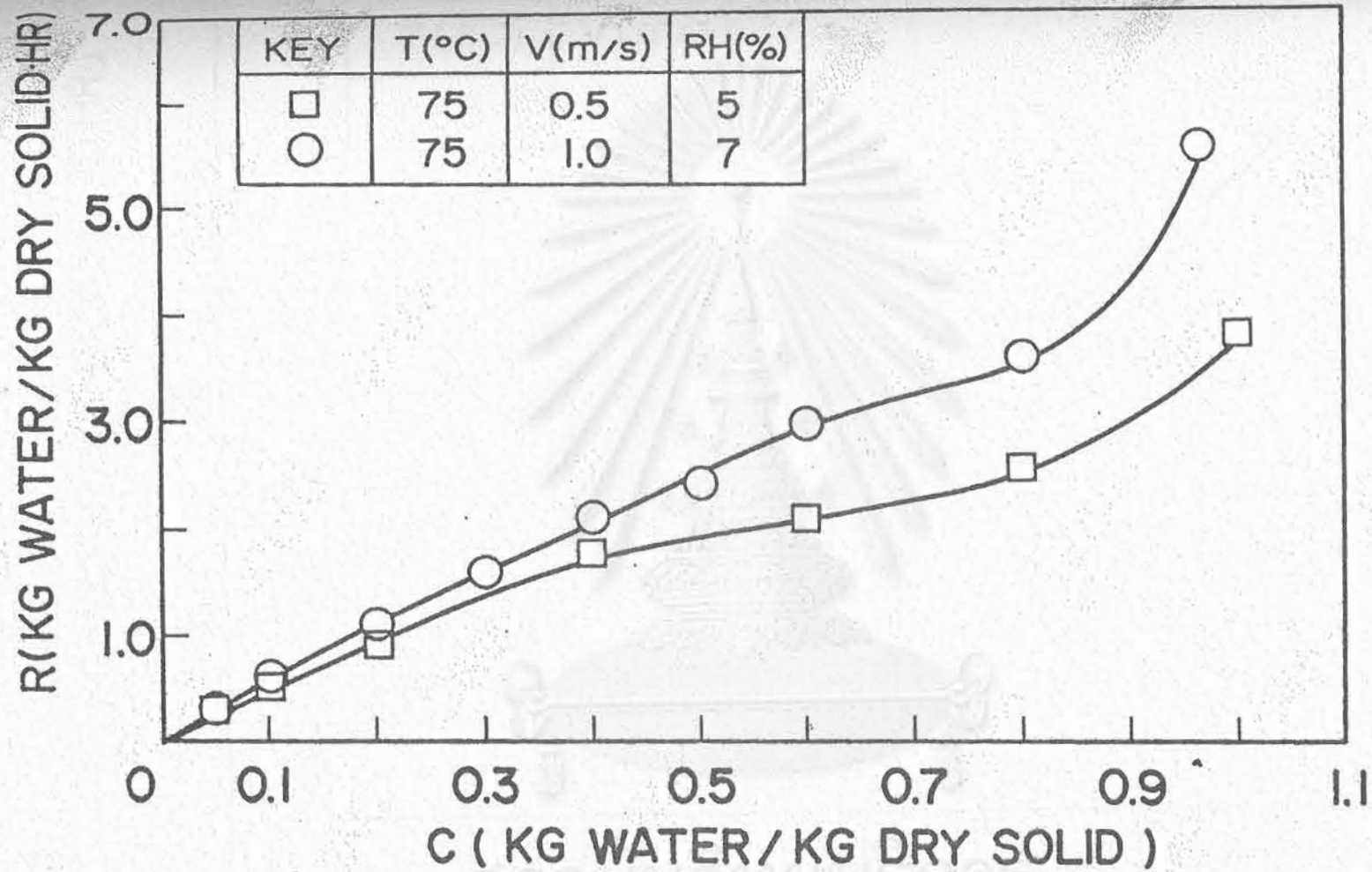
รูปที่ 5.11 อัตราการอบแห้งกับความชื้นในมันสำปะหลังสำหรับลมร้อน 50^oซ และ 70^oซ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

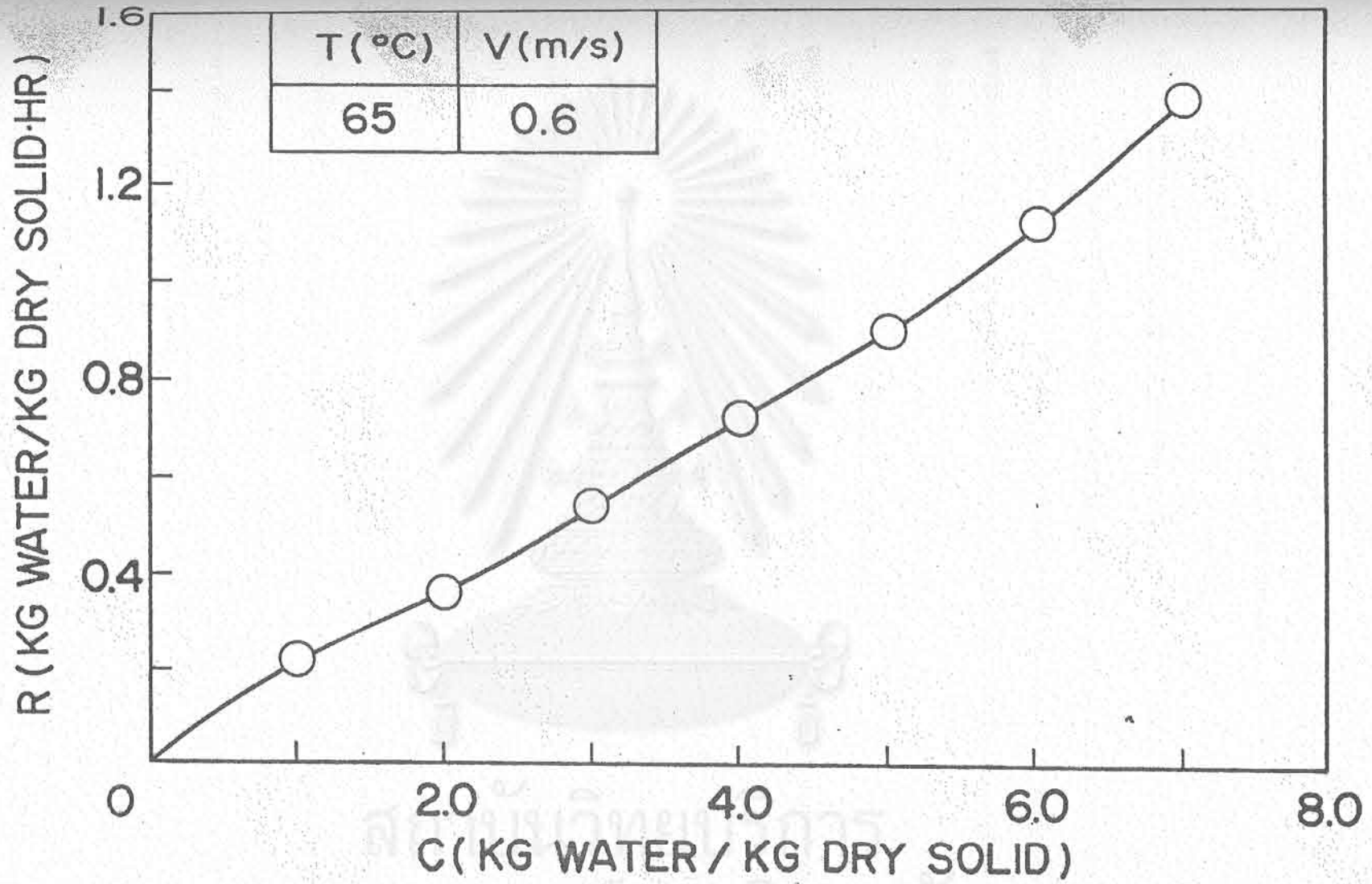


รูปที่ 5.12 อัตราการอบแห้งกับความชื้นในมันสำปะหลังสำหรับความเร็วลมต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.13 อัตราการอบแห้งกับความชื้นในมันสำปะหลังสำหรับความเร็วลมต่างๆ



รูปที่ 5.14 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 5 ซม.

บทที่ 6

การวิจารณ์ผลที่ได้จากการทดลอง

6.1 ผลการอบแห้งมันสำปะหลังชิ้นบาง (หนา 5 ซม.)

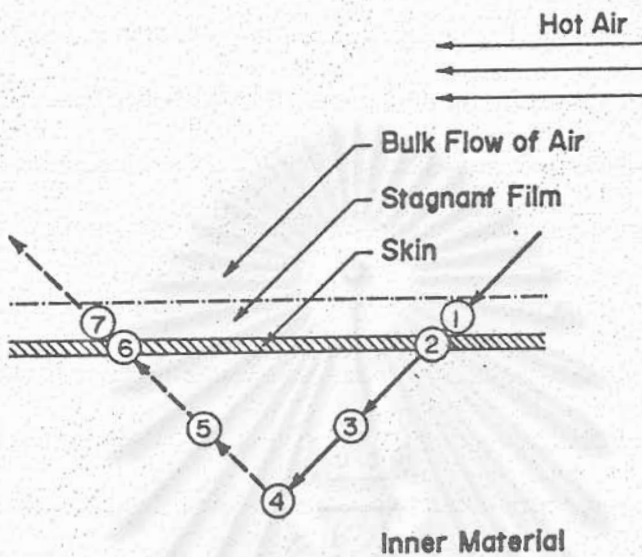
จาก เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งชิ้นมันสำปะหลัง (หนา 5 ซม) พบว่ามันสำปะหลัง มีแต่ช่วงอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลดลง นอกจากนั้นจากรูปที่ 5.10 - 5.13 จะเห็นได้ว่าทั้ง อุณหภูมิและความ เร็วของลมร้อนมีอิทธิพลสำคัญต่ออัตราการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิและความ เร็วลมที่ศึกษา

6.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการอบแห้ง

รูปที่ 5.10 และ 5.11 แสดงให้เห็นว่าอัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นเมื่อ อุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้น การที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนมีค่าสูงขึ้น การถ่ายเท ความร้อนโดยการนำและการถ่ายเทมวลโดยการแพร่ภายในชิ้นวัสดุจะมีค่ามากขึ้น ผลก็คือน้ำที่ผิว ของวัสดุระเหยออกไปได้เร็วขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การ แพร่ของน้ำจะมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นการแพร่ของน้ำภายในของวัสดุไปแทนที่น้ำที่ระเหยออกจากผิว จึงเกิดได้รวด เร็วขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้อัตราการอบแห้งจึงมีค่ามากขึ้น เมื่อลมร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น จาก 50°ซ เป็น 70°ซ

6.1.2 อิทธิพลของความ เร็วลมต่ออัตราการอบแห้ง

อิทธิพลของความ เร็วลมต่ออัตราการอบแห้งอธิบายได้โดยการพิจารณา รูปข้างล่างนี้ ซึ่งแสดงขั้นตอนการถ่าย เทความร้อนจากลมร้อน เข้าไปในวัสดุเพื่อระ เหยน้ำภายใน และขั้นตอนการถ่าย เทมวลจากภายในวัสดุออกมาภายนอกในขณะอบแห้ง รูปนี้แสดงความต้านทาน ค่าๆ ที่เกิดขึ้นต่อการถ่าย เทความร้อนและมวลด้วย



LEGEND

- ① Film Heat Transfer Resistance
- ② Skin Heat Transfer Resistance
- ③ Internal Heat Transfer Resistance
- ④ Evaporation of Water Content
- ⑤ Internal Mass Transfer Resistance
- ⑥ Skin Mass Transfer Resistance
- ⑦ Film Mass Transfer Resistance

จากรูปนี้ ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทเข้าไปภายในวัสดุโดยผ่านความต้านทานของฟิล์ม (Film resistance) และของภายใน (Internal resistance) วัสดุตามลำดับ เมื่อความร้อนถ่ายเทเข้าไปภายในวัสดุ น้ำภายในจะรับความร้อนและเกิดการระเหย มวลของน้ำที่ระเหยออกสู่ภายนอกวัสดุโดยผ่านความต้านทานภายในวัสดุและของฟิล์มตามลำดับ

เมื่อความเร็วของลมร้อนมีค่าสูงขึ้น ความหนาของฟิล์มขอบเขต (Boundary film thickness) รอบผิววัสดุจะมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มมีค่าลดลง อนึ่ง ความต้านทานรวมของการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเท่ากับผลบวกของความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มและของภายในวัสดุ ซึ่งค่อนอนุกรมกัน ดังนั้นอิทธิพลของความ

เร็วลมที่มีต่ออัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับขนาดสัมพัทธ์ (Relative magnitude) ของความต้านทานทั้งสองนี้

จากรูป 5.12 และ 5.13 เห็นได้ว่าอัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นอย่างเด่นชัด เมื่อความเร็วลมสูงขึ้น เฉพาะในช่วงแรกของการอบแห้ง ทั้งนี้เป็นเพราะในช่วงแรกชั้นมันสำปะหลังที่พื้นมาใหม่ๆ จะยังมีน้ำอยู่ที่ผิวและในเนื้อวัสดุใกล้ผิว ดังนั้นในช่วงการอบแห้งนี้ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ผิววัสดุจะมีขนาดโตกว่าความต้านทานภายในวัสดุและเป็นปัจจัยที่ควบคุมอัตราการอบแห้งด้วยเหตุนี้การเพิ่มความเร็วของลมร้อนซึ่งมีผลโดยตรงต่อการลดความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มจึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นอย่างเด่นชัด

แต่ในช่วงต่อมาความชื้นที่ระเหยทั้งหมดจะมาจากส่วนลึกภายในเนื้อวัสดุ ดังนั้นอัตราการแพร่ของน้ำภายในวัสดุออกมาที่ผิวซึ่งแสดงออกโดยค่าความต้านทานภายในจึงเป็นปัจจัยที่ควบคุมอัตราการอบแห้ง ดังนั้นการเพิ่มความเร็วลมจึงมีผลน้อยมากต่ออัตราการอบแห้งในช่วงหลังนี้

6.2 ผลการอบแห้งมันสำปะหลังขึ้นหนา (หนา 40 ซม)

รูปที่ 5.7 และ 5.8 แสดงการกระจายความชื้นภายในชั้นวัสดุกับ เวลาสำหรับการอบแห้งขึ้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. ในกรณีการอบแห้งแบบปรกติและในกรณีการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราว (ทุกๆ 150 นาที) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวัสดุที่อยู่ด้านปลายทางเข้าของลมร้อนจะมีอัตราการแห้งตัวเร็วกว่าวัสดุที่อยู่ด้านปลายทางออกมาก เพราะอุณหภูมิของลมร้อนจะค่อยๆ ลดลงและความชื้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นขณะที่ลมร้อนไหลผ่านวัสดุขึ้นหนา

รูปที่ 5.9 แสดงการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุกับ เวลาสำหรับการอบแห้งขึ้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. ในกรณีการอบแห้งโดยสลับลมร้อนเป็นครั้งคราว (ทุกๆ 30 นาที) จะเห็นว่าในการอบแห้งลักษณะนี้วัสดุที่อยู่บริเวณตอนกลางของชั้นวัสดุจะมีความชื้นสูงกว่าวัสดุที่อยู่ด้านปลายทั้งสองของชั้นวัสดุ การกระจายความชื้นของวัสดุในกรณีนี้ค่อนข้างจะสม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบปรกติและแบบผสมวัสดุเป็นครั้งคราว

การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง

7.1 การคำนวณการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน

ก่อนที่จะทำการคำนวณการกระจายความชื้นของชั้นวัสดุหนาในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน เราจำเป็นต้องทราบ เส้นลักษณะ เฉพาะของการอบแห้งของชั้นวัสดุบางโดยการทดลอง รูปที่ 5.6 แสดง การเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นมันสำปะหลังกับเวลา เมื่อวิเคราะห์หา เส้นลักษณะ เฉพาะของ การอบแห้งโดยใช้เส้นกราฟในรูปนี้ เราจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.14 สิ่งสำคัญคือ เงื่อนไขของเส้น ลักษณะของการอบแห้งที่ใช้จะต้องตรงกับ เงื่อนไขที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุชั้นหนาในตารางที่ 7.1 ด้วย

ตารางที่ 7.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการอบแห้งกับลักษณะสมบัติของชั้นมันสำปะหลัง

ความเร็วของลมร้อน	0.6 ม./วินาที
อุณหภูมิของลมร้อน	65 ^o ซ
ความชื้นของลมร้อน (H)	0.018 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง
อัตราส่วนว่างของชั้นวัสดุ (ε)	0.768
ความหนาแน่นของมันสำปะหลังแห้งสนิท	924 กก./ลบ.ม.
เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของชั้นมันสำปะหลัง (D _p)	0.409 x 10 ⁻² ม.
ความชื้นสมดุลย์ของชั้นมันสำปะหลัง (c _e)	0.00 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง

เนื่องจาก เส้นลักษณะ เฉพาะของการอบแห้งมันสำปะหลังไม่มีช่วงอัตราการอบแห้งที่ความ เร็วคงที่ ดังนั้น เราจึงไม่สามารถหาค่าของความชื้นวิกฤต , c_c , ของมันสำปะหลังโดยตรง จากการทดลองได้และมีความจำเป็นต้องกำหนดค่าของ c_c โดยทำให้ผลรวมของผลต่างของอัตรา การอบแห้งยกกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด (Least square method)

นั่นคือ เรากำหนดให้

$$S(c_c) = \sum_{i=1}^n \left\{ R_{\text{exp}}(c_i) - R_{\text{theo}}(c_i) \right\}^2$$

โดยที่ $R_{\text{exp}}(c_i)$ คือ อัตราการอบแห้งจากการทดลองที่ความชื้น c_i

$R_{\text{theo}}(c_i)$ คือ อัตราการอบแห้งจากทฤษฎีที่ความชื้น c_i

n คือ จำนวนจุดที่ทดลองหาค่าของ R_{exp}

อนึ่ง ค่าของ R_{theo} คำนวณได้จาก

$$R_{\text{theo}} = -\frac{d\omega}{d\theta} = -\frac{ka}{(1-\epsilon)\rho_s} \frac{d\omega}{d\tau}$$

โดยที่ $\frac{d\omega}{d\tau}$ คือค่าที่คำนวณได้จากสมการ (4.33) ส่วนค่าของ ka หาได้จากการคูณค่าของ k และ a ซึ่งหาได้จาก

$$\frac{k}{G} = 2.566(\text{Re}_p)^{-0.51} \quad (\text{Yoshida, 1967})$$

$$a = 6(1-\epsilon)/D_p$$

$$\text{Re}_p = GD_p/\mu$$

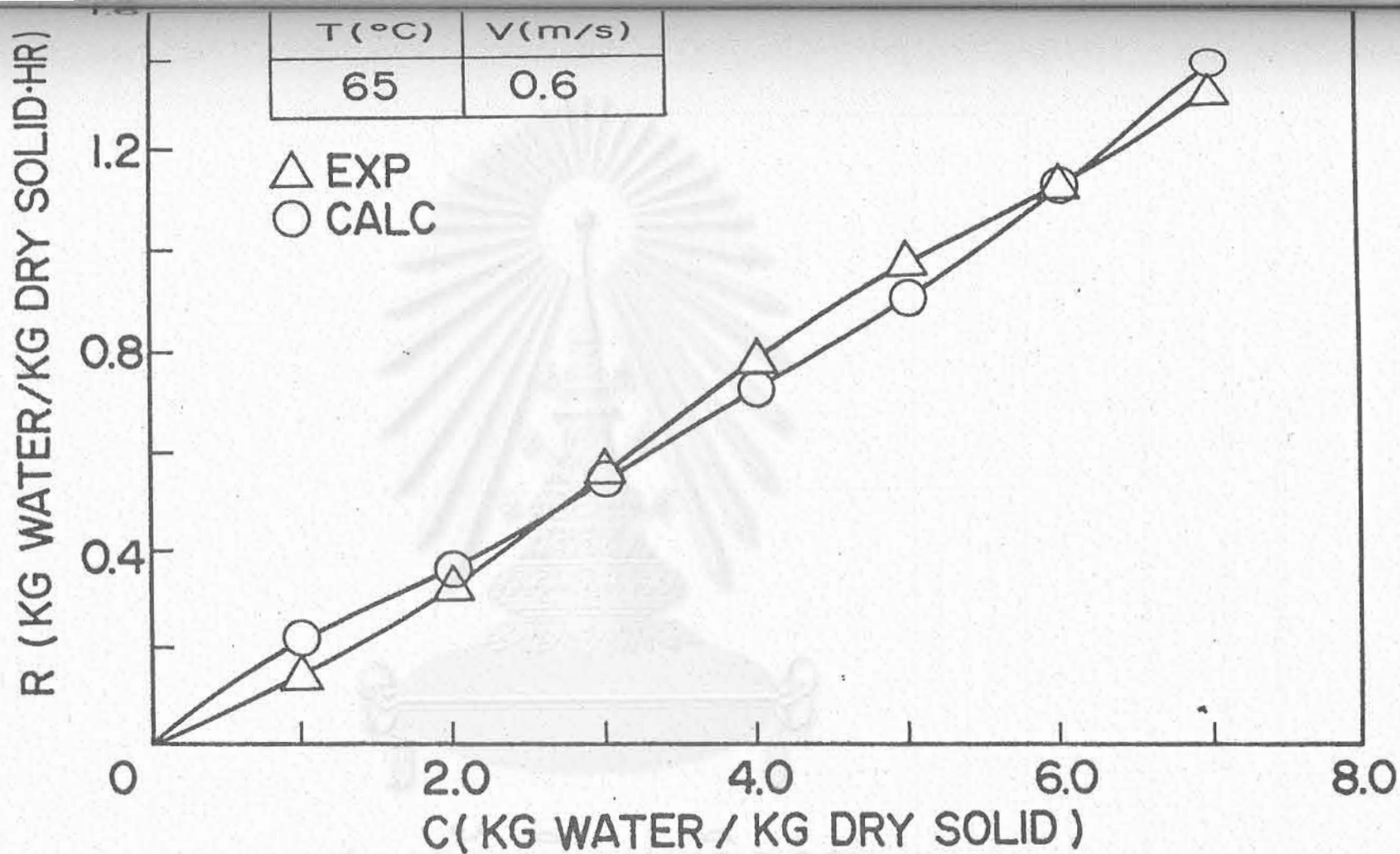
สรุปแล้วค่าที่ถูกต้องของ c_c คือค่าที่ทำให้ฟังก์ชัน $S(c_c)$ มีค่าน้อยที่สุดนั่นเอง

ตารางที่ 7.2 แสดงค่า c_c ที่หาได้โดยวิธีดังกล่าวข้างต้น เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งเชิงทฤษฎีที่ได้จากการใช้ c_c ดังกล่าวมีแสดงเปรียบเทียบกับผลของการทดลองในรูปที่

7.1 อนึ่ง รายละเอียดของการคำนวณค่า R_{theo} มีแสดงไว้ในภาคผนวก ง

รูปที่ 7.2 แสดงผลการคำนวณการกระจายความชื้นในชั้นมันสำปะหลัง (หนา 40 ซม) ที่เวลาต่างๆ กัน โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง สมการที่ใช้ในการคำนวณคือ สมการ (4.30)

$$\phi(\xi, \tau) = \frac{\phi_0 e^{\phi_0 \xi}}{\left\{ e^{\pi \tau} + (e^{\phi_0 \xi} - 1) \right\}}$$



รูปที่ 7.1 การเปรียบเทียบเส้นลักษณะเฉพาะเชิงทฤษฎีกับผลการทดลองอบแห้งขึ้นมันสำปะหลังหนา 5 ซม.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.2 ค่า c_c ที่หาได้และการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่า c_c ดังกล่าวกับผลการทดลอง

$$c_c \text{ ที่เหมาะสม} = 3.85 \text{ กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง} \quad S(c_c) = 0.04747$$

เวลาอบแห้ง(ชม.)	อัตราการอบแห้ง(กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง ชม.)	
	จากการทดลอง	จากการคำนวณ
0.000	1.624	1.537
0.117	1.382	1.310
0.183	1.095	1.183
0.283	0.899	0.998
0.400	0.708	0.799
0.567	0.539	0.562
0.800	0.360	0.325
1.133	0.224	0.138

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 7.3 แสดงผลการคำนวณการกระจายความชื้นภายในชั้นมันสำปะหลัง (หนา 40 ซม.) และความชื้นเฉลี่ยของชั้นวัสดุที่เวลาต่างๆ กัน ในกรณีที่มีการผสมวัสดุอย่างสมบูรณ์ ทุกๆ 150 นาที โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง สมการที่ใช้ในการคำนวณการกระจายความชื้นคือสมการ (4.30) ส่วนสมการที่ใช้ในการคำนวณความชื้นเฉลี่ยคือ สมการ (4.32)

$$\omega(\tau) = \frac{1}{\xi_L} \left\{ \frac{\phi_o \xi_L + \ln \phi_o \xi^{-\eta_o \tau} + \phi_o - \phi_o \xi^{-\eta_o \tau} \xi^{-\phi_o \xi_L}}{\phi_o} \right\}$$

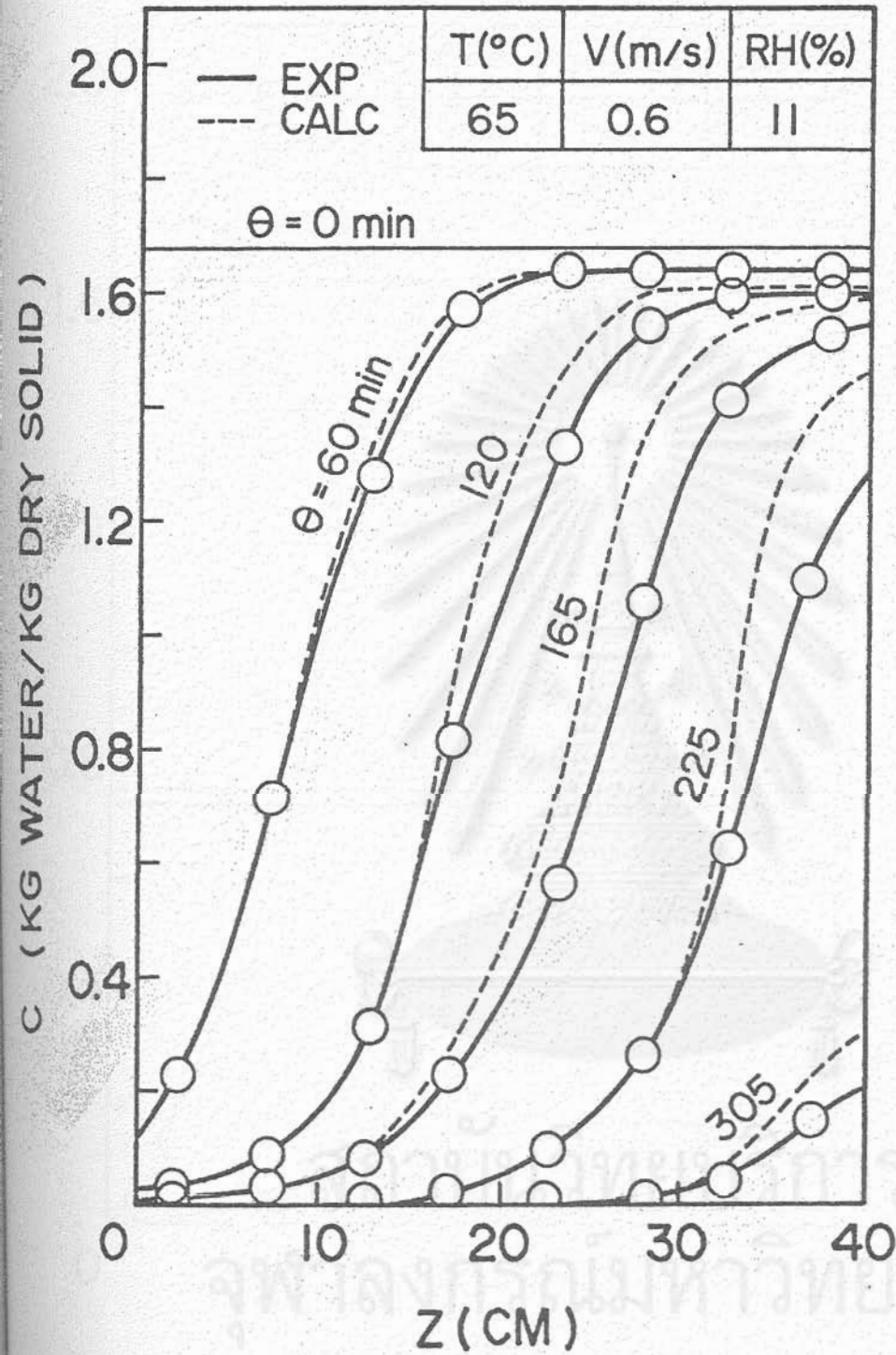
รูปที่ 7.4 และ 7.5 แยกแสดงผลการคำนวณการกระจายความชื้นภายในชั้นมันสำปะหลัง (หนา 40 ซม.) ที่เวลาต่างๆ กัน ในกรณีที่มีการสลับทิศทางลมทุกๆ 30 นาที โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง รูปที่ 7.4 แสดงการกระจายความชื้นเฉพาะในช่วงเวลาที่ลมร้อนไหลเข้าทางด้านล่างของชั้นวัสดุ ส่วนรูปที่ 7.5 แสดงการกระจายความชื้นเฉพาะในช่วงเวลาที่ลมร้อนไหลเข้าทางด้านบนของชั้นวัสดุ สมการที่ใช้ในการคำนวณคือ สมการ 4.29

$$\phi(\xi, \tau) = \frac{\int_0^{\xi} p(\eta) d\eta}{\frac{1}{\phi_{i0}} \xi^{\eta_o \tau} + \int_0^{\xi} \xi \int_0^{\eta} p(\beta) d\beta d\eta}$$

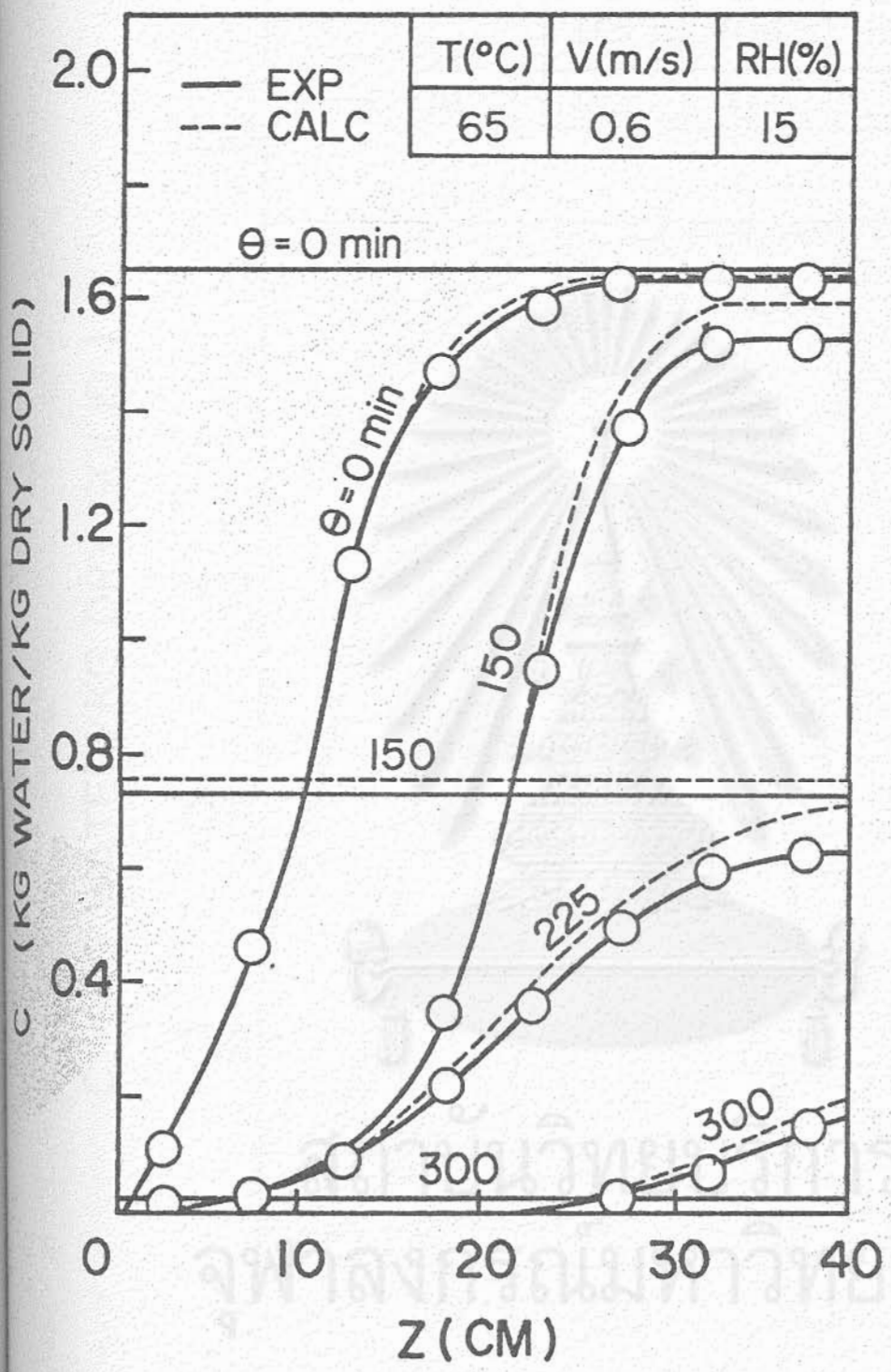
ตารางที่ 7.3 และ 7.4 แสดงผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ (θ_F') ในการอบแห้งระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลองสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. เพื่อให้วัสดุที่ด้านทางออกของลมร้อน เหลือความชื้น เท่ากับความชื้นที่ต้องการในกรณีการอบแห้งแบบปกติและการอบแห้งแบบผสมวัสดุทุกๆ 150 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 7.5 แสดงผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ (θ_F') ในการอบแห้งระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลองสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. เพื่อให้ความชื้นสูงสุดในชั้นวัสดุ เหลือค่า เท่ากับความชื้นที่ต้องการ

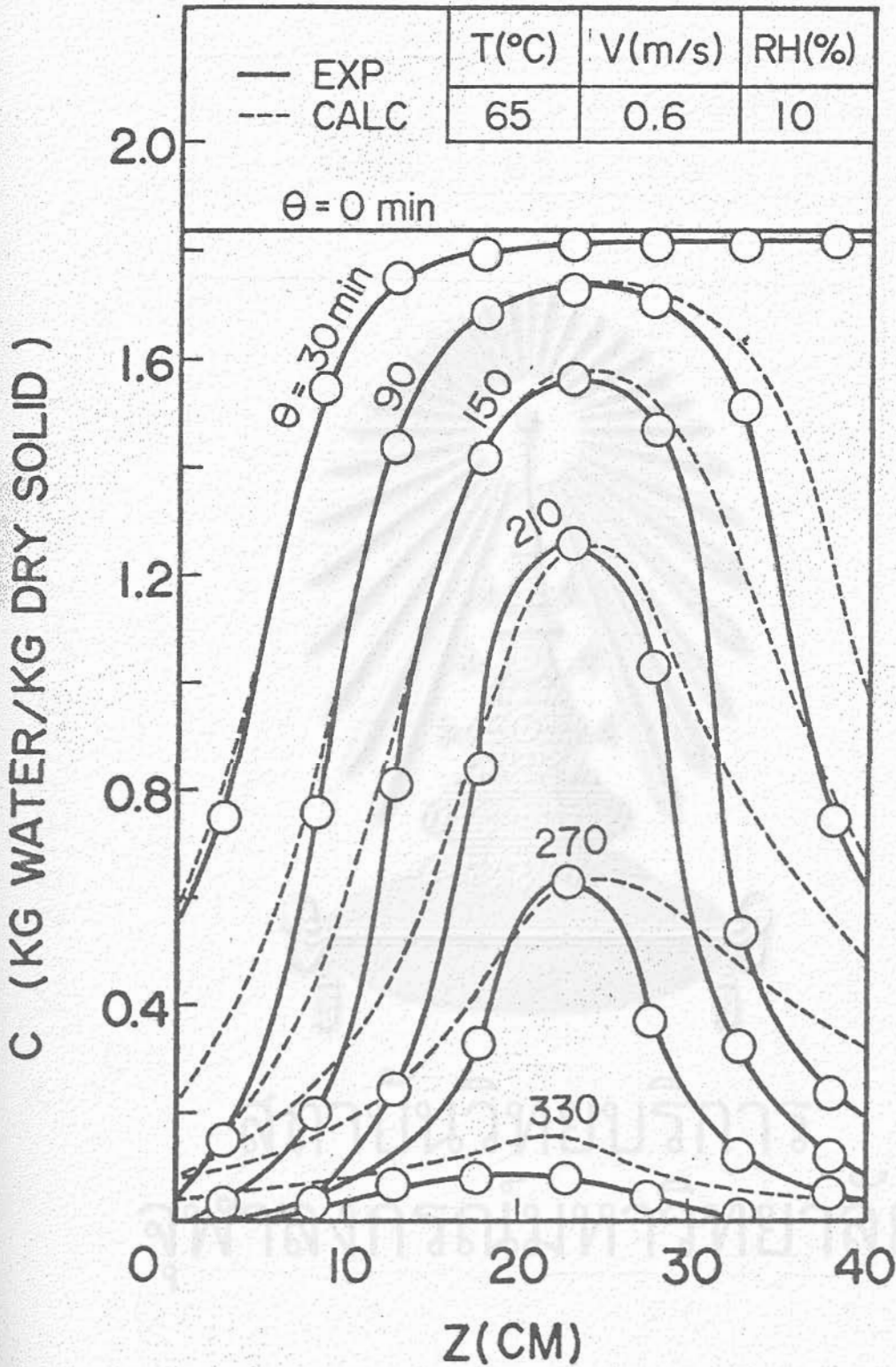




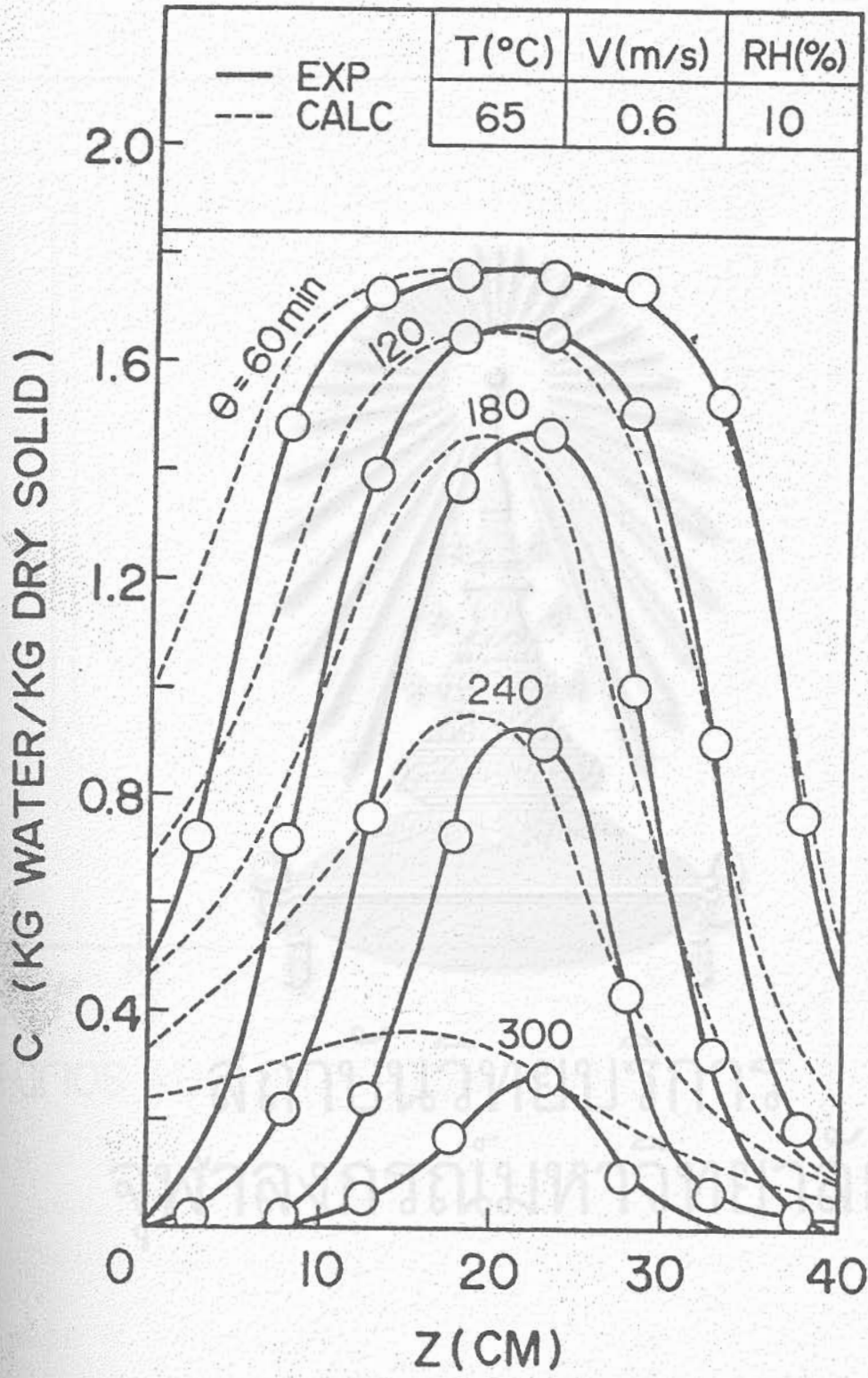
รูปที่ 7.2 ผลการคำนวณกับผลการทดลองหาการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุกับเวลา
 สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีปกติ)



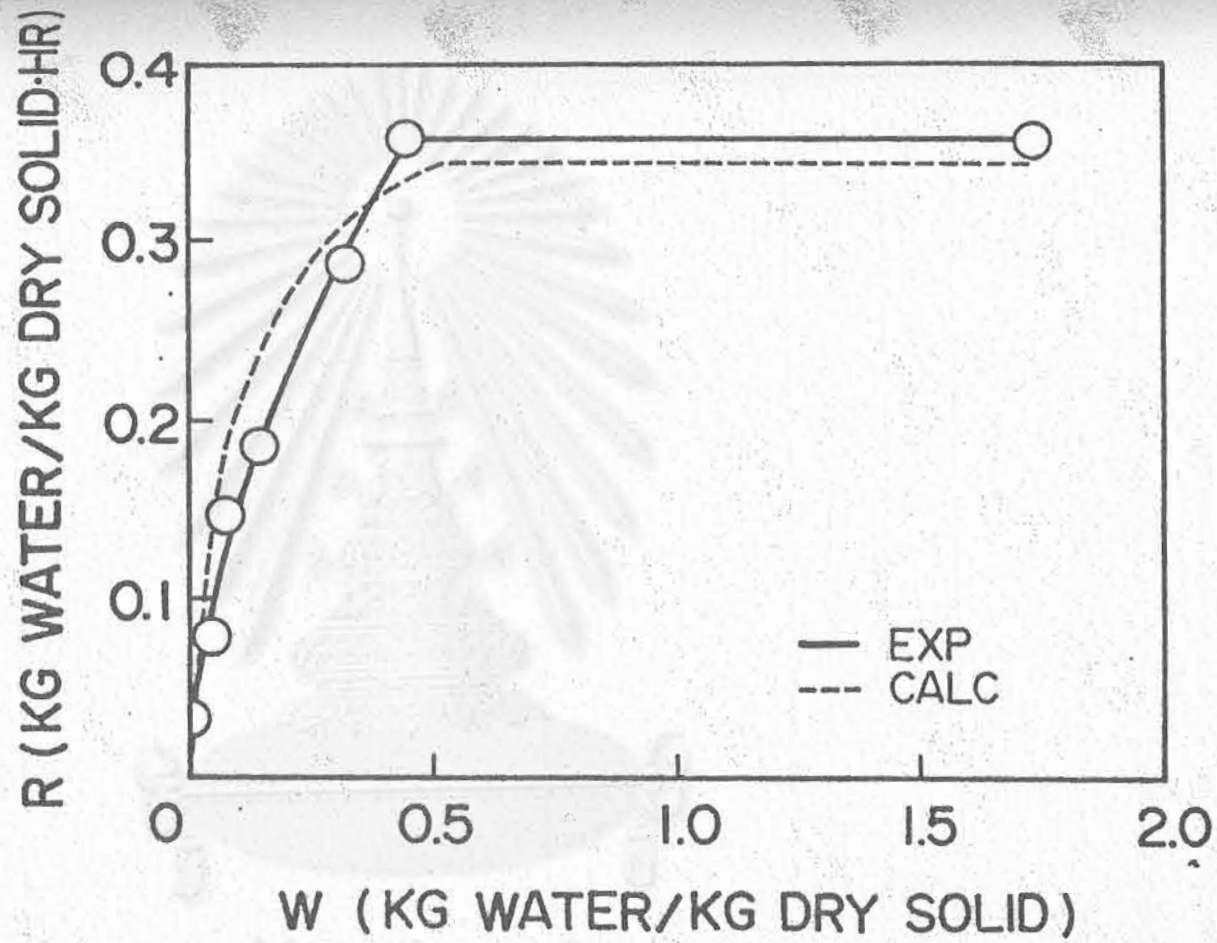
รูปที่ 7.3 ผลการคำนวณกับผลการทดลองการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุกับ เวลาสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีผสมวัสดุทุกๆ 150 นาที)



รูปที่ 7.4 ผลการคำนวณกับผลการทดลองการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุกับเวลา (เฉพาะเวลาที่ความร้อนเข้าทางด้านล่าง) สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีสลับทิศทางลมร้อนทุกๆ 30 นาที)



รูปที่ 7.5 ผลการคำนวณกับการทดลองการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุกับเวลา (เฉพาะเวลาที่ลมร้อนเข้าทางด้านบน) สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีสลับทิศทางลมร้อนทุกๆ 30 นาที)



รูปที่ 7.6 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งที่มันสำปะหลัง ทน 40 ซม. ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

ตารางที่ 7.3 การเปรียบเทียบเวลา (θ_f') ที่ต้องใช้อบแห้งระหว่างผลการคำนวณ
กับผลการทดลองสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม.
เพื่อให้วัสดุที่ด้านทางออกของลมร้อนมีความชื้น เท่ากับความชื้นที่ต้อง
การ (กรณีการอบแห้งแบบปกติ)

ความชื้น(กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง)		เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (θ_f') (นาที)		
แรก เริ่ม	สุดท้าย	คำนวณ	ทดลอง	% ความคลาดเคลื่อน
1.677	0.083	330	320	+3.1
1.677	0.167	315	302	+4.3
1.677	0.335	300	285	+5.3

ตารางที่ 7.4 การเปรียบเทียบเวลา (θ_f') ที่ต้องใช้อบแห้งระหว่างผลการคำนวณ
กับผลการทดลองสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม.
เพื่อให้วัสดุที่ด้านทางออกของลมร้อนมีความชื้น เท่ากับความชื้นที่ต้อง
การ (กรณีที่ผสมวัสดุทุกๆ 150 นาที)

ความชื้น(กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง)		เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (θ_f') (นาที)		
แรก เริ่ม	สุดท้าย	คำนวณ	ทดลอง	% ความคลาดเคลื่อน
1.650	0.165	297	292	+1.7
1.650	0.248	290	281	+3.2
1.650	0.330	277	270	+2.6

ตารางที่ 7.5 การเปรียบเทียบเวลา (θ_f) ที่ต้องให้การอบแห้งระหว่างผลการคำนวณ กับผลการทดลองสำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. เพื่อทำให้ความชื้นสูงสุดในชั้นวัสดุเหลือค่า เท่ากับความชื้นที่ต้องการ (กรณีที่สลับทิศทางลมร้อนทุกๆ 30 นาที)

ความชื้น (กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง)		เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (θ_f') (นาที)		
แรกเริ่ม	สุดท้าย	คำนวณ	ทดลอง	% ความคลาดเคลื่อน
1.823	0.091	350	325	+7.7
1.823	0.182	330	310	+6.4
1.823	0.365	300	291	+3.1

รูปที่ 7.6 เปรียบเทียบเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม.

ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง ในที่นี้เส้นลักษณะเฉพาะของการทดลองได้มาจากการเขียนกราฟระหว่างความชื้นเฉลี่ยของชั้นวัสดุกับ เวลาอบแห้ง แล้วอ่านค่าความชื้นหรืออัตราการอบแห้งที่จุดต่างๆ ของกราฟนี้ เพื่อสร้างกราฟระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นเฉลี่ยอีกทีหนึ่ง ส่วนเส้นลักษณะเฉพาะของการคำนวณหาได้โดยใช้สมการที่ (4.32) กับชั้นวัสดุหนา 40 ซม.

7.2 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง

การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองอาจแยกพิจารณา เป็นกรณีๆ ดังต่อไปนี้

7.2.1 การอบแห้งแบบปกติ

ตารางที่ 7.3 ได้แสดงผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง θ_f' สำหรับ

ความชื้นสุดท้าย 3 ค่า จะเห็นได้ว่าค่าคำนวณของเวลาที่ใช้ในการอบแห้งใกล้เคียงกับค่าทดลองมาก

โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 5.3 % รูปที่ 7.6 ซึ่งเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการ

ทดลอง เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งของชั้นวัสดุหนา 40 ซม. ก็ให้ผลที่ใกล้เคียงอย่างน่าพอใจ

รูปที่ 7.2 ได้เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของการกระจายความชื้นของชั้นวัสดุหนา 40 ซม. ที่เวลาอบแห้งต่างๆ กัน จะเห็นได้ว่าในย่านทางเข้าของลมร้อนการกระจายความชื้นของวัสดุที่คำนวณได้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง แต่ผลการคำนวณจะแตกต่างกับผลการทดลองพอสมควรในย่านทางออกของลมร้อนในลักษณะที่ความชื้นที่ได้จากการทดลองจะลดลงเร็วกว่าผลการคำนวณ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้เมื่อพิจารณาตารางที่ 7.2 ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง และจากการคำนวณ จะเห็นได้จากตารางว่าเมื่อวัสดุมีความชื้นเหลืออยู่น้อย เช่นที่เวลาอบแห้ง 1.133 ชม. อัตราการอบแห้งที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ มีค่าเท่ากับ 0.224 และ 0.138 (กก.น้ำ/กก. วัสดุแห้ง.ชม.) ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ากันเกือบเท่าตัว ถ้าย้อนไปดูผลการเปรียบเทียบในรูป 7.2 เนื่องจากลมร้อนที่ย่านทางออกของชั้นวัสดุย่อมมีความชื้นสูงกว่าที่ผ่านทางเข้า ดังนั้นอัตราการอบแห้งที่ย่านทางออกจะมีค่าต่ำ ผลก็คือ ค่าคำนวณของอัตราการอบแห้งจะมีค่าต่ำกว่าค่าทดลอง จึงทำให้การกระจายของความชื้นที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงกว่าการทดลองพอสมควร อย่างไรก็ตามผลต่างดังกล่าวนี้ไม่ทำให้ค่าคำนวณและค่าทดลองของเวลา θ'_f ที่ต้องใช้ในการอบแห้งซึ่งเป็นสิ่งที่เราสนใจสูงสุดในการอบแห้งเกิดความคลาดเคลื่อนนัก

7.2.2 กรณีอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราว (ผสมทุกๆ 150 นาที)

ตารางที่ 7.4 ได้แสดงผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (θ'_f) สำหรับความชื้นสุดท้าย 3 ค่า จะเห็นได้ว่าค่าคำนวณของเวลาที่ใช้ในการอบแห้งใกล้เคียงกับค่าทดลองมากโดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 3.2 %

รูปที่ 7.3 ได้เปรียบเทียบการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุที่เวลาต่างๆ กัน จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการกระจายความชื้นของวัสดุภายในชั้นวัสดุสำหรับการทดลองและการคำนวณจะเป็นไปในทำนองเดียวกับกรณีการอบแห้งแบบปกติและสามารถอธิบายสาเหตุได้ในทำนองเดียวกัน

7.2.3 กรณีอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อน

ตารางที่ 7.5 ได้แสดงผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (θ'_f) ในกรณีสลับทิศทางลมร้อนทุกๆ 30 นาที 3 ค่า จะเห็นได้ว่าค่าคำนวณของเวลาที่ใช้ในการอบแห้งใกล้เคียงกับค่าทดลองมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 7.7 %

รูปที่ 7.4 และ 7.5 ได้เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของการกระจายความชื้นของชั้นวัสดุหนา 40 ซม. ที่เวลาอบแห้งต่างๆ กัน เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจรูปที่ 7.4 แสดงเฉพาะการกระจายความชื้นในช่วงเวลาที่ลมร้อนไหลเข้าทางด้านล่างของชั้นวัสดุ ส่วนรูปที่ 7.5 แสดงเฉพาะการกระจายความชื้นในช่วงเวลาที่ลมร้อนไหลเข้าทางด้านบนของชั้นวัสดุ ในกรณีอบแห้งโดยการสลับทิศทางลมร้อนนี้ จะเห็นได้ว่าวัสดุที่อยู่ย่านตรงกลางของชั้นวัสดุจะมีความชื้นสูงกว่าวัสดุที่อยู่ย่านปลายทั้งสองข้างของชั้นวัสดุเสมอ

เมื่อทำการอบแห้งวัสดุได้ 30 นาทีแรก การกระจายความชื้นของวัสดุจะมีลักษณะดังเส้นเวลา 30 นาที ที่แสดงในรูปที่ 7.4 หลังจากนั้นเราก็ทำการสลับทิศทางของลมร้อนและอบแห้งต่อไปอีก 30 นาที ผลที่ได้คือ เส้นการกระจายความชื้นของชั้นวัสดุที่เวลา 60 นาที ในรูปที่ 7.5 เมื่อสลับทิศทางทางลมแล้วอบแห้งต่อไปอีก 30 นาที ก็จะได้เส้นการกระจายความชื้นดังในรูปที่ 7.4 (เส้นเวลา 90 นาที) เป็นต้น จากการเปรียบเทียบการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุจะพบว่าผลการทดลองและผลการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกันในย่านตรงกลางของชั้นวัสดุ สำหรับการกระจายความชื้นในย่านปลายทั้งสองด้านของชั้นวัสดุมีข้อน่าสนใจ เกิดดังนี้คือ

ก. ที่เวลาต่างๆ ของการทดลองอบแห้ง อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของทั้งชั้นวัสดุที่ได้จะเร็วกว่าผลการคำนวณทำให้การกระจายของความชื้นที่ได้จากการทดลองลดลงเร็วกว่าผลการคำนวณ

ข. เมื่อพิจารณาผลการทดลองและผลการคำนวณการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุ จะเห็นได้ว่าที่เวลา 60 นาที ผลการทดลองและผลการคำนวณที่ปลายด้านทางเข้าของลมร้อน ในรูปที่ 7.5 จะใกล้เคียงกัน แต่ที่ปลายด้านทางออกของลมร้อน ผลการทดลองจะมีความชื้นต่ำกว่าที่ได้ผลการคำนวณ เมื่อสลับทิศทางลมร้อน แล้วอบแห้งต่อไปอีก 30 นาที ก็จะได้เส้นการกระจายความชื้นดังเส้นเวลา 90 นาที ในรูปที่ 7.4 จะเห็นได้ว่าผลการทดลองและผลการคำนวณของการกระจายความชื้นที่ปลายด้านทางเข้าใหม่ของลมร้อนมีค่าเข้าใกล้กันมากทั้งๆ ที่ก่อนหน้านี้ 30 นาที (เส้นการกระจายความชื้นที่เวลา 60 นาที) ผลการทดลองและผลการคำนวณที่ปลายด้านนี้มีค่าค่อนข้างต่างกัน ในขณะที่เดียวกันผลการทดลองและผลการคำนวณที่ปลายด้านทางออกใหม่ของลมร้อนกลับมีค่าต่างกันมากขึ้นกว่าของที่เวลา 60 นาที

เมื่อสลับทิศทางลมร้อนแล้วทำการอบแห้งต่อไปอีก 30 นาที ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณที่ปลายทั้งสองข้างของชั้นวัสดุก็จะเป็นไปในทำนองเดียวกันอีก เหตุที่

เป็นเช่นนี้ สามารถอธิบายได้เมื่อคำนึงถึงว่า ในความเป็นจริงแล้วจะต้องเกิดการแพร่ของน้ำภายในเนื้อวัสดุออกมาที่ผิวของวัสดุในขณะที่ทดลองอบแห้ง ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะถือว่าน้ำที่อยู่ในวัสดุจะแพร่ไปสู่ผิวของวัสดุค่อนข้างเร็ว ถ้าย้อนกลับไปพิจารณาการอบแห้งโดยเริ่มต้นการกระจายความชื้นที่ 30 นาทีแรกของการอบแห้ง (เส้นเวลา 30 นาที) ในรูปที่ 7.4 แล้วเริ่มสลับที่ลมร้อนเข้าทางด้านความสูง 40 ซม. ออกทางด้านความสูง 0 ซม. เพื่ออบแห้งต่ออีก 30 นาที ลมร้อนที่ปลายด้านทางเข้าใหม่จะระเหยความชื้นจากวัสดุได้น้อยกว่าค่าทางทฤษฎีเนื่องจากน้ำภายในวัสดุที่ค่อนข้างแห้งแล้วต้องใช้เวลาในการแพร่ออกมาที่ผิว ดังนั้นในการทดลองความชื้นของวัสดุที่ปลายด้านนี้จะลดลงได้ช้ากว่าผลการคำนวณจึงทำให้เส้นการกระจายความชื้นที่ได้จากผลการคำนวณลดไล่เข้าใกล้ผลการทดลองได้ดี แต่เมื่อลมร้อนนั้นผ่านไหลขึ้นวัสดุจนใกล้บริเวณปลายด้านทางออก ความชื้นของลมร้อนจะเพิ่มช้ากว่าผลการคำนวณ ดังนั้นจึงสามารถระเหยความชื้นออกจากวัสดุในบริเวณนี้ได้เร็วกว่าผลการคำนวณ ดังนั้นเส้นการกระจายความชื้นที่ปลายด้านทางออกของวัสดุ จึงเริ่มแตกต่างจากผลการคำนวณมากขึ้นๆ เมื่อทำการสลับทิศทางลมร้อนอีก โดยให้ลมร้อนเข้าทางด้านความสูง 0 ซม. และออกด้านความสูง 40 ซม. แล้วทำการอบแห้งต่อไปอีก 30 นาที โดยเหตุผลในทำนองเดียวกับที่ได้กล่าวมาข้างต้น ความชื้นของวัสดุที่ปลายด้านทางเข้าใหม่ของลมร้อนจะเข้าใกล้ผลการคำนวณมากขึ้น (ดูเส้นการกระจายความชื้นที่เวลา 90 นาที รูปที่ 7.4) ส่วนความแตกต่างของความชื้นที่ปลายด้านทางออกใหม่ของลมร้อนก็จะกลับเพิ่มสูงขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะ เกิดซ้ำขึ้นในทุกครั้งที่มีการสลับทิศของลมร้อน

สรุปแล้วจากการ เปรียบ เทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองในวิธีการอบแห้งทั้ง 3 แบบ (ดูข้อ 7.2.1 - 7.2.3) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางทฤษฎีสามารถทำนาย เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงอย่างน่าพอใจทุกกรณี ในภาคปฏิบัติแล้วข้อมูลที่สำคัญที่สุดในการอบแห้งแบบงวดๆ นั้นจะไม่ใช่ว่ารูปร่างของการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุแต่เป็น เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งแต่ละครั้ง เพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ (ความจริงจุดประสงค์หลักของการศึกษาการกระจายความชื้นในชั้นวัสดุก็ เพื่อใช้ในการประเมิน เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งนั่นเอง) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประโยชน์ได้ดีในงานวิศวกรรมอบแห้งแบบไหลผ่าน ซึ่งจะหุ้ดถึงในบทต่อไป

บทที่ 8

การประยุกต์ใช้แบบจำลองในงานวิศวกรรมอบแห้ง

8.1 การประหยัดพลังงานในการอบแห้งแบบงวด (Batch) โดยการผสมวัสดุเป็นครั้งคราว

โดยการใช้แบบจำลองข้างต้นที่ได้พิสูจน์ความเหมาะสมแล้วในงานวิจัยนี้เราสามารถคำนวณหาเวลาที่ต้องใช้อบแห้งวัสดุในเงื่อนไขต่างๆ เพื่อลดความชื้นของวัสดุให้เหลือค่าที่ต้องการ ในกรณีการอบแห้งแบบปกติ (นั่นคือการอบแห้งที่ไม่มีการผสมวัสดุหรือสลับทิศทางของลมร้อน) และในกรณีการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราว เวลาอบแห้งที่ต้องใช้อาจนิยามได้ 2 ลักษณะคือ

ก. เวลาที่ต้องใช้ $\bar{\theta}_f$ เพื่อทำให้ความชื้นเฉลี่ยสุดท้ายของชั้นวัสดุเหลือค่าเท่ากับที่ต้องการ

ข. เวลาที่ต้องใช้ θ'_f เพื่อทำให้ความชื้นสุดท้ายที่ปลายด้านทางออกของลมร้อนเหลือค่าเท่ากับที่ต้องการ

ในภาคปฏิบัติแล้ว เวลาอบแห้งที่ต้องใช้จริงน่าจะเป็น θ'_f มิฉะนั้นแล้วจะมีวัสดุบางส่วนที่ยังชื้นเกินไปทำให้เป็นบ่อเกิดของการเน่าเสียได้ในเวลาอันสั้น

ตารางที่ 8.1, 8.2, 8.3 และ 8.4 แสดงผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่มค่าหนึ่งจนเหลือความชื้นสุดท้ายต่างๆ สำหรับการอบแห้งขึ้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. ระหว่างกรณีการอบแห้งแบบปกติและการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราว ในที่นี้ θ_m คือช่วงห่างของเวลาที่เรานำวัสดุแต่ละครั้ง อนึ่ง ตารางเหล่านี้ยังแสดงพลังงานที่เครื่องอบแห้งสามารถประหยัดได้ซึ่งคำนวณได้โดยเปรียบเทียบค่า θ'_f ระหว่างกรณีที่ไม่ผสมวัสดุ (นั่นคือ $\theta_m = \infty$ นาที) กับกรณีที่ผสมวัสดุทุกๆ θ_m นาที

ตารางที่ 8.1 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้งจนเหลือความชื้น 0.336 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติ กักับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที)

θ_m (นาที)	$1/\theta_m$ (นาที ⁻¹)	θ'_F (นาที)	$\bar{\theta}_F$ (นาที)	พลังงานที่ประหยัดได้* (%)
∞	0.000	300	231	0.0 (ไม่มีการผสม)
50	0.020	250	231	16.7
100	0.010	268	231	20.7
150	0.007	285	231	5.0
200	0.005	268	231	10.7
250	0.004	250	231	16.7
300	0.003	300	231	0.0

$$\text{พลังงานที่ประหยัดได้} = \frac{\text{เวลา}\theta'_F \text{ การอบแห้งแบบปกติ} - \text{เวลา}\bar{\theta}_F \text{ การอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราว}}{\text{เวลา}\theta'_F \text{ การอบแห้งแบบปกติ}} \times 100 \%$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.2 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้งจนเหลือความชื้น 0.252 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง ทนนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที)

θ_m (นาที)	$1/\theta_m$ (นาที ⁻¹)	θ_f' (นาที)	$\bar{\theta}_f$ (นาที)	พลังงานที่ประหยัดได้ (%)
∞	0.000	305	247	0.0 (ไม่มีการผสม)
50	0.020	250	247	18.0
100	0.010	283	247	7.2
150	0.007	295	247	3.3
200	0.005	283	247	7.2
250	0.004	250	247	18.0
300	0.003	300	247	1.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.3 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้งจนเหลือความชื้น 0.168 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยมีการผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที)

θ_m (นาที)	$1/\theta_m$ (นาที ⁻¹)	θ'_f (นาที)	$\bar{\theta}_f$ (นาที)	พลังงานที่ประหยัดได้ (%)
∞	0.000	315	265	0.0 (ไม่มีการผสม)
50	0.020	275	265	12.7
100	0.010	300	265	4.8
150	0.007	300	265	4.8
200	0.005	300	265	4.8
250	0.004	275	265	12.7
300	0.003	300	265	4.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.4 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม

1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.084 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลัง หนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที)

θ_m (นาที)	$1/\theta_m$ (นาที ⁻¹)	θ'_f (นาที)	$\bar{\theta}_f$ (นาที)	พลังงานที่ประหยัดได้ (%)
∞	0.000	330	288	0.0 (ไม่มีการผสม)
50	0.020	300	288	9.1
100	0.010	300	288	9.1
150	0.007	300	288	9.1
200	0.005	300	288	9.1
250	0.004	300	288	9.1
300	0.003	300	288	9.1

จากผลที่แสดงไว้ในตารางที่ 8.1 - 8.4 เราสามารถสรุปได้ว่า ในการอบแห้งวัสดุจนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากัน การอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าหรือเท่ากับการอบแห้งแบบปกติ อนึ่ง ในกรณีดังกล่าว เวลาสั้นสุดที่ใช้ในการอบแห้งจะเป็นกรณีที่ผสมวัสดุทุกๆ 50 หรือ 250 นาที สรุปแล้วผลที่ได้ก็คือสามารถเพิ่มผลผลิตต่อวันได้สูงถึง 16.7 %, 18.0 %, 12.7 % และ 9.1 % สำหรับเงื่อนไขการอบแห้งในตารางที่ 8.1, 8.2, 8.3 และ 8.4 ตามลำดับ

อย่างไรก็ดีในภาคปฏิบัติเราจำเป็นต้องเสียเวลาจำนวนหนึ่งในการผสมวัสดุแต่ละครั้ง ถ้าการผสมวัสดุแต่ละครั้งกินเวลา (θ_x) 10 นาที ผลการประหยัดเวลาที่ได้รับจะเปลี่ยนแปลงจากที่แสดงไว้ในตารางที่ 8.1 - 8.4, ตารางที่ 8.5 - 8.8 แสดงผลการคำนวณสำหรับเงื่อนไขการอบแห้งในตารางที่ 8.1 - 8.4 ตามลำดับ ในกรณีที่ให้ $\theta_x = 10$ นาที

ตารางที่ 8.5 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.336 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งที่มันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุกๆ θ_m นาที แต่เสียเวลาในการผสมวัสดุครั้งละ $\theta_x = 10$ นาที)

θ_m (นาที)	$1/\theta_m$ (นาที ⁻¹)	จำนวนครั้งที่ ทำการผสมวัสดุ	เวลาทั้งหมดที่ ในการผสมวัสดุ (นาที)	θ'_f (นาที)	$\bar{\theta}_f$ (นาที)	พลังงานที่ประ- หยัดได้** (%)
∞	0.000	0	0	300	231	0.0
50	0.020	5	50	300	281	0.0
100	0.010	2	20	288	251	4.0
150	0.007	1	10	295	241	1.7
200	0.005	1	10	278	241	7.3
250	0.004	1	10	260	241	13.3
300	0.003	0	0	300	231	0.0

** ถือว่าเปิดลมร้อนทิ้งไว้ตลอดเวลา แม้ในขณะที่ผสมวัสดุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.6 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้งจนเหลือความชื้น 0.252 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที แต่เสียเวลาในการผสมวัสดุครั้งละ $\theta_x = 10$ นาที)

θ_m (นาที)	$1/\theta_m$ (นาที ⁻¹)	จำนวนครั้งที่ทำการผสมวัสดุ	เวลาดังหมดที่ใช้ในการผสมวัสดุ (นาที)	θ'_f (นาที)	$\bar{\theta}_f$ (นาที)	พลังงานที่ประหยัดได้ (%)
∞	0.000	0	0	305	247	0.
50	0.020	5	50	300	297	1.6
100	0.010	2	20	303	267	0.6
150	0.007	1	10	305	257	0.0
200	0.005	1	10	293	257	3.9
250	0.004	1	10	260	257	14.8
300	0.003	1	10	310	257	+1.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.7 ผลการเปรียบเทียบ เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก. วัสดุแห้งจนเหลือความชื้น 0.168 กก.น้ำ/กก. วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติ กับการอบแห้งโดยผสมวัสดุ เป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที แต่เสียเวลาในการผสมวัสดุครั้งละ $\theta_x = 10$ นาที)

θ_m (นาที)	$1/\theta_m$ (นาที ⁻¹)	จำนวนครั้งที่ทำ การผสมวัสดุ	เวลาดังหมดที่ใช้ ในการผสมวัสดุ (นาที)	θ'_f (นาที)	$\bar{\theta}_f$ (นาที)	พลังงานที่ประ- หยัดได้ (%)
∞	0.000	0	0	315	265	0.0
50	0.020	5	50	325	315	-3.2
100	0.010	2	20	320	285	-1.6
150	0.007	2	20	320	285	-1.6
200	0.005	1	10	310	275	1.6
250	0.004	1	10	285	275	9.5
300	0.003	1	10	310	275	1.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.8 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้งจนเหลือความชื้น 0.084 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งที่น้ำมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวทุก θ_m นาที แต่เสียเวลาในการผสมวัสดุครั้งละ $\theta_x = 10$ นาที)

θ_m (นาที)	$1/\theta_m$ (นาที ⁻¹)	จำนวนครั้งที่ทำการผสมวัสดุ	เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการผสมวัสดุ (นาที)	θ'_f (นาที)	$\bar{\theta}_f$ (นาที)	พลังงานที่ประหยัดได้ (%)
∞	0.000	0	0	330	288	0.0
50	0.020	6	60	350	348	-9.1
100	0.010	3	30	330	318	0.0
150	0.007	2	20	320	308	3.0
200	0.005	1	10	310	298	6.1
250	0.004	1	10	310	298	6.1
300	0.003	1	10	310	298	6.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลที่แสดงไว้ในตารางที่ 8.5 - 8.8 จะเห็นว่า ถ้าคิดเวลาเดินเครื่องอบแห้ง โดยรวม เวลาที่ต้องใช้ในการผสมวัสดุกับ เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งที่คำนวณได้ในตอนแรก เวลาที่ใช้จริงในการเดินเครื่องจะเพิ่มมากขึ้นถ้าผสมวัสดุถี่ขึ้น (นั่นคือ ถ้า θ_m มีค่าน้อย) ดังนั้นผลของการประหยัด เวลาเดินเครื่องจะขึ้นกับทั้งค่าของ θ_m และ θ_x ด้วย

โดยทั่วไปถ้าเสียเวลาน้อยในการผสมวัสดุแต่ละครั้ง การประหยัดเวลามากที่สุดจะเกิดขึ้นที่ค่า θ_m น้อยลง (นั่นคือการผสมถี่ขึ้น) ในทางตรงกันข้ามถ้าการผสมวัสดุแต่ละครั้ง ต้องกินเวลานานพลังงานสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ค่า θ_m สูง คือ 250 นาที อนึ่ง ผลของการประหยัดพลังงานและการเพิ่มผลผลิตที่ได้จะมีค่าสูงถึง 13.3 %, 14.8 %, 9.5 % และ 6.1 % สำหรับเงื่อนไขในตารางที่ 8.5, 8.6, 8.7 และ 8.8 ตามลำดับ

8.2 การประหยัดพลังงานในการอบแห้งแบบงวด (Batch) โดยการสลับทิศทางของลมร้อน

สำหรับกรณีการอบแห้งโดยสลับทิศทางของลมร้อนเป็นครั้งคราว วัสดุที่อยู่ในย่านทางเข้าและออกของลมร้อนจะแห้งตัวเร็วกว่าวัสดุที่อยู่ย่านใจกลางของชั้นวัสดุ ดังนั้นเวลา θ_f ที่ต้องใช้อบแห้งจะหมายถึง เวลาที่ต้องใช้เพื่อทำให้ตำแหน่งที่มีความชื้นสูงสุด ในชั้นวัสดุ เหลือความชื้น เท่ากับค่าที่ต้องการ

ตารางที่ 8.9, 8.10, 8.11 และ 8.12 แสดงผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรก เริ่มค่าที่หนึ่งจนเหลือความชื้นสุดท้ายต่างๆ สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. ระหว่างกรณีการอบแห้งแบบปกติและกรณีการอบแห้งที่สลับทิศทางของลมร้อนทุก θ_m นาที

อนึ่ง ในการอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อนเราไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงเวลาที่เสียไปในการสลับทิศทางลมร้อนแต่ละครั้ง เพราะในภาคปฏิบัติเราสามารถออกแบบ เครื่องอบแห้งที่สลับทิศทางของลมร้อนอย่างรวดเร็วได้โดยง่าย

ตารางที่ 8.9 ผลการเปรียบเทียบ เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรก เริ่ม
 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง จนเหลือความชื้น 0.336 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง
 สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติ
 กับการอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อนทุก θ'_m นาที)

θ'_m (นาที)	$1/\theta'_m$ (นาที ⁻¹)	θ_f (นาที)	พลังงานที่ประ- หยัดได้ (%)
∞	0.000	300	0.0
30	0.033	280	6.7
60	0.017	300	0.0
90	0.011	300	0.0
120	0.008	310	-3.3

ตารางที่ 8.10 ผลการเปรียบเทียบ เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรก เริ่ม
 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้งจนเหลือความชื้น 0.252 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง
 สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติ
 กับการอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อนทุก θ'_m นาที)

θ'_m (นาที)	$1/\theta'_m$ (นาที ⁻¹)	θ_f (นาที)	พลังงานที่ประ- หยัดได้ (%)
∞	0.000	305	0.0
30	0.033	300	1.6
60	0.017	310	-1.6
90	0.011	310	-1.6
120	0.008	320	-4.9

ตารางที่ 8.11 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้งจนเหลือความชื้น 0.168 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อนทุก θ'_m นาที)

θ'_m (นาที)	$1/\theta'_m$ (นาที ⁻¹)	θ_f (นาที)	พลังงานที่ประหยัดได้ (%)
∞	0.000	315	0.0
30	0.033	310	1.6
60	0.017	320	-1.6
90	0.011	330	-4.8
120	0.008	330	-4.8

ตารางที่ 8.12 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุจากความชื้นแรกเริ่ม 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้งจนเหลือความชื้น 0.084 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง สำหรับการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีการอบแห้งแบบปกติกับการอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อนทุก θ'_m นาที)

θ'_m (นาที)	$1/\theta'_m$ (นาที ⁻¹)	θ_f (นาที)	พลังงานที่ประหยัดได้ (%)
∞	0.000	330	0.0
30	0.033	340	-3.0
60	0.017	340	-3.0
90	0.011	340	-3.0
120	0.008	350	-6.1

จากผลที่แสดงในตารางที่ 8.9 - 8.12 จะเห็นว่า การอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อน เป็นครั้งคราวแทบไม่ช่วยประหยัด เวลาอบแห้งเลย ยิ่งกว่านั้นอาจทำให้เสีย เวลา มากกว่า การอบแห้งแบบปกติด้วยซ้ำ อย่างไรก็ตาม การอบแห้งโดยสลับทิศทางลมก็มีข้อดีกว่า การอบแห้งแบบปกติ ในแง่ที่ว่าที่ เวลาสิ้นสุดของการอบแห้ง การกระจายความชื้นในชั้นวัสดุจะค่อนข้างสม่ำเสมอว่า กรณีของการอบแห้งแบบปกติ ในกรณีหลังความชื้นที่ปลายด้านทาง เข้าของลมร้อนจะต่ำกว่าที่ ปลายด้านทางออกมาก

8.3 การยืนยันผลการประหยัดเวลาที่ทำนายโดยแบบจำลองข้างต้น

จากหัวข้อ 8.1 และ 8.2 จะเห็นได้ว่า การอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวสามารถ ประหยัด เวลาอบแห้งได้สูงถึง 14.8 % ถึง 6.1 % ซึ่งขึ้นอยู่กับความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ ส่วน การอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อน เป็นครั้งคราวแทบไม่ช่วยประหยัด เวลาอบแห้ง แต่ก็ช่วยให้ชั้น วัสดุมีความชื้นสุดท้ายสม่ำเสมอขึ้น ในอุดมคติแล้ว เราควรทำการอบแห้งมันสำปะหลังภายใน เงื่อนไขเหมือนกัน แต่ใช้วิธีการอบแห้งแบบต่างๆ (แบบปกติ แบบผสมวัสดุเป็นครั้งคราวและแบบ สลับทิศทางลมร้อน เป็นครั้งคราว) เพื่อ เปรียบเทียบและยืนยันผลของการประหยัด เวลาอบแห้งที่ แบบจำลองได้ทำนายไว้ในหัวข้อ 8.1 และ 8.2 ในการประเมินผลการประหยัดเวลา โดยใช้ แบบจำลองนั้น เราสามารถทำและต้องทำได้โดยกำหนดให้ชั้นวัสดุมีความชื้นแรก เริ่ม เหมือนกัน หมดในทุกกรณี (กรณีอบแห้งปกติ กรณีผสมวัสดุเป็นครั้งคราว และกรณีสลับทิศทางลมร้อน เป็น ครั้งคราว) แล้วคำนวณหาเวลาที่จำเป็นต้องใช้ในการลดความชื้นสุดท้ายให้เหลือค่าที่สนใจเหมือน กันหมด แต่สิ่งที่เราได้ค้นพบในภาคปฏิบัติก็คือ ความชื้นแรกเริ่มของชั้นวัสดุในการทดลองแต่ละครั้ง จะไม่เท่ากัน เนื่องจากการทดลองแต่ละครั้งต้องกินเวลานาน ทำให้วันๆ หนึ่งทำการทดลองได้ ไม่เกิน 1 ครั้ง ดังนั้น ถ้าหั่นและเตรียมมันสำปะหลังไว้ล่วงหน้าให้พร้อมกับการทดลองหลายๆ ครั้ง ความชื้นแรกเริ่มในการอบแห้งแต่ละครั้งก็ย่อมเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนั้นการกระจายความชื้นของ ชั้นมันที่ เฝ้งหั่นได้กับในชั้นมันที่หั่นทิ้งไว้นาน เป็นวันๆ ก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย ถึงแม้จะซื้อมันสำปะหลังมา กองทิ้งไว้โดยไม่หั่นก็ตาม ความชื้นแรกเริ่มตลอดจนคุณสมบัติทางกายภาพและชีวภาพของมันก็ยัง เปลี่ยนไปได้ เมื่อเวลาผ่านไปเป็นวันๆ นอกจากนี้ก็เป็นการศึกษาที่จะหั่นชั้นมันให้ได้ขนาด เหมือนกัน หมดในการ เตรียมการทดลองแต่ละครั้ง อนึ่ง ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนที่ใช้ก็เปลี่ยนแปลงได้แต่ ละวัน ถึงแม้จะรักษาอุณหภูมิของลมร้อนให้คงที่

ด้วยเหตุนี้ เราจึงได้พยายามคิดหาทางเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้น ทางเลี่ยงที่ได้คิดขึ้นก็คือ มีความจำเป็นหรือไม่ที่ต้องกำหนดให้ความชื้นแรกเริ่มมีค่าเท่ากันหมดในการทดลองแต่ละครั้ง ในแง่กลับกันก็คือ เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งจะยังเท่ากันหรือไม่ ถ้าเราลดความชื้นจากความชื้นแรกเริ่มต่างๆ จนเหลือความชื้นสุดท้ายที่มีเปอร์เซ็นต์เท่ากัน เมื่อเทียบเท่ากับความชื้นแรกเริ่มนั้นๆ

จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง เราพบว่าแม้แต่การอบแห้งแบบเดียวกัน เช่นกรณีการอบแห้งแบบปกติเหมือนกัน ถ้าความชื้นแรกเริ่มต่างกัน เช่น 1.68 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง และ 1.20 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งเพื่อให้เหลือความชื้นสุดท้ายเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากัน เมื่อเทียบจากความชื้นแรกเริ่มนั้นๆ ก็ต่างกันด้วย (เช่น 316 และ 240 นาที ตามลำดับสำหรับการลดลงเหลือ 10 % เหมือนกัน) ผลสรุปอย่างเดียวกันนี้ก็ได้กับการอบแห้งแบบผสมวัสดุ เป็นครึ่งคราวและกรณีสลับทิศทางลมร้อน เป็นครึ่งคราวด้วย ด้วยเหตุนี้ทางเลี่ยงนี้จึงไม่ใช่วิธีที่ถูกต้อง

สรุปแล้วถึงแม้เราไม่อาจยืนยันผลการประหยัดเวลาอบแห้งระหว่างกรณีการอบแห้งแบบต่างๆ ได้โดยการทดลองโดยตรงก็จริง แต่เราก็ยังสามารถยืนยันผลโดยทางอ้อมได้ นั่นคือโดยการพิสูจน์ว่าแบบจำลองที่ได้ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถทำนายเวลาที่ต้องใช้อบแห้งได้ค่อนข้างแม่นยำ ไม่ว่าจะการอบแห้งจะเป็นแบบปกติ แบบผสมวัสดุเป็นครึ่งคราวหรือแบบสลับทิศทางลมร้อน เป็นครึ่งคราว การพิสูจน์ความเหมาะสมของแบบจำลองในกรณีการอบแห้งแบบต่างๆ นี้ มีรายละเอียดอยู่ในหัวข้อ 7.1 ดังนั้น เราจึงมีความเชื่อมั่นพอสมควรว่าผลของการประหยัดพลังงานที่แสดงไว้ในหัวข้อ 8.1 และ 8.2 จะใกล้เคียงกับความเป็นจริง

8.4 ช่วงห่างของเวลา θ_m ที่เหมาะสมที่สุดในกรณีการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครึ่งคราว

จากตารางที่ 8.1 - 8.4 เราพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (θ'_F) จะสั้นที่สุดเมื่อช่วงห่างของการผสมวัสดุ θ_m มีค่า 50 หรือ 250 นาที ทั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อเอาค่า $\theta_m = 50$ หรือ 250 ไปหารค่า $\bar{\theta}_F$ ของการอบแห้งแบบปกติ การหารจะทำได้ลงตัวหรือเหลือเศษน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับค่า θ_m อื่นๆ ในตารางดังกล่าว ดังนั้นข้อสรุปที่น่าสนใจมากก็คือค่า θ_m ที่เหมาะสมที่สุดในการลดเวลาและพลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้งก็คือ ค่า θ_m ที่หารเวลา $\bar{\theta}_F$ ที่ต้องใช้ในการอบแห้งโดยไม่ผสมวัสดุเลยได้ลงตัวหรือเกือบลงตัวที่สุด

8.5 ตัวอย่างการคำนวณพื้นที่ของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านและการประเมินพลังงานที่ประหยัดได้เมื่อเปลี่ยนไปทำการอบแห้งแบบผสมวัสดุเป็นครั้งคราว

สมมติว่าเราต้องการลดความชื้นของชั้นมันสำปะหลัง (ขนาด 0.5 x 0.5 x 0.3 ซม.) ในอัตรา 1250 กก. (วัสดุแห้ง)/งวด x วันละ 4 งวด จากความชื้น 1.68 กก./กก. วัสดุแห้งลงเหลือ 0.252 กก./กก. วัสดุแห้ง โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน ความหนาแน่นของเนื้อมันสำปะหลังแห้ง คือ 924 กก./ลบ.ม. อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 65^oซ และ 0.6 ม./วินาที ตามลำดับ อัตราส่วนว่างของชั้นวัสดุเท่ากับ 0.768 และความสูงของชั้นวัสดุเท่ากับ 0.4 ม. อากาศภายนอกมีอุณหภูมิ 20^oซ

ก. การคำนวณพื้นที่ของเครื่องอบแห้งที่ต้องใช้

ในกรณีการอบแห้งแบบปกติ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง(θ_F^I)จะเท่ากับ 305 นาที (ตารางที่ 8.6)

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่รวมของเครื่องอบแห้ง} &= \frac{1250}{924(1-0.768) \times 0.4} \\ &= 14.5 \quad \text{ตร.ม.} \end{aligned}$$

ถ้าให้เส้นผ่าศูนย์กลางของเครื่องอบแห้งแต่ละเครื่อง = 1.1 ม.

$$\text{จำนวนเครื่องที่ต้องใช้ในการอบแห้ง} = \frac{14.5 \times 4}{\pi(1.1)^2} = 15 \quad \text{คอลัมน์}$$

ข. การประเมินพลังงานที่ต้องใช้เดินเครื่องอบแห้ง (กรณีอบแห้งแบบปกติ)

เนื่องจากลมร้อนที่อุณหภูมิ 65^oซ มีปริมาตรจำเพาะ = 1.02 ลบ.ม./กก.อากาศแห้ง

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วเชิงมวลของลมร้อน} &= \frac{0.6 \times 3600}{1.02} \\ &= 2117 \text{ กก./}(\text{ตร.ม.})(\text{ชม.}) \end{aligned}$$

$$\text{ความร้อนที่ต้องใช้เพิ่มอุณหภูมิอากาศ} = 2117 \times \frac{\pi(1.1)^2(1)}{4 \times 29} (7.00)(65-20)$$

$$= 21852.9 \text{ กิโลแคลอรี/ชม.}$$

$$= 25.4 \text{ kW}$$



ผลลดความดันของลมร้อนที่ไหลผ่านชั้นวัสดุหาได้จาก

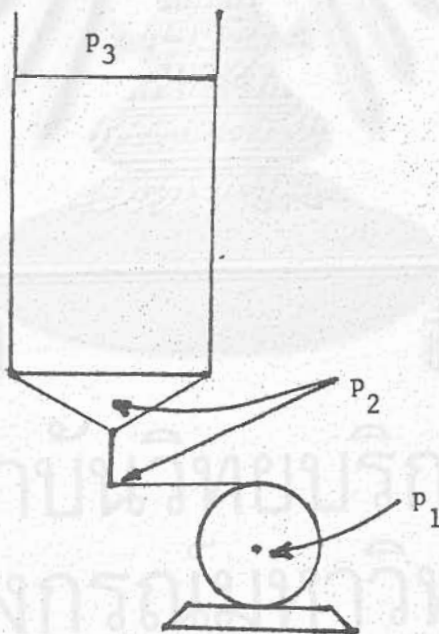
$$\frac{\Delta P \cdot g_c \cdot \epsilon^3 \cdot d_p \cdot g}{L(1 - \epsilon) \cdot G^2} = \frac{150(1 - \epsilon)}{(D_p \cdot G / \mu)} + 1.75$$

นั่นคือ

$$\frac{\Delta P \cdot 9.8 \times (0.768)^3 \times 0.409 \times 10^{-2} \times 0.98}{0.4(1 - 0.768) (2117/3600)^2} = \frac{150(1 - 0.768) (2.0 \times 10^{-5})}{0.409 \times 10^{-2} \times (2117/3600)} + 1.75$$

$$\Delta P = 3.68 \text{ Kg}_{\text{force}}/\text{ตร.ม} = 3.53 \times 10^{-3} \text{ atm.}$$

พิจารณารูป



$$\text{ความเร็วเชิงปริมาตรที่จุด 2 (V}_2) = \frac{1(1.1)^2}{4} \times 0.6 = 0.57 \text{ ลบ.ม./วินาที}$$

$$= 570 \text{ ลิตร/วินาที}$$

กำลังของเครื่องเป่าลม/ชม.

$$= \frac{\gamma}{\gamma-1} P_2 V_2 \left[1 - \left\{ \frac{P_1}{P_2} \right\}^{\gamma-1/\gamma} \right] \frac{1}{\eta}$$

เนื่องจาก

$$\gamma = C_p / C_v = 1.4 \text{ สำหรับอากาศ}$$

$$\eta = \text{ประสิทธิภาพของเครื่องเป่าลม} = 80 \%$$

$$P_2 = 1 + 3.53 \times 10^{-3} \text{ atm} = 1.004 \text{ atm}$$

กำลังของเครื่องเป่าลม/ชม.

$$= \frac{1.4}{1.4-1.0} P_2 V_2 \left[1 - \left\{ \frac{1}{P_2} \right\}^{(1.4-1.0)/1.4} \right] \frac{1}{0.8}$$

$$= 4.375 P_2 V_2 (1 - P_2^{-2/7})$$

$$= 4.375(1.004)(570) \left\{ 1 - (1.004)^{-2/7} \right\}$$

$$\times (0.1359 \text{ กำลังม้า.วินาที/ลิตร. atm})$$

$$= 0.68 \text{ กำลังม้า}$$

$$= 0.51 \text{ KW}$$

เนื่องจากการอบแห้งแบบปกติใช้เวลางวดละ = 305 นาที

$$= 5.08 \text{ ชม.}$$

ถ้าทำการอบแห้ง 4 งวด จะใช้เวลา = 5.08 x 4

$$= 20.33 \text{ ชม.}$$

พลังงานที่ต้องใช้สำหรับลดความร้อนคือ เครื่องอบแห้ง = 25.4 x 20.33 = 516.4 kW-h

พลังงานที่ต้องใช้สำหรับ เครื่องเป่าลมต่อ เครื่องอบแห้ง = 0.51 x 20.33 = 10.4 kW-h

พลังงานรวมที่ต้องใช้ทั้งหมดคือ เครื่องอบแห้ง = 526.8 kW-h

พลังงานรวมที่ต้องใช้ทั้งหมดสำหรับ 15 เครื่อง = 7902 kW-h

ค. การประเมินพลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้งแบบผสมวัสดุอย่างครั้งคราว

จากตารางที่ 6

การอบแห้งโดยการผสมวัสดุ เป็นครั้งคราวใช้เวลาอบแห้งงวดละ = 260 นาที หรือ 4.33 ชม

ดังนั้นพลังงานที่ต้องใช้ทั้งหมดสำหรับ 15 คอลัมน์อบแห้ง = 6730 kW-h

พลังงานที่ประหยัดได้เมื่อ เปลี่ยนไปอบแห้งแบบผสมวัสดุครั้งคราว = 117. kW-h/วัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๑.1 ข้อสรุปหลัก

ข้อสรุปหลักที่ได้จากงานวิจัยมีดังนี้ คือ

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถทำนายเวลาที่คงใช้ในการอบแห้งชั้นวัสดุค่อนข้างหนาแบบไหลผ่านได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 5.3%, 3.2% และ 7.7% สำหรับกรณีการอบแห้งแบบปกติ แบบผสมวัสดุเป็นครั้งคราว (ทุกๆ 150 นาที) และแบบสลัทธิศทางของลมร้อนเป็นครั้งคราว (ทุก ๆ 30 นาที) ตามลำดับ

2. เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่คงใช้ในการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. ให้เหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากัน เราพบว่า การอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า (หรือ เท่ากับ) การอบแห้งแบบปกติเสมอ ส่วนการอบแห้งโดยสลัทธิศทางลมร้อนเป็นครั้งคราวแทบไม่มีผลต่อการประหยัดเวลาการอบแห้งเลย และในบางเงื่อนไขอาจเสียเวลามากกว่าการอบแห้งแบบปกติ อย่างไรก็ตาม การอบแห้งโดยสลัทธิศทางลมก็มีข้อดีในแง่ที่ว่าความชื้นในชั้นวัสดุที่อบแห้งเสร็จจะกระจายค่าสม่ำเสมอกว่ากรณีการอบแห้งแบบปกติ

3. ในกรณีการอบแห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราว ถ้าต้องเสียเวลา (θ_x) ในการผสมวัสดุครั้งละ 10 นาที เวลาที่สั้นที่สุดที่คงใช้ในการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. จะเป็นกรณีที่ผสมวัสดุทุกๆ 250 นาที ซึ่งสามารถประหยัดพลังงาน (หรือเพิ่มผลผลิต) ได้สูงถึง 13.3%, 14.8%, 9.5% และ 6.1% สำหรับการลดความชื้นจาก 1.68 กก.น้ำ/กก. วัสดุแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้าย 0.336, 0.252, 0.168 และ 0.084 กก.น้ำ/กก. วัสดุแห้ง ตามลำดับ

4. ในกรณีการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. โดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราวช่วงห่างของเวลา θ_m ที่เหมาะสมที่สุดในการลดเวลาอบแห้งก็คือ ค่า θ_m ที่สามารถหารเวลา θ_f ของกรณีการอบแห้งโดยไม่ผสมวัสดุเลยได้ลงตัวหรือ เกือบลงตัวที่สุด

5. เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองที่เวลาเดียวกันของการกระจายความชื้นในชั้นมันสำปะหลัง สำหรับทั้งกรณีการอบแห้งแบบปกติ แบบผสมวัสดุเป็นครั้งคราวและแบบสลัทธิศทางลมร้อนเป็นครั้งคราว จะเห็นได้ว่าการกระจายความชื้นในย่านทางเข้าของลม

ร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณมากกว่าของในย่านทางออกของลมร้อนเสมอ สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นมืออธิบายอยู่ในหัวข้อ 7.2.3

6. จากการศึกษาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งมันสำปะหลังชั้นบางในเงื่อนไขต่างๆ (4 ประเภท) ปรากฏว่าไม่พบช่วงอัตราเร็วการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ อนึ่ง อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนมีอิทธิพลพอสมควรต่อการอบแห้งมันสำปะหลังชั้นบางในลักษณะที่อัตราการอบแห้งจะมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนมีค่าสูงขึ้น

9.2 งานวิจัยที่ควรทำต่อในอนาคต

งานที่สมควรทำต่อคือการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ เครื่องอบแห้งประเภทอื่นเพื่อประยุกต์แนวทางที่ได้ผลสำหรับประหยัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรณานุกรม



เรียวโซ โทเอ "อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม" , พิมพ์ครั้งที่ 2, pp 85-92, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 1982

เอกสารสถิติการเกษตร ปี 1982/83, ศูนย์สถิติการเกษตร, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

เอกสารรายงานการส่งออกวัสดุเกษตรของประเทศไทย, กรมการค้าต่างประเทศ, กระทรวงพาณิชย์, 1984

Ashworth, J.C. and Hill, M.C. "Use of simulation techniques to evaluate strategies for improvement of industrial multizone through-circulation trolley dryer" First International drying symposium (Mujumdar, A.S.) pp. 508-522, 1980.

Bakshi, A.S. and Singh R. Paul. "Drying characteristic of Parboiled rice" International symposium on drying :pp 282-288, 1980.

Brown, A.H. and Van Arsdel, W.B. "Drying rate monographs. III. White potato strips-vertical air flow" USDA (1951): AIC-31-III

Chien, K.S., Matthes, R.K. and Verma, B.P., "Dimensional analysis of seed-moisture movement in deep-bed drying" Trans Amer Soc Agr Eng, Gen Ed. 14(2), (1971): 227-281.

Chirife, J. and Cachero, R.A., "Through-circulation drying of tapioca root" J.Food Science. 35(1970): 364-368.

Garden, R.G. and Mitchell, T.J., "Through-circulation drying of seaweed" J.Sci. Food Agr. 8(1953): 370

Hochstetler, T. "Using waste engine heat to dry grain" Agric Eng. 62(3), (1981): 18-19

- Hubble and Prestion, E., "Consider microwave drying" Chem Eng (New York) 89(20), (1982): 125-127.
- Marshall, W.R. and Hougen, O.A., "Through-circulation drying of seaweed" J.Sci.Food Agr. 3, (1942): 113.
- McGraw, D.R., Farabi, H. and Jairam, J. "The optimisation of batch operated packed bed dryers for the drying of tropical agricultural products" Third International drying symposium pp. 616-619, 1984.
- Ouhab, R. and Pourhiet, A.L.E., "Optimum drying condition of grain" Third International drying symposium , pp. 579-584, 1984.
- Roberts, D.E. and Brooker, D.B., "Grain drying with a recirculation" Trans Amer Soc Agric Eng., Gen Ed. 18(1), (1975): 181-184.
- Rusmitus, S. "Study of variable effecting drying rate of Tapioca chips" Master's Thesis, Department of Chemical Technology, Chulalongkorn University, 1978.
- Sabbah, R.A., Meyer, G.E., Keener, H.M. and Roller, W.L. "Reversed-direction-air-flow drying for soybean seed" Trans Amer Soc Agric Eng. Gen Ed. 20(3), (1977): 562-566.
- Shanokprasith, S. and Bunnrungsanor, S. "Through-circulation drying of freshly harvested paddy" Senior project, Department of Chemical Technology, Chulalongkorn University, 1976.
- Svensson, C. "Industrial applications for new steam drying process in forest and agricultural industry" Third International drying symposium, pp. 541-546, 1984.
- Tanthapanichakoon, W. and Loychirakul, T. "Through flow drying characteristics of some Thai fruits" Third International drying symposium, pp. 591-596, 1984.

- Thanh, N.C. "Technological improvement of Tapioca chips and pellets produced in Thailand" AIT research report 57, 1976.
- Thanh, N.C., Muttamara, S., Lahani, B.N. and Burintratikul "Optimisation of drying and pelleting techniques for tapioca roots" Environmental division, AIT, Thailand, 1979.
- Toei, R. ed. Kanso Sochi, 6th ed., pp. 648-656, Nikkan Kogyo Shembunsha, 1972.
- Thompson and James, F. "Reducing energy use in agricultural drying operation" In conference on energy use manage : pp. 22-26, 1979.
- Thongswang, M., Naewbanij, M., Sihawaong, R., Unsuriya, T. and Kammuang, P. "Design on laboratory grain dryer." Thailand Pat. XI-5, 1980.
- Yoshida, F. and Mori Shoron Kagaku Kogaku II pp. 58, Asakura Shaten, 1967.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-1

ภาคผนวกนี้แสดงโปรแกรมคอมพิวเตอร์และลักษณะการกระจายความชื้นในชั้นมันสำปะหลัง
หนา 40 ซม. ของทั้งการคำนวณและการทดลอง สำหรับทั้งกรณีการอบแห้งแบบปกติและการอบ-
แห้งโดยผสมวัสดุเป็นครั้งคราว (ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างของกรณีผสมวัสดุทุกๆ 50 นาที)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


```

56 EXPCC=EXP(CCMNA/(CCMIN-EC))
57 DO 100 I=1,NUMBER
58 EXPZTA=EXP(CCADATA(I)/(CCMIN-EC))
59 FCAL(I)=CFIC*EXPZTA*(1.C-EXPCC)/(1.C-EXPZTA*(1.C-EXPCC))
70 WRITE(6,110) ZTA(I),EXPZTA(I),FCAL(I)
71 110 FORMAT(10X,F9.5,20X,F18.9,20X,F18.9)
72 100 CONTINUE
73 WRITE(6,SUCH DATA FROM THE EXPERIMENT IN DIMENSIONLESS FORM
74 DO 4 I=1,NATA
75 DO 4 J=2,MPCINT
76 WEXP(I,J)=(WEXP(I,J))/CCMIN
77 4 CONTINUE
78 CCA=(WEXP(1,2)+WEXP(1,3)+WEXP(1,4)+WEXP(1,5)+WEXP(1,6)+WEXP(1,7)+W
*EXP(1,8)+WEXP(1,9))/8.
79 DO 23 J=3,MPCINT
79 ETA(J)=ATA(J)*CCMASS/100./FLCH
90 23 CONTINUE
91 WRITE(6,101)
92 WRITE(6,55) CCMIN.
83 55 FORMAT(15X,'CCMIN=',F6.2//)
84 DO 3 I=1,NATA
85 WEXP(I,10)=(WEXP(I,2)+WEXP(I,3)+WEXP(I,4)+WEXP(I,5)+WEXP(I,6)+WEXP
*(I,7)+WEXP(I,8)+WEXP(I,9))/8.
86 3 CONTINUE
87 WRITE(6,24)(ETA(J),J=3,MPCINT)
88 24 FORMAT(150X,'TABLE OF DATA IN DIMENSIONLESS'///2X,'TIME(MIN) TAU
*
',35X,'VALUE OF FI AT ETA=',32X,' FI MEAN'//25X,'*',8F10.5/
*//)
89 WRITE(6,52)((WEXP(I,J),J=1,MPCINT),I=1,NATA)
90 52 FORMAT(2X,F7.2;17X;9F10.5)
91 SHOW DATA FROM CALCULATION
91 WRITE(6,101)
92 FIONA=CCA
93 WRITE(6,103) FICNA
94 103 FORMAT(5X,'FICNA=',F8.4)
95 WRITE(6,25)(ETA(J),J=3,MPCINT)
96 25 FORMAT(150X,'TABLE OF DATA IN DIMENSIONLESS'///2X,'TIME(MIN) TAU
*
',35X,'VALUE OF FI AT ETA=',32X,' FI MEAN',2X,'RATE'//25X,'
**',8F10.5//)
97 TF=5.
98 TUF=CCMASS*TF/(AFSIGN*DEN*CCMIN*60.)
99 TUT=0.
100 TG=0.
101 56 W=EXP(TI*TUT)
102 I=3
103 57 A(I)=FIONA*(EXP(FIONA*ETA(I)))/(W+EXP(FIONA*ETA(I))-1)
104 I=I+1
105 IF(I=GT;MPCINT) GO TO 58
106 GO TO 57
107 58 C=EXP(-FICNA)*FTAL
108 E=EXP(FICNA*ETAL)
109 D=EXP(-PI*TUT)
110 ZA=(FIONA*FTAL+ALCG(D*(1.-C)+C))/FTAL
111 RATE=((PI)*FICNA*(C*(1.-F))/ETAL*(FIONA-(FICNA*D)+(FICNA*D*E)))*CC
*MASS/(AFSIGN*DEN)
112 WRITE(6,113) IG,TUT,(Z(I),I=3,MPCINT),DA,RATE
113 113 FORMAT(10X,17.2,2X,F8.2,7X,'CFIC,F)
114 114 FORMAT(10X,17.2,2X,F8.2,7X,'CFIC,F)
115 GO TO 5

```

```

117 C WRITE(5,150) DATA FROM THE EXPERIMENT IN CASE OF MIXING
118 5 WRITE(5,1)
119 WRITE(5,151) (STAT(J), J=1, MFCINT)
120 151 FORMAT(30X, 'TABLE OF RAW DATA BETWEEN TIME*MOISTURE IN CASE OF MI
*XP(1,7)/7X, 'TIME(MIN) * * * * *', 30X, 'VALUE OF MOISTURE AT
*DTIME(C/CM)=', 20X, 'MEAN', 775X, '1', 2X, 9F10.5//)
121 DO 152 I=1, MATA
122 AEXP(I, 2) = (AEXP(I, 1) + AEXP(I, 2) + AEXP(I, 4) + AEXP(I, 5) + AEXP(I, 6) + AEXP(I, 7) + AEXP(I, 8) + AEXP(I, 9)) / 8.
123 152 CONTINUE
124 WRITE(6, 153) ((AEXP(I, J), J=1, MFCINT), I=1, MATA)
125 153 FORMAT(2X, F7.2, 19X, 9F10.5)
C WRITE(5) SHOW DATA IN DIMENSIONLESS FORM IN CASE OF MIXING
126 DO 154 I=1, MATA
127 DO 154 J=2, MFCINT
128 AEXP(I, J) = (AEXP(I, J)) / CC MIN
129 154 CONTINUE
130 ACG = (AEXP(I, 2) + AEXP(I, 3) + AEXP(I, 4) + AEXP(I, 5) + AEXP(I, 6) + AEXP(I, 7) + AEXP(I, 8) + AEXP(I, 9)) / 8.
131 DO 155 J=3, MFCINT
132 ETA(J) = ACG * CC MASS / LOC. / FLOW
133 155 CONTINUE
134 WRITE(6, 101)
135 WRITE(6, 156) CC MIN
136 156 FORMAT(175X, 'CC MIN=', F6.2//)
137 DO 157 I=1, MATA
138 AEXP(I, 10) = (AEXP(I, 2) + AEXP(I, 3) + AEXP(I, 4) + AEXP(I, 5) + AEXP(I, 6) + AEXP(I, 7) + AEXP(I, 8) + AEXP(I, 9)) / 8.
139 157 CONTINUE
140 WRITE(6, 158) (ETA(J), J=3, MFCINT)
141 158 FORMAT(150X, 'TABLE OF DATA IN DIMENSIONLESS IN CASE OF MIXING'//72
*Y, 675X, 'E(MIN) TAU *', 35X, 'VALUE OF FI AT ETA=', 32X, 'FI MEAN'
*//25X, 'MEAN', 9F10.5//)
142 WRITE(6, 159) ((AEXP(I, J), J=1, MFCINT), I=1, MATA)
143 159 FORMAT(2X, F7.2, 17X, 9F10.5)
144 FLOW = ACG
145 I=1
146 I=3
147 113 YAT(I) = ETA(J)
148 I=I+1
149 J=J+1
150 IF (J.GT. MFCINT) GO TO 51
151 GO TO 113
152 51 I=1
153 14 YAT(I) = YAT(I)
154 I=I+1
155 IF (I.GT. 51) GO TO 551
156 GO TO 14
157 551 MFCINT = MFCINT + 1
158 Z1 = 1.0 / MFCINT
159 Z2 = 1.0 / MFCINT
160 IPRINT = MFCINT
161 MFCINT = 0
162 2170 MFCINT = MFCINT + IPRINT
163 Z1 = 1.0 / MFCINT
164 IPRINT = 0
165 4011 I=1

```

```

170      WRITE(6,100)
171      GOTO 172
172      WRITE(6,100)
173      100 FORMAT(I10)
174      G. CALCULATION FOR PROFILE AFTER MIXING
175      THETA = ZTACFF
176      ZTASUM = ZTACFF
177      DO 170 K=1,MPOINT
178      F(IK)=FICF
179      170 CONTINUE
180      TAUSUM = 0.0
181      100 J=0.0
182      N = 0
183      277 WRITE (6,100) ZTASUM,THETA,TAUSUM,TAU,(F(IK),K=1,MPOINT)
184      190 FORMAT(IX,F7.2,IX,F7.2,'*',F7.2,F7.2,'*',10F10.5)
185      FICFF=0.00001
186      IF (F(I(MPOINT)),LT.FICFF) GO TO 666
187      IF (ZTASUM.GT.ZTACFF) GO TO 666
188      IF (N.GT.100) GO TO 999
189      THETA = THETA+ZTAD1
190      ZTASUM=ZTASUM+ZTACFF
191      N = N+1
192      TAU=CCM*ZTAD1*THETA*(AFSIFK*DEA*(CCMIN-EC)*60.0)
193      TAUSUM=ZTASUM+CCPASS/(AFSIFK*DEA*(CCMIN-EC)*60.0)
194      AE=XXE(I)TAU1
195      DO 190 K=1,MPOINT
196      B=EXP(-IEN*TAU(K))
197      F(IK)=FICN*B/(AE+(B-1.0))
198      190 CONTINUE
199      GO TO 277
200      666 C=EXP((F(IK)-FICN)*BTAL)
201      B=EXP((1-I)TAU)
202      F(IK)=FICN*(1+C*FACOS((B*(1.0-C)+C))/BTAL)
203      THETA = ZTACN
204      WRITE(7,101)
205      105 FORMAT(I10)
206      DO 203 I,J=1,MPOINT
207      F(I,J) = FICN
208      203 CONTINUE
209      GO TO 848
210      675 TRZTANIX,GT,XXIY) GO TO 1111
211      GO TO 202
212      1111 STOP
213      END

```

END 154

CA=	0.0000	CB=	0.0000	CC=	0.0000	CDNA=	3.06000	CCNP=	-10.71000	CCNC=	-2.30400		
DEI=	0.0000	ETA=	0.0000	CMASS=	162626.00000	AFSIGN=	0.23000						
THETA=	0.000	THETA=	0.117	THETA=	0.183	THETA=	0.283	THETA=	0.400	THETA=	0.567	THETA=	0.800
THETA=	1.135	THETA=											
CISTURE=	0.8000	MCISTURE=	0.7000	MCISTURE=	0.6000	MCISTURE=	0.5000	MCISTURE=	0.4000	MCISTURE=	0.3000	MCISTURE=	0.200
CISTURE=	0.1000	MCISTURE=											
REXPET=	1.634	REXPET=	1.382	REXPET=	1.095	REXPET=	0.900	REXPET=	0.708	REXPET=	0.539	REXPET=	0.360
REXPET=	0.234	REXPET=											
PI=0.0140	MASSLINEAR=	2130.00	MPCINT=	10	NATA=	20	LPCINT=	9	NATA=	10			

TABLE OF FAW DATA BETWEEN TIME & MOISTURE

TIME (MIN)	VALUE OF MOISTURE AT DISTANCE (CM) =									MEAN
	2.50000	7.50000	12.50000	17.50000	22.50000	27.50000	32.50000	37.50000		
0.00	1.66100	1.67600	1.66700	1.70400	1.68500	1.67900	1.66300	1.69600	1.67762	
10.00	0.66700	1.33000	1.57600	1.68200	1.67300	1.67900	1.65800	1.67000	1.49200	
20.00	0.23100	0.71900	1.28600	1.58500	1.63100	1.63600	1.62600	1.63200	1.29325	
30.00	0.06500	0.27900	0.75000	1.35100	1.56000	1.61400	1.60500	1.61600	1.10487	
40.00	0.02700	0.08600	0.20500	0.81200	1.32700	1.53200	1.57200	1.57900	0.90500	
50.00	0.01600	0.02700	0.07000	0.22900	0.56300	1.05200	1.40600	1.51900	0.61025	
60.00	0.00900	0.01600	0.03800	0.09300	0.26500	0.62500	1.13300	1.42200	0.45012	
70.00	0.00500	0.00500	0.02100	0.04000	0.09900	0.27600	0.62100	1.10100	0.27100	
80.00	0.00000	0.00500	0.01100	0.02200	0.03800	0.10400	0.29300	0.57700	0.14375	
90.00	0.00000	0.00500	0.00500	0.01600	0.01600	0.04100	0.12000	0.31900	0.06525	
100.00	0.00000	0.00500	0.00500	0.00500	0.01100	0.01900	0.04000	0.13500	0.02750	
110.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00500	0.00600	0.01400	0.01300	0.05400	0.01212	
120.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00500	0.00000	0.00000	0.00000	0.00500	0.00125	
130.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00500	0.00000	0.00000	0.00000	0.00500	0.00125	
140.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
150.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
160.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
170.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
180.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
190.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
200.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	

CALCULATION VALUE OF CC

CC MIN = 0.00000 CC DIFFERENT = 0.05000 CC OFF = 10.00000 NUMBER OF THETA = 3

SUMPTION = 0.04747 CC MINIMUM = 3.84996

THETA (DEG)	RATE OF EXPERIMENT	RATE OF CALCULATION
0.00000	1.623999000	1.537529000
0.11700	1.381955000	1.309927000
0.18300	1.095000000	1.182901000
0.29300	0.899999000	0.997869000
0.40000	0.708000000	0.799710500
0.56700	0.538595900	0.562116200
0.90000	0.360000000	0.325071800
1.13300	0.223999000	0.138419000

TABLE OF DATA IN DIMENSIONLESS

TIME (11)	TAU	VALUE OF FI AT ETA=								FI MEAN
		*	1.90876	5.72627	9.54378	13.26129	17.17879	20.99631	24.81381	
0.00		0.42143	0.42533	0.43299	0.44260	0.43767	0.43611	0.43195	0.43793	0.43575
30.00		0.17325	0.24546	0.40936	0.43715	0.43455	0.43611	0.43065	0.33377	0.38754
50.00		0.06000	0.18676	0.33403	0.41169	0.42364	0.42494	0.42234	0.42390	0.33591
70.00		0.01688	0.07221	0.19481	0.25091	0.40520	0.41923	0.41689	0.41775	0.28698
120.00		0.00701	0.02234	0.07922	0.21091	0.34468	0.29819	0.40852	0.40397	0.23507
155.00		0.00416	0.00701	0.01818	0.05948	0.14624	0.27325	0.36520	0.34455	0.15851
175.00		0.00234	0.00416	0.00987	0.02416	0.06883	0.16234	0.29429	0.35935	0.11692
225.00		0.00130	0.00130	0.00545	0.01039	0.02571	0.07169	0.16130	0.23573	0.07039
255.00		0.00000	0.00130	0.00286	0.00571	0.00987	0.02701	0.07610	0.17535	0.03734
285.00		0.00000	0.00130	0.00130	0.00416	0.00416	0.01065	0.03117	0.03236	0.01695
305.00		0.00000	0.00130	0.00130	0.00130	0.00286	0.00494	0.01039	0.03507	0.00714
335.00		0.00000	0.00000	0.00130	0.00130	0.00156	0.00364	0.00338	0.01403	0.00315
375.00		0.00000	0.00000	0.00000	0.00130	0.00000	0.00000	0.00000	0.01130	0.00032
425.00		0.00000	0.00000	0.00000	0.00130	0.00000	0.00000	0.00000	0.01130	0.00032
455.00		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
495.00		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
515.00		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
545.00		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
575.00		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
595.00		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

TABLE OF DATA IN DIMENSIONLESS

TIME(MIN)	TAU	VALUE OF FI AT ETA=								FI MEAN	RATE
		* 1.90877	5.72627	9.54378	13.36129	17.17879	20.99631	24.81381	28.63133		
0.00	0.00	0.43575	0.43575	0.43575	0.43575	0.43575	0.43575	0.43575	0.43575	0.43575	-0.35086
5.00	17.56	0.39131	0.42657	0.42398	0.43542	0.43569	0.43574	0.43575	0.43575	0.42916	-0.35086
10.00	25.12	0.34671	0.41592	0.42177	0.43499	0.43561	0.43572	0.43575	0.43575	0.42056	-0.35086
15.00	40.71	0.30315	0.40240	0.42901	0.43446	0.43551	0.43570	0.43574	0.43575	0.41297	-0.35086
20.00	67.24	0.26169	0.38698	0.42559	0.43379	0.43539	0.43568	0.43574	0.43575	0.40537	-0.35086
25.00	87.91	0.22320	0.36915	0.42135	0.43295	0.43522	0.43565	0.43573	0.43575	0.39778	-0.35086
30.00	99.77	0.18828	0.34887	0.41612	0.43189	0.43501	0.43561	0.43572	0.43575	0.39019	-0.35085
35.00	115.93	0.15726	0.32627	0.40970	0.43056	0.43476	0.43556	0.43572	0.43574	0.38259	-0.35085
40.00	132.43	0.13021	0.30164	0.40189	0.42891	0.43444	0.43550	0.43570	0.43574	0.37500	-0.35085
45.00	147.05	0.10700	0.27542	0.39246	0.42683	0.43403	0.43542	0.43569	0.43574	0.36740	-0.35085
50.00	165.71	0.08736	0.24821	0.38118	0.42424	0.43352	0.43533	0.43567	0.43574	0.35981	-0.35085
55.00	182.17	0.07095	0.22072	0.36785	0.42102	0.43288	0.43520	0.43565	0.43573	0.35221	-0.35085
57.00	198.72	0.05726	0.19267	0.35231	0.41704	0.43208	0.43505	0.43562	0.43573	0.34462	-0.35085
55.00	219.20	0.04620	0.16774	0.33449	0.41211	0.43107	0.43486	0.43558	0.43572	0.33703	-0.35084
70.00	231.96	0.03710	0.14252	0.31444	0.40607	0.42980	0.43461	0.43553	0.43571	0.32943	-0.35084
75.00	248.72	0.02972	0.12141	0.29234	0.39869	0.42821	0.43430	0.43548	0.43570	0.32184	-0.35084
80.00	264.98	0.02376	0.10167	0.26855	0.38977	0.42622	0.43391	0.43540	0.43563	0.31424	-0.35083
85.00	291.54	0.01896	0.08457	0.24355	0.37907	0.42375	0.43342	0.43531	0.43561	0.30665	-0.35083
90.00	296.10	0.01511	0.06946	0.21796	0.36639	0.42066	0.43281	0.43519	0.43564	0.29906	-0.35082
95.00	314.66	0.01204	0.05681	0.19247	0.35155	0.41684	0.43204	0.43504	0.43562	0.29146	-0.35081
100.00	331.22	0.00958	0.04615	0.16775	0.33448	0.41211	0.43107	0.43486	0.43559	0.28387	-0.35080
105.00	347.78	0.00761	0.03739	0.14444	0.31518	0.40630	0.42985	0.43462	0.43554	0.27628	-0.35078
110.00	364.25	0.00605	0.03014	0.12275	0.29381	0.39921	0.42837	0.43432	0.43548	0.26868	-0.35076
115.00	380.91	0.00481	0.02422	0.10328	0.27066	0.39061	0.42661	0.43395	0.43541	0.26109	-0.35074
120.00	397.47	0.00382	0.01941	0.08606	0.24620	0.38028	0.42403	0.43348	0.43532	0.25350	-0.35070
125.00	414.03	0.00303	0.01552	0.07111	0.22102	0.37800	0.42106	0.43289	0.43521	0.24591	-0.35066
130.00	430.59	0.00240	0.01240	0.05834	0.19577	0.35362	0.41738	0.43215	0.43506	0.23832	-0.35061
135.00	447.15	0.00191	0.00989	0.04756	0.17112	0.32700	0.41283	0.43121	0.43483	0.23073	-0.35055
140.00	462.71	0.00151	0.00787	0.03858	0.14767	0.31815	0.40723	0.43004	0.43466	0.22315	-0.35047
145.00	480.27	0.00120	0.00627	0.03116	0.12592	0.29719	0.40038	0.42858	0.43437	0.21556	-0.35037
150.00	496.82	0.00095	0.00498	0.02507	0.10619	0.27440	0.39207	0.42674	0.43402	0.20798	-0.35024
155.00	513.39	0.00076	0.00396	0.02012	0.08867	0.25020	0.38206	0.42445	0.43356	0.20040	-0.35008
160.00	529.96	0.00060	0.00315	0.01611	0.07341	0.22516	0.37015	0.42159	0.43300	0.19282	-0.34988
165.00	546.52	0.00048	0.00250	0.01287	0.06031	0.19993	0.35616	0.41805	0.43223	0.18525	-0.34963
170.00	563.08	0.00038	0.00198	0.01027	0.04924	0.17518	0.33994	0.41366	0.43137	0.17769	-0.34931
175.00	579.64	0.00030	0.00157	0.00818	0.03998	0.15153	0.32149	0.40826	0.43026	0.17013	-0.34891
180.00	596.20	0.00024	0.00125	0.00652	0.03232	0.12949	0.30090	0.40165	0.42935	0.16258	-0.34847
185.00	612.76	0.00019	0.00099	0.00519	0.02603	0.10941	0.27841	0.39360	0.42779	0.15505	-0.34777
190.00	629.32	0.00015	0.00079	0.00412	0.02000	0.09153	0.25444	0.38291	0.42438	0.14753	-0.34698
195.00	645.89	0.00012	0.00062	0.00327	0.01574	0.07588	0.22951	0.37235	0.42213	0.14003	-0.34598
200.00	662.44	0.00009	0.00050	0.00260	0.01338	0.06243	0.20428	0.35873	0.41972	0.13255	-0.34473
205.00	679.01	0.00007	0.00039	0.00206	0.01068	0.05102	0.17941	0.34292	0.41747	0.12511	-0.34316
210.00	695.57	0.00006	0.00031	0.00164	0.00851	0.04147	0.15553	0.32486	0.41521	0.11770	-0.34121
215.00	712.13	0.00005	0.00025	0.00130	0.00678	0.03355	0.13318	0.30462	0.41217	0.11034	-0.33878
220.00	728.69	0.00004	0.00020	0.00102	0.00539	0.02703	0.11275	0.28245	0.40912	0.10304	-0.33576
225.00	745.25	0.00003	0.00016	0.00080	0.00429	0.02172	0.09448	0.25870	0.40597	0.09591	-0.33253
230.00	761.81	0.00002	0.00012	0.00065	0.00341	0.01740	0.07945	0.23390	0.40251	0.08947	-0.32745
235.00	778.37	0.00002	0.00010	0.00052	0.00271	0.01392	0.06462	0.20867	0.39925	0.08314	-0.32184

247.00	774.85	C.CCC01	C.CCC08	C.CCC04	C.CCC16	C.C1111	C.CC237	0.18369	0.37334	0.37376	-0.37376
248.00	811.40	C.CCC01	C.CCC08	C.CCC04	C.CCC17	C.CC836	C.C4301	0.15960	0.32117	0.32932	-0.32687
251.00	871.09	C.CCC01	C.CCC08	C.CCC04	C.CCC15	C.CC775	C.C3482	0.13696	0.31330	0.06149	-0.29715
255.00	944.67	C.CCC01	C.CCC04	C.CCC00	C.CC107	C.CC561	0.07008	0.11617	0.23544	0.05516	-0.29574
260.00	961.19	C.CCC01	C.CCC03	C.CCC17	C.CC085	C.CC446	C.C2257	0.09751	0.25293	0.04912	-0.27254
265.00	977.74	C.CCC00	C.CCC02	C.CCC17	C.CC064	C.CC255	C.C1007	0.08100	0.23129	0.04331	-0.25754
271.00	996.30	C.CCC00	C.CCC07	C.CCC10	C.CC058	C.CC292	0.01447	0.06689	0.21139	0.03799	-0.24003
275.00	916.96	C.CCC00	C.CCC02	C.CCC08	C.CC043	0.00224	0.01156	0.05478	0.13331	0.03296	-0.22261
280.00	927.42	C.CCC00	C.CCC01	C.CCC04	C.CC024	C.CC178	0.00922	0.04461	0.13372	0.02835	-0.20323
283.00	952.83	C.CCC00	C.CCC01	C.CCC04	0.00027	C.CC141	0.00734	0.03614	0.14377	0.02417	-0.19312
290.00	969.56	C.CCC00	C.CCC01	C.CCC04	0.00021	0.00112	0.00584	0.02916	0.11765	0.02043	-0.16201
295.00	977.10	C.CCC00	C.CCC01	C.CCC03	C.CC117	C.CC085	0.00465	0.02345	0.13351	0.01712	-0.14283
301.00	993.74	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC03	0.00013	0.00070	0.00369	0.01881	0.03377	0.01424	-0.12370
305.00	1116.23	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC02	C.CC011	0.00056	0.00293	0.01505	0.03721	0.01176	-0.10582
310.00	1036.78	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC02	0.00008	0.00044	0.00233	0.01202	0.03575	0.00965	-0.09951
315.00	1043.35	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC01	0.00007	0.00035	0.00185	0.00959	0.03525	0.00787	-0.07494
320.00	1059.01	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC01	0.00005	0.00028	0.00147	0.00764	0.03751	0.00639	-0.06218
325.00	1074.47	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC01	0.00004	0.00022	0.00117	0.00608	0.03329	0.00517	-0.05119
330.00	1099.03	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC01	0.00003	0.00018	0.00092	0.00484	0.02437	0.00416	-0.04186
335.00	1109.59	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00003	0.00014	0.00073	0.00384	0.01755	0.00334	-0.03404
340.00	1124.15	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00002	0.00011	0.00058	0.00305	0.01355	0.00269	-0.02755
345.00	1142.71	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00002	0.00009	0.00046	0.00243	0.01250	0.00214	-0.02221
350.00	1150.29	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00001	0.00007	0.00037	0.00193	0.02298	0.00171	-0.01785
355.00	1175.94	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00001	0.00006	0.00029	0.00153	0.01795	0.00136	-0.01430
360.00	1182.40	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	C.CCC01	0.00004	0.00023	0.00121	0.02633	0.00109	-0.01144
365.00	1208.06	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC01	0.00003	C.CC018	0.00096	0.01503	0.00086	-0.00913
370.00	1235.52	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC01	0.00003	0.00014	0.00076	0.01403	0.00069	-0.00728
375.00	1242.08	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00002	0.00011	0.00061	0.01313	0.00055	-0.00580
380.00	1254.54	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00002	0.00009	0.00048	0.02253	0.00043	-0.00462
385.00	1275.20	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00001	0.00007	0.00038	0.02201	0.00034	-0.00367
390.00	1297.76	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00001	0.00006	0.00030	0.01159	0.00027	-0.00292	
395.00	1308.32	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00001	C.CC005	0.00024	0.01126	0.00022	-0.00232
400.00	1324.89	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00001	0.00004	0.00019	0.01100	0.00017	-0.00184
405.00	1341.45	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00001	0.00003	0.00015	0.01133	0.00014	-0.00146
410.00	1359.01	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	C.CC002	0.00012	0.01063	0.00011	-0.00116
415.00	1374.57	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00002	0.00009	0.01053	0.00009	-0.00092
420.00	1391.13	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00001	0.00008	0.01049	0.00007	-0.00073
425.00	1407.69	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00000	0.00001	0.00006	0.01032	0.00005	-0.00058
430.00	1424.25	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	C.CC001	0.00005	0.01025	0.00004	-0.00046
435.00	1440.81	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00001	0.00004	0.01020	0.00003	-0.00036
440.00	1457.37	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	C.CCC00	0.00000	0.00001	0.00003	0.01016	0.00003	-0.00029
445.00	1473.93	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	C.CCC00	0.00000	0.00000	0.00002	0.01012	0.00002	-0.00023
450.00	1490.50	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00002	0.01010	0.00002	-0.00018
455.00	1507.06	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00000	0.00001	0.01003	0.00001	-0.00014
460.00	1523.62	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	C.CCC00	0.00000	0.00000	0.00001	0.00995	0.00001	-0.00011
465.00	1540.18	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	C.CC000	0.00000	0.01000	0.00001	-0.00009
470.00	1556.74	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	C.CCC00	0.00000	0.00000	0.00001	0.01004	0.00001	-0.00007
475.00	1573.30	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00001	0.00993	0.00001	-0.00006
480.00	1589.86	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	C.CC000	0.00000	0.01002	0.00000	-0.00005
485.00	1606.42	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00000	0.00000	0.01002	0.00000	-0.00004
490.00	1622.98	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01002	0.00000	-0.00003
495.00	1639.54	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00000	0.00000	0.01001	0.00000	-0.00002
500.00	1656.10	C.CCC00	C.CCC00	C.CCC00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01001	0.00000	-0.00002

TABLE OF RAW DATA BETWEEN TIME*MCISTURE IN CASE OF MIXTJS

TIME (H)	VALUE OF MCISTURE AT DISTANCE(CM)=								MEAN
	2.50000	7.50000	12.50000	17.50000	22.50000	27.50000	32.50000	37.50000	
0.00	1.65200	1.69800	1.65200	1.65200	1.64100	1.64100	1.64400	1.52400	1.65050
75.00	0.09700	0.48000	1.16600	1.46500	1.56500	1.59200	1.60100	1.54700	1.18912
150.00	0.02700	0.03200	0.09900	0.38800	0.93500	1.33900	1.49000	1.45600	0.72075
0.00	0.71400	0.71100	0.71400	0.71400	0.70700	0.70700	0.70900	0.59600	0.70900
75.00	0.03200	0.05500	0.10700	0.19600	0.33900	0.47700	0.58400	0.61200	0.30025
150.00	0.00200	0.00800	0.02600	0.01300	0.00500	0.02600	0.04800	0.13200	0.03287
0.00	0.02900	0.02800	0.02900	0.02900	0.02500	0.02500	0.02700	0.01900	0.02637
75.00	0.00700	0.00700	0.01100	0.01100	0.01100	0.01100	0.01300	0.01300	0.01050
150.00	0.00500	0.00300	0.00300	0.00500	0.00300	0.00700	0.00700	0.00500	0.00475
0.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

CC 111- 2.75

TABLE OF DATA IN DIMENSIONLESS IN CASE OF MIXING

TIME (H)	TAJ	VALUE OF FI AT ETA=								FI MEAN
*		1.90876	5.72627	9.54378	13.36129	17.17879	20.99631	24.81381	28.63133	
0.00		0.42910	0.44104	0.42910	0.42910	0.42624	0.42624	0.42702	0.42192	0.42871
75.00		0.02520	0.12468	0.20286	0.28052	0.40650	0.41351	0.41585	0.43132	0.30887
150.00		0.00701	0.00821	0.02571	0.10078	0.24286	0.34780	0.38702	0.37319	0.18721
0.00		0.18546	0.18468	0.18546	0.18546	0.18364	0.18364	0.18416	0.13378	0.18416
75.00		0.00821	0.01425	0.02779	0.05091	0.08805	0.12390	0.15169	0.15376	0.07799
150.00		0.00052	0.00208	0.00675	0.00338	0.00130	0.00753	0.01247	0.03429	0.00054
0.00		0.00753	0.00727	0.00753	0.00753	0.00649	0.00649	0.00701	0.03434	0.00685
75.00		0.00182	0.00182	0.00286	0.00286	0.00286	0.00286	0.00338	0.03338	0.00272
150.00		0.00130	0.00078	0.00078	0.00130	0.00078	0.00182	0.00182	0.03130	0.00123
0.00		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.03000	0.00000

11111111111111 MIXING EVERY 50.00 MIN 1111111

TABLE OF CALCULATION FOR PROFILE AFTER MIXING

TIME (MIN)		T20		VALUE OF FI AT FTA=								
3.00	175.00*	SUM	NO. SUM*	1.90876	5.72627	9.54378	13.26129	17.17979	20.79631	24.91381	29.63133	
3.00	1.00*	0.00	0.00*	0.42871	0.42871	0.42871	0.42871	0.42871	0.42871	0.42871	0.42871	
25.00	25.00*	82.81	82.81*	0.21815	0.26091	0.41258	0.42568	0.42811	0.42959	0.42363	0.42870	
50.00	50.00*	165.61	165.61*	0.08502	0.22994	0.37178	0.41630	0.42623	0.42822	0.42361	0.42869	
75.00	1.00*	165.61	0.00*	0.35276	0.35276	0.35276	0.35276	0.35276	0.35276	0.35276	0.35276	
75.00	25.00*	247.42	82.81*	0.16673	0.27342	0.32800	0.34597	0.35097	0.35229	0.35264	0.35273	
100.00	50.00*	331.22	165.61*	0.06219	0.15924	0.26804	0.32596	0.34538	0.35081	0.35225	0.35263	
125.00	0.00*	331.22	0.00*	0.27682	0.27682	0.27682	0.27682	0.27682	0.27682	0.27682	0.27682	
125.00	25.00*	414.03	82.81*	0.12090	0.19114	0.23951	0.26260	0.27171	0.27503	0.27623	0.27661	
150.00	50.00*	496.84	165.61*	0.04325	0.09621	0.16752	0.22565	0.25660	0.26944	0.27421	0.27591	
175.00	1.00*	496.84	0.00*	0.20094	0.20094	0.20094	0.20094	0.20094	0.20094	0.20094	0.20094	
175.00	25.00*	579.64	82.81*	0.08068	0.11875	0.15206	0.17485	0.18792	0.19468	0.19773	0.19956	
200.00	50.00*	662.45	165.61*	0.02774	0.05154	0.08565	0.12365	0.15574	0.17708	0.18311	0.19527	
225.00	0.00*	662.45	0.00*	0.12564	0.12564	0.12564	0.12564	0.12564	0.12564	0.12564	0.12564	
225.00	25.00*	745.25	82.81*	0.04617	0.06082	0.07571	0.08922	0.10020	0.10865	0.11455	0.11854	
250.00	50.00*	829.06	165.61*	0.01521	0.02201	0.03340	0.04637	0.06105	0.07592	0.08743	0.10044	
275.00	1.00*	829.06	0.00*	0.05561	0.05561	0.05561	0.05561	0.05561	0.05561	0.05561	0.05561	
275.00	25.00*	913.87	82.81*	0.01874	0.02146	0.02422	0.02725	0.03020	0.03309	0.03597	0.03848	
300.00	50.00*	997.67	165.61*	0.00602	0.00726	0.00870	0.01038	0.01229	0.01444	0.01683	0.01942	
325.00	0.00*	997.67	0.00*	0.01192	0.01192	0.01192	0.01192	0.01192	0.01192	0.01192	0.01192	
325.00	25.00*	1076.48	82.81*	0.00380	0.00392	0.00404	0.00416	0.00429	0.00441	0.00454	0.00467	
350.00	50.00*	1159.29	165.61*	0.00120	0.00129	0.00130	0.00135	0.00141	0.00147	0.00153	0.00159	
375.00	1.00*	1159.29	0.00*	0.00139	0.00139	0.00139	0.00139	0.00139	0.00139	0.00139	0.00139	
375.00	25.00*	1242.09	82.81*	0.00044	0.00044	0.00044	0.00044	0.00044	0.00044	0.00044	0.00045	
400.00	50.00*	1324.90	165.61*	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	
425.00	1.00*	1324.90	0.00*	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	
425.00	25.00*	1407.70	82.81*	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	
450.00	50.00*	1490.51	165.61*	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	
475.00	1.00*	1490.51	0.00*	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	
475.00	25.00*	1573.31	82.81*	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	

ภาคผนวก ก-2

ภาคผนวกนี้แสดงโปรแกรมคอมพิวเตอร์และลักษณะการกระจายความชื้นในชั้นมันสำปะหลัง
หนา 40 ซม. ของทั้งการคำนวณและการทดลองสำหรับกรณีการอบแห้งโดยสลับทิศทางลมร้อนเป็น
ครั้งคราว (ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างของกรณีที่สลับทิศทางลมร้อนทุก ๆ 30 นาที)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

DIMENSION ETAL(100), A(100), M(100), ATAL(CC), AEXP(20,10), NTA(100), J
*A(100)
C AEXP(I,J)=VALUE OF MCISTURE CONTENT OF THE DRYING MATERIAL IN THE BEC AT
C DIFFERENT HEIGHT
C CR=FINAL MOISTURE CONTENT(KG WATER/ KG DRY SOLID)
C EC=EQUILIBRIUM MCISTURE CONTENT(KG WATER/KG DRY SOLID)
C DEN=DENSITY (KG/CUBIC M)
C AFSICN=FRACTION OF VOL OCCUPIED BY DRY MATERIAL IN PACKED BED
C -1-(VOID FFACTION)
C CC=CRITICAL MCISTURE CONTENT(KG WATER/KG DRY SOLID)
C CCMASS=MASS TRANSFER COEFFICIENT(KG/CUBIC M, HR, DELTA H)
C NPOINT=NUMBER OF COLUMN OF DATA (MCISTURE CONTENT) FROM THE LONG BED EXP
C I REVERSE FLOW ) PLUS COLUMN OF TIME AND AVERAGE MCISTURE CONTENT
C NATA=NUMBER OF ROW OF DATA(TIME) FROM THE LONG BED EXP( REVERSE FLOW)
C ATAJ)=DISTANCE(CM) FROM THE EXP)
C BTA(J)=DISTANCE(CM)(USED IN THE CALCULATION)
C FLOW=MASS FLOW RATE(KG DRY AIR/HR, SQUARE M)
C LPOINT=NUMBER OF COLUMN OF DATA (MCISTURE CONTENT) FROM THE LONG BED EXP
C I REVERSE FLOW ) PLUS COLUMN OF TIME
C JPOINT=NUMBER OF DATA OF DISTANCE AT DIFFERENT HEIGHT OF BEC
C N=NUMBER OF MCISTURE CONTENT CALCULATED FROM THE NUMERICAL INTEGRATION
C SN=NUMBER OF DEVICED INTERVAL IN THE NUMERICAL INTEGRATION
C TS=TIME INTERVAL BEFORE EACH REVERSE DIRECTION OF AIR FLOW
C TV=TIME INTERVAL ADDED TO INCREASE TIME INTERVAL BEFORE EACH REVERSE
C DIRECTION OF AIR FLOW
C TF=TIME INTERVAL OF EACH CALCULATION OF PROFILE OF MCISTURE CONTENT
C PI=VALUE OF MCISTURE CONTENT OF AIR AT WET BULB TEMPERATURE MINUS VALUE OF
C MCISTURE CONTENT OF AIR BEFORE ENTER THE BED
C READ ALL DATA USED IN THE CALCULATION
2 READ(5,66) CB,EC,DEN,ETAL,AFSICN,CC
3 66 FORMAT(BF10.5)
4 READ(5,222) CCMASS, NPCINT, NATA
5 222 FORMAT(F15.5, 2I10)
6 READ(5,181) FLOW, LPOINT, JPOINT
7 181 FORMAT(F8.4, 2I10)
8 READ(5,16) (ATA(J), J=3, JPCINT)
9 16 FORMAT(10F5.3)
10 READ(5,17) (BTA(J), J=1, JPCINT)
11 17 FORMAT(16F5.3)
12 READ(5,150) ((AEXP(I,J), J=1, LPOINT), I=1, NATA)
13 150 FORMAT(9F8.4)
14 WRITE(6,101)
15 101 FORMAT(1H1)
16 WRITE(6,67) CB, EC, DEN, ETAL, AFSICN, CC
17 67 FORMAT(1/2X, 'CB=', F10.5, 2X, 'EC=', F10.5, 2X, 'DEN=', F10.2, 2X, 'ETAL=', F
*10.5//2X, 'AFSICN=', F10.5, 2X, 'CC=', F10.5)
18 WRITE(6,223) CCMASS, NPCINT, NATA
19 223 FORMAT(1/2X, 'CCMASS=', F12.2, 2X, 'NPCINT=', I10, 2X, 'NATA=', I10)
20 WRITE(6,182) FLOW, LPOINT, JPOINT
21 182 FORMAT(1/2X, 'MASS FLOW RATE=', F10.2, 2X, 'LPOINT=', I10, 2X, 'JPOINT=', I
*10)
22 READ(5,40) N, SN, TS, TV, PI, TF
23 40 FORMAT(110, 5F10.5)
24 WRITE(6,73) N, SN, TS, TV, PI, TF
25 73 FORMAT(1/2X, 'N=', I10, 2X, 'SN=', F10.5, 2X, 'TS=', F10.2, 2X, 'TV=', F10.2//
*2X, 'PI=', F10.5, 2X, 'TF=', F10.5)
C WRITE*SHOW DATA FROM THE EXPERIMENT IN CASE OF REVERSE FLOW
26 5 WRITE(6,101)
27 WRITE(6,150) (ATA(J), J=3, JPCINT)

```

```

20 AT DESIG=CEN*100*(AEXP(I,2)+AEXP(I,3)+AEXP(I,4)+AEXP(I,5)+AEXP(I,6)+
DO 152 I=1,NATA
30 AEXP(I,NPCINT)=(AEXP(I,2)+AEXP(I,3)+AEXP(I,4)+AEXP(I,5)+AEXP(I,6)+
*AEXP(I,7)+AEXP(I,8)+AEXP(I,9))/8.
31 152 CONTINUE
32 WRITE(6,153)((AEXP(I,J),J=1,NPCINT),I=1,NATA)
33 153 FORMAT(2X,F7.2,19X,9F10.5)
C WRITE$SHOW DATA IN DIMENSIONLESS FORM IN CASE OF REVERSE FLOW
34 DO 154 I=1,NATA
35 DO 154 J=2,NPCINT
36 AEXP(I,J)=(AEXP(I,J))/CC
37 154 CONTINUE
38 ACA=(AEXP(I,2)+AEXP(I,3)+AEXP(I,4)+AEXP(I,5)+AEXP(I,6)+AEXP(I,7)+
*EXP(I,8)+AEXP(I,9))/8.
39 DO 155 J=3,NPCINT
40 ETA(J)=ATA(J)*CCMASS/100./FLOW
41 155 CONTINUE
42 WRITE(6,101)
43 DO 157 I=1,NATA
44 AEXP(I,NPCINT)=(AEXP(I,2)+AEXP(I,3)+AEXP(I,4)+AEXP(I,5)+AEXP(I,6)+
*AEXP(I,7)+AEXP(I,8)+AEXP(I,9))/8.
45 157 CONTINUE
46 WRITE(6,158)(ETA(J),J=3,NPCINT)
47 158 FORMAT(/50X,'TABLE OF DATA IN DIMENSIONLESS IN CASE OF REVERSE FLOW
*W'//2X,'TIME(MIN) TAU ',35X,'VALUE OF FI AT ETA='//32X,'FI
* MEAN'//25X,'*',8F10.5//)
48 WRITE(6,159)((AEXP(I,J),J=1,NPCINT),I=1,NATA)
49 159 FORMAT(2X,F7.2,17X,9F10.5)
50 CA=(ACA*CC)
C PROGRAM TO CALCULATE PROFILE OF MOISTURE IN THROUGH FLOW DRYER
51 FIGNA=(CA-EC)/(CC-EC)
52 FICFF=(CR-EC)/(CC-EC)
53 WRITE(6,131) FIGNA,FICFF
54 131 FORMAT(/2X,'FIGNA=',F10.5,2X,'FICFF=',F10.5)
C WRITE TYPING OF CALATION FOR PROFILE
55 DO 401 J=1,NPCINT
56 FTA(J)=9TA(J)*CCMASS/100./FLOW
57 401 CONTINUE
58 WRITE(6,120)(FTA(J),J=1,8)
59 120 FORMAT(/50X,'TABLE OF CALCULATION FOR PROFILE'//2X,'TIME(MIN)
* TAU ',30X,'VALUE OF FI AT ETA ='//25X,'*',2X,10F10.5//)
60 WRITE(6,627)(FTA(J),J=5,NPCINT)
61 627 FORMAT(25X,'*',2X,10F10.5//)
62 TUS=CCMASS*TS/(AFSICN*DEN*(CC-EC)*60.)
63 TUV=CCMASS*TV/(AFSICN*DEN*(CC-EC)*60.)
64 TUF=CCMASS*TF/(AFSICN*DEN*(CC-EC)*60.)
65 H=ETAL/SN
66 31 WRITE(6,185)
67 185 FORMAT(2X,'DIRECTION OF FLOW IS FORWARD')
68 TTF=0
69 2C TLT=0.
70 TG=0.
71 42 W=EXP(PI*TLT)
72 I=1
73 SS=0.0
74 45 S=(SS+H)
75 A(I)=FIGNA*(EXP(FICNA*S))/(W+EXP(FICNA*S)-1)
76 SS=SS+1.

```

```

71      IF (I.EQ.1) GC TO 46
72      GO TO 45
73      46 WRITE(6,90) TG,TUT,A(1),A(3),A(5),A(7),A(9),A(11),A(13),A(15)
81      50 FORMAT(2X,F10.4,4X,F10.4,2X,1CF10.5)
82      WRITE(6,91) TG,TLT,A(17),A(19),A(21),A(23),A(25),A(27),A(29),A(31)
      *,A(33)
93      91 FORMAT(2X,F10.4,4X,F10.4,2X,1CF10.5)
94      TLT=TUT+TUF
95      TG=TF+TF
96      IF (TUT.GT.TUS) GC TO 308
97      GC TO 42
99      308 TTG=TG+TTF-TF
100     WRITE(6,711) TTG
101     711 FORMAT(55X,'ACCLUMULATE TIME (MIN) ',F10.2)
102     511 WRITE(6,11)
103     11 FORMAT(//2X,'DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD')
104     TUT=0.
105     TG=0.
106     WRITE(6,15) TG,TUT,A(1),A(3),A(5),A(7),A(9),A(11),A(13),A(15)
107     15 FORMAT(2X,F10.4,4X,F10.4,2X,1CF10.5)
108     WRITE(6,37) TG,TUT,A(17),A(19),A(21),A(23),A(25),A(27),A(29),A(31)
      *,A(33)
109     37 FORMAT(2X,F10.4,4X,F10.4,2X,1CF10.5)
110     GC TO 113
111     550 TTG=TG+TTF-TF
112     WRITE(6,901) TTG
113     901 FORMAT(55X,'ACCLUMULATE TIME (MIN) =',F10.2)
114     50 WRITE(6,100)
115     100 FORMAT(//2X,'DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD')
116     TLT=0.
117     TG=0.
118     WRITE(6,503) TG,TUT,A(1),A(3),A(5),A(7),A(9),A(11),A(13),A(15)
119     503 FORMAT(2X,F10.4,4X,F10.4,2X,1CF10.5)
120     WRITE(6,503) TG,TUT,A(17),A(19),A(21),A(23),A(25),A(27),A(29),A(31)
      *,A(33)
121     503 FORMAT(2X,F10.4,4X,F10.4,2X,1CF10.5)
122     TUT=TUF
123     TG=TF
124     70 W=EXP(-PI*TUT)
125     I=N
126     FL=A(N)
127     CB=FL/W
128     HJ(N)=CB
129     I=N-1
130     Q=0.
131     E=1.
132     D=0.
133     Y=A(N)
134     75 AJ=(A(I)+Y)*(H/2.)
135     Y=A(I)
136     Q=Q+AJ
137     U=EXP(D)
138     V=(U+E)*(H/2.)
139     E=U
140     D=D+V
141     HJ(I)=U/(W/FL+D)
142     IF (I.EQ.1) GC TO 85
143     I=I-1
144     GC TO 75

```



```

137 112 FORMAT(2X,F10.4,4X,F10.4,2X,1CF10.5)
138 TUT=TUT+TUF
139 TG=TG+TF
140 IF(TUT.GT.TUS) GO TO 92
141 GO TO 70
142 92 Z=0/ETAL
143 IF(Z.LT.FICFF) GE TO 95
144 GO TO 751
145 95 WRITE(6,99)
146 99 FORMAT(50X,'REFINISHED//')
147 TUS=TUS+TUV
148 IF(TUS.GT.496.83) GO TO 107
149 GO TO 31
150 751 TTF=TG+TIG-TF
151 WRITE(6,721) TTF
152 721 FORMAT(55X,'ACCUMLATE TIME (MIN) ',F10.2)
153 107 WRITE(6,185)
154 TUT=0.
155 TG=0.
156 WRITE(6,500) TG,TUT,HJ(1),HJ(2),HJ(5),HJ(7),HJ(9),HJ(11),HJ(13),HJ
*(15)
157 600 FORMAT(2X,F10.4,4X,F10.4,2X,1CF10.5)
158 WRITE(6,611) TG,TUT,HJ(17),HJ(19),HJ(21),HJ(23),HJ(25),HJ(27),HJ(2
*9),HJ(31),HJ(33)
159 611 FORMAT(2X,F10.4,4X,F10.4,2X,1CF10.5)
160 TUT=TUF
161 TG=TF
162 111 W=EXP(PI*TUT)
163 I=1
164 FL=HJ(1)
165 CB=FL/W
166 A(1)=CB
167 I=2
168 D=C.
169 E=1.
170 D=C.
171 Y=HJ(1)
172 121 AJ=(4J(I)+Y)*(H/2.)
173 Y=HJ(I)
174 D=C+AJ
175 J=EXP(D)
176 V=(U+E)*(H/2.)
177 E=U
178 D=C+V
179 A(I)=U/((W/FL)+D)
180 IF(I.EQ.N) GO TO 190
181 I=I+1
182 GO TO 121
183 190 WRITE(6,138) TG,TUT,A(1),A(3),A(5),A(7),A(9),A(11),A(13),A(15)
184 138 FORMAT(2X,F10.4,4X,F10.4,2X,1CF10.5)
185 WRITE(6,647) TG,TUT,A(17),A(19),A(21),A(23),A(25),A(27),A(29),A(31)
*(33)
186 647 FORMAT(2X,F10.4,4X,F10.4,2X,1CF10.5)
187 TUT=TUT+TUF
188 TG=TG+TF

```

```
187  
190 GO TO 133  
191 14C Z=C/ETAL  
192 IF(Z<LT.FICFF) GO TO 25  
193 GO TO 550  
194 167 STOP  
195 END
```

SEI TRY



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

C1= 0.0000 EG= 0.000000 REF= 924.13 ETAL= 70.52000

AFSIOV= 0.23000 CC= 3.85000

C1MASS= 162626.00 NPOINT= 10 NATA= 20

MASS FLOW RATE= 2130.00 LPCINT= 5 JPCINT= 17

N= 13 SN= 32.00000 TS= 30.00 TV= 30.00

PI= 0.01400 TF= 10.00000



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TABLE OF RAW DATA BETWEEN TIME & DISTURBANCE IN CASE OF REVERSE FLOW

TIME (MIN)	VALUE OF MOISTURE AT DISTANCE (CM) =								MEAN
	2.50000	7.50000	12.50000	17.50000	22.50000	27.50000	32.50000	37.50000	
0.00	1.84100	1.81400	1.82500	1.82500	1.82100	1.82100	1.81800	1.82100	1.82375
30.00	0.75000	1.54200	1.75600	1.79900	1.81200	1.91700	1.81000	1.79500	1.63512
60.00	0.72400	1.48500	1.72200	1.77100	1.77500	1.74100	1.53900	0.77700	1.44175
90.00	0.15700	0.76400	1.43900	1.58400	1.73500	1.71200	1.51000	0.74500	1.21825
120.00	0.02300	0.71000	1.39700	1.64800	1.66400	1.51200	0.90400	0.19100	1.00625
150.00	0.02800	0.19900	0.81400	1.42400	1.57900	1.47300	0.53400	0.23400	0.78562
180.00	0.09500	0.22100	0.75900	1.37200	1.46700	1.10300	0.32600	0.03300	0.67325
210.00	0.01600	0.03900	0.23800	0.84800	1.27600	1.02900	0.32600	0.11900	0.48637
240.00	0.07700	0.10500	0.23800	0.72700	0.89800	0.43200	0.06500	0.01300	0.32000
270.00	0.01500	0.02500	0.24700	0.32600	0.63700	0.37500	0.10800	0.06600	0.22497
300.00	0.03700	0.03700	0.05900	0.16100	0.24400	0.09400	0.01500	0.01200	0.08237
330.00	0.00500	0.03900	0.05300	0.02900	0.06300	0.03400	0.01500	0.01200	0.03250
360.00	0.00500	0.00500	0.00500	0.00900	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00300
390.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
420.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
450.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
480.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
510.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
540.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
570.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TABLE OF DATA IN DIMENSIONLESS IN CASE OF REVERSE FLOW

TIME(MIN)	TAU	VALUE OF FI AT ETA =								FI MEAN
	*	1.90876	5.72627	9.54378	13.36129	17.17879	20.99631	24.81381	28.63133	
0.00		C.47818	C.47221	C.47403	C.47403	C.47299	C.47299	0.47221	0.47299	0.47370
30.00		C.15481	0.40052	0.45610	C.46727	C.47065	0.47195	0.47C13	0.46523	0.42471
60.00		C.186C5	C.38571	C.44727	C.4600C	0.46104	0.45221	0.39974	0.23182	0.37448
70.00		0.04078	0.19844	C.37377	C.4374C	0.45065	0.44468	0.39221	0.13351	0.31643
120.00		0.00597	0.18442	C.36286	C.42805	0.42221	0.39295	0.23481	0.04951	0.26136
150.00		C.CC727	C.C5169	C.21143	C.36987	0.41013	C.38260	0.13870	0.03378	0.20406
180.00		C.C2571	C.C574C	0.19714	C.35636	0.38104	0.28649	0.08468	0.01313	0.17487
210.00		C.CC416	0.C1C13	C.C6182	C.22026	C.33143	0.26727	C.08468	C.03391	0.12633
240.00		C.C2C0C	0.C2727	C.C6182	C.18883	C.23325	0.11221	0.01688	0.00468	0.09312
270.00		C.CC39C	C.C0649	C.C6416	C.C8468	C.16545	C.C9740	0.02805	0.01714	0.05841
300.00		C.CC961	0.C0561	C.C1532	0.04182	C.C6338	0.C2442	0.00390	0.00312	0.02140
330.00		C.CC13C	C.C1C13	C.C1377	C.C1013	0.01636	C.CC883	0.00390	0.00312	0.00844
360.00		C.CC12C	0.CC13C	C.CC13C	C.CC234	C.CC000	0.CC000	0.00C00	0.00000	0.00078
370.00		C.CC00C	0.CC00C	0.CC00C	0.CC00C	C.CC000	0.CC000	0.00C00	0.00000	0.00000
420.00		C.CC00C	C.CC00C	C.CC00C	0.CC00C	0.CC000	0.CC000	0.00C00	0.00000	0.00000
450.00		C.CC00C	0.CC00C	C.CC00C	C.CC00C	C.CC000	0.CC000	0.00C00	0.00000	0.00000
480.00		C.CC00C	0.CC00C	0.CC00C	C.CC00C	C.CC000	0.CC000	0.00C00	0.00000	0.00000
510.00		C.CC00C	C.CC00C	C.CC00C	C.CC00C	C.CC000	0.CC000	0.00C00	0.00000	0.00000
540.00		C.CC00C	0.CC00C	0.CC00C	0.CC00C	C.CC000	0.CC000	0.00C00	0.00000	0.00000
570.00		C.CC00C	0.CC00C	C.CC00C	C.CC00C	C.CC000	0.CC000	0.00C00	0.00000	0.00000

FI34A = 0.47370 FIOFF = C.CC003

TABLE OF CALCULATION FOR PROFILE

TIME(MIN)	TAU	VALUE OF FI AT ETA =								FI MEAN
	*	C.CC000	1.90876	3.81751	5.72627	7.63502	9.54378	11.45253	13.36129	
	*	15.27005	17.17879	19.08755	20.99631	22.90506	24.81381	26.72253	28.63133	30.54009
DIRECTION OF FLOW IS FORWARD										
0.0000	0.0000	C.47370	0.47370	0.47370	0.47370	C.47370	C.47370	0.47370	0.47370	0.47370
0.0000	0.0000	0.47370	0.47370	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	0.47370	0.47370	0.47370
10.0000	33.1220	C.29795	C.38235	C.43191	C.45884	C.46630	C.47067	0.47247	0.47320	0.47370
10.0000	33.1220	C.47350	0.47362	C.47367	C.47369	C.47370	C.47370	0.47370	0.47370	0.47370
20.0000	66.2441	0.19738	C.29262	C.37877	C.43C05	0.45500	0.46594	0.47053	0.47241	0.47370
20.0000	66.2441	0.47318	C.47349	C.47261	C.47367	C.47369	C.47369	0.47370	0.47370	0.47370
30.0000	99.3661	0.11785	C.21311	C.31681	C.39456	0.43811	C.45861	0.46747	0.47116	0.47370
30.0000	99.3661	0.47267	C.47328	C.47253	C.47262	C.47367	C.47369	0.47370	0.47370	0.47370
ACCUMULATE-TIME (MIN) 30.00										
DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD										
0.0000	0.0000	C.11785	C.21311	C.31681	C.39456	C.43811	C.45861	0.46747	0.47116	0.47370
0.0000	0.0000	C.47247	C.47328	C.47353	C.47362	0.47367	C.47369	0.47270	0.47370	0.47370
10.0000	33.1220	0.25528	C.32420	C.38583	C.42695	C.44864	C.45857	0.46280	0.46431	0.47370
10.0000	33.1220	C.46512	C.46512	C.46456	C.46292	C.45882	C.44899	0.42637	0.37926	0.29793
20.0000	66.2441	C.25528	C.32420	C.38583	C.42695	C.44862	C.45855	0.46275	0.46433	0.47370

20.0000	66.2441	0.46481	C.46437	C.46268	0.45835	0.44788	C.42375	0.37452	0.27011	0.18738
30.0000	99.3661	0.25528	C.32420	C.38583	0.42674	0.44862	C.45852	0.46267	0.46417	
30.0000	99.3661	C.46431	C.46316	C.45972	0.45125	C.43151	C.38942	0.31383	0.21214	0.11785

ACCUMULATE TIME (MIN) = 60.00

DIRECTION OF FLOW IS FORWARD

0.0000	0.0000	0.25528	C.32420	C.38583	0.42674	0.44862	C.45852	0.46267	0.46417	
0.0000	0.0000	0.46431	C.46316	0.45972	0.45125	0.43151	C.38942	0.31383	0.21214	0.11785
10.0000	33.1220	C.16056	C.19811	C.25335	0.31754	0.37434	C.41358	0.43617	0.44771	
10.0000	33.1220	0.45206	C.45498	C.45445	0.45097	0.44169	C.42097	0.38135	0.32147	0.25387
20.0000	66.2441	0.10098	C.13962	C.19924	0.27461	C.34668	C.29880	0.42921	0.44456	
20.0000	66.2441	0.45176	C.45444	0.45427	0.45087	0.44165	C.42095	0.38135	0.32147	0.25389
30.0000	99.3661	0.06351	0.09502	C.14874	0.22603	C.31024	C.27736	0.41853	0.43933	
30.0000	99.3661	0.44971	C.45355	0.45391	0.45073	0.44155	C.42093	0.38134	0.32145	0.25389

ACCUMULATE TIME (MIN) = 90.00

DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD

0.0000	0.0000	0.06351	C.09502	C.14874	0.22603	C.31024	C.27736	0.41853	0.43933	
0.0000	0.0000	0.44971	C.45355	0.45391	0.45073	0.44155	C.42093	0.38134	0.32145	0.25389
10.0000	33.1220	C.17028	C.21050	C.26211	C.27007	C.37252	C.40954	0.43043	0.43713	
10.0000	33.1220	C.44234	C.43897	0.42841	0.40660	0.36847	C.21328	0.25073	0.19671	0.15968
20.0000	66.2441	0.17027	C.21050	0.26211	C.27005	C.37248	C.40943	0.43011	0.43933	
20.0000	66.2441	C.44097	C.43576	0.42122	0.39155	C.34066	C.27046	0.19697	0.13354	0.10043
30.0000	99.3661	0.17027	C.21049	0.26209	C.22001	C.37241	C.40927	0.42977	0.43317	
30.0000	99.3661	0.43879	C.43076	0.41027	C.36580	C.30416	C.22217	0.14685	0.09424	0.06317

ACCUMULATE TIME (MIN) = 120.00

DIRECTION OF FLOW IS FORWARD

0.0000	0.0000	C.17027	C.21049	0.26209	C.22001	C.37241	C.40927	0.42977	0.43317	
0.0000	0.0000	C.43879	C.43076	0.41027	C.36590	C.30416	C.22217	0.14685	0.09424	0.06317
10.0000	33.1220	C.10709	0.12345	C.14923	C.18834	0.24164	C.30138	0.35565	0.39333	
10.0000	33.1220	0.41493	C.42266	0.41836	C.40025	0.36518	C.21463	0.25847	0.20813	0.16885
20.0000	66.2441	C.06735	C.08378	C.10932	0.14894	C.20564	C.27356	0.33722	0.39311	
20.0000	66.2441	0.40599	0.42041	0.41737	0.39982	0.36495	C.31455	0.25845	0.20811	0.16884
30.0000	99.3661	0.04236	C.05544	C.07670	0.11177	0.16626	C.23806	0.31154	0.36941	
30.0000	99.3661	C.40238	C.41699	0.41581	0.39514	C.36470	C.21442	0.25839	0.20813	0.16882

ACCUMULATE TIME (MIN) = 150.00

DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD

0.0000	0.0000	0.04236	C.05544	C.07670	0.11177	0.16626	C.23806	0.31154	0.36941	
0.0000	0.0000	0.40238	C.41699	0.41581	0.39514	0.36470	C.21442	0.25839	0.20813	0.16882
10.0000	33.1220	C.12567	C.14866	0.17912	0.21879	0.26706	C.21791	0.36060	0.39533	
10.0000	33.1220	C.39251	C.37879	C.34504	0.29421	0.23651	C.18521	0.14735	0.12222	0.10618
20.0000	66.2441	C.12564	0.14862	0.17905	0.21867	0.26681	C.21740	0.35949	0.39316	
20.0000	66.2441	C.38730	C.36832	C.32631	C.26584	C.20074	C.14616	0.10777	0.08213	0.06678
30.0000	99.3661	C.12559	0.14655	C.17894	C.21846	0.26642	C.21659	0.35774	0.39313	
30.0000	99.3661	C.37930	C.35282	C.30028	C.23050	0.16183	C.10947	0.07554	0.05413	0.04200

ACCUMULATE TIME (MIN) = 180.00

DIRECTION OF FLOW IS FORWARD

0.0000	0.0000	C.12559	C.14655	0.17894	C.21846	0.26642	C.21659	0.35774	0.39313	
0.0000	0.0000	C.37530	C.35282	C.30028	C.23050	C.16183	C.10947	0.07554	0.05413	0.04200
10.0000	33.1220	C.07899	C.08748	C.09991	C.11842	0.14604	C.18557	0.23593	0.28321	
10.0000	33.1220	C.32818	C.34491	C.33454	C.30155	C.25680	0.21236	0.17502	0.14514	0.12379
20.0000	66.2441	C.04568	C.05815	C.07031	C.08824	C.11538	C.15548	0.20895	0.25710	
20.0000	66.2441	C.31471	C.33770	C.33071	C.29567	C.25586	C.21186	0.17473	0.14577	0.12368
30.0000	99.3661	0.03125	C.03797	C.04779	C.06280	0.08650	C.12261	0.17682	0.23717	
30.0000	99.3661	C.29544	C.32575	C.32481	C.29672	C.25437	C.21107	0.17423	0.14517	0.12349

ACCUMULATE TIME (MIN) = 210.00

DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD

0.0000	0.0000	C.03125	C.03797	C.04779	C.06280	C.08650	0.12361	0.17692	0.23937	
0.0000	0.0000	C.29544	C.32595	C.32481	C.29673	C.25437	0.21107	0.17423	0.14557	0.12349
10.0000	33.1220	C.09700	C.11067	C.12802	C.15019	0.17821	0.21177	0.24675	0.27315	
10.0000	33.1220	C.27848	C.25759	C.21840	C.17583	C.14052	0.11508	0.09769	0.09534	0.07767
20.0000	66.2441	C.09671	C.11021	C.12742	C.14930	0.17676	C.20928	0.24230	0.26512	
20.0000	66.2441	C.26482	C.23705	C.19205	C.14648	C.11055	C.08550	0.06961	0.05735	0.04885
30.0000	99.3661	C.05625	C.10562	0.12651	C.14790	C.17451	C.20545	0.23553	0.25327	
30.0000	99.3661	C.24566	C.21038	C.16114	C.11576	C.08256	C.06069	0.04657	0.03723	0.03072

ACCUMULATE TIME (MIN) = 240.00

DIRECTION OF FLOW IS FORWARD

0.0000	0.0000	C.05625	C.10562	0.12651	C.14790	C.17451	C.20545	0.23553	0.25327	
0.0000	0.0000	0.24566	C.21038	C.16114	C.11576	C.08256	C.06069	0.04657	0.03723	0.03072
10.0000	33.1220	C.06054	C.06532	0.07176	C.08059	0.09285	C.10993	0.13287	0.16033	
10.0000	33.1220	C.18568	C.19866	0.19419	C.17704	0.15552	C.13505	0.11755	0.10316	0.09143
20.0000	66.2441	C.03807	C.04288	C.04918	0.05768	C.06947	C.08806	0.10891	0.13749	
20.0000	66.2441	0.16592	C.18356	C.18783	0.17031	C.15118	C.13217	0.11557	0.10175	0.09039
30.0000	99.3661	C.02395	C.02773	0.03278	0.03973	0.04961	C.06297	0.08464	0.11210	
30.0000	99.3661	0.14191	C.16377	C.16945	0.16061	C.14474	C.12783	0.11255	0.09953	0.08878

ACCUMULATE TIME (MIN) = 270.00

DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD

0.0000	0.0000	C.02295	C.02773	C.03278	0.03973	0.04961	C.06297	0.08464	0.11210	
0.0000	0.0000	C.14191	0.16377	C.16945	0.16061	0.14474	0.12783	0.11255	0.09953	0.09978
10.0000	33.1220	C.06888	C.07522	C.08253	C.09088	C.10017	C.10989	0.11874	0.12427	
10.0000	33.1220	C.12366	0.11607	0.10407	0.09144	C.08048	C.07175	0.06501	0.05933	0.05584
20.0000	66.2441	C.06454	C.07221	C.07884	0.08612	0.09394	C.10165	0.10785	0.11024	
20.0000	66.2441	C.10648	C.09648	C.08321	0.07022	C.05925	C.05083	0.04425	0.03915	0.03512
30.0000	99.3661	C.06313	0.06811	C.07260	0.07950	0.08545	C.09083	0.09415	0.09347	
30.0000	99.3661	C.08722	C.07607	C.06310	0.05129	0.04187	C.03473	0.02935	0.02526	0.02209

ACCUMULATE TIME (MIN) = 300.00

DIRECTION OF FLOW IS FORWARD

0.0000	0.0000	C.06212	C.06811	C.07360	0.07950	0.08549	C.09083	0.09415	0.09347	
0.0000	0.0000	C.08722	C.07607	C.06310	0.05129	0.04187	C.03473	0.02935	0.02526	0.02209
10.0000	33.1220	0.03970	C.04164	0.04393	0.04663	C.04978	C.05339	0.05732	0.06126	
10.0000	33.1220	0.06458	C.06660	C.06694	0.06575	0.06350	C.06067	0.05760	0.05452	0.05155
20.0000	66.2441	0.02497	C.02693	0.02922	0.03190	0.03503	C.03864	0.04269	0.04639	
20.0000	66.2441	C.05078	0.05372	0.05528	0.05545	C.05454	C.05294	0.05095	0.04833	0.04661
30.0000	99.3661	0.01571	C.01725	0.01907	0.02124	C.02382	C.02685	0.03035	0.03415	
30.0000	99.3661	C.03790	C.04109	C.04325	0.04459	C.04455	C.04403	0.04305	0.04133	0.04046

ACCUMULATE TIME (MIN) = 330.00

DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD

0.0000	0.0000	0.01571	0.01725	0.01907	0.02124	0.02382	0.02685	0.03035	0.03415	
0.0000	0.0000	C.03790	C.04109	C.04325	0.04459	C.04455	C.04403	0.04305	0.04133	0.04046
10.0000	33.1220	C.02879	C.02949	0.03016	0.03076	0.03126	C.03163	0.03182	0.03193	
10.0000	33.1220	0.02152	C.03104	0.03036	0.02957	C.02871	C.02785	0.02703	0.02623	0.02544
20.0000	66.2441	C.02326	C.02357	C.02382	0.02399	C.02406	0.02401	0.02371	0.02343	
20.0000	66.2441	0.02284	C.02210	C.02125	C.02034	C.01940	C.01848	0.01761	0.01679	0.01600
30.0000	99.3661	C.01782	C.01787	C.01786	0.01778	C.01752	C.01735	0.01693	0.01647	
30.0000	99.3661	C.01587	0.01516	C.01435	C.01359	0.01280	C.01205	0.01133	0.01057	0.01007

ACCUMULATE TIME (MIN) = 360.00

DIRECTION OF FLOW IS FORWARD

0.0000	0.0000	C.01782	C.01787	0.01786	0.01778	0.01762	0.01735	0.01673	0.01647	
0.0000	0.0000	C.01587	C.01516	C.01435	0.01359	C.01280	C.01205	0.01133	0.01057	0.01007
10.0000	33.1220	C.01121	C.01135	C.01149	0.01163	0.01176	C.01189	0.01201	0.01212	
10.0000	33.1220	C.01221	C.01229	C.01234	0.01238	C.01240	C.01240	0.01233	0.01235	0.01231
20.0000	66.2441	C.00705	C.00710	0.00734	0.00749	C.00765	C.00778	0.00792	0.00805	

00.0000	66.2441	C.C0018	C.C0029	C.C0039	C.C0048	C.C0056	C.C0062	0.C0067	0.00525	0.00598
10.0000	69.3661	C.C0443	C.C0452	C.C0466	C.C0478	C.C0490	C.C0502	0.C0514	0.00573	0.00598
20.0000	99.3661	C.C0536	C.C0547	C.C0556	C.C0565	C.C0573	C.C0581	0.C0587	0.00573	0.00598

ACCUMULATE TIME (MIN) = 290.00

DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD

0.0000	0.0000	C.C0443	C.C0455	C.C0466	C.C0478	C.C0490	C.C0502	0.C0514	0.00525	0.00598
0.0000	0.0000	C.C0536	C.C0547	C.C0556	C.C0565	C.C0573	C.C0581	0.C0587	0.00573	0.00598
10.0000	33.1220	C.C0393	C.C0392	C.C0392	C.C0392	C.C0391	C.C0390	0.C0387	0.00339	0.00376
10.0000	33.1220	0.C0387	C.C0386	0.C0385	C.C0383	0.00382	C.C0381	0.C0377	0.00378	0.00376
20.0000	66.2441	C.C0258	C.C0257	C.C0256	C.C0255	C.C0254	C.C0253	0.C0251	0.00251	0.00237
20.0000	66.2441	C.C0249	C.C0247	C.C0246	0.C0244	0.00243	C.C0241	0.C0240	0.00240	0.00237
30.0000	99.3661	C.C0167	C.C0166	C.C0165	0.C0164	C.C0163	C.C0162	0.C0161	0.00161	0.00149
30.0000	99.3661	0.C0159	C.C0157	C.C0156	C.C0155	0.C0154	C.C0153	0.C0151	0.00151	0.00149

ACCUMULATE TIME (MIN) = 420.00

DIRECTION OF FLOW IS FORWARD

0.0000	0.0000	C.C0167	C.C0166	C.C0165	C.C0164	0.C0163	C.C0162	0.C0161	0.00161	0.00149
0.0000	0.0000	0.C0159	C.C0157	C.C0156	C.C0155	C.C0154	C.C0153	0.C0151	0.00151	0.00149
10.0000	33.1220	0.C0105	C.C0105	C.C0105	C.C0105	0.00105	C.C0105	0.C0105	0.00105	0.00107
10.0000	33.1220	0.C0106	C.C0106	0.C0106	C.C0106	0.00106	C.C0106	0.C0105	0.00105	0.00107
20.0000	66.2441	0.C0066	C.C0066	C.C0066	C.C0066	0.00066	C.C0067	0.C0067	0.00067	0.00068
20.0000	66.2441	C.C0067	C.C0067	C.C0067	C.C0067	0.00067	C.C0067	0.C0063	0.00063	0.00068
30.0000	99.3661	C.C0042	C.C0042	C.C0042	C.C0042	0.00042	C.C0042	0.C0042	0.00042	0.00043
30.0000	99.3661	0.C0042	C.C0042	0.C0042	C.C0043	0.00043	C.C0043	0.C0043	0.00043	0.00043

ACCUMULATE TIME (MIN) = 450.00

DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD

0.0000	0.0000	C.C0042	C.C0042	0.C0042	C.C0042	C.C0042	C.C0042	0.C0042	0.00042	0.00043
0.0000	0.0000	C.C0042	C.C0042	C.C0042	C.C0042	C.C0042	C.C0042	0.C0042	0.00042	0.00043
10.0000	33.1220	C.C0027	C.C0027	C.C0027	C.C0027	C.C0027	0.C0027	0.C0027	0.00027	0.00027
10.0000	33.1220	C.C0027	C.C0027	C.C0027	C.C0027	C.C0027	C.C0027	0.C0027	0.00027	0.00027
20.0000	66.2441	C.C0017	C.C0017	C.C0017	C.C0017	C.C0017	C.C0017	0.C0017	0.00017	0.00017
20.0000	66.2441	C.C0017	C.C0017	C.C0017	C.C0017	C.C0017	C.C0017	0.C0017	0.00017	0.00017
30.0000	99.3661	C.C0011	C.C0011	C.C0011	C.C0011	C.C0011	C.C0011	0.C0011	0.00011	0.00011
30.0000	99.3661	C.C0011	C.C0011	C.C0011	C.C0011	C.C0011	C.C0011	0.C0011	0.00011	0.00011

ACCUMULATE TIME (MIN) = 480.00

DIRECTION OF FLOW IS FORWARD

0.0000	0.0000	0.C0011	C.C0011	0.C0011	C.C0011	0.C0011	C.C0011	0.C0011	0.00011	0.00011
0.0000	0.0000	0.C0011	C.C0011	0.C0011	C.C0011	0.C0011	C.C0011	0.C0011	0.00011	0.00011
10.0000	33.1220	C.C0007	C.C0007	C.C0007	C.C0007	C.C0007	C.C0007	0.C0007	0.00007	0.00007
10.0000	33.1220	C.C0007	C.C0007	C.C0007	C.C0007	C.C0007	C.C0007	0.C0007	0.00007	0.00007
20.0000	66.2441	0.C0004	C.C0004	0.C0004	C.C0004	0.C0004	C.C0004	0.C0004	0.00004	0.00004
20.0000	66.2441	0.C0004	C.C0004	0.C0004	C.C0004	0.C0004	C.C0004	0.C0004	0.00004	0.00004
30.0000	99.3661	0.C0003	C.C0003	0.C0003	C.C0003	0.C0003	C.C0003	0.C0003	0.00003	0.00003
30.0000	99.3661	0.C0003	C.C0003	0.C0003	C.C0003	0.C0003	C.C0003	0.C0003	0.00003	0.00003

ACCUMULATE TIME (MIN) = 510.00

DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD

0.0000	0.0000	C.C0003	C.C0003	0.C0003	C.C0003	C.C0003	C.C0003	0.C0003	0.00003	0.00003
0.0000	0.0000	C.C0003	C.C0003	C.C0003	C.C0003	C.C0003	C.C0003	0.C0003	0.00003	0.00003
10.0000	33.1220	C.C0002	C.C0002	C.C0002	C.C0002	C.C0002	C.C0002	0.C0002	0.00002	0.00002
10.0000	33.1220	C.C0002	C.C0002	C.C0002	C.C0002	C.C0002	C.C0002	0.C0002	0.00002	0.00002
20.0000	66.2441	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	0.C0001	0.00001	0.00001
20.0000	66.2441	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	0.C0001	0.00001	0.00001
30.0000	99.3661	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	0.C0001	0.00001	0.00001
30.0000	99.3661	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	C.C0001	0.C0001	0.00001	0.00001

ACCUMULATE TIME (MIN) = 540.00

DIRECTION OF FLOW IS FORWARD

0.0000	0.0000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	0.00000
0.0000	0.0000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	0.00000
10.0000	33.1220	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	0.00000
10.0000	33.1220	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	0.00000
20.0000	66.2441	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	0.00000
20.0000	66.2441	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	0.00000
30.0000	99.3661	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	0.00000
30.0000	99.3661	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	C.00000	0.00000

FINISHED

DIRECTION OF FLOW IS FORWARD

0.0000	0.0000	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	0.47370
0.0000	0.0000	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	0.47370
10.0000	33.1220	C.29793	C.28235	C.43191	C.45584	C.46630	C.47067	C.47247	C.47320	0.47370
10.0000	33.1220	C.47350	C.47262	C.47367	C.47369	C.47370	C.47370	C.47370	C.47370	0.47370
20.0000	66.2441	C.18728	C.29262	C.27877	C.43005	C.45500	C.46594	C.47053	C.47241	0.47370
20.0000	66.2441	C.47318	C.47349	C.47361	C.47267	C.47369	C.47369	C.47370	C.47370	0.47370
30.0000	99.3661	C.11785	C.21311	C.31681	C.39456	C.43811	C.45861	C.46747	C.47116	0.47370
30.0000	99.3661	C.47267	C.47229	C.47253	C.47363	C.47367	C.47369	C.47370	C.47370	0.47370
40.0000	132.4882	C.07412	C.14681	C.25141	C.34880	C.41370	C.44742	C.46267	C.46913	0.47370
40.0000	132.4882	C.47186	C.47295	C.47340	C.47358	C.47365	C.47368	C.47367	C.47370	0.47370
50.0000	165.6102	C.04662	C.10057	C.18929	C.29449	C.38004	C.43071	C.45530	C.46607	0.47370
50.0000	165.6102	C.47058	C.47243	C.47319	C.47349	C.47362	C.47367	C.47367	C.47369	0.47370
60.0000	198.7322	C.02932	C.06636	C.13589	C.23606	C.33650	C.40657	C.44401	C.46121	0.47370
60.0000	198.7322	C.46856	C.47161	C.47285	C.47336	C.47356	C.47364	C.47363	C.47367	0.47370

ACCUMULATE TIME (MIN) 60.00

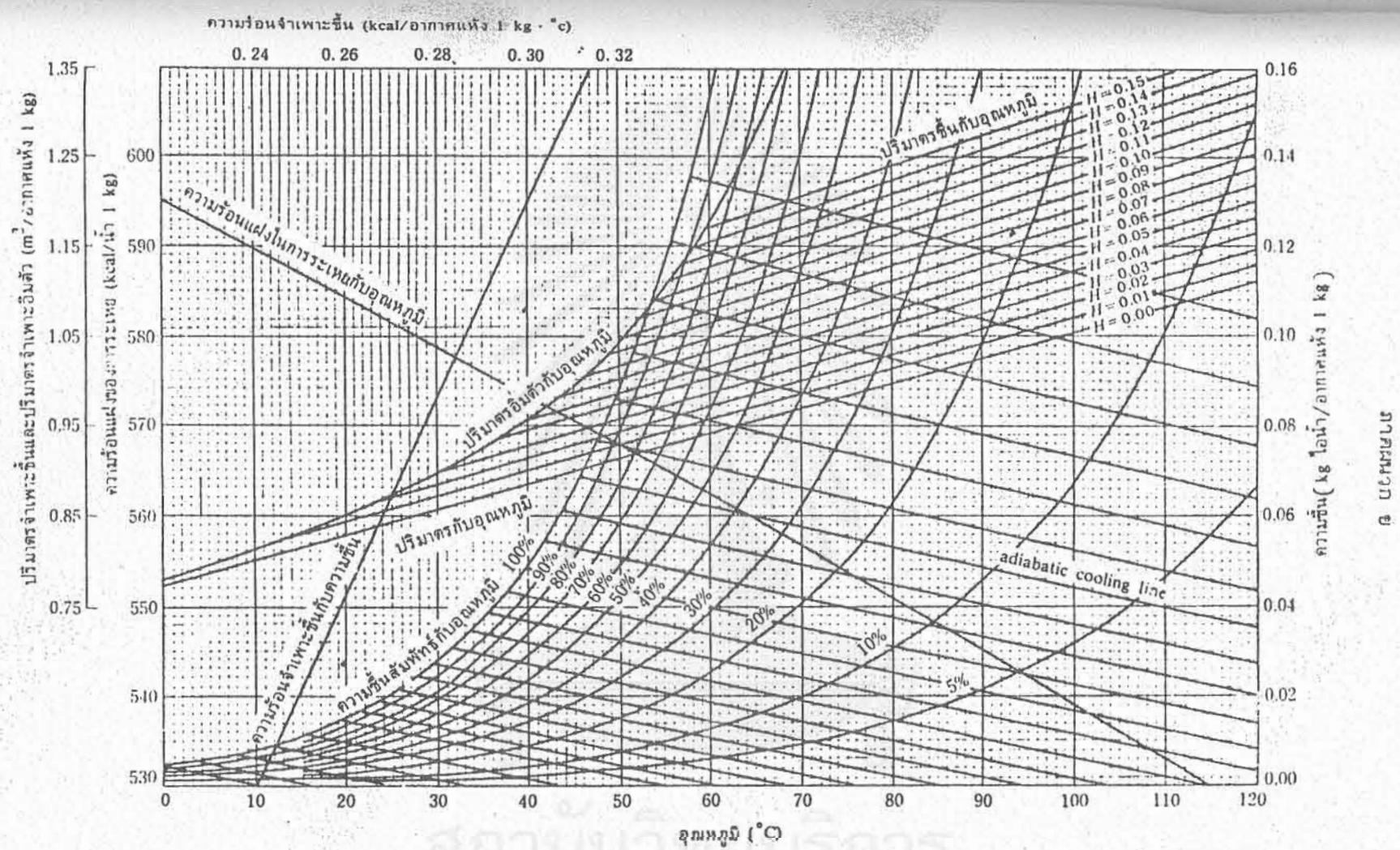
DIRECTION OF FLOW IS BACKWARD

0.0000	0.0000	C.02932	C.06636	C.13589	C.23606	C.33650	C.40657	C.44401	C.46121	0.47370
0.0000	0.0000	C.46856	C.47161	C.47285	C.47336	C.47356	C.47364	C.47368	C.47369	0.47370
10.0000	33.1220	C.15993	C.20727	C.26976	C.32872	C.39657	C.43200	C.45149	C.45975	0.27993
10.0000	33.1220	C.46216	C.46423	C.46424	C.46279	C.45878	C.44897	C.42633	C.37725	0.27993
20.0000	66.2441	C.15992	C.20727	C.26976	C.32871	C.39657	C.43298	C.45144	C.45953	0.19738
20.0000	66.2441	C.46285	C.46257	C.46236	C.45821	C.44783	C.42393	C.37451	C.29030	0.19738
30.0000	99.3661	C.15993	C.20727	C.26976	C.32871	C.39655	C.43295	C.45135	C.45943	0.11785
30.0000	99.3661	C.46236	C.46256	C.45940	C.45112	C.43146	C.38940	C.21382	C.21214	0.11785
40.0000	132.4882	C.15993	C.20727	C.26976	C.32870	C.39652	C.43290	C.45123	C.45911	0.07412
40.0000	132.4882	C.46158	C.46044	C.45478	C.44028	C.40776	C.34475	C.24952	C.14334	0.07412
50.0000	165.6102	C.15993	C.20727	C.26975	C.32868	C.39650	C.43291	C.45102	C.45851	0.04662
50.0000	165.6102	C.46024	C.45743	C.44762	C.42407	C.37501	C.29160	C.18821	C.10035	0.04662
60.0000	198.7322	C.15993	C.20726	C.26974	C.32866	C.39644	C.43268	C.45070	C.45731	0.02932
60.0000	198.7322	C.45838	C.45272	C.42668	C.40062	C.33254	C.23419	C.13534	C.06627	0.02932

ACCUMULATE TIME (MIN) 120.00

DIRECTION OF FLOW IS FORWARD

0.0000	0.0000	C.15993	C.20726	C.26974	C.32866	C.39644	C.43268	C.45070	C.45731	0.02932
0.0000	0.0000	C.45828	C.45272	C.42668	C.40062	C.33254	C.23419	C.13534	C.06627	0.02932
10.0000	33.1220	C.10059	C.11597	C.14269	C.18631	C.24610	C.31731	C.37605	C.41474	0.15993
10.0000	33.1220	C.43530	C.44297	C.44022	C.42491	C.39065	C.33494	C.26764	C.20614	0.15993
20.0000	66.2441	C.06326	C.07835	C.10375	C.14622	C.21014	C.28730	C.35705	C.40475	0.15993
20.0000	66.2441	C.43066	C.44094	C.43926	C.42445	C.39054	C.33487	C.26761	C.20613	0.15993
30.0000	99.3661	C.03979	C.05169	C.07236	C.10895	C.16902	C.24973	C.33050	C.39935	0.15924
30.0000	99.3661	C.42347	C.42776	C.43801	C.42388	C.39030	C.33477	C.26757	C.20611	0.15924
40.0000	132.4882	C.02503	C.03355	C.04885	C.07752	C.12891	C.20675	C.29555	C.36321	0.15927
40.0000	132.4882	C.41253	C.43275	C.43587	C.42298	C.38997	C.33461	C.26741	C.20607	0.15927
50.0000	165.6102	C.01574	C.02153	C.03221	C.05215	C.09360	C.16233	C.25302	C.33351	0.15924
50.0000	165.6102	C.39625	C.42511	C.43251	C.42156	C.38922	C.33435	C.26733	C.20601	0.15924
60.0000	198.7322	C.00990	C.01372	C.02090	C.03544	C.06520	C.12100	C.20590	C.29195	0.15924



รูป ๒1 รูปกราฟความชื้นในหน่วยมวล (มาตรฐาน : ความดันรวม 760 mm Hg , อากาศแห้ง 1 kg)

ภาคผนวก ค-1

วิธีคำนวณปริมาณความชื้นของวัสดุ

การคำนวณหาปริมาณความชื้นของวัสดุทำได้ดังนี้

จากข้อมูลการทดลองที่เวลา t_1

น้ำหนักวัสดุ	=	X_1	กรัม
น้ำหนักวัสดุแห้ง	=	X_2	กรัม
น้ำหนักน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ	=	$X_1 - X_2$	กรัม
ปริมาณความชื้นของวัสดุที่เวลา t_1	=	$\frac{X_1 - X_2}{X_2}$	กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค-2

วิธีคำนวณอัตราการอบแห้ง

$$\text{อัตราการอบแห้ง} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำที่ระเหยไปในช่วงเวลานั้น ๆ}}{\text{น้ำหนักของวัสดุแห้ง} \times \text{ช่วงเวลานั้น}}$$

นอกจากการใช้ความสัมพันธ์ข้างต้นแล้ว อัตราการอบแห้งยังหาได้จากการลากเส้นสัมผัสกับ เส้นกราฟที่พลอตระหว่างความชื้นกับ เวลาแล้วอ่านความชันของ เส้นสัมผัสนั้น

ในงานวิจัยนี้การหาอัตราการอบแห้งจะใช้วิธีหลัง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ภาคผนวกนี้แสดงรายละเอียดของการคำนวณอัตราการอบแห้งเชิงทฤษฎี (R_{theo}) เพื่อกำหนดค่า c_c ที่เหมาะสมที่สุดโดยการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง

วัสดุ ชั้นมันสำปะหลังขนาด 0.5 ซม. x 0.5 ซม. x 0.3 ซม.

อุณหภูมิ เข้าของลมร้อน 65°C

ความเร็วของลมร้อน 0.6 ม/วินาที

ความชื้นของลมร้อน 0.018 กก.น้ำ/กก.อากาศแห้ง

อัตราส่วนว่างของชั้นวัสดุ 0.768

ความหนาแน่นจริงของวัสดุแห้ง 924 กก./ลบ.ม.

เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของชั้นวัสดุ 0.409×10^{-2} ม.

ความชื้นแรกเริ่ม 0.80 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง

ความชื้นสมดุล 0.00 กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง

ก่อนอื่นสมมุติว่าลมร้อนที่ออกจากชั้นวัสดุ มี อุณหภูมิ 30°C และมีความชื้น 0.032 กก.น้ำ/กก.อากาศแห้ง จากแผนภูมิความชื้น ลมร้อนอุณหภูมิ 65°C ความชื้น 0.018 กก.น้ำ/กก.อากาศแห้ง จะมีปริมาตรจำเพาะ (v_H) = 1.02 ลบ.ม./กก.อากาศแห้ง

$$\text{ความเร็วเชิงมวลของลมร้อน (G)} = \frac{0.6(3600) \left\{ 1 + \frac{(0.018 + 0.032)}{2} \right\}}{1.02}$$

$$= 2170 \text{ กก./ตร.ม.ชม.}$$

ดังนั้น

$$Re_p = \frac{GD_p}{\mu} = \frac{2170 \times 0.409 \times 10^{-2}}{7.2 \times 10^{-2}} = 123.2$$

จาก

$$\frac{k}{G} = 2.566(Re_p)^{0.51}$$

เราได้

$$2.566(123.2)^{-0.51} \times 2170 = 477.83 \text{ กก./ตร.ม.ชม.}$$

จาก

$$\begin{aligned} a &= 6(1-\epsilon)/D_p \\ &= 6(1-0.768)/0.409 \times 10^{-2} \\ &= 340.34 \text{ ม}^{-1} \\ ka &= 477.83 \times 340.34 \\ &= 162,626 \text{ กก./ชม.ลบ.ม.} \end{aligned}$$

หนึ่งลมร้อนที่อุณหภูมิ 65°ซ ความชื้น 0.018 กก.น้ำ/กก.อากาศแห้ง มีอุณหภูมิ
 กระจายเปียก = 32.8°ซ และความชื้นอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระจายเปียก = 0.032 กก.น้ำ/กก.
 อากาศแห้ง

จาก

$$\xi_L = \ln \left\{ \frac{H_w - H_i}{H_w - H_L} \right\}$$

$$\xi_L = \frac{kaL}{G_o} ; G_o = \frac{G}{1 + H_i}$$

H_i = ความชื้นของลมร้อนก่อน เข้าชั้นวัสดุ

H_L = ความชื้นของลมร้อนที่ออกจากชั้นวัสดุ

H_w = ความชื้นของลมร้อนที่อุณหภูมิกระจายเปียก

ดังนั้น

$$\xi_L = \frac{162,626 \times 0.05}{2170/(1 + 0.018)} = 3.82$$

จาก

$$H_L = \frac{H_w - (H_w - H_1)}{\xi_L}$$

$$H_L = 0.032 - \frac{(0.032 - 0.018)}{\xi^{3.82}}$$

หรือ

$$H_L = 0.0316 \text{ ซึ่งใกล้เคียงกับที่เราได้สมมุติไว้ตอนแรก}$$

ดังนั้น

$$\pi_o = H_w - H_1 = 0.032 - 0.018 = 0.014$$

และ

$$R_{\text{theo}} = -\frac{dw}{d\theta} = \frac{ka}{(1-\epsilon)\rho_s} \cdot \frac{\pi_o \xi^{-\pi_o \tau} (1-\xi^{\phi_o} \xi)}{\xi_L (1-\xi^{-\pi_o \tau} (1-\xi^{\phi_o} \xi_L))}$$

$$\text{โดยที่ } \tau = \frac{ka\theta}{(1-\epsilon)\rho_s (c_c - c_e)}$$

$$\phi = \frac{(c - c_c)}{(c_c - c_e)}$$

หลังจากการแทนค่าต่างๆ ลงไปในสมการข้างต้นเราจะเห็นว่าเหลือเพียงตัวแปร θ และ c_c ที่ต้องรู้ในการคำนวณค่า R_{theo}

โดยการทดลองใช้ c_c ค่าหนึ่งเราจะได้ค่า R_{theo} ที่เวลา θ ต่างๆ ซึ่งเอาไปเปรียบเทียบกับอัตราการอบแห้งที่ได้จากการทดลองได้ สรุปแล้วค่า c_c ที่เหมาะสมที่สุดคือค่าที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของผลต่างระหว่าง R_{theo} และ R_{exp} มีค่าน้อยที่สุดนั่นเอง