การอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง

น.ส. จำลักษณ์ ศรีนาคเรือง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-1411-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DRYING OF EUCALYPTUS BARK IN CONTINUOUS FLUIDIZED BED

Miss. Jumluck Srinakruang

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-1411-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง
โดย	น.ส. จำลักษณ์ ศรีนาคเรือง
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

.... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำลักษณ์ ศรีนาคเรือง : การอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง
DRYING OF EUCALYPTUS BARK IN CONTINUOUS FLUIDIZED BED
อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ,
88 หน้า. ISBN 974-13-1141-9

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชัน โดยพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งคือ ความเร็วลม 2.32 – 3.85 m/s อุณหภูมิอากาศร้อน 80 - 100 $^{\circ}$C ความสูงของเบด 3.5 – 9.5 cm สำหรับการทดลองแบบกะ ส่วนการทดลองอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชันแบบต่อเนื่องมีอัตราการไหลของวัตถุดิบ 0.125 กิโลกรัมต่อนาที ความสูงของเบด 10 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลือกไม้ 0.5 เซนติเมตร มีตัวแปรที่ศึกษา คือ ความเร็วลม 2.32 – 2.85 m/s อุณหภูมิอากาศร้อน 90 - 110 $^{\circ}$C จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายอัตราการอบแห้ง จากการทดลองที่ความชื้นเริ่มต้น 55 – 60 % โดยน้ำหนักเปียก เหลือความชื้นประมาณ 10 % โดยน้ำหนักเปียก

ซึ่งภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแบบกะ คือ ความสูงเบด 9.5 cm ความเร็วลม 2.32 m/s และอุณหภูมิ 80 $^{\circ}$C ส่วนภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแบบต่อเนื่อง คือ อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C ความเร็วลม 2.85 m/s เนื่องจากความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งต่ำกว่า 10 % โดยน้ำหนักเปียก ความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ ประสิทธิภาพสูงและอัตราการผลิตสูง

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งที่ได้นำมาใช้กับการทดลองแบบกะและแบบต่อเนื่อง พบว่าสามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ดีกับการทดลองแบบต่อเนื่อง เนื่องจากให้ค่าใกล้เคียงกับทุกช่วงอุณหภูมิและทุกช่วงความเร็วลม ส่วนการทดลองแบบกะนั้นสามารถทำนายได้ดีพอสมควร กล่าวคือในช่วงเวลาการอบแห้งที่ความสูงของเบดต่ำๆ สามารถทำนายความชื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลองแต่ไม่สามารถใช้ได้กับที่ความสูงเบด 9.5 cm เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างตัวกลางไม่คงที่ เกิดฟองแก๊สมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....
ปีการศึกษา	2543	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....

4272231823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEY WORD : EUCALYPTUS/ DRYING/ FLUIDIZED BED

JUMLUCK SRINAKRUANG : DRYING OF EUCALYPTUS BARK IN CONTINUOUS FLUIDIZED BED THESIS ADVISOR : OC. PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., THESIS COADVISOR : PROF. SOMSAK DAMRONGLERD, Ph.D., 88 pp

ISBN 974-13-1141-9

This research has the objective to study a drying of Eucalyptus shell by using fluidized bed. The variables such as temperature range of 80 – 100 °C, hot air velocities 2.32 – 3.85 m/s and height of bed of 3.5 –9.5 cm. in batch process whereas temperature range of 90-110 °C and hot air velocities of 2.32 –2.85 m/s in continuous process were investigated. The initial moisture content about 55-60% by weight being decreased to 10% by weight was criteria for determination the optimum condition.

Experimental results for the optimum condition in batch process was 9.5 cm of height of bed, 2.32 m/s of hot air velocity and 80 °C of bed temperature, while the optimum condition in continuous process was 90 °C of bed temperature and 2.85 m/s hot air velocity. These optimum conditions give high energy efficiency and obtain 10% moisture content of shell.

Mathematical model shows the prediction very well in both batch and continuous process for all experiments at low height of bed, except the height of bed at 9.5 cm in batch process having large deviation because of not being uniform contact between hot air and raw material.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Technology
Field of study Chemical Technology
Academic year 2000

Student's signature.......................................
Advisor's signature.......................................
Co – advisor's signature................................

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ. ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตักเตือน และช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้ให้ลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ คุณสังข์ ชมชื่น และ คุณประเสริฐ ช่วยศรีนวล ที่ช่วยซ่อมอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้จนสามารถดำเนินการวิจัยได้ดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ

ทุนวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัยจึงขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ	ฌ
สัญลักษณ์	ฏ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	3
1.2 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการอบแห้ง	4
2.1.1 การถ่ายโอนความร้อนโดยการพา	4
2.1.2 สมการการอบแห้งทางทฤษฎี	6
2.2 ความชื้นในวัสดุ	7
2.2.1 ความชื้นสมดุลของวัสดุ	7
2.3. ฟลูอิไดเซชัน	9
2.3.1 ประเภทของฟลูอิไดเซชัน	9
2.3.2 ลักษณะของฟลูอิไดซ์เบด	9
2.3.3 การคำนวณหาความดันลดในฟลูอิไดซ์เบด	12
2.3.4 การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์	12
2.3.5 สมการทั่วไปของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิไดเซชัน	13
2.3.6 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง	13
2.3.7 แก๊สฟลูอิไดเซชัน	14
2.3.8 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งฟลูอิไดซ์เบดอย่างต่อเนื่อง	15
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด	16

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

2.4.1 แบบจำลอง 16
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 20
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง 23
3.1 รูปแบบการศึกษา 23
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 23
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย 28
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล 30
4.1 ลักษณะการเกิดฟลูอิไดซ์เบดจากการทดลอง 30
4.2 ผลการทดลองการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 34
4.3 ผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งแบบกะ 35
4.4 การหาภาวะที่เหมาะสมโดยการอบแห้งเปลือกไม้แบบกะ 42
4.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งแบบ กะ กับแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ 49
4.6 การอบแห้งเปลือกไม้ในฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง 51
4.7 การหาภาวะที่เหมาะสมโดยการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่อง 54
4.8 การเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งแบบต่อเนื่องกับแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ 57
4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง 61
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 63
5.1 ตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในฟลูอิไดซ์เบดแบบกะ 63
5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด 63
5.3 การหาภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง 63
5.4 ข้อเสนอแนะ 64
รายการอ้างอิง 65
ภาคผนวก 67
ประวัติผู้เขียน 88

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง 6

2.2 เส้นความชื้นสมดุลคงที่ของเมล็ดพืชต่างๆ 8

2.3 ลักษณะของเบดนิ่งและจุดเริ่มฟลูอิไดเซชัน 10

2.4 ลักษณะของฟลูอิไดซ์เบด 11

2.5 ความสัมพันธ์ของ $C_d(Rep)^2$ กับ Rep 14

3.1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในฟลูอิไดซ์เบด.... 24

3.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด 25

3.3 พัดลมเป่าอากาศ 25

3.4 อุปกรณ์ Cyclone 26

3.5 เครื่องป้อนและอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ 27

4.1 ลักษณะการเกิดฟลูอิไดเซชัน 31

4.2 การเกิดฟองแก๊สในฟลูอิไดซ์เบด 32

4.3 การเกิด Channelling ในฟลูอิไดซ์เบด 33

4.4 ผลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในฟลูอิไดซ์เบดแบบกะ ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 3.5 cm 34

4.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 3.5 cm 36

4.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 6.5 cm 36

4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 9.5 cm 37

4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.25 m/s ความสูงของเบด 3.5 cm 37

4.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.25 m/s ความสูงของเบด 6.5 cm 38

4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.25 m/s ความสูงของเบด 9.5 cm 38

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.81 m/s ความสูงของเบด 3.5 cm 39
4.12 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.81 m/s ความสูงของเบด 6.5 cm 39
4.13 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.81 m/s ความสูงของเบด 9.5 cm 39
4.14 ผลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 $^{\circ}C$ ความสูงของเบด 3.5 cm 40
4.15 ผลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}C$ ความสูงของเบด 6.5 cm 40
4.16 ผลของความสูงเบดที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.81m/s อุณหภูมิ 80 $^{\circ}C$ 41
4.17 ผลของความสูงเบดที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.25 m/s อุณหภูมิ 90 $^{\circ}C$ 41
4.18 ผลของความเร็วลมที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ความสูงเบด 3.5 cm 44
4.19 ผลของความเร็วลมที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ความสูงเบด 6.5 cm 44
4.20 ผลของความเร็วลมที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ความสูงเบด 9.5 cm 45
4.21 ผลของความสูงเบดที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ความเร็วลม 2.32 m/s 45
4.22 ผลของความสูงเบดที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.25 m/s 46
4.23 ผลของความสูงเบดที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.81 m/s 46
4.24 ประสิทธิภาพการอบแห้งเปลือกไม้แบบกะที่อุณหภูมิ 80 $^{\circ}C$ 47
4.25 แผนผังการคำนวณความชื้นจากแบบจำลอง 49
4.26 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองและแบบจำลองที่ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 3.5 cm 50

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.27 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องที่ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 9.5 cm อุณหภูมิ 80 °C 50

4.28 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องที่ความเร็วลม 2.58 m/s 52

4.29 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 100 °C 52

4.30 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 110 °C 53

4.31 ผลของความเร็วลมที่มีต่อต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 100 °C 53

4.32 ผลของความเร็วลมที่มีต่อต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 110 °C 53

4.33 ผลของความเร็วลมที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ทั้งหมดกับอุณหภูมิในการอบแห้ง 56

4.34 ประสิทธิภาพของการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่อง 56

4.35 แผนผังการคำนวณความชื้นจากแบบจำลอง 58

4.36 ผลของการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่อุณหภูมิ 110 °C ความเร็วลม 2.32 m/s 59

4.37 ผลของการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วลม 2.58 m/s 61

4.38 ผลของการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่อุณหภูมิ 100 °C ความเร็วลม 2.85 m/s 62

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็ง (m^2)
C	=	ความเข้มข้นของความชื้น (kg / m^3)
Co	=	ความชื้นเริ่มต้น (kg water / kg dry solid)
Cc	=	ความชื้นวิกฤต (kg water / kg dry solid)
C^+	=	ความชื้นสมดุล (kg water / kg dry solid)
C_{AS}	=	ความเข้มข้นของมวล A ที่อิ่มตัว (kg / m^3)
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2 / h)
d	=	มวลของวัสดุแห้งไม่มีความชื้น (kg)
d_p	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (mm)
g	=	อัตราการเร่งจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
g_C	=	แฟคเตอร์เปลี่ยนหน่วยของแรงและน้ำหนัก ($kg.m/kg.s^2$)
h	=	ความสูงของเบด (mm)
h'	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($kJ / m^2\ h^\circ C$)
h'_D	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (kg / hm^2)
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ / kg)
m°_w	=	อัตราการไหลของน้ำ (kg / h)
M_W	=	ความชื้นโดยน้ำหนักเปียก, เศษส่วน
N_A	=	ปริมาณของมวลสารที่เกิดจากการถ่ายโอน (kg / hm^3)
p_g	=	ความหนาแน่นของของแก๊ส (kg/m^3)
p_S	=	ความหนาแน่นของของแข็ง (kg/m^3)
q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน (kJ)
Q°	=	อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)
R	=	อัตราการอบแห้ง (kg water / kg dry solid / s)
Rep	=	ค่า Reynold number ไม่มีหน่วย
t	=	เวลา (วินาที)
$\bar{t}$	=	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
t_C	=	เวลาวิกฤต (วินาที)
T	=	อุณหภูมิ (K)
T_s	=	อุณหภูมิของเม็ดของแข็ง ($^\circ C$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์ (ต่อ)

T_{wb}	=	อุณหภูมิกระเปาะเปียก ($^{\circ}$C)
T_{∞}	=	อุณหภูมิของกระแสของไหล ($^{\circ}$C)
u	=	ความเร็วลม (m/s)
U_{mf}	=	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิไดเซชัน (m/s)
W	=	Hold up ของของแข็ง(kg)
X	=	ระยะทาง (m)
ε	=	ช่องว่างภายในเบด ไม่มีหน่วย
θ_c	=	dimensionless time (t / t_C)
μ	=	ความหนืดของแก๊ส (kg.m/s)
ϕ	=	แฟคเตอร์รูปร่าง ไม่มีหน่วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการที่รัฐบาลสนับสนุนให้เกษตรกรปลูกต้นยูคาลิปตัสเพื่อเป็นวัตถุดิบของการผลิตเยื่อกระดาษตั้งแต่ปี 2525 เป็นต้นมา และมีการเพิ่มพื้นที่การปลูกมากขึ้นปีละ 5% เนื่องจากก่อนส่งโรงงานทำเยื่อกระดาษจำเป็นต้องลอกเปลือกออกก่อน จึงทำให้มีปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเหลือทิ้งมากกว่าปีละแสนตัน ทำให้มีของเสียทิ้งจากโรงงานมากมาย ซึ่งเปลือกไม้นี้มีความชื้นสูงมาก เมื่อนำไปเผาไหม้จะเกิดควันและเขม่าดำ ดังนั้นเมื่อต้องการนำมาใช้งานต้องมีการนำไปตากแดดเสียก่อนซึ่งใช้เวลานาน และไม่สามารถนำไปตากแดดได้ในช่วงฤดูฝน

สถานการณ์ของการอบแห้งของโรงงานในปัจจุบัน อาศัยธรรมชาติคือพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสประมาณ 50 - 55 % โดยน้ำหนักเปียก หลังจากลอกเปลือกไม้แล้วจึงนำไปตากแดดในลานคอนกรีต ซึ่งต้องใช้พื้นที่ในการตากมาก โดยจะต้องตากแดดทิ้งไว้ประมาณ 2 – 3 วัน ซึ่งเปลือกไม้ที่จะนำไปใช้งานได้ต้องมีความชื้นประมาณ 10 % โดยน้ำหนักเปียกเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า และในช่วงฤดูฝนไม่สามารถใช้ลานตากได้อย่างสม่ำเสมอทุกวันจึงมีปริมาณเปลือกไม้ที่มีความชื้นสูงตกค้างอยู่มาก ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้จึงต้องใช้เครื่องอบแห้ง

การอบแห้งของแข็งขนาดเล็กเป็นสิ่งที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการอบวัตถุดิบ ในระหว่างการผลิต และผลผลิตที่สำเร็จเรียบร้อยแล้ว ซึ่งวิธีที่ใช้จะขึ้นกับขนาดของอนุภาคและธรรมชาติของสารป้อน ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้การอบแห้งแบบพ่น (Spray Drying) เหมาะกับอนุภาคขนาด 10-500 ไมโครเมตร การอบแห้งแบบ Flash Drying เหมาะกับอนุภาคขนาด 10-3000 ไมโครเมตร หรือการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด เหมาะกับอนุภาคขนาด 50-5000 ไมโครเมตร ในขณะที่การอบแห้งแบบพ่นและ แบบ Flash drying จะใช้กับวัตถุป้อนที่เป็นของเหลว แต่ฟลูอิไดซ์เบดจะใช้กับวัตถุป้อนที่เป็นของแข็งเปียก

การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดมีทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง ซึ่งการทำงานแบบกะก็เหมาะสำหรับผลผลิตที่มีปริมาณน้อยและไวต่ออุณหภูมิสูง ภาวะของกระบวนการจะง่ายและผลผลิตก็จะมีคุณภาพที่สม่ำเสมออันเนื่องมาจากความเหมือนกันของเบดที่ช่วงเวลาสั้นๆระหว่างที่ดำเนินการอยู่ ในการอบแห้งแบบต่อเนื่องผลผลิตจากเตาอบจะอยู่ภายใต้กระบวนการที่มีสภานะคงตัว

การอบแห้งเป็นกระบวนการไล่ความชื้น ซึ่งการอบแห้งวิธีนี้มีข้อดีกว่าการอบแห้งโดยใช้เบดนิ่ง คือ การกระจายความชื้นของเปลือกไม้หลังการอบแห้งมีความสม่ำเสมอ อัตราการอบแห้งสูง ประสิทธิภาพของความร้อนสูงและสม่ำเสมอ และสามารถควบคุมอุณหภูมิในเบดได้ ซึ่งทำให้เวลาในการอบแห้งต่ำอันเนื่องมาจากอัตราการถ่ายโอนความร้อนและมวลที่สูง ให้ทางเลือกกว้างในการอบแห้งของวัสดุ เทคนิคนี้ยังดำเนินการได้ง่ายและการซ่อมบำรุงก็ง่ายด้วย สามารถปรับให้เป็นระบบอัตโนมัติและยังใช้ร่วมกับกระบวนการอื่นได้ เช่นการผสม การจัดหมวดหมู่ การทำให้เย็น เป็นต้น

เป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการอบแห้งใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่น พลังงานที่ใช้แบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ ความร้อนที่ใช้ในการทำให้อากาศร้อน และพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ ความร้อนที่ใช้อาจได้จากไฟฟ้า หรือน้ำมันเชื้อเพลิงต่างๆ เช่น แก๊ส หรือน้ำมัน ดังนั้นการศึกษาการอบแห้งเปลือกไม้ที่ความชื้นสูงโดยใช้วิธีฟลูอิไดเซชันจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีค่าต่อการวิเคราะห์การอบแห้งโดยใช้ฟลูอิไดซ์เบดในทางอุตสาหกรรมต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.1 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชัน
2. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการอบแห้ง

1.2 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชันแบบกะ
    - 1.1 ผลของอุณหภูมิ โดยตัวแปรที่ 80 , 90 และ 100 องศาเซลเซียส
    - 1.2 ผลของความเร็วลม โดยตัวแปรที่ 2.32 , 3.25 และ 3.81 m/s
    - 1.3 ผลของความสูงเบด โดยตัวแปรที่ 3.5 , 6.5 และ 9.5 เซนติเมตร
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชันแบบต่อเนื่อง
    - 2.1 ผลของอุณหภูมิ โดยตัวแปรที่ 90 , 100 และ 110 องศาเซลเซียส
    - 2.2 ผลของความเร็วลม โดยตัวแปรที่ 2.32 , 2.58 และ 2.85 m/s
3. เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอัตราการอบแห้ง
2. ได้แนวทางและข้อมูลพื้นฐานที่จะขยายเครื่องมือเพื่อใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรมต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการอบแห้ง[2]

กระบวนการอบแห้ง คือกระบวนการถ่ายโอนความร้อนจากลมร้อนไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งมักจะขึ้นกับกลไกการถ่ายโอนความร้อนได้แก่ การนำความร้อน และการพาความร้อน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการพาความร้อน

2.1.1 การถ่ายโอนความร้อนโดยการพา

ในกรณีที่อากาศไหลผ่านวัสดุชื้น ตัวอากาศร้อนจะทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนไปยังวัสดุและพาไอน้ำออกไปด้วย ถ้าอากาศร้อนนั้นมีอุณหภูมิและความชื้นคงที่จะพบว่ามีกระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นสองช่วงคือ ช่วงแรกอัตราการอบแห้งจะคงที่ และเมื่ออบต่อไปจนกระทั่งถึงความชื้นค่าหนึ่ง จะพบว่าอัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลงเรียกความชื้นที่จุดนี้ว่าความชื้นวิกฤต ถ้าความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าความชื้นวิกฤต ในการอบแห้งจะมีเพียงช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ผิวของวัสดุจะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก การถ่ายโอนความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยความเร็วลม อุณหภูมิของอากาศ ถ้าสภาวะสิ่งแวดล้อมมีค่าคงที่จะทำให้อัตราการอบแห้งคงที่ด้วย และในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อิทธิพลของอากาศภายนอกจะลดลงด้วย อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเนื้อวัสดุ

ในขณะที่มีการถ่ายโอนมวล การถ่ายโอนความร้อนก็เกิดขึ้นด้วยพร้อมๆกัน ซึ่งทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อนสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณความร้อนขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิ ในการอบแห้งความร้อนจะถ่ายโอนจากกระแสอากาศไปยังผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำซึ่งเป็นไปตามสมการ (1)

$$q = h'A\,(T_{\infty} - T_s) \qquad (1)$$

q = อัตราการถ่ายเทความร้อน kJ

h' = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน $kJ / m^2\,h\,^{\circ}C$

A = พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็ง m^2

T_{∞} = อุณหภูมิของกระแสของไหล $^{\circ}C$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

T_s = อุณหภูมิของเม็ดของแข็ง $^{\circ}C$

ในขณะเดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิววัสดุมายังกระแสอากาศ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2)

$$N_A = h'_D A (C_{AS} - C_A) \qquad (2)$$

N_A = ปริมาณของมวลสารที่เกิดจากการถ่ายโอน kg / hm^3

h'_D = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล kg / hm^2

C_{AS} = ความเข้มข้นของมวล A ที่อิ่มตัว kg / m^3

กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ช่วงดังรูปที่ 2.1 คือ

1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

ที่ช่วงเวลานี้การถ่ายโอนความร้อนและมวลระหว่างวัสดุและอากาศเกิดขึ้นที่รอบ ๆ ผิววัสดุ ซึ่งน้ำเคลื่อนที่จากในวัสดุได้เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น ซึ่งในช่วงแรกนี้ภายในวัสดุมีน้ำเป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะคงที่ ส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม เขียนสมการจะได้ว่า

$$m^{\circ}_w = h' A (T_\infty - T_{wb}) / h_{fg} \qquad (3)$$

m°_w = อัตราการไหลของน้ำ kg / h

T_{wb} = อุณหภูมิกระเปาะเปียก $^{\circ}C$

h_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ kJ / kg

2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงการถ่ายโอนความร้อนและมวลมิได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่เกิดภายในเนื้อวัสดุด้วย ซึ่งช่วงเวลานี้ปริมาณน้ำในวัสดุเหลือน้อยลง การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากวัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งการที่น้ำสามารถเคลื่อนที่ในวัสดุได้เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น อัตราการถ่ายโอนมวลต่อหนึ่งหน่วยหน่วยพื้นที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนท์ความเข้มข้นของความชื้น สามารถเขียนสมการได้ว่า

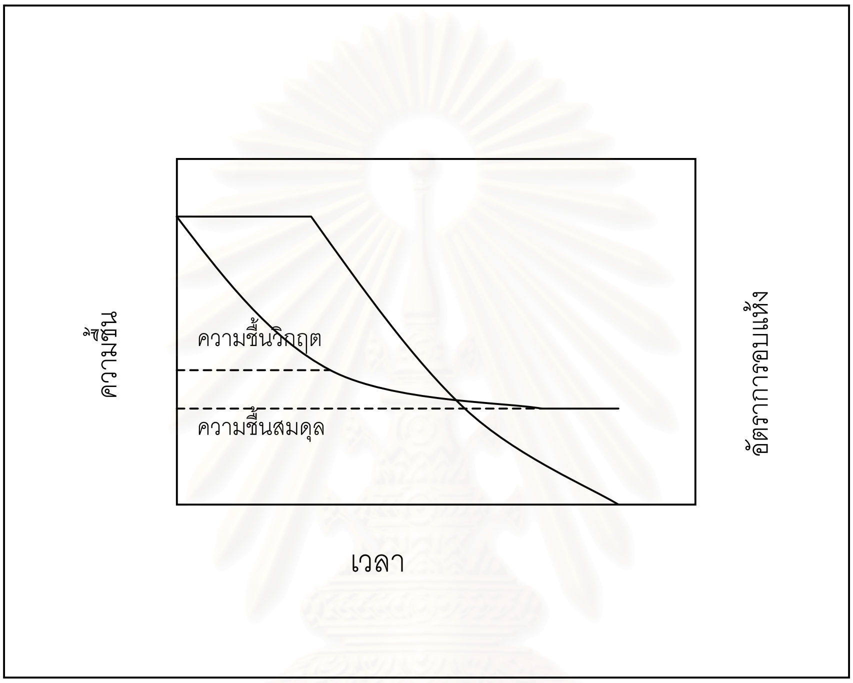
$$\dot{m}_w = -AD\partial C/\partial X \qquad (4)$$

A = พื้นที่การถ่ายโอนมวล m^2

C = ความเข้มข้นของความชื้น kg / m^3

X = ระยะทาง m

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น m^2 / h



รูปที่ 2.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง

ที่มา : สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540) [2]

2.1.2 สมการอบแห้งทางทฤษฎี

ได้มีผู้นำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov (1966) [13] ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุที่อาจเกิดขึ้นในแบบต่างๆดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวอันเนื่องมาจาก Capillary Flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface Force)

2. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความชื้น (Liquid Diffusion)

3. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวเนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็ก(Surface Diffusion)

4. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปไอเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion)

5. การเคลื่อนที่ของไอน้ำในรูปไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Diffusion)

6. การเคลื่อนที่ของไอน้ำในรูปของเหลวและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม(Hydrodynamic Flow)

จากกลไกการเคลื่อนที่ภายในของน้ำดังกล่าว Luikov [13] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุ และความดันรวม เนื่องจากแบบจำลองของ Luikov[13] มีความยุ่งยากมาก เพราะมีตัวแปรและตัวพารามิเตอร์หลายตัว ดังนั้นจึงยังไม่มีการนำแบบจำลองไปใช้

2.2 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นโดยน้ำหนักเปียก

$$M_W = (W - d) / W \quad (5)$$

M_W = ความชื้นโดยน้ำหนักเปียก, เศษส่วน

W = มวลของวัสดุ, kg

d = มวลของวัสดุแห้งไม่มีความชื้น kg

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในวงการค้า โดยทั่วไปจะอ้างถึงในรูปเปอร์เซนต์

2. ความชื้นโดยน้ำหนักแห้ง

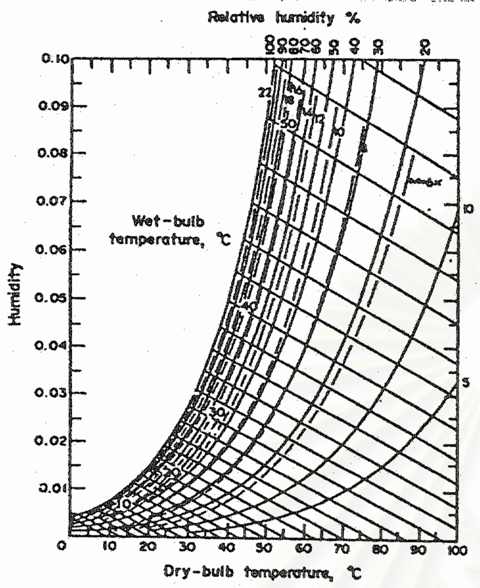
$$M_d = (W - d) / d \quad (6)$$

ความชื้นนี้นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง

2.2.1 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลของอากาศมีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันของอากาศที่อยู่รอบๆ

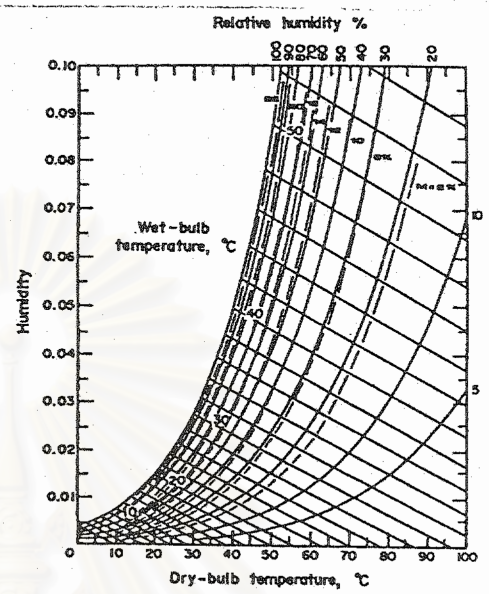
ด้วย เราเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นกับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ



a. เส้นความชื้นสมดุลคงที่ของข้าวเปลือก

$1-RH=\exp[-7.87\times10^{-6}(1.8T+491.7)(100M_{eq})^{2.088}]$

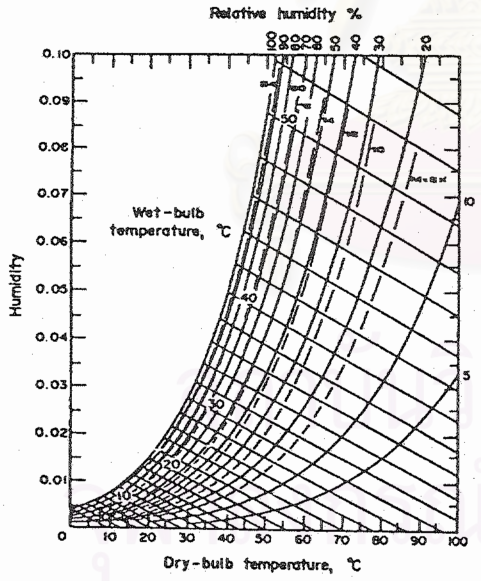
Henderson (1955)



b. เส้นความชื้นสมดุลคงที่ของข้าวโพด

$1-RH=\exp[-1.1\times10^{-5}(1.8T+491.7)(100M_{eq})^{1.9}]$

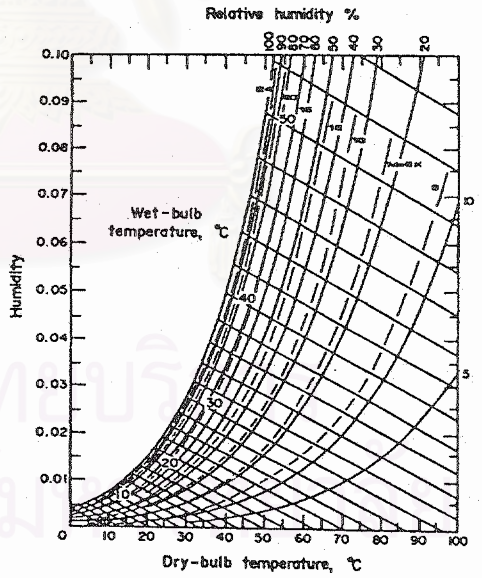
Henderson (1952)



c. เส้นความชื้นสมดุลคงที่ของข้าวเปลือกพันธุ์ กข23(การคายน้ำ)

$1-RH=\exp[-3.146\times10^{-6}T_{abs}(100M_{eq})^{2.464}]$

Soponronnarit (1987)



d. เส้นความชื้นสมดุลคงที่ของข้าวฟ่าง

$1-RH=\exp[-3.4\times10^{-6}(1.8T+491.7)(100M_{eq})^{2.31}]$

Henderson (1952)

รูปที่ 2.2 เส้นความชื้นสมดุลคงที่ของเมล็ดพืชต่างๆ

ที่มา : สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540) [(2)]

2.3 ฟลูอิไดเซชัน[1,12]

คือกระบวนการที่ของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็ง แล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้มีคุณสมบัติคล้ายของไหล โดยที่ของไหลที่ใช้อาจเป็นแก๊สหรือของเหลว ปล่อยให้ไหลผ่านชั้นของเม็ดของแข็ง เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งก็จะค่อยๆขยับตัว จนในที่สุดก็จะลอยตัวขึ้นทั้งหมดไม่เกาะติดกันอีกต่อไป ซึ่งลักษณะของเม็ดของแข็งที่อยู่ในลักษณะแบบนี้ว่ามีลักษณะเหมือนของไหล ซึ่งเราจะเรียกของแข็งในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิไดเซชัน

2.3.1 ประเภทของฟลูอิไดเซชัน

ฟลูอิไดเซชัน แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. ฟลูอิไดเซชันสองสถานะ (Two- phase Fluidization) คือ ในหอทดลองหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยของสองสถานะ คือของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจเป็นแก๊สหรือของเหลวก็ได้ ทั้งนั้นฟลูอิไดเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท

1.1 แก๊สฟลูอิไดเซชัน (Gas Fluidization)

1.2 ฟลูอิไดเซชันของเหลว (Liquid Fluidization)

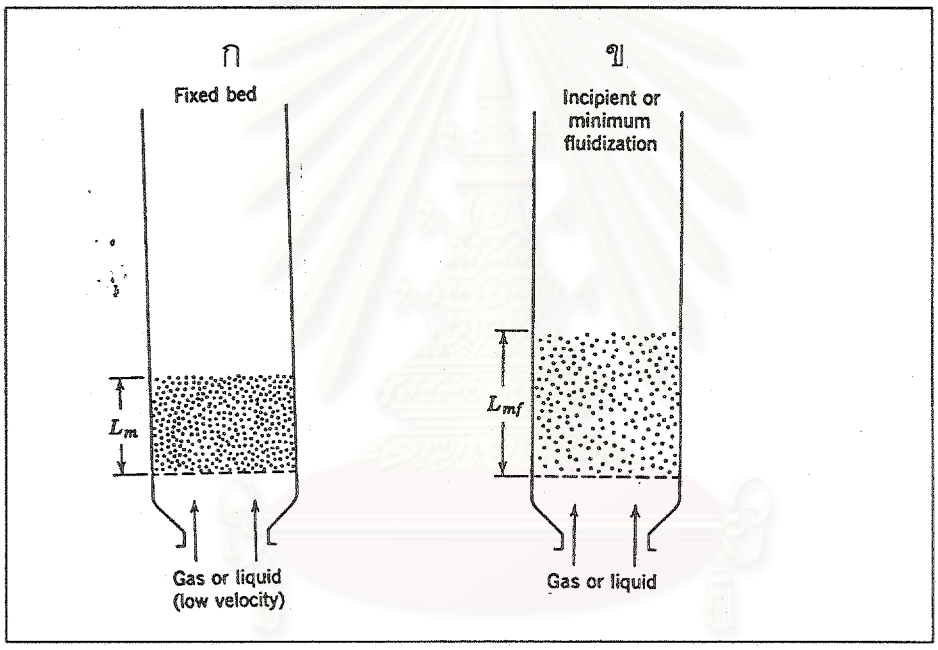
2. ฟลูอิไดเซชันสามสถานะ (Three- phase Fluidization) คือ ภายในหอทดลองจะประกอบด้วยสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส อยู่พร้อมกันสามสถานะ

2.3.2 ลักษณะของฟลูอิไดซ์เบด

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลองจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอทดลอง

เมื่อบรรจุของแข็งลงในหอทดลองเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลให้ไหลเข้าจากทางด้านล่างของหอทดลองอย่างช้าๆ ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดของแข็งที่หยุดนิ่งขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ จะเห็นว่าเม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย เราเรียกลักษณะของเบดนี้ว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) ดังรูปที่ 2.3 ก จากนั้นเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวและจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งจะลอยตัวอย่างอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิไดเซชัน แสดงดังรูปที่ 2.3 ขหลังจากนั้นถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นไปอีกจะทำให้เบดขยายตัวตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งยังคงอยู่ชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับตัวเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดหนาแน่น (Dense-phase Fluidized bed) และถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นไปอีก เม็ดของแข็งก็เกือบจะลอยออกนอกหอทดลองเราเรียกเบดลักษณะนี้ว่า ฟลูอิไดซ์เบด

เจือจาง (Diluted phase Fluidized bed) ถ้ายังคงเพิ่มความเร็วของของไหลต่อไปถึงความเร็วสุดท้ายของฟลูอิไดเซชัน (Therminal Velocity) ของเม็ดของแข็ง พื้นผิวชั้นบนจะหายไปและเม็ดของแข็งจะถูกพัดพาออกจากเบดไปติดกับของไหล เรียกจุดนี้ว่า การถูกพัดพาของเบด (Lean Phase Fluidized Bed) เบดในลักษณะนี้จะใช้การขนส่งด้วยอากาศ (Pnematics Transport) เช่น การลำเลียงผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ แต่ถ้าเป็นของเหลวจะเรียกว่า การขนส่งด้วยของเหลว (Hydraulics Transport) เช่น การขนส่งเมล็ดแร่

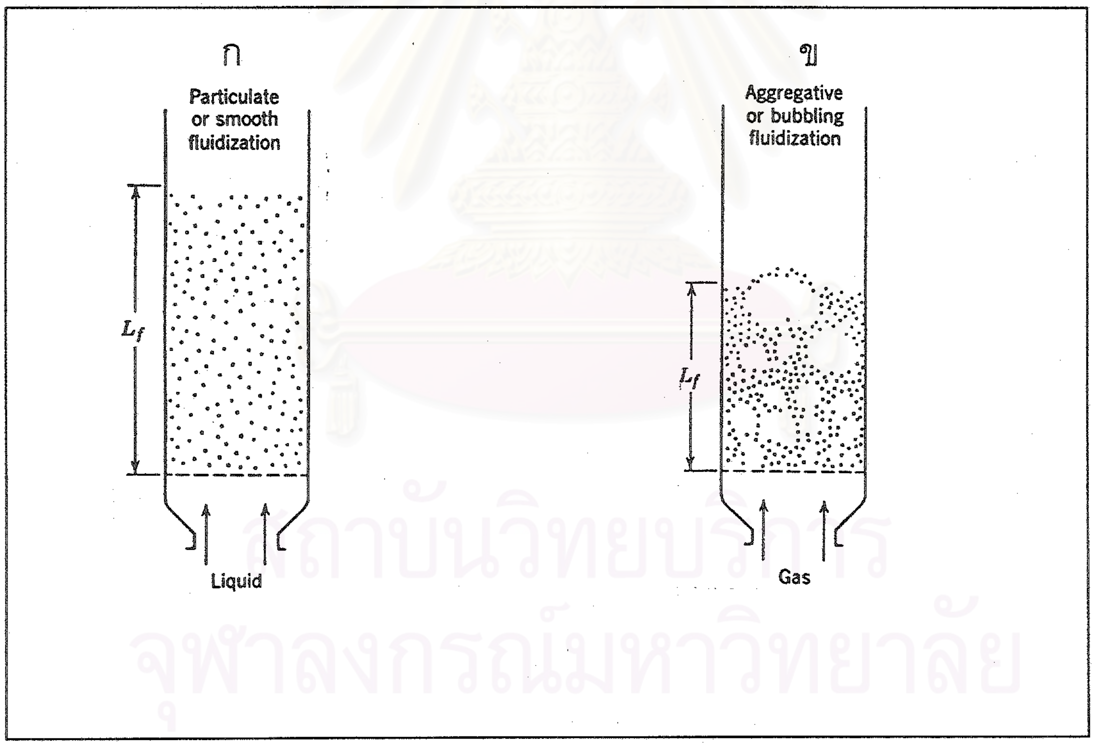


รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของเบดนิ่งและจุดเริ่มฟลูอิไดเซชัน

ที่มา : Kunii & Levenspiel (1969) [12]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฟลูอิไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบด เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบดนี้ว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Smooth Fluidized Bed) ดังรูปที่ 2.4 ก ฟลูอิไดซ์เบดที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะเบดจะแตกต่างจากที่ใช้เป็นของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบดแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งลอยตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองแก๊สเกิดขึ้น ฟองแก๊สก็จะแทรกตัวเองขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมานี้จะทำให้เม็ดของแข็งหลุดจากส่วนหลังคาของฟองแก๊สลงมายังส่วนข้างล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นไปด้วย ภายในเบดจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างชุลมุนวุ่นวายเบดชนิดนี้เรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดวุ่นวาย หรือเรียกสั้นว่าเบดวุ่นวาย (Aggregated Fluidized Bed) ดังรูปที่ 2.4 ข



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของฟลูอิไดซ์เบด
ที่มา : Kunii & Levenspiel (1969)[12]

2.3.3 การคำนวณหาความดันลดในฟลูอิไดซ์เบด

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัว แรงที่เกิดจากความดันย่อมเท่ากับน้ำหนักของเม็ดของแข็งหักออกด้วยแรงพยุง (Buoyancy force) ที่กระทำบนเม็ดของแข็งโดยของไหลเขียนสมการได้ว่า

$$\Delta P / L_{mf} = (1-\varepsilon_{mf})\,(p_s - p_g)\, g / g_c \qquad (7)$$

ΔP = ความดันต่างของเบด g / cm^2

L_{mf} = ความสูงต่ำสุดของเบด cm

ε_{mf} = สัดส่วนช่องว่างต่ำสุด ไม่มีหน่วย

p_g = ความหนาแน่นของแก๊ส g / cm^3

p_s = ความหนาแน่นของของแข็ง g / cm^3

2.3.4 การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์

ในเบดที่ใช้เม็ดของแข็งขนาดเล็กจะทำให้สามารถใช้ความเร็วของของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันได้แล้ว เพราะฉะนั้นความเร็วต่ำสุดที่จะทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันสามารถคำนวณได้จาก

$$U_{mf} = \frac{(\phi_S d_p)^2}{150} \cdot \frac{p_S - p_g}{\mu}\, g \left(\frac{\varepsilon^3_{mf}}{(1-\varepsilon_{mf})}\right) \qquad (8)$$

Rep $<$ 20

U_{mf} = ความเร็วต่ำสุด cm / s

ϕ_S = แฟคเตอร์รูปร่าง ไม่มีหน่วย

d_p = ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย

μ = ความหนืด kg / m.s

สำหรับเบดที่มีเม็ดของแข็งขนาดใหญ่ ความเร็วต่ำสุดหาได้จาก

$$U^2_{mf} = \frac{\phi_S d_p}{1.75} \cdot \frac{p_S - p_g}{p_g} \cdot g\varepsilon^3_{mf} \qquad (9)$$

Rep $>$1000

2.3.5 สมการทั่วไปของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิไดเซชัน

บางครั้งการหาค่าของแฟคเตอร์รูปร่าง (ϕ_S) และค่าของสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดทำได้ยากมากได้มีการหลีกเลี่ยงที่จะใช้ค่าทั้งสองนี้โดยพยายามเปลี่ยนให้อยู่ในเทอมของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็งดังในสมการที่ 10

ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิไดเซชันจากสมการที่ 9 เขียนใหม่

$$U^2_{mf} = \frac{C\, d_p^{\,2} g\, (p_S - p_g)}{\mu} \qquad (10)$$

C เป็นฟังก์ชั่นของค่า Reynold

และสำหรับของไหลที่มีค่า Rep น้อยกว่า 50 จะได้

$$U_{mf} = \frac{688\, d_p^{\,1.82}(p_s - p_g)^{0.94}}{\mu^{0.88}} \qquad (11)$$

2.3.6 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง (U_t)

ในฟลูอิไดเซชันนั้นมีความเร็วของของไหลอยู่ 2 ขอบเขต ขอบเขตอันแรกคือความเร็วต่ำสุดของฟลูอิไดเซชัน ขอบเขตอันที่สองคือ ความเร็วของไหลที่เพิ่มขึ้นจากความเร็วต่ำสุดจนกระทั่งทำให้เม็ดของแข็งลอยหลุดจากหอทดลองไป ความเร็วอันนี้จะมีขนาดเท่ากับความเร็วตกอิสระพอดี

จากการศึกษาเกี่ยวกับการไหลของของไหลพบว่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็ง(U_t) ในของไหลที่อยู่นิ่งเท่ากับ

$$U_t = \left[4gd_p\,(p_s - p_g)/(3p_g C_d)\right]^{0.5} \qquad (12)$$

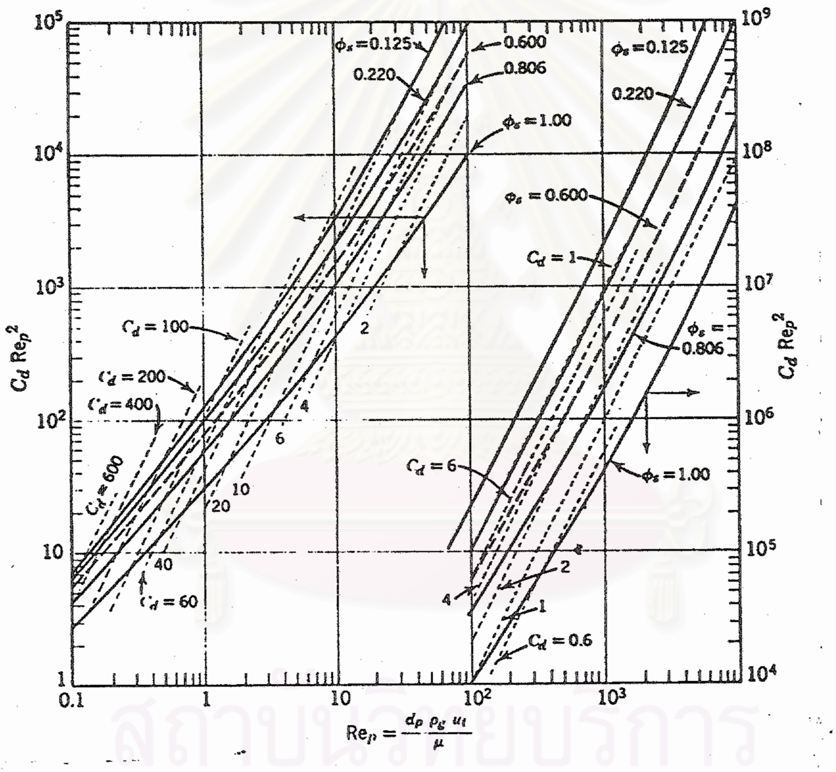
C_d = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ไม่มีหน่วย

ค่า Reynold Number คือ Rep $= d_p\, p_g\, U_t / \mu$

ดังนั้น

$$C_d(Rep)^2 = \left[4g_c\, d_p^3 \rho_g(\rho_s-\rho_g)\right]/(3\mu^2) \quad (13)$$

Brown และผู้ร่วมงาน [14]ได้หาความสัมพันธ์ของ $C_d(Rep)^2$ กับ Rep ดังผลการคำนวณที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของ $C_d(Rep)^2$ กับ Rep

ที่มา : Brown et al. (1950)[14]

2.3.7 แก๊สฟลูอิไดเซชัน

ปรากฏการณ์ของฟลูอิไดซ์เบดที่เกิดจากแก๊สมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของแก๊สที่ผ่านเข้าเบด ขนาดและรูปร่างของอนุภาคของแข็งที่ใช้เป็นเบดในขณะที่เบดเริ่มมีลักษณะเป็นฟลูอิไดเซชันใหม่ๆ จะมีลักษณะที่เกิดขึ้นคล้ายกับลักษณะที่เกิดขึ้นใน

ฟลูอิไดซ์ของของเหลว แต่ถ้าความเร็วของแก๊สเพิ่มมากขึ้น จะมีแก๊สบางส่วนรวมตัวกัน ก่อตัวเหมือนถุงอากาศ ซึ่งส่วนนี้จะเรียกว่า ฟองแก๊ส

2.3.7.1 ลักษณะฟองแก๊ส [3]

ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของแข็ง ความเร็วของฟองแก๊ส และแผ่นกระจายของไหล ลักษณะของฟองแก๊สอาจแบ่งได้ดังนี้

1. Channelling เกิดการผ่านของแก๊สเป็นช่องๆ โดยที่อนุภาคของแข็งอยู่ตรงทางผ่านของแก๊สเท่านั้นที่เคลื่อนที่ แต่บริเวณด้านข้างจะอยู่กับที่ไม่เคลื่อนที่

2. Bubbling อนุภาคของแข็งในฟลูอิไดซ์เบดจะเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาและสม่ำเสมอในเบด แต่ถ้าหากบริเวณใดมีอนุภาคของแข็งอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่นหรือไม่มีเลย เราเรียกบริเวณนี้ว่า Bubbling

3. Slugging การเกิดฟองแก๊สหรือการรวมตัวของฟองแก๊ส จนได้ฟองแก๊สที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ มีการแยกตัวของอนุภาคของแข็งเป็นชั้นๆ ทำให้การถ่ายโอนมวล หรือความร้อนเกิดได้ไม่ทั่วถึง เนื่องจากอนุภาคของแข็งได้สัมผัสกับแก๊สเป็นเวลาอันสั้นหรือไม่สัมผัสเลยในบางส่วน

4. Spouted Bed การที่แก๊สไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของแข็งเท่านั้นด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณด้านข้าง ลักษณะการไหลแบบนี้คล้ายกับน้ำพุ

2.3.8 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง [4]

2.3.8.1 ข้อดีของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง

1. เครื่องมือสามารถสร้างให้มีขนาดเล็ก ทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่น้อย

2. เนื่องจากเม็ดของแข็งเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้สม่ำเสมอ

3. พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบดนิ่งที่ใช้จำนวนเม็ดของแข็งที่เท่ากัน จึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวล

4. จากคุณสมบัติที่คล้ายของไหล จึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้โดยที่ของแข็งจะสามารถไหลออกจากเบดได้เองโดยไม่ต้องใช้เครื่องกลช่วย

2.3.8.2 ข้อเสียของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง

1. เวลาของของไหลสัมผัสกับของแข็งสั้น ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก

2. มักจะเกิดฟองแก๊ส ทำให้การสัมผัสไม่ดีเป็นการสูญเปล่า ซึ่งถ้าเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอาจต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วย

3. เนื่องจากเกิดการผสมกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งเม็ดของแข็งมีช่วงเวลาที่อยู่ในเบดสั้นหรือนานเกินไป ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพไม่ตรงตามที่กำหนด

4. ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปียกและเป็นยางไม่ได้ เพราะจะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่ทำให้ไม่สามารถเกิดฟลูอิไดซ์ได้

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด[10]

การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดมีทั้งแบบกะ และแบบต่อเนื่อง ซึ่งการทำงานแบบกะเหมาะสำหรับผลผลิตที่มีปริมาณน้อยและไวต่ออุณหภูมิสูง สภาวะของกระบวนการจะง่ายและผลผลิตก็จะมีคุณภาพที่สม่ำเสมออันเนื่องมาจากความเหมือนกันของเบดที่ช่วงเวลาสั้นๆระหว่างที่ดำเนินการอยู่ ในการอบแห้งแบบต่อเนื่องผลผลิตจากเตาอบจะอยู่ภายใต้กระบวนการที่มีสถาวะคงตัวซึ่งเวลาที่อยู่ในเครื่องของแต่ละอนุภาคภายในเตาอบจะมีช่วงเวลาที่กว้าง

ลักษณะการผสมกันของของแข็งและจลนพลศาสตร์การอบแห้งเป็นสิ่งที่สำคัญในการประเมินผลของการอบแห้งในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง การผสมกันของของแข็งอาจประมาณว่าเป็นการผสมแบบอุดมคติ Beran และ Lutcha[15] ได้ศึกษาการอบแห้งผลึกแอมโมเนียมซัลเฟตโดยสมมุติว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่จะเกิดก่อนช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อย่างไรก็ตามสิ่งที่ถือว่าเป็นหลักของจลนพลศาสตร์การอบแห้งจะประกอบด้วยช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ตามด้วยช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งข้อมูลจากการทดลองที่ได้มาจากการทดลองที่เป็นฟลูอิไดซ์เบดแบบสั้น อย่างไรก็ตามจากการทดลองชี้ให้เห็นว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเพียงอย่างเดียวที่สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งได้

แบบจำลองของ Chandran et al. (1990)[10] นี้จะถูกใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งของอนุภาคของแข็ง ข้อมูลการทดลองที่ได้รับจากการอบแห้งของแข็งในแบบกะและแบบต่อเนื่องจะได้ผลเหมือนกับที่ทำนายด้วยแบบจำลอง และฟังก์ชันของเวลาในการอบแห้งก็เหมาะสมในการอธิบายการผสมกันของของแข็ง

2.4.1 แบบจำลอง (Model Development)

2.4.1.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งสำหรับกระบวนการแบบกะ

ข้อสมมุติฐานต่อไปนี้ทำขึ้นเพื่อใช้พัฒนาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

1. เส้นอัตราการอบแห้งจะมีทั้งช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง
2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงจะเป็นเส้นตรงและแทนด้วยเส้นที่ลากจากปริมาณความชื้นวิกฤตไปสู่ปริมาณความชื้นสมดุล
3. ภาวะของตัวกลางที่ให้ความร้อนจะยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการ
4. พื้นที่สัมผัสระหว่างของแข็งและตัวกลางยังคงที่สำหรับระบบแก๊ส และของแข็ง

สมการควบคุมจลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งแสดงดังนี้

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

$$t = (Co-C)/R \qquad (14)$$

หรือ

$$C = Co - Rt \quad \text{เมื่อ } C \geq Cc \text{ และ } t \leq tc \qquad (15)$$

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

$$t = \left[(Cc-C^{+})/R\right] \ln\left[(Cc-C^{+})/(C-C^{+})\right] \qquad (16)$$

หรือ

$$C = C^{+} + (Cc - C^{+}) \exp\left[-\beta(t-t_c)\right] \qquad (17)$$

เมื่อ $C \leq Cc$ และ $t \geq t_c$

$$\beta = R / \left[Cc - C^{+}\right] \qquad (18)$$

β = ความชันของเส้นที่แทนด้วยช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

R = สัมประสิทธิ์อัตราการอบแห้งแสดงในหน่วยของน้ำหนักน้ำที่ระเหยต่อน้ำหนักวัสดุต่อเวลา

Co = ความชื้นเริ่มต้น (kg water / kg dry solid)

Cc = ความชื้นวิกฤต (kg water / kg dry solid)

C^{+} = ความชื้นสมดุล (kg water / kg dry solid)

t = เวลา (วินาที)

เวลาที่ใช้ประมาณปริมาณความชื้นของผลผลิตในเครื่องอบแห้งแบบกะ ใช้สมการที่14 และ16

การคำนวณค่า R , Cc , และ C^{+} สามารถคำนวณได้จากสมการ Emperical ของ Vanecek et al.(1966) [11]

$$(RW / p_g \overset{\circ}{Q}) = k_1 (u^2 / gd)^{0.6} (d / h)^{0.2} \exp(-4000 / T) \quad (19)$$

$$Cc = k_2 (p_g \overset{\circ}{Q})^{-0.03} W^{0.12} d^{-0.18} Co^{0.35} \exp(-T / 1000) \quad (20)$$

$$\left[1 - \frac{C^{+}}{Co} \right] = k_3 (p_g \overset{\circ}{Q})^{0.04} d^{-0.33} Co^{0.260} \exp(1500 / T) \quad (21)$$

k_1 , k_2 ,k_3 = ค่าคงที่ของเปลือกไม้มีค่าเท่ากับ 4,800 , 0.55 และ 1.35 โดยใช้สมการของ Vanecek et al.(1966) [11]

2.4.1.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้งสำหรับกระบวนการแบบต่อเนื่อง

กระบวนการอบแห้งแบบนี้แตกต่างจากแบบกะ คือ ความต่อเนื่องของการอบแห้ง ในกระบวนการแบบกะ เบดที่เข้ามาจะเป็นเนื้อเดียวกันในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นจะมีการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้อย จลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบกะ สามารถประมาณเวลาที่ต้องการในการลดลงของความชื้นของของแข็งได้ในขณะที่การอบแห้งแบบต่อเนื่อง(Continuous Fluidized Bed) อนุภาคที่ออกมาจะมีการกระจายของเวลาที่อยู่ในเครื่อง (Residence Time) ไม่เท่ากัน จำเป็นที่จะต้องพิจารณาเวลาที่อยู่ในเครื่องไปพร้อมๆกันกับจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

วิธีฟลูอิไดซ์เบดจำนวนการสัมผัสกันจะมากแต่เวลาในการสัมผัสกันและพื้นที่ที่ใช้ในการสัมผัสกันจะน้อย ทำให้การศึกษาเรื่องของการถ่ายโอนมวลและความร้อนระหว่างอนุภาคจากการสัมผัสกันจะน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาเรื่องอนุภาคสัมผัสกับของไหลที่เป็นตัวกลาง ดังนั้นจะสมมุติให้แก๊สฟลูอิไดซ์ในแบบต่อเนื่องมีพื้นที่ที่มีขอบเขตไม่จำกัด

ความชื้นเฉลี่ยในผลผลิตจากการอบแห้งของแข็งแบบต่อเนื่องกับการกระจายของเวลาที่อยู่ในเครื่องของอนุภาคสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\bar{C}}{Co} = \int_0^{\infty} (C/Co)_b\, E(\theta)\,d\theta \qquad (22)$$

$(C/Co)_b$ คือ ปริมาณความชื้นในผลผลิตที่เกี่ยวข้องกับปริมาณความชื้นเริ่มต้นในกระบวนการแบบกะ

$E(\theta)$ คือ ฟังก์ชันของการกระจายของเวลาที่อยู่ในเครื่องของของแข็งซึ่งเหมาะสมกับลักษณะการผสมกันภายในเบด

สมมุติว่าเป็นการผสมอุดมคติสำหรับของแข็ง

$$E(\theta) = \exp(-\theta)$$

$$\theta = t / t_C$$

t_C = เวลาวิกฤต (วินาที)

นำไปแทนในสมการที่ 15,17 และ21 จะได้ความชื้นเฉลี่ยของในผลผลิต

$$\frac{\bar{C}}{Co} = 1 - \frac{R\bar{t}}{Co} + \exp(-\theta_c)\cdot\left[\frac{R\bar{t}\,\theta_c}{Co} + \frac{R\bar{t}}{Co} - \frac{(1-C)}{Co} + \frac{(Cc-C^{+})}{Co}\,(1/(\beta\bar{t}+1))\right] \qquad (23)$$

สมมุติว่าปริมาณความชื้นและอัตราการอบแห้งที่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่สุดท้ายจะเหมือนกันทุกประการกับที่เริ่มต้นของช่วงอัตราการอบแห้งลดลงสมการที่ 23 เหลือเป็น

$$\frac{\bar{C}}{Co} = 1 + \frac{R\bar{t}}{Co}\left[\frac{\beta\bar{t}\exp(-\theta_c) - 1}{\beta\bar{t}+1}\right] \qquad (24)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ.1997 Soponronnarit S. และคณะ [8] ศึกษาเรื่องการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด พบว่าการถ่ายโอนความชื้นในเนื้อข้าวโพดถูกควบคุมด้วยการแพร่ภายใน ดังสภาวะในการทดลองต่อไปนี้ อุณหภูมิของอากาศขาเข้าประมาณ 120-200 °C , ความเร็วลม 2.2-4m/s ความสูงเบด 4-12 cm อัตราส่วนอากาศไหลป้อนกลับ 0.5-0.9 ความชื้นเริ่มต้น 43% ซึ่งสมการของ Wang และ Singh สามารถใช้อธิบายผลการทดลองนี้ได้โดยพบว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าและความเร็วลมเป็นตัวแปรสำคัญต่อการอบแห้ง

ในปี ค.ศ.1999 Swasdisevi T. และคณะ [9] ศึกษาเรื่องการอบแห้งหัวหอมโดยใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้ง จากนั้นนำไปพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายการอบแห้งในฟลูอิไดซ์เบด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 32 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 62 % ความเร็วต่ำสุดประมาณ 1.36, 1.2, 0.95และ 0.62 m/s ความชื้นเริ่มต้น 95, 71, 56และ50% โดยน้ำหนักเปียก ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งก็คือ อุณหภูมิของอากาศอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศ

ในปี พ.ศ. 2536 อรอนงค์ ศรีพวาทกุล[4] ศึกษาเรื่องการอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง โดยพิจารณาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการผลิต ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพของข้าวเปลือก และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการอบแห้ง การใช้พลังงาน จากการทดลองที่อุณหภูมิ 115 °C เป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ข้าวเปลือกยังคงมีสภาพดีอยู่และความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 30% โดยน้ำหนักแห้งพบว่า อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกขึ้นอยู่กับ อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ และอุณหภูมิของอากาศ ที่อัตราการไหลจำเพาะต่ำจะสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ ที่อัตราการไหลเวียนกลับและความสูงของชั้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานต่ำ ไม่ควรอบแห้งข้าวเปลือกให้มีความชื้นต่ำกว่า 22 % โดยน้ำหนักแห้งเนื่องจากจะทำให้ข้าวหลังการสีมีคุณภาพต่ำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Soponronnarit และคณะ[8]สามารถทำนายอัตราการอบแห้งและพลังงานได้ดีพอสมควร

ในปี ค.ศ.1990 M.Abid และคณะ[6] ศึกษาเรื่องกลไกการถ่ายโอนมวลและความร้อนระหว่างการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดในเครื่องฟลูอิไดเซชัน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าข้อจำกัดของกลไกการถ่ายโอนมวลและความร้อนขึ้นอยู่กับธรรมชาติภายในของเมล็ดพืชส่วนสภาวะภายนอก เช่น ความชื้น และความเร็วของแก๊สมีผลต่ออัตราการอบแห้งน้อยมาก ซึ่งจากผลการทดลองจะพบแต่ช่วงอัตาการอบแห้งลดลงไม่พบอัตราการอบแห้งคงที่ และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Luikov [13] พบว่าให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองยกเว้นที่อุณหภูมิ 110 °C

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์กลไกของการถ่ายโอนมวลและความร้อนจะใช้แบบจำลองของ Luikov[13] ซึ่งใช้พื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์อธิบาย โดยที่แบบจำลองนี้จะกล่าวถึงการถ่ายโอนของน้ำโดยการแพร่ ภายใต้อิทธิพลของเกรเดียนท์ความเข้มข้นของความชื้นและโดยการแพร่ของอุณหภูมิ ภายใต้อิทธิพลของอุณหภูมิภายในที่แตกต่างกัน

ในปี ค.ศ.1979 J.H.B.J. HOEBINK and K.RIETEMA[7] ศึกษาเรื่อง การอบแห้งเม็ดของแข็งในฟลูอิไดซ์เบด โดยใช้พื้นฐานของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและมวลมาอธิบาย โดยในงานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลองเพื่อใช้อธิบายการถ่ายโอนมวลมาอธิบายการถ่ายโอนมวลจากของแข็งไปสู่ฟองอากาศซึ่งในกรณีนี้จะไม่มีข้อจำกัดของการแพร่ภายในของแข็งมาเกี่ยวข้อง การถ่ายโอนมวลมี 2 แบบคือ การถ่ายโอนมวลจากวัฏภาคที่หนาแน่น (Dense phase) ไปยังขอบเขตของกลุ่มหมอก (Cloud boundary) และการถ่ายโอนมวลจากของแข็งผ่านไปยังกลุ่มหมอก ระหว่างที่เกิดฟองอากาศลอยตัว ซึ่งเหมือนกับแบบจำลองของการถ่ายโอนความร้อนระหว่างเบดกับฟองอากาศที่ลอยตัว

ในปี ค.ศ. 1990 A. N. Chandran. และคณะ[10] ศึกษาเรื่องการอบแห้งวัสดุแข็งในฟลูอิไดซ์เบด โดยมีการนำแบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Model Kinetic) มาพัฒนาสำหรับการอบแห้งวัสดุแข็งในฟลูอิไดซ์เบด โดยจะสมมุติว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ตามด้วยช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ข้อมูลการทดลองได้มาจากการทดลองในฟลูอิไดซ์เบดแบบกะ (Batch) แบบต่อเนื่อง (Continuous) และแบบเกลียวต่อเนื่อง (Spiral Continuous) ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์ที่ได้สมมุติไว้ และเวลาที่อยู่ในเครื่องของแข็งก็เหมาะสมกับวิธีการอบแห้ง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งวัสดุแข็งในเครื่องฟลูอิไดซ์เบด ซึ่งอยู่บนพื้นฐานการรวมกันของจลนพลศาสตร์การอบแห้งและเวลาที่อยู่ในเครื่องที่เหมาะสมสำหรับการผสมกันของของแข็งในเบดเพื่อทำนายความชื้นเฉลี่ยของผลผลิต

แบบจำลองของการอบแห้งจะประกอบด้วยช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ตามด้วยช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ข้อมูลการทดลองได้มาจากการทดลองแบบกะ แบบต่อเนื่อง และแบบเกลียวซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจได้ผลสอดคล้องกับแบบจำลองบนพื้นฐานของสมมุติฐานที่ได้สมมุติไว้แต่แรก ตัวแปรที่สำคัญของแบบจำลองนี้คือ สัมประสิทธิ์การอบแห้งระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นวิกฤตและความชื้นสมดุล ซึ่งตัวแปรที่มีผลกระทบคือการเลือกอุณหภูมิ อัตราการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง ความสูงของเบด อัตราการไหลของของแข็งในกระบวนการแบบต่อเนื่อง

การอบแห้งแบบหมุนเป็นเกลียวต่อเนื่อง (Spiral Fluidized Bed) ที่ถูกพัฒนามาใช้ศึกษานี้จะได้ผลสอดคล้องกับแบบกะ ที่ Peclet Number สูงๆและจะสอดคล้องกับแบบต่อเนื่องที่

Peclet Number ต่ำๆ Axial Mixing ในแบบเกลียว จะถูกควบคุมโดยการเลือกอัตราการไหลของตัวกลางและความกว้างของท่อ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดำเนินการทดลอง

3.1 รูปแบบการศึกษา

เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบกะ และ แบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ ความเร็วลม และความสูงของเบด(เฉพาะแบบกะ) ที่เวลาต่างๆ และตัวอย่างที่ได้จากการอบแห้งจะนำมาหาความชื้น และเป็นข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจะนำไปทำนายการอบแห้งอย่างเหมาะสมต่อไป

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

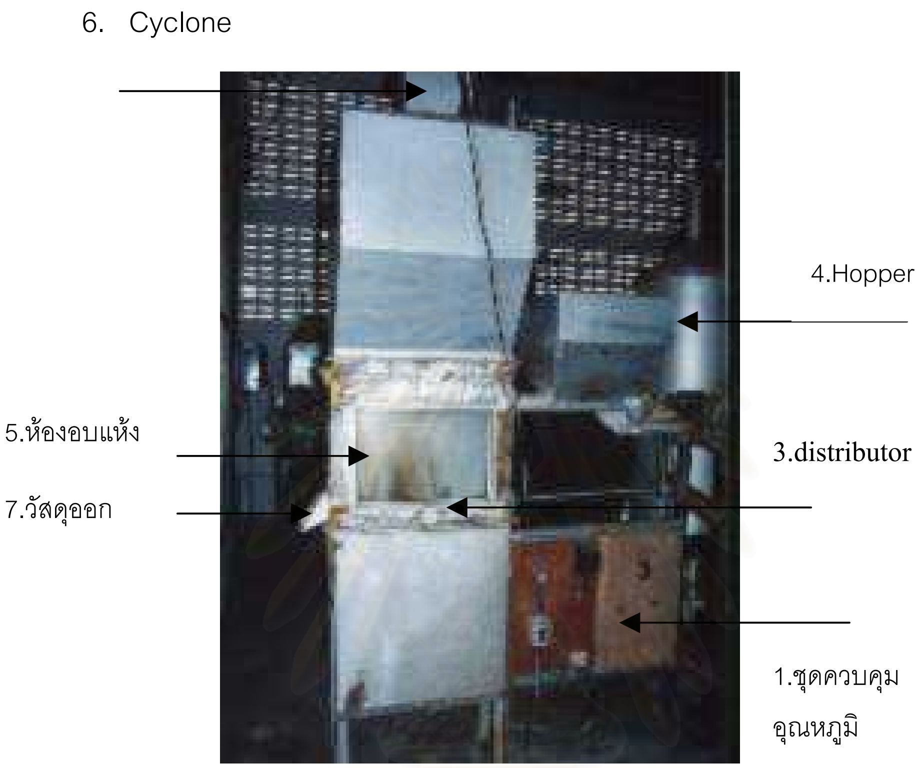
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยในการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดมีส่วนประกอบดังรูปที่ 3.1 คือ

1. เครื่องอบแห้ง มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 12 เซนติเมตร ยาว 16 เซนติเมตร ความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 55 เซนติเมตร ด้านล่างของคอลัมน์ใส่แผ่นกระจาย (Distributor) เพื่อกระจายลมให้สม่ำเสมอทั่วทั้งคอลัมน์ แสดงดังรูปที่ 3.2
2. เครื่องป้อน (Feeder) เป็นเครื่องที่ให้วัสดุไหลเข้าเครื่องโดยมีเกลียวลำเลียง
3. พัดลมเป่าอากาศ (Blower) ดังรูปที่ 3.3
4. เครื่องให้ความร้อน เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนในการอบแห้งโดยใช้เตาแก๊สเผาเหล็กให้ร้อนสามารถให้อุณหภูมิได้สูงสุด 130 ^{o}C
5. อุปกรณ์ไซโคลน (Cyclone) เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับดักของแข็งขนาดเล็กที่ลอยออกมาเหนือคอลัมน์ ดังรูปที่ 3.4
6. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ประกอบด้วย Thermocouple วัดอุณหภูมิอากาศร้อนภายในเบด และมีตัวควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ดังรูปที่ 3.5
7. เครื่องวัดความเร็วลม

3.2.2 เครื่องมือทดลองหาความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

1.1 เครื่องชั่งละเอียด 0.1 mg Sartorius รุ่น 1702 MP8 หมายเลข 35090125

1.2 ตู้อบ (Oven) ของ WT binder ช่วงอุณหภูมิ 0 – 250 ^{o}C

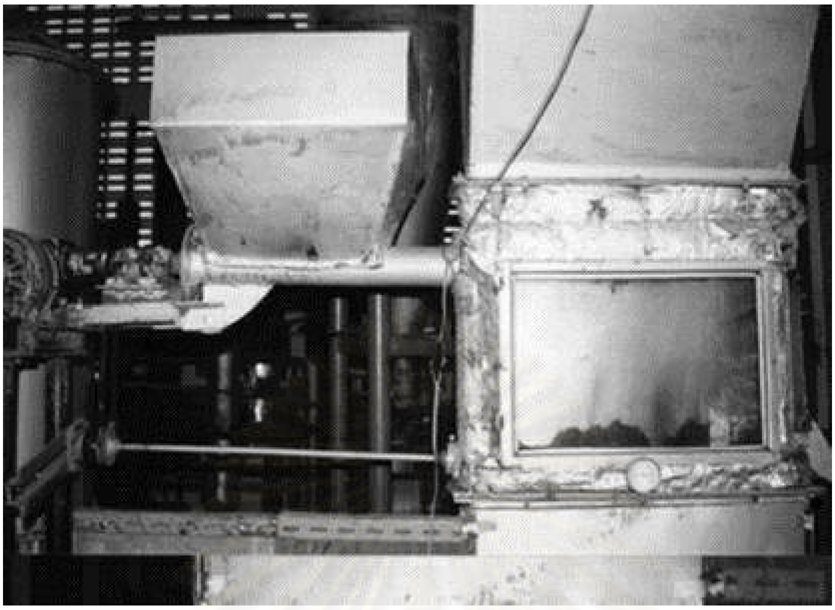


รูปแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการอบแห้ง

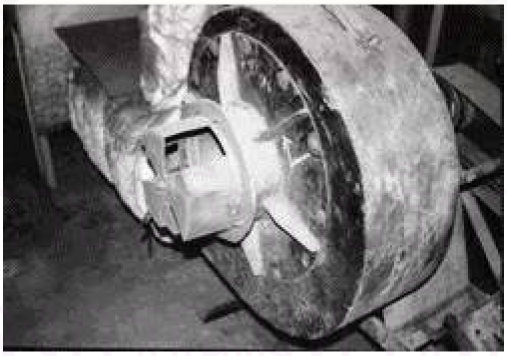
1. ชุดควบคุมอุณหภูมิ
2. heater
3. distributor
4. hopper
5. ห้องอบแห้ง
6. cyclone
7. วัสดุออก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในฟลูอิไดซ์เบด



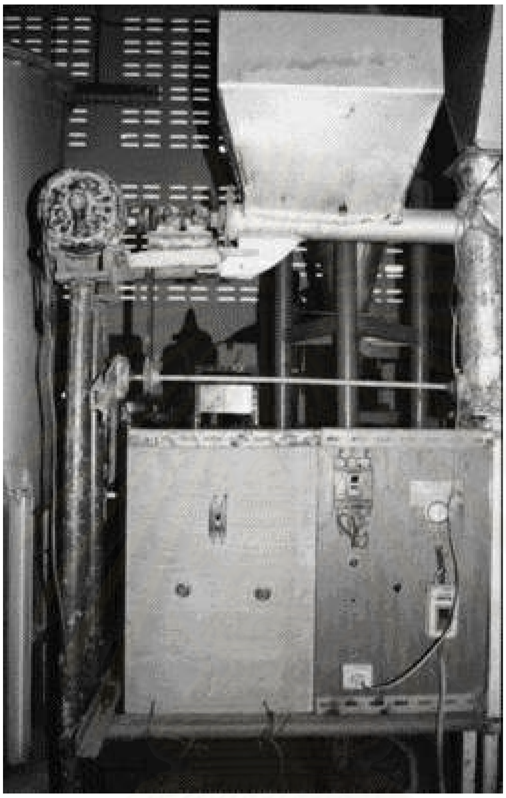
รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด



รูปที่ 3.3 พัดลมเป่าอากาศ

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ Cyclone

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 เครื่องป้อนและอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การทดลองการอบแห้งเปลือกไม้ โดยทำการทดลองการอบแห้งเปลือกไม้ในฟลูอิไดซ์เบดแบบกะ

1. เปิดเครื่องให้ความร้อนและปรับ Temperature Controller ให้ได้อุณหภูมิอากาศร้อน 80 $^{\circ}$C

2. เปิดพัดลมและปรับความเร็วของอากาศให้ได้ 2.32 m/s

3. วัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่อง

4. ป้อนเปลือกไม้เข้าเครื่องอบแห้งให้ได้ความสูงเบด 3.5 เซนติเมตร

5. เก็บตัวอย่างเปลือกไม้ที่ทางออกที่เวลา 1 , 2 , 3 , 5 , 8 และ 10 นาที

6. เปลี่ยนอุณหภูมิอากาศร้อนเป็น 90 $^{\circ}$C และ 100 $^{\circ}$C ตามลำดับ และดำเนินการทดลองซ้ำตั้งแต่ 2-5 ตามลำดับ

7. เปลี่ยนความเร็วลมเป็น 3.25 และ 3.81 m/s ตามลำดับ และดำเนินการทดลองซ้ำตั้งแต่ 1-6 ตามลำดับ

8. เปลี่ยนความสูงของเบดเป็น 6.5 และ 9.5 เซนติเมตร ตามลำดับ และดำเนินการทดลองซ้ำตั้งแต่ 1-7 ตามลำดับ

9. นำเปลือกไม้ที่ผ่านการอบแห้งไปทดสอบหาความชื้นในตู้อบ

3.3.2 การทดลองการอบแห้งเปลือกไม้ โดยทำการทดลองการอบแห้งเปลือกไม้ในฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง

1. เปิดเครื่องให้ความร้อนและปรับ Temperature Controller ให้ได้อุณหภูมิอากาศร้อน 90 $^{\circ}$C

2. เปิดพัดลมและปรับความเร็วของอากาศให้ได้ 2.32 m/s

3. วัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่อง

4. ป้อนเปลือกไม้เข้าเครื่องอบแห้งที่อัตราคงที่ 125 g/min โดยมีความสูงของเบด 10 cm (ตัวแปรนี้ไม่สามารถเปลี่ยนได้ด้วยข้อจำกัดของเครื่องป้อน)

5. เก็บตัวอย่างเปลือกไม้ตรงทางออกที่เวลา 1 , 2 , 3 , 5 , 8 และ 10 นาที

6. เมื่อสิ้นสุดการอบแห้งแต่ละครั้ง ชั่งน้ำหนักเปลือกไม้ที่ค้างภายในเครื่อง (Hold Up)

7. เปลี่ยนอุณหภูมิอากาศร้อนเป็น 100 $^{\circ}$C และ 110 $^{\circ}$C ตามลำดับ และดำเนินการทดลองซ้ำตั้งแต่ 2-6 ตามลำดับ

8. เปลี่ยนความเร็วลมเป็น 2.58 และ 2.85 m/s ตามลำดับ และดำเนินการทดลองซ้ำตั้งแต่ 2-7 ตามลำดับ

9. นำเปลือกไม้ที่ผ่านการอบแห้งไปหาความชื้นในตู้อบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

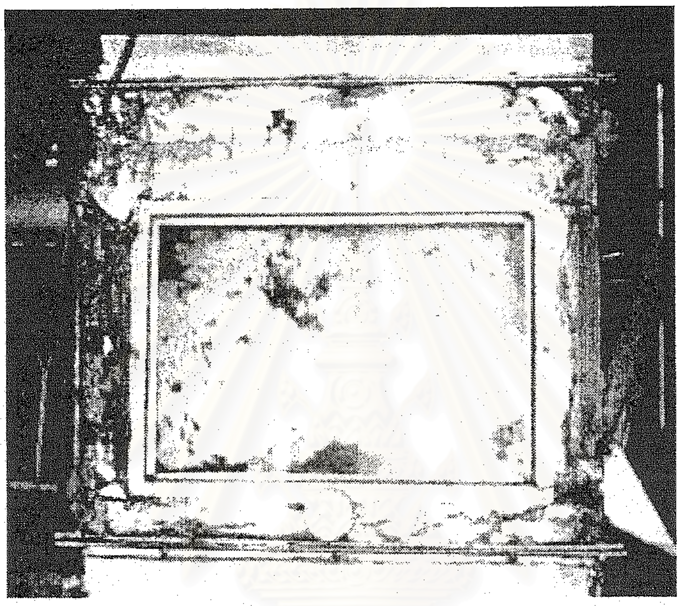
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชัน ซึ่งข้อมูลของการทดลองได้มาจากการทำการทดลองแบบกะ และแบบต่อเนื่อง จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการอบแห้งต่อไป

4.1 ลักษณะการเกิดฟลูอิไดซ์เบดจากการทดลอง

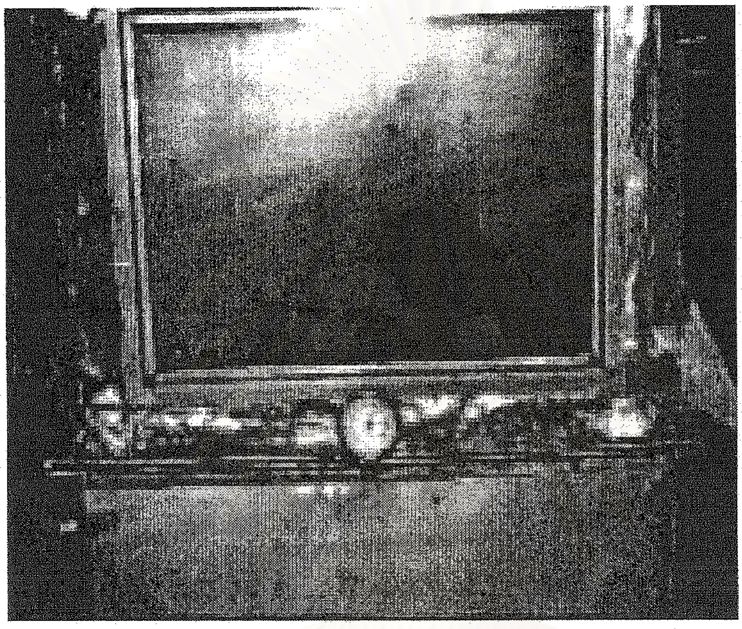
การเกิดฟลูอิไดเซชันได้นั้นต้องอาศัยปัจจัยหลายๆอย่างรวมกัน เช่น แผ่นกระจายลม และความเร็วของของไหล เ ป็นต้น จากรูปที่ 4.1 แสดงการเกิดฟลูอิไดเซชัน โดยเมื่อปล่อยเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเข้าสู่ส่วนอบแห้งแล้วจะเกิดฟลูอิไดซ์ทำให้เปลือกไม้ลอยตัวขึ้นแยกตัวกันเป็นอิสระซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายของไหล ถ้าเป็นการทดลองแบบกะ เปลือกไม้จะลอยตัวอยู่เหนือแผ่นกระจายลม ไม่ลอยออกนอกส่วนอบแห้ง ส่วนการทดลองแบบต่อเนื่อง เปลือกไม้จะลอยตัวอยู่เหนือส่วนอบแห้งและสามารถไหลออกจากส่วนอบแห้งได้เองโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือช่วย ซึ่งเป็นข้อดีของการอบแห้งโดยใช้เทคนิคนี้ที่ดีกว่าวิธีการอบแห้งแบบอื่น ความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดที่ใช้ทำการอบแห้งแบบต่อเนื่องประมาณ 2.9 m/s ถ้าเพิ่มความเร็วของอากาศมากกว่านี้เปลือกไม้ยังคงไม่ลอยออกจากส่วนอบแห้งเนื่องจากระบบการป้อนเปลือกไม้ไม่สามารถทำงานได้ เพราะปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นจะไปดันปลือกไม้ในเครื่องป้อนทำให้ไม่สามารถป้อนเปลือกไม้ได้

จากการทดลองพบว่าฟลูอิไดซ์เบดมีการเกิดฟองก๊าซ (Bubbling) เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น จะมีก๊าซบางส่วนรวมตัวกันแล้วก่อเป็นถุงอากาศลอยตัวเหนือแผ่นกระจายลม ดังรูปที่ 4.2 เมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้นจำนวนฟองก๊าซมีมากขึ้น เมื่อฟองก๊าซนี้ลอยตัวขึ้นไปถึงผิวหน้าของเบดฟองก๊าซก็จะแตกตัวออก ทำให้ผิวหน้าของเบดมีลักษณะไม่สม่ำเสมอมีการกระเพื่อมขึ้นๆลงๆ ในการอบแห้งเปลือกไม้แบบฟลูอิไดเซชันยังพบอีกว่ามีการเกิด Channelling ซึ่งจะเกิดในช่วงความเร็วลมต่ำๆ ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเกิดจากการกระจายลมที่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของเบด ทำให้ความเร็วลมของอากาศที่เข้าสู่เบดมีส่วนหนึ่งเร็วกว่าส่วนอื่นจึงทำให้เกิดปัญหา Channelling



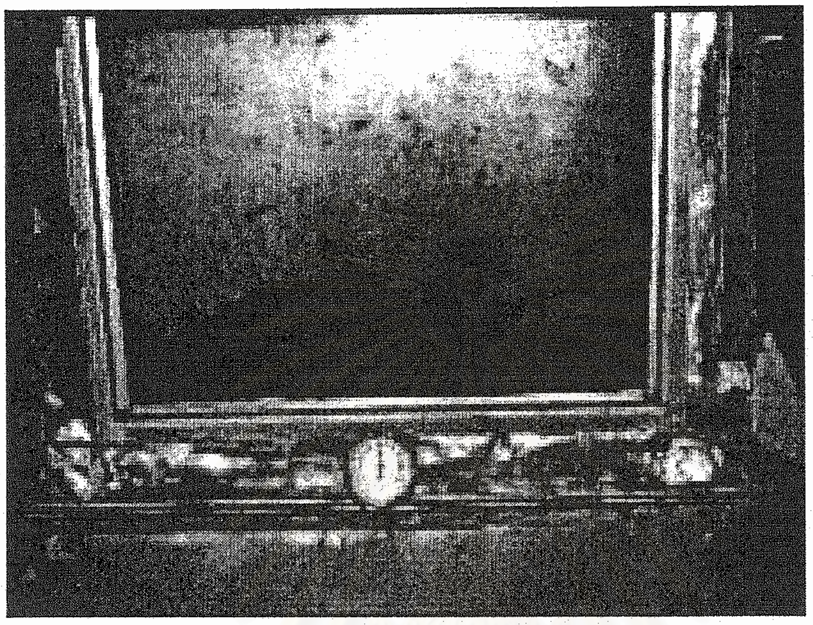
รูปที่ 4.1 ลักษณะการเกิดฟลูอิไดเซชัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 การเกิดฟองแก๊สในฟลูอิไดซ์เบด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

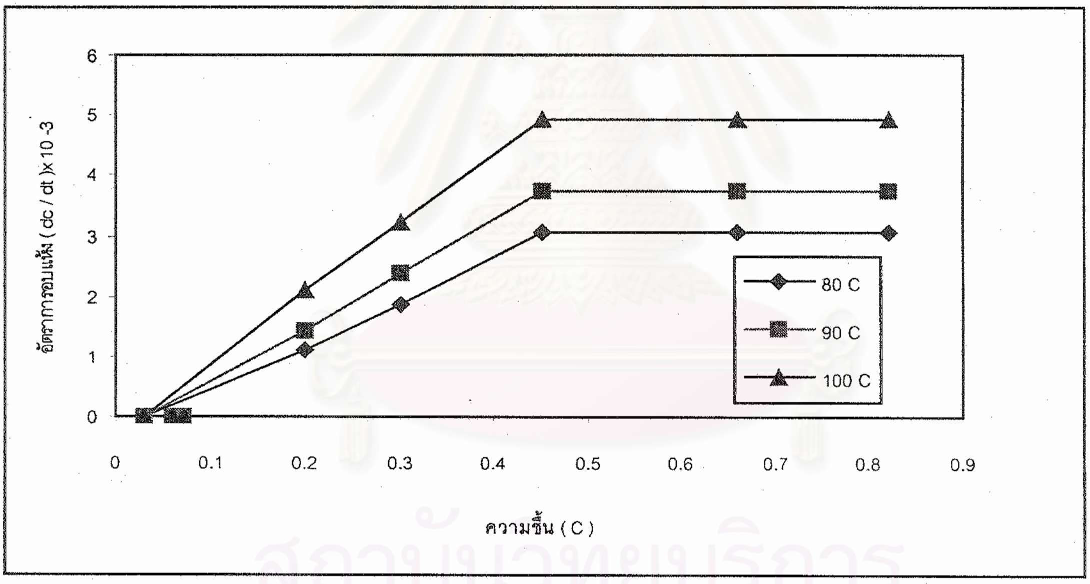


รูปที่ 4.3 การเกิด Channelling ในฟลูอิไดซ์เบด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลการทดลองการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

จาการทดลองการอบแห้งเปลือกไม้ที่อุณหภูมิ 80 – 100 °C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 55 – 60 % โดยน้ำหนักเปียกพบว่ามีกระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นสองขั้นตอน ดังรูปที่ 4.4 คือ ขั้นตอนแรกอัตราการอบแห้งเปลือกไม้จะคงที่ และเมื่ออบต่อไปจนถึงความชื้นค่าหนึ่ง จะพบว่าอัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลงเรียกความชื้นที่จุดนี้ว่าความชื้นวิกฤต ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ผิวของวัสดุจะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก การถ่ายโอนความร้อนและมวลเกิดขึ้นที่ผิว อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ และเมื่ออบแห้งต่อไปที่อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศคงที่ เมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมากแล้ว อิทธิพลของอากาศภายนอกจะลดลงและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งลดลง



รูปที่ 4.4 ผลการทดลองของการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในฟลูอิไดซ์เบดแบบกะ ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 3.5 cm

จากกราฟในรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าที่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอัตราการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลภายนอกมีผลต่อการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

4.3 ผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งแบบกะ

4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้ง

จากรูปที่ 4.5 – 4.13 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นไร้หน่วย C / Co ที่ช่วงอุณหภูมิ 80 – 100 $^{\circ}$C จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นไร้หน่วยจะลดลงจาก 1.0 เหลือ 0.13, 0.1 และ 0.04 ตามลำดับที่เวลา 5 นาที ส่วนในรูปที่ 4.6 – 4.13 จะได้ผลเหมือนกันคือมีค่าความชื้นใกล้เคียงกันที่เวลา 5 นาที เมื่อความเร็วลมสูงขึ้นความชื้นจะลดลงอยู่ในช่วง 0.18 – 0.02 โดยปรากฏว่ามีความแตกต่างของความชื้นในช่วงต้นของการทดลอง เนื่องจากในช่วงแรกนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะไปเพิ่มพลังงานจลน์ของน้ำภายในเนื้อวัสดุและจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิววัสดุและกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนและมวลดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงสูงขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปประยะหนึ่งแล้วจะเห็นว่าความแตกต่างของความชื้นจะลดลงเนื่องจากที่ช่วงเวลานี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อิทธิพลของอากาศภายนอกจะมีผลน้อยลงเนื่องจากปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเหลือน้อยลง ดังนั้นความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของความชื้นระหว่างภายในเนื้อวัสดุกับอากาศลดลง จึงทำให้การแพร่ของความชื้นจากภายในเนื้อวัสดุออกสู่อากาศลดลง ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองได้ผลเหมือนกันทุกภาพ

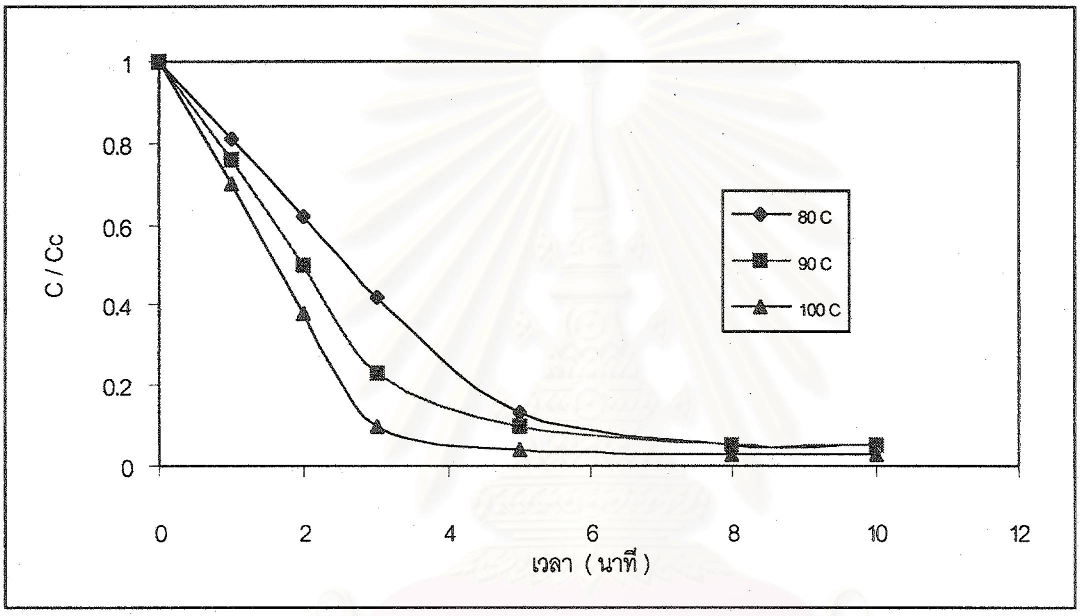
4.3.2 อิทธิพลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้ง

จากรูปที่ 4.14 – 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นไร้หน่วย C / Co ที่ช่วงความเร็วลม 2.32 – 3.81 m/s จากรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วลม ความความชื้นจะลดลงจากค่า C / Co 1.0 เหลือความชื้น 0.18, 0.13 และ 0.11 ตามลำดับที่เวลา 5 นาที เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C จะมีเหลือความชื้น 0.19, 0.1 และ 0.08 ตามลำดับ ความชื้นที่ได้ทุกค่าความเร็วลมจะมีค่าไม่ต่างกันมากคืออยู่ในช่วง 0.19 – 0.01 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของลมที่ไหลผ่านวัสดุ จะทำให้วัสดุมีการเคลื่อนที่ได้มากขึ้น วัสดุสามารถสัมผัสกับอากาศได้มากขึ้น การถ่ายโอนความร้อนและมวลสารดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเพิ่มขึ้น

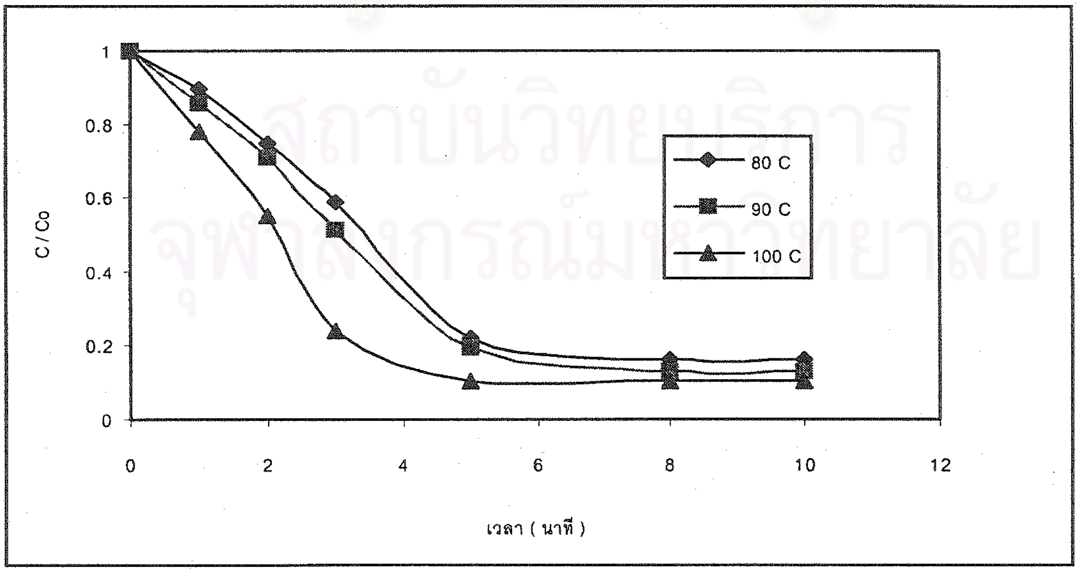
4.3.3 อิทธิพลของความสูงเบดที่มีต่ออัตราการอบแห้ง

จากกราฟรูปที่ 4.16 – 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นไร้หน่วยที่ช่วงความสูงของเบด 3.5 – 9.5 cm จากรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้นความชื้นจะเพิ่มขึ้นจากค่า C / Co 1.0 เหลือความชื้น 0.13, 0.18 และ 0.19 ตาม

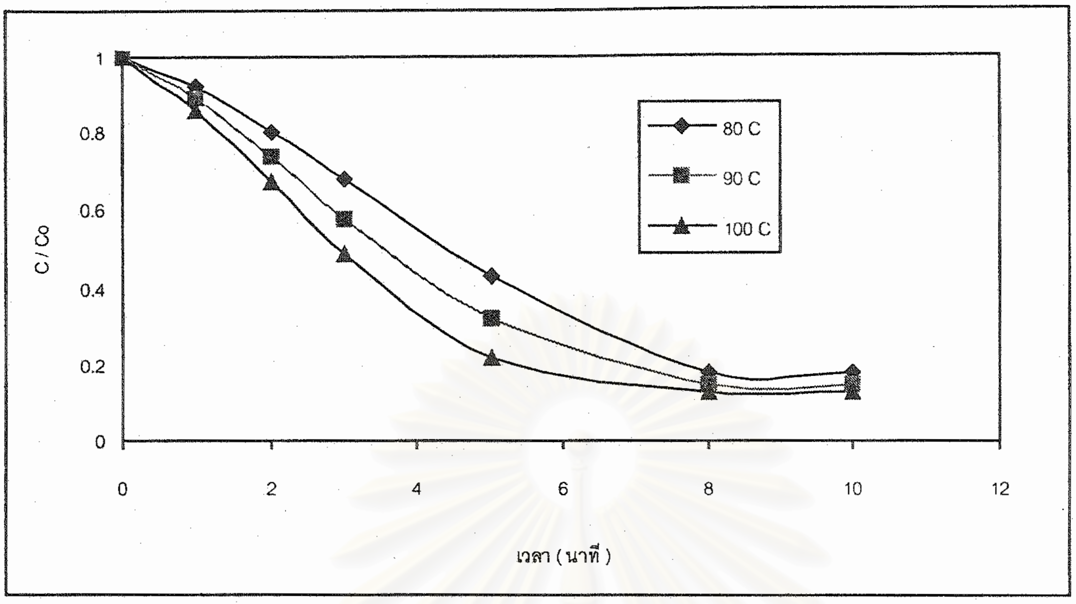
ลำดับที่เวลา 5 นาทีเช่นเดียวกับรูปที่ 4.17 ที่อุณหภูมิ 90 °C ความชื้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.11-0.04 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้นการอบแห้งต้องใช้เวลานานขึ้น เนื่องจากที่ความสูงของชั้นเปลือกไม้มากขึ้น มวลเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำที่ระเหยมากขึ้น ระยะห่างระหว่างอนุภาคจะน้อยลง การสัมผัสกันระหว่างวัสดุกับอากาศก็จะน้อยลงทำให้อากาศมีความชื้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การแพร่ของน้ำในเปลือกไม้ช้าลง และในกรณีที่เปลือกไม้มีชั้นความสูงมากขึ้นโอกาสที่จะเกิดฟองก๊าซขนาดใหญ่มากขึ้นทำให้เปลือกไม้สัมผัสกับอากาศไม่ทั่วถึง ทำให้การถ่ายโอนมวลและความร้อนลดลง



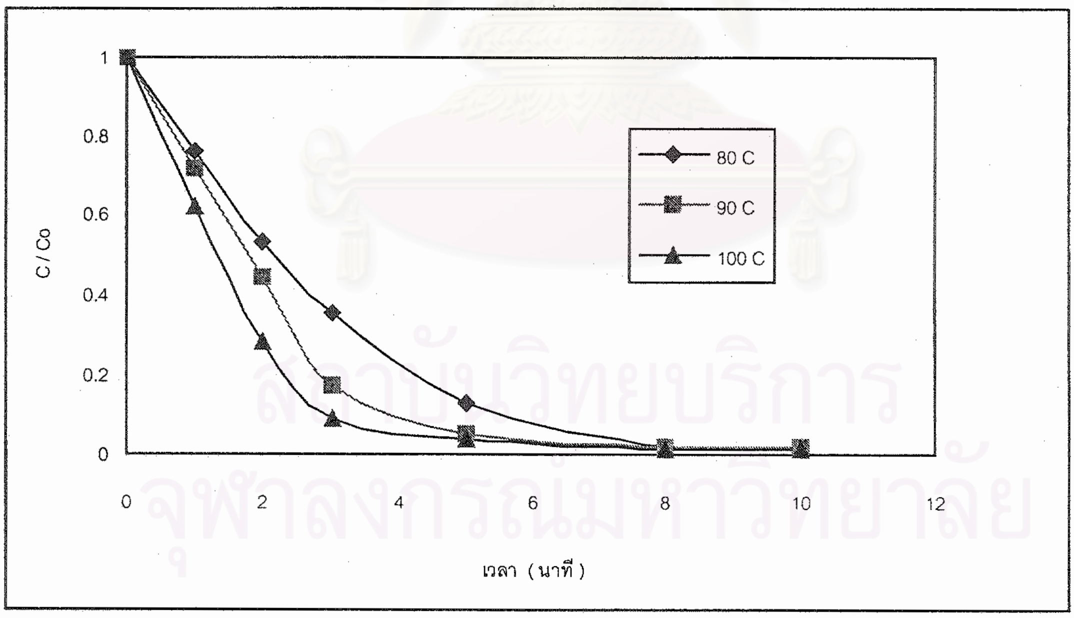
รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 3.5 cm



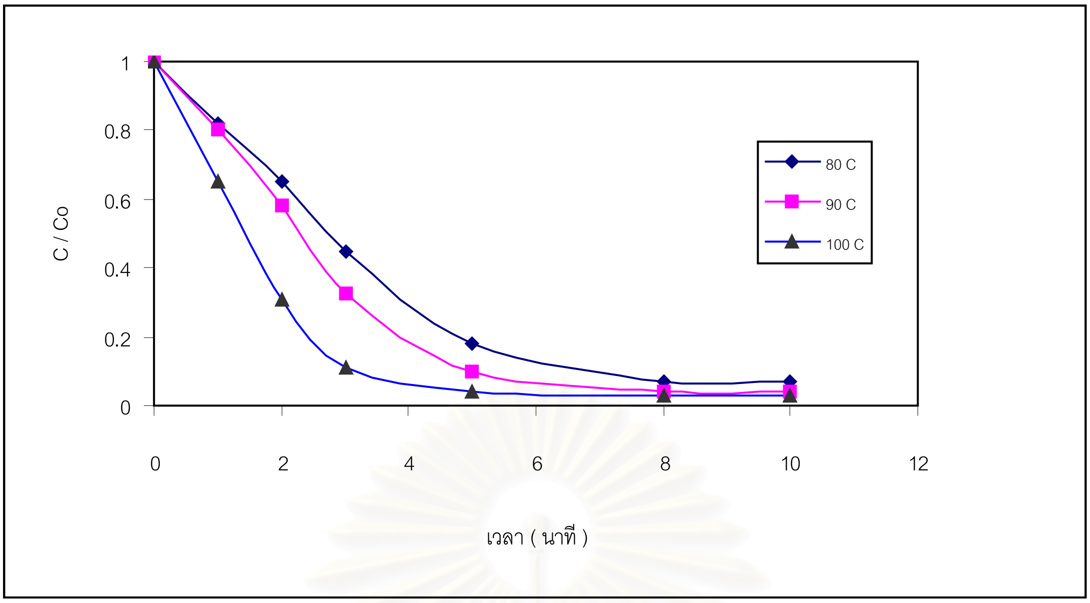
รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 6.5 cm



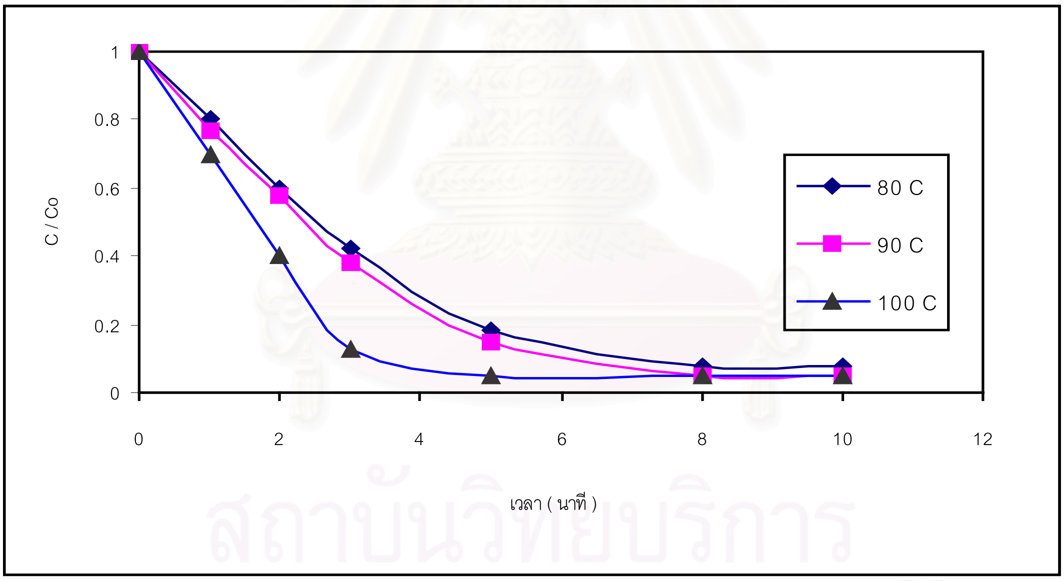
รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 9.5 cm



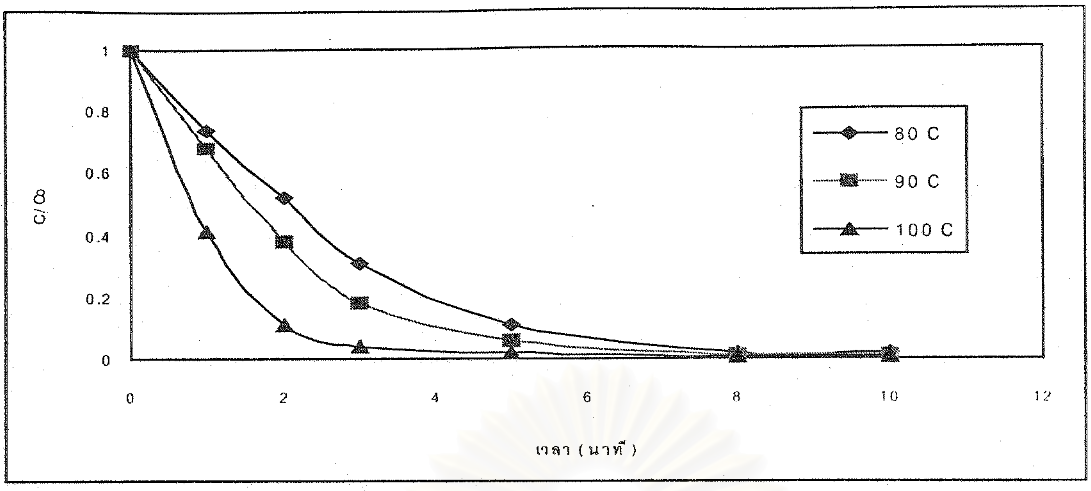
รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.25 m/s ความสูงของเบด 3.5 cm



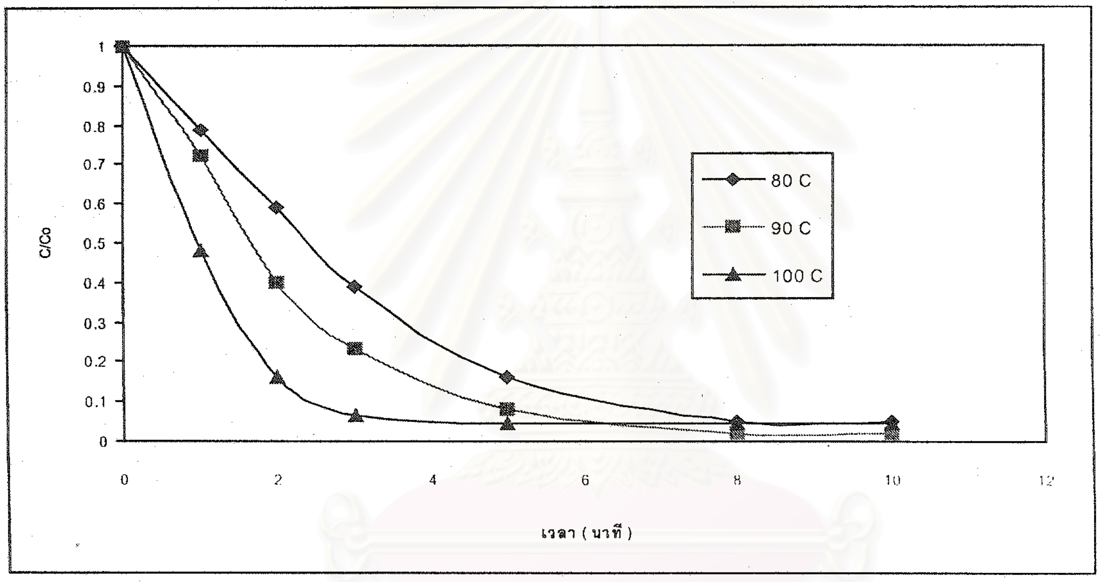
รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.25 m/s ความสูงของเบด 6.5 cm



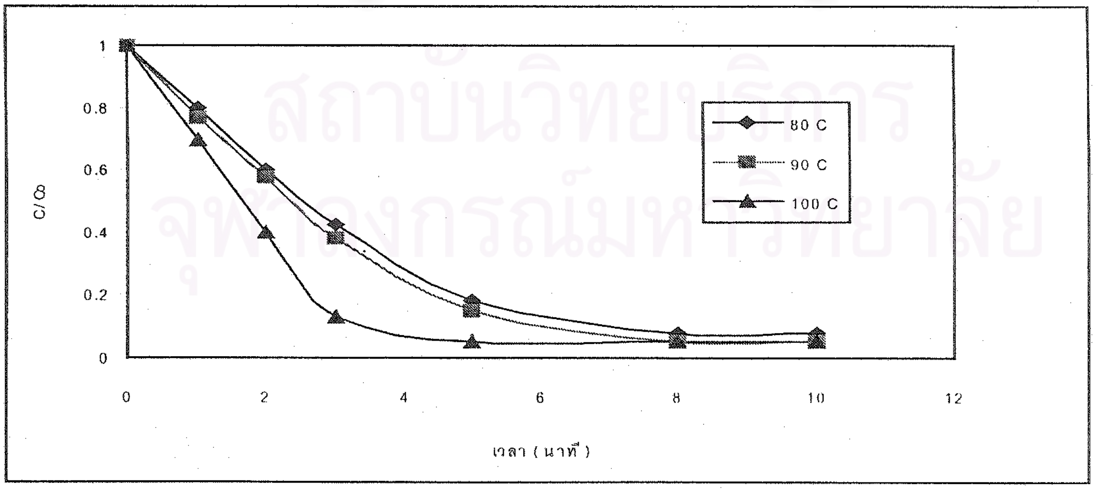
รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.25 m/s ความสูงของเบด 9.5 cm



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.81 m/s ความสูงของเบด 3.5 cm

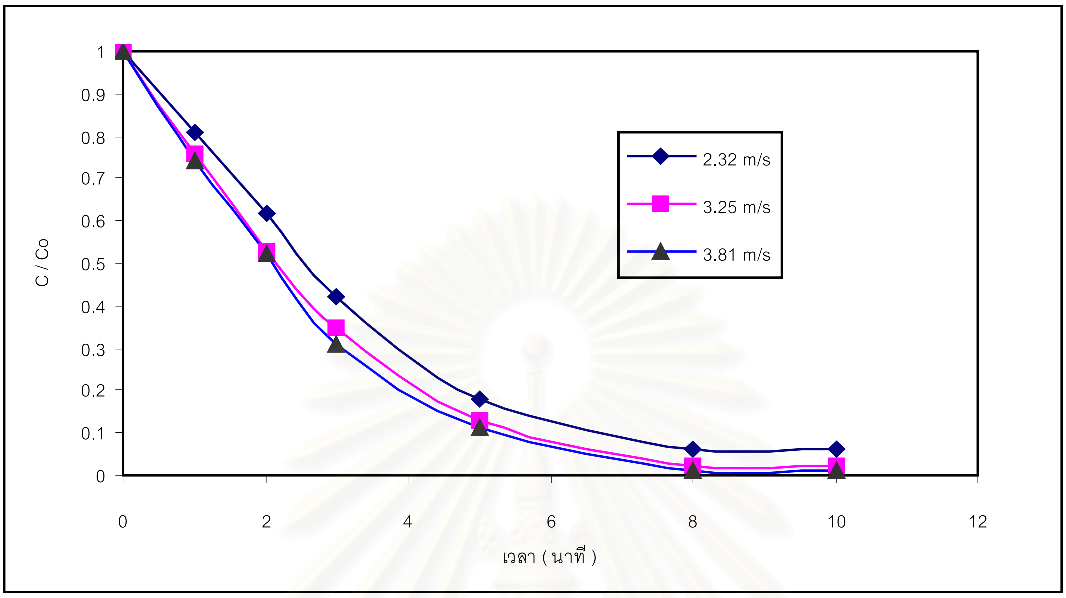


รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.81 m/s ความสูงของเบด 6.5 cm

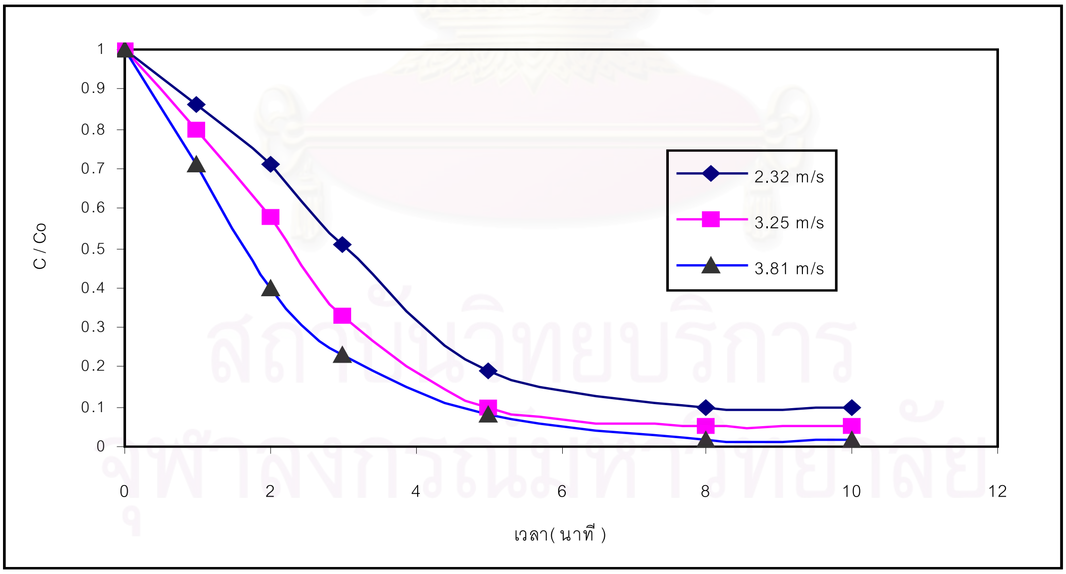


รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.81 m/s ความสูงของเบด 9.5 cm

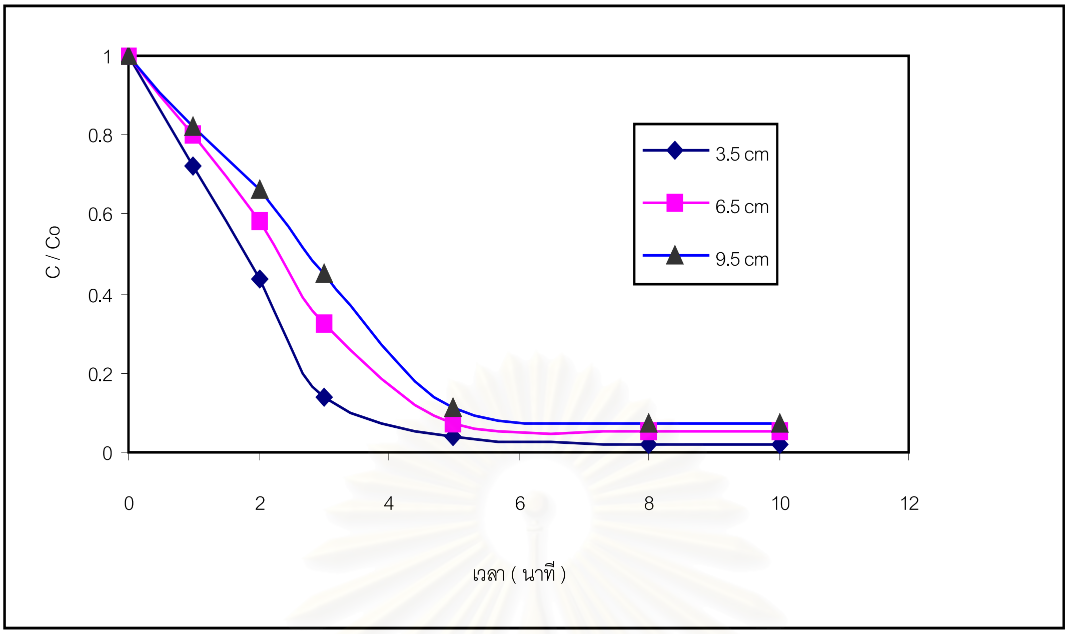
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



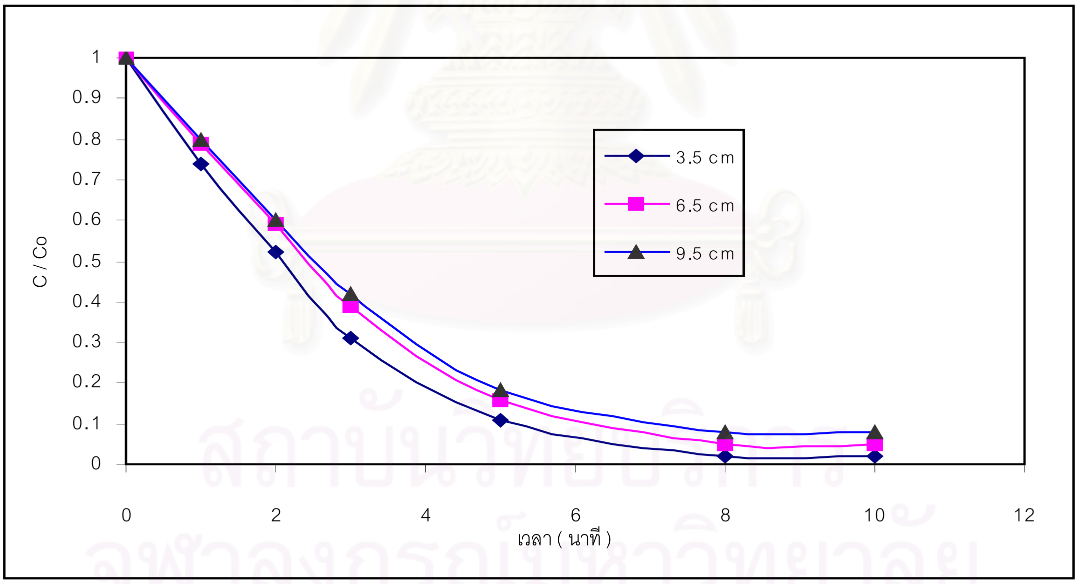
รูปที่ 4.14 ผลของความเร็วลมที่ต่อการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C ความสูงของเบด 3.5 cm



รูปที่ 4.15 ผลของความเร็วลมที่ต่อการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C ความสูงของเบด 6.5 cm



รูปที่ 4.16 ผลของความสูงของเบดที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.81m/s อุณหภูมิ 80 $^{\circ}$C



รูปที่ 4.17 ผลของความสูงของเบดที่มีต่อการอบแห้งที่ความเร็วลม 3.25m/s อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C

4.4 การหาภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมโดยการอบแห้งเปลือกไม้แบบกะ

ในการศึกษาหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมนั้นได้มีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาว่า ให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงและความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้ ความชื้นจริงเริ่มต้นของเปลือกไม้ 55 % โดยน้ำหนักเปียก ความชื้นหลังการอบแห้งเปลือกไม้ต้องต่ำกว่า 10 % โดยน้ำหนักเปียก เนื่องจากเงื่อนไขดังกล่าวเมื่อนำเปลือกไม้ไปเผาแล้วจะสามารถลุกติดไฟได้และทำให้ไม่เกิดควันคำ การพิจารณาภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมมีสมมุติฐานดังนี้คือ หลักอ้างอิงของเวลาในการทดลองแต่ละการทดลองเท่ากับ 10 นาทีความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดได้มาจาก ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำและความร้อนที่ทำให้อากาศร้อนขึ้น โดยไม่คิดผลของการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งภาวะที่ใช้ในการพิจารณามีดังต่อไปนี้คือ

4.4.1 การพิจารณาผลของความชื้นหลังการอบแห้งที่ภาวะทั้งหมดของการทดลอง

เนื่องจากเงื่อนไขของการอบแห้งคือ ความชื้นหลังการอบแห้งต้องน้อยกว่า 10 % โดยน้ำหนักเปียก ซึ่งมีค่าความชื้นที่เวลาใดๆต่อความชื้นเริ่มต้น (C/Co) น้อยกว่า 0.1 ดังนั้นจากตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลของผลการทดลองการอบแห้งแบบกะที่ทุกค่าอุณหภูมิ ความเร็วลมและความสูงของเบดจะพบว่า ภาวะที่ไม่เหมาะสมในการทดลองคือที่ ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 6.5 และ 9.5 cm เนื่องจากภาวะดังกล่าวให้ความชื้นหลังการอบแห้งมากกว่า 10 % โดยน้ำหนักเปียก นอกเหนือจากภาวะดังกล่าวนี้ภาวะอื่นที่ใช้ในการทดลองสามารถใช้ได้ทั้งหมด

4.4.2 ความสัมพันธ์อุณหภูมิที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 4.18 – 4.23 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งก็จะมากขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นมาจากตัวเชื้อเพลิงซึ่งต้องให้พลังงานความร้อนแก่อากาศเพิ่มขึ้น ขณะที่การแพร่ภายในของน้ำถูกจำกัดด้วยการแพร่ของน้ำภายในวัสดุ ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้พลังงานความร้อนน้อยที่สุดคือ 80 $^{\circ}$C

4.4.3 การพิจารณาผลของความเร็วลมที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 4.18 – 4.20 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดกับอุณหภูมิ ที่ช่วงความเร็วลม 2.32 – 3.81 m/s จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วลมสูงขึ้นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งจะสูงกว่าที่ความเร็วลมต่ำๆ เนื่องจากใช้ปริมาณอากาศที่มากกว่าทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนมากขึ้น ในขณะที่การเคลื่อนที่ของน้ำถูกควบคุมด้วยการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ดังนั้นที่ความเร็วลมที่ใช้พลังงานความร้อนน้อยที่สุดคือ 2.32 m/s

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

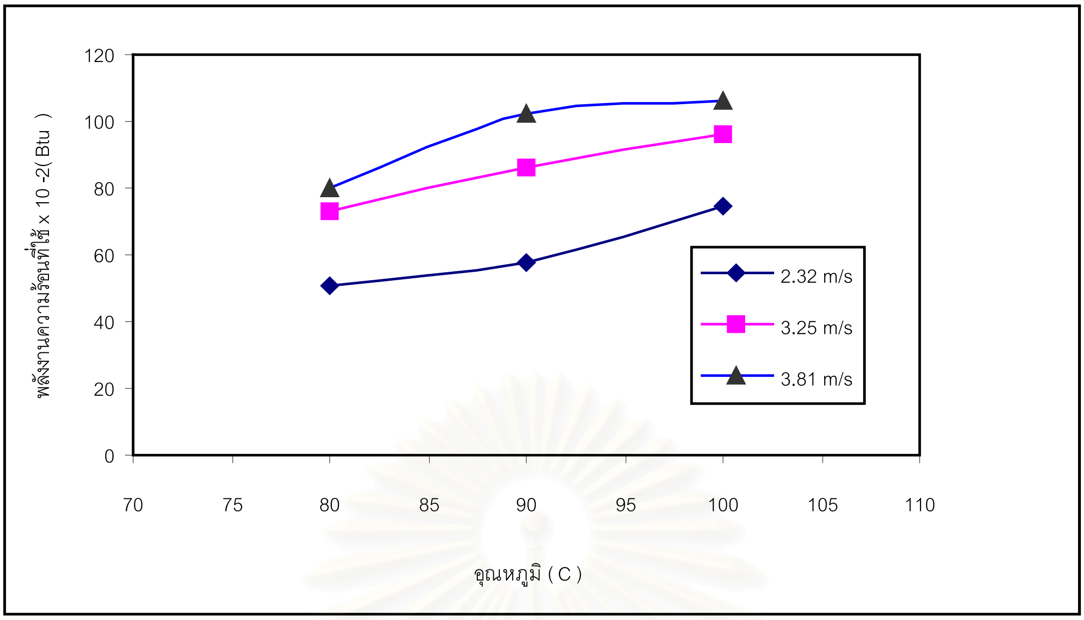
4.4.4 การพิจารณาผลของความสูงเบด

พิจารณารูปที่ 4.21 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด ที่ความเร็วลม 2.32 m/s และที่ช่วงความสูงเบด 3.5 – 9.5 cm พบว่าความร้อนที่ใช้จะมากขึ้นเมื่อความสูงเบดเพิ่มขึ้น เนื่องจากภาวะอากาศภายในห้องอบแห้งมีปริมาณไอน้ำมากขึ้นเพราะวัสดุมีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นการแพร่ของน้ำจากผิววัสดุไปยังอากาศลดลง ส่งผลให้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น ในการอบแห้งที่ความเร็วลมและช่วงความสูงเบดดังกล่าวควรอบแห้งที่ความสูงเบด 3.5 cm และใช้อุณหภูมิอากาศ 80 $^{\circ}$C ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง 5,115 Btu มีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 11.37 % ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งพบว่าแม้ว่าจะใช้ความร้อนในการอบแห้งน้อยกว่าแต่ประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นควรเลือกที่ความสูงเบด 9.5 cm อุณหภูมิ 80 $^{\circ}$C เพราะมีประสิทธิภาพ 23.58 % ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง 6,017.99 Btu ดังรูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพในการอบแห้งหาได้จาก

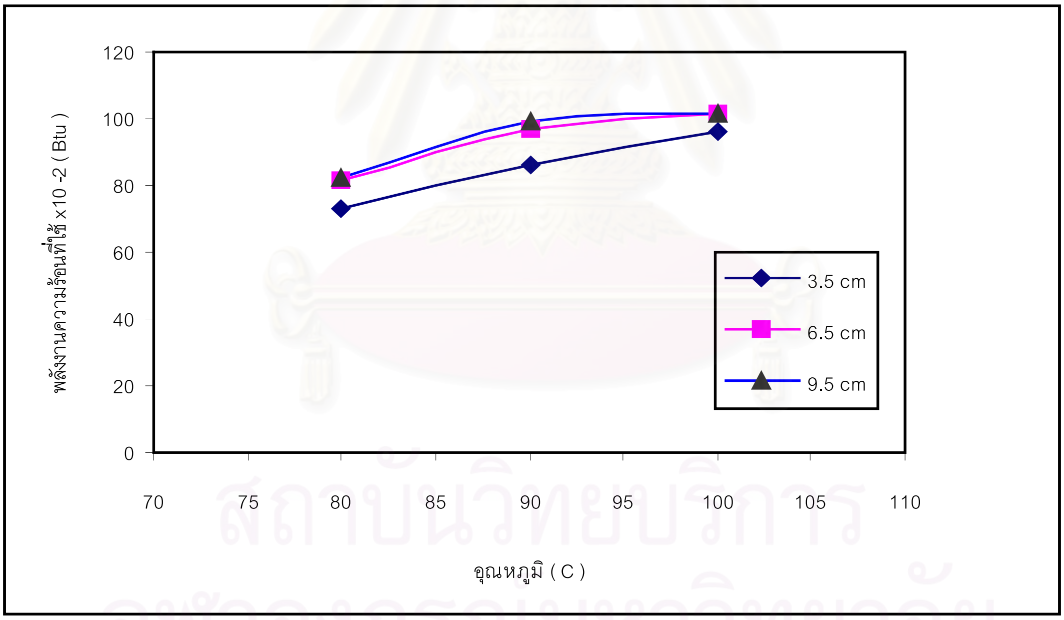
$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ}}{\text{ความร้อนที่ใช้ทั้งหมด}}$$

พิจารณารูปที่ 4.22 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด ที่ความเร็วลม 3.25 m/s และที่ช่วงความสูงเบด 3.5 – 9.5 cm พบว่าความร้อนที่ใช้จะมากขึ้นเมื่อความสูงเบดเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการอบแห้งที่ความเร็วลมและช่วงความสูงเบดดังกล่าวคือควรอบแห้งที่ ความสูงเบด 3.5 cm และใช้อุณหภูมิอากาศ 80 $^{\circ}$C ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 7,296.06 Btu มีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 9.87 % ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งพบว่าแม้ว่าจะใช้ความร้อนในการอบแห้งน้อยกว่าแต่ประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นควรเลือกที่ความสูงเบด 9.5 cm อุณหภูมิ 80 $^{\circ}$C เพราะมีประสิทธิภาพ 18.24 % ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง 8,251.06 Btu ดังรูปที่ 4.24

พิจารณารูปที่ 4.23 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด ที่ความเร็วลม 3.81 m/s และที่ช่วงความสูงเบด 3.5 – 9.5 cm พบว่าความร้อนที่ใช้จะมากขึ้นเมื่อความสูงเบดเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการอบแห้งที่ความเร็วลมและช่วงความสูงเบดดังกล่าวควรอบแห้งที่ ความสูงเบด 3.5 cm และใช้อุณหภูมิอากาศ 80 $^{\circ}$C ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง 8,028.81 Btu มีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 9.85 % ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งพบว่าแม้ว่าจะใช้ความร้อนในการอบแห้งน้อยกว่าแต่ประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นควรเลือกที่ความสูงเบด 9.5 cm อุณหภูมิ 80 $^{\circ}$C เพราะมีประสิทธิภาพ 21.88 % ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง 9,855.85 Btu ดังรูปที่ 4.24

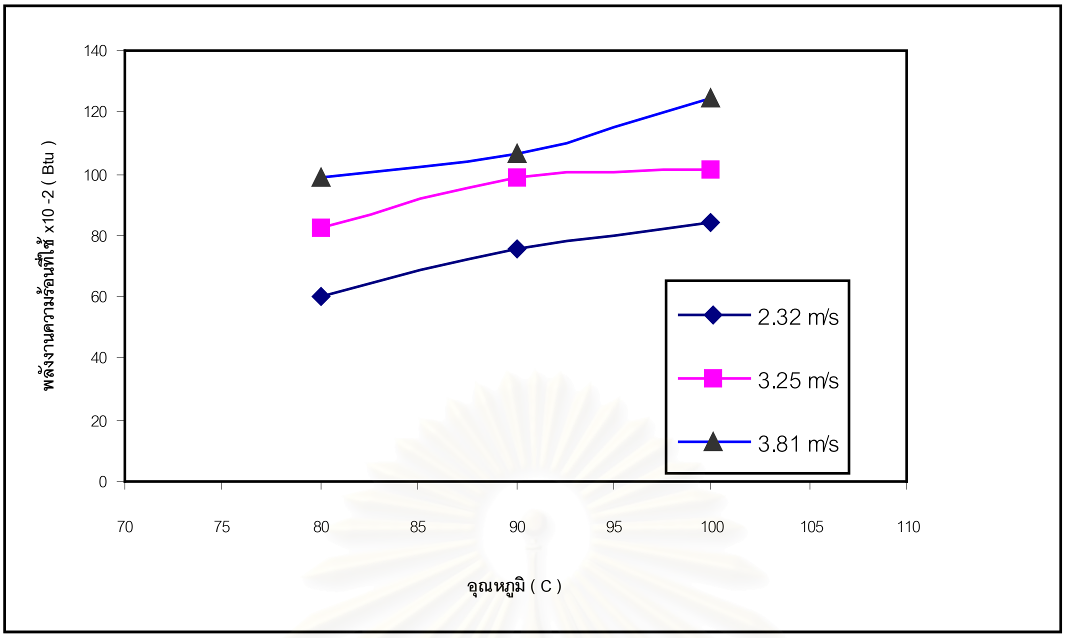


รูปที่ 4.18 ผลของความเร็วลมที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ความสูงเบด 3.5 cm

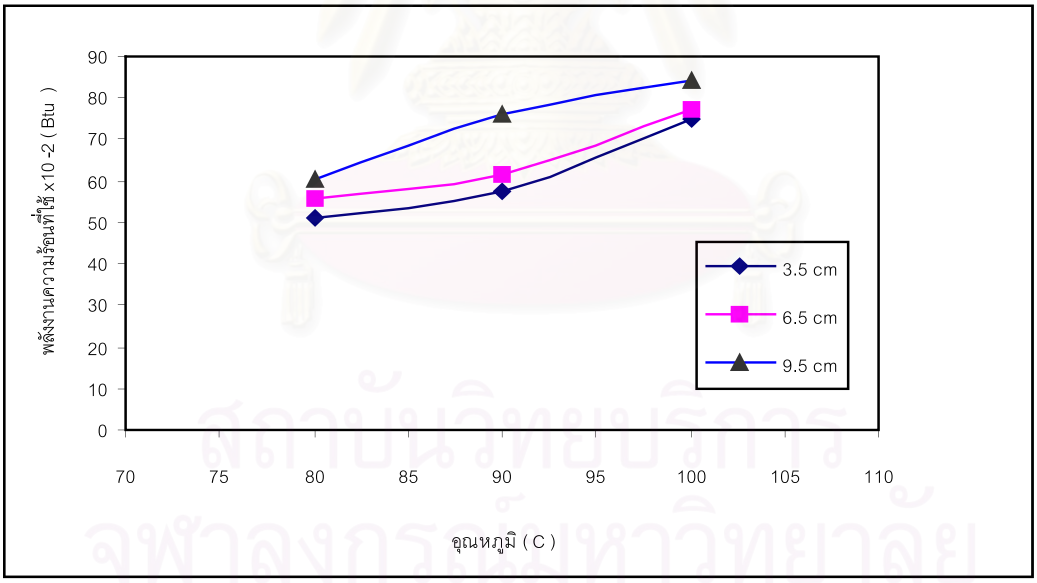


รูปที่ 4.19 ผลของความเร็วลมที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ความสูงเบด 6.5 cm

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

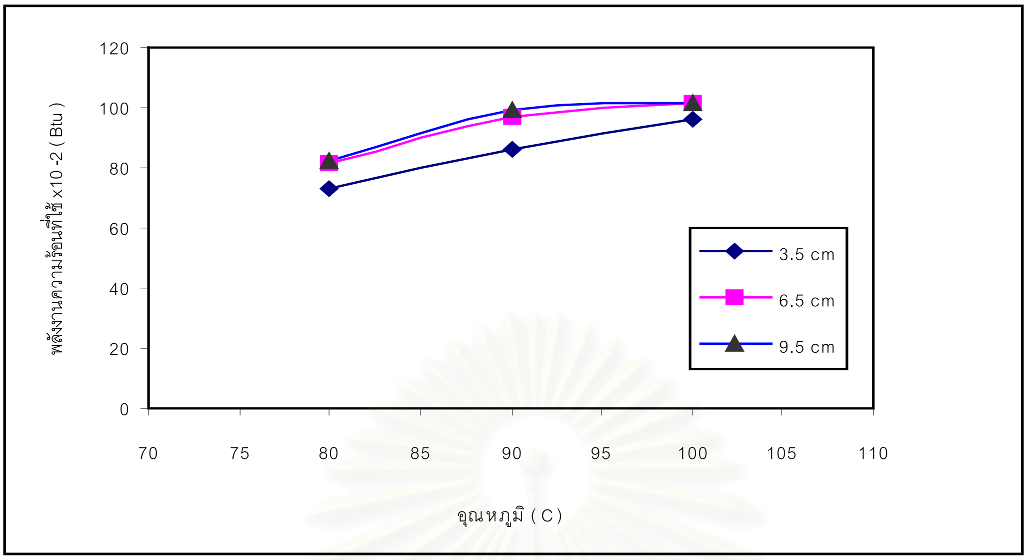


รูปที่ 4.20 ผลของความเร็วลมที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ความสูงเบด 9.5 cm

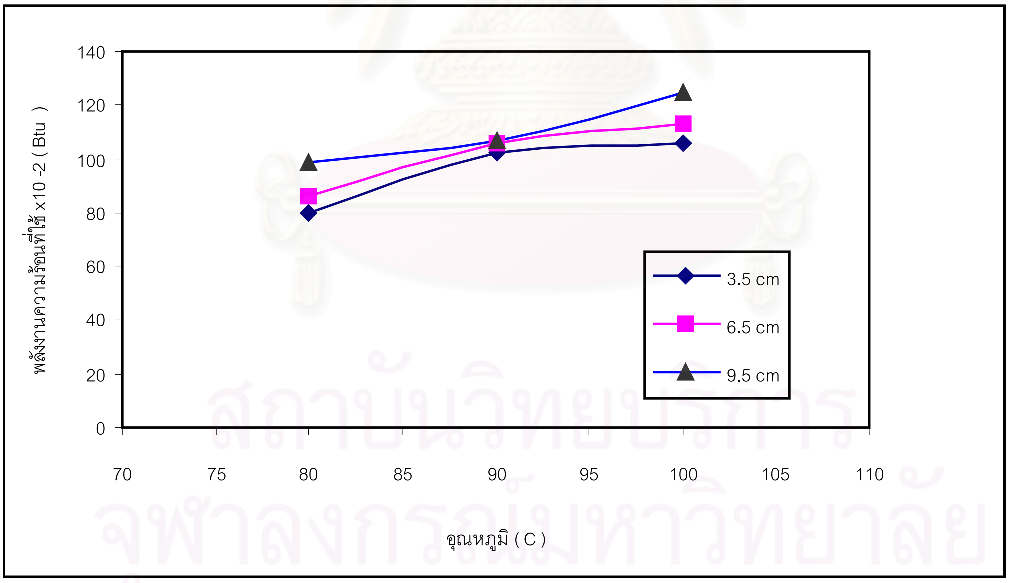


รูปที่ 4.21 ผลของความสูงเบดที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่ความเร็วลม 2.32 m/s

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

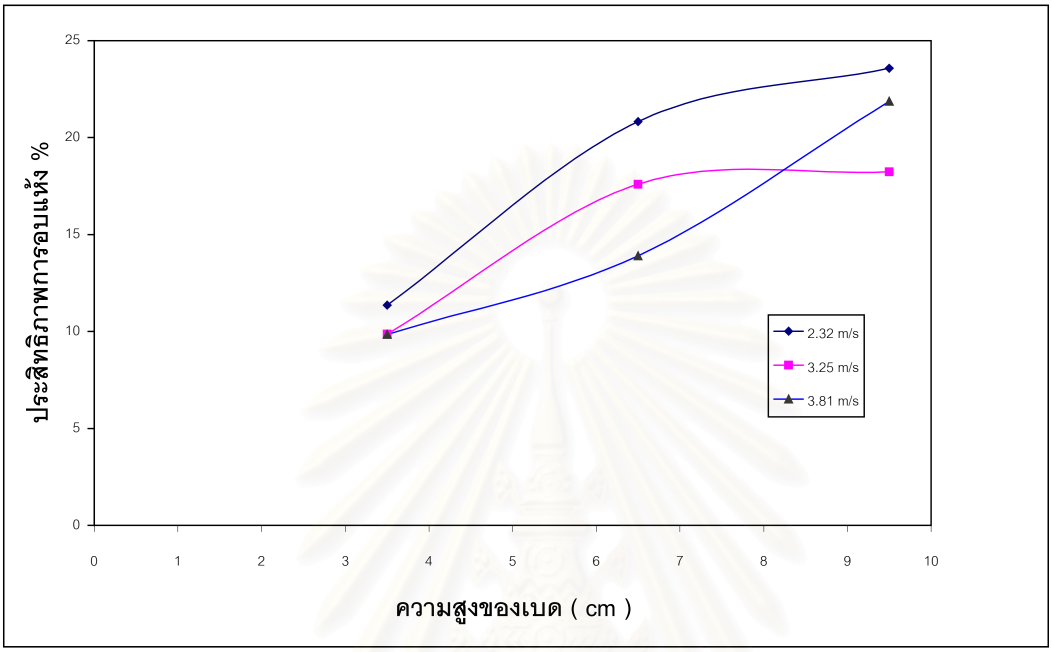


รูปที่ 4.22 ผลของความสูงเบดที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งความเร็วลม 3.25 m/s



รูปที่ 4.23 ผลของความสูงเบดที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งความเร็วลม 3.81 m/s

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการอบแห้งเปลือกไม้แบบกะที่อุณหภูมิ 80 °C

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

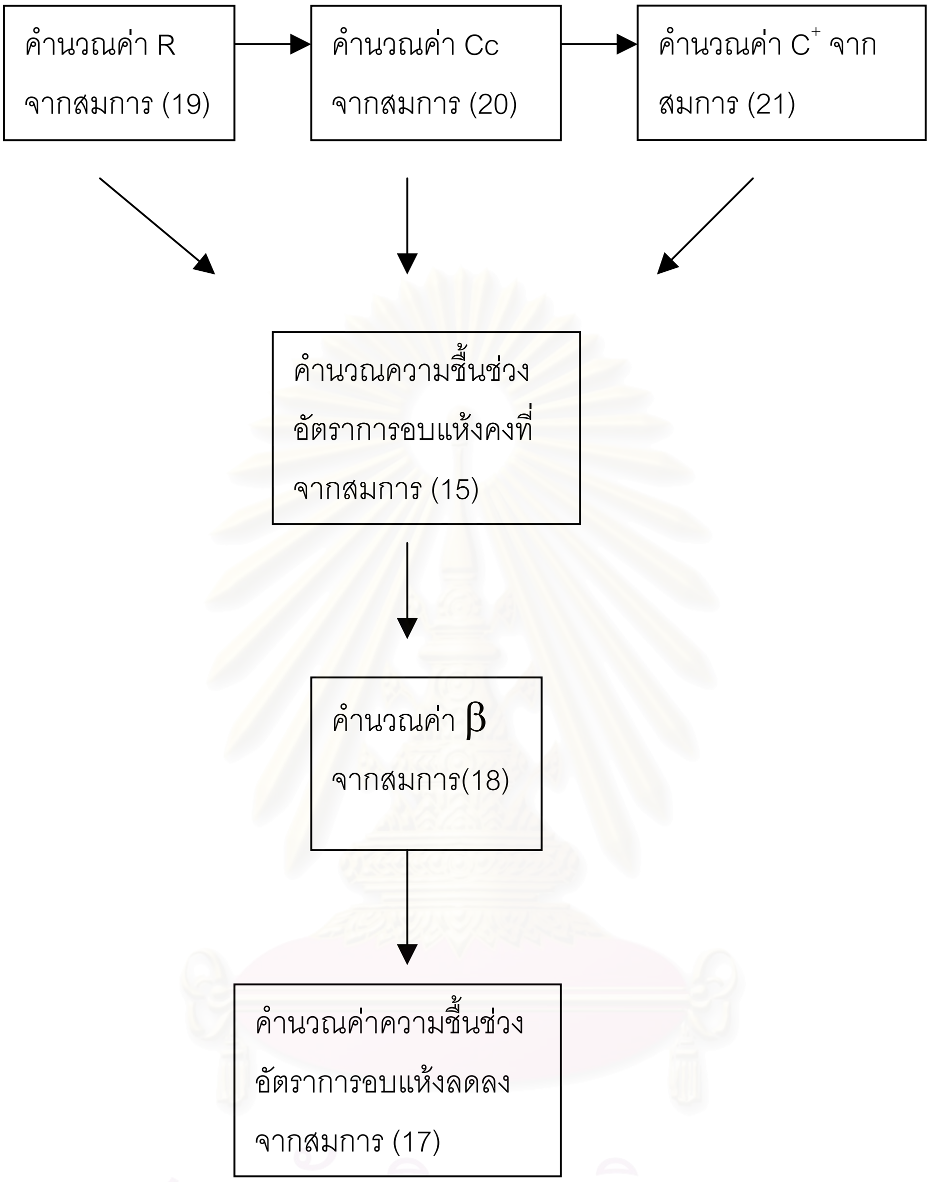
4.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งจากการทดลองแบบกะกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองของ Chandran et al. (1990)[10] และ Vanecek et al. (1966)[11] ซึ่งการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณดังนี้คือ อุณหภูมิของอากาศร้อน ความชื้นเริ่มต้นของเปลือกไม้ ความเร็วลม อัตราการไหลของอากาศ เวลาในการอบแห้ง ความสูงของเบดและน้ำหนักของเบด ค่าต่างๆที่แบบจำลองสามารถทำนายได้ ได้แก่ อัตราการอบแห้ง (R) ความชื้นวิกฤต (Cc) ความชื้นสมดุล (C^+) และความชื้นหลังการอบแห้งที่เวลาใดๆ โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังต่อไปนี้

การคำนวณเริ่มต้นโดยใช้สมการ (19) คำนวณหาค่าอัตราการอบแห้ง (R) โดยสมมุติค่าคงที่ k_1 เท่ากับ 4,800 จากนั้นคำนวณค่าความชื้นวิกฤต Cc โดยใช้สมการ (20) โดยสมมุติค่าคงที่ k_2 เท่ากับ 0.55 จากนั้นจึงคำนวณค่า C^+ จากสมการ (21) โดยสมมุติค่าคงที่ k_3 เท่ากับ 1.35 นำค่า R , Cc และ C^+ ที่ได้ไปแทนในสมการ (15) เพื่อหาความชื้นที่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ที่ช่วงเวลาใดๆ จากนั้นนำค่า R , Cc และ C^+ ที่ได้ไปคำนวณค่า β จากสมการ (18) นำค่า และ β ที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ (17) เพื่อหาค่าความชื้นที่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงที่เวลาใดๆ ขั้นตอนการคำนวณแสดงดังรูปแผนผังที่ 4.25

จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 80 , 90 และ 100 $^{\circ}C$ โดยนำไปเขียนกราฟดังรูปที่ 4.26 ซึ่งจะพบว่าได้ความชื้นหลังการอบแห้งใกล้เคียงกับผลการทดลอง ต่อมาได้ทำการทดลองเปลี่ยนความสูงของเบดที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 4.27 และปรากฏว่าที่ความสูงของเบด 9.5 cm ผลที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองได้ค่าเบี่ยงเบนจากการทดลองเล็กน้อยเนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างตัวกลางและวัสดุไม่คงที่ เกิดการ Fluctuate เนื่องจากมีฟองแก๊สขนาดใหญ่เกิดขึ้น

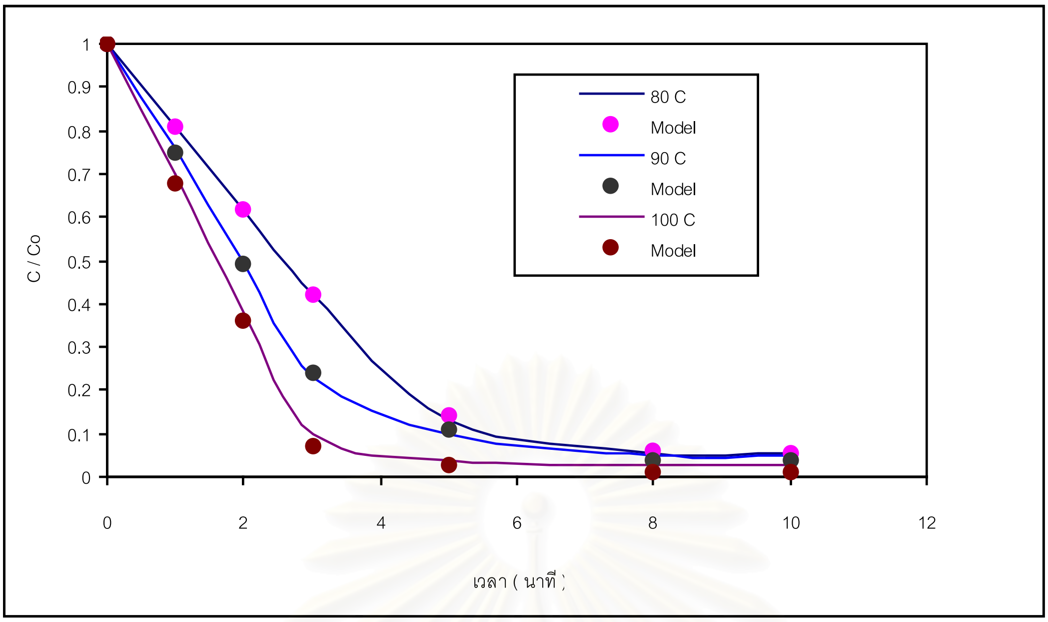
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ

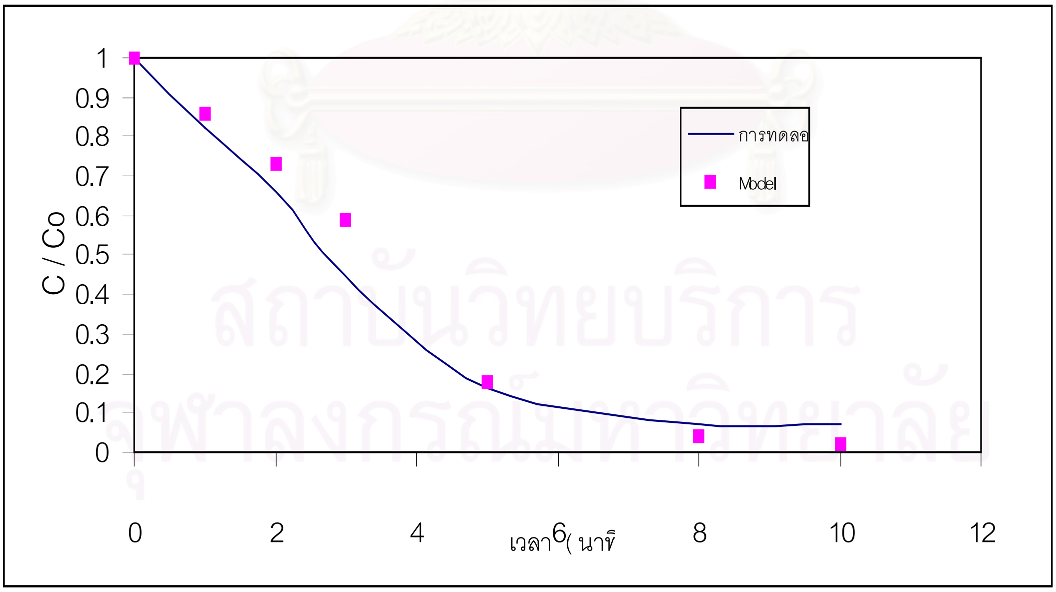
รูปที่ 4.25 แผนผังการคำนวณความชื้นจากแบบจำลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.26 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองและแบบจำลองที่

ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 3.5 cm



รูปที่ 4.27 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการทดลองและแบบจำลองที่

ความเร็วลม 3.25 m/s อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C ความสูงของเบด 9.5 cm

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 การอบแห้งเปลือกไม้ในฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งเปลือกไม้ในฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง โดยมีอัตราการป้อน 125 กรัมต่อนาที ความสูงของเบด 10 เซนติเมตร ไม่สามารถเปลี่ยนอัตราการป้อนได้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่อง ซึ่งตัวแปรที่ศึกษามีดังต่อไปนี้คือ อุณหภูมิอากาศร้อน 90 – 110 $^{\circ}C$ ความเร็วลม 2.32 – 2.85 m/s

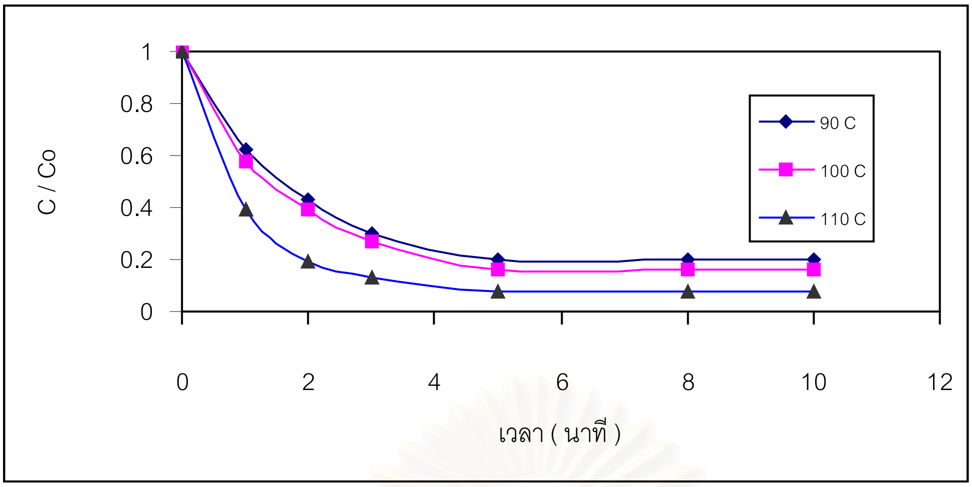
4.6.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้ง

จากรูปที่ 4.28 – 4.30 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นไร้หน่วย (C / Co) ที่ช่วงอุณหภูมิ 90 – 110 $^{\circ}C$ จากกราฟจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นจะลดลงจากความชื้น 1.0 เหลือความชื้น 0.2 , 0.16 ,0.08 ตามลำดับในรูปที่ 4.28 ที่เวลา 5 นาที ส่วนในรูปที่ 4.29 และ 4.30 ความชื้นจะอยู่ในช่วง 0.01- 0.1 โดยที่จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะไปเพิ่มพลังงานจลน์ของน้ำภายในเนื้อวัสดุและจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิววัสดุและกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงสูงขึ้น

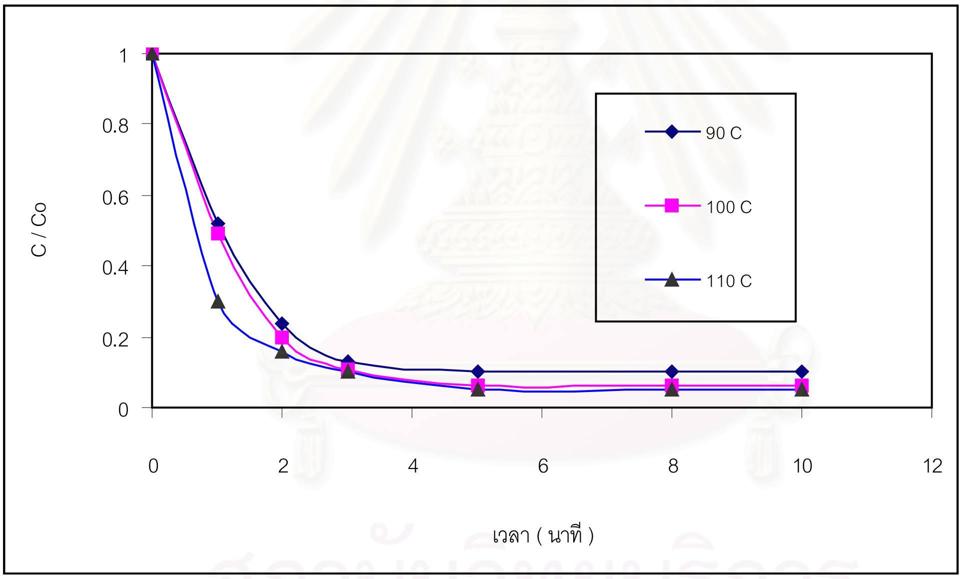
4.6.2 อิทธิพลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้ง

จากรูปที่ 4.31 – 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นไร้หน่วยที่ช่วงความเร็วลม 2.32 – 2.85 m/s ที่อุณหภูมิ 100 และ 110 $^{\circ}C$ ตามลำดับ จากกราฟพบว่าที่ความเร็วลมที่สูงกว่าจะสามารถลดความชื้นของเปลือกไม้ได้มากกว่า กล่าวคือที่อุณหภูมิ 100 $^{\circ}C$ ที่ความเร็วลม 2.32, 2.58 และ 2.85 m/s จะให้ความชื้นไร้หน่วยเหลือ 0.16 , 0.06 และ 0.04 ตามลำดับที่เวลา 5 นาที และสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิ110 $^{\circ}C$ ทุกความเร็วลมจะมีค่าความชื้นสุดท้ายไม่ต่างกันมากคืออยู่ในช่วง 0.08 ถึง 0.01 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของลมที่ไหลผ่านวัสดุ จะทำให้วัสดุมีการเคลื่อนที่ได้มากขึ้น วัสดุสามารถสัมผัสกับอากาศได้มากขึ้น ส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของความชื้นภายในวัสดุกับอากาศมากขึ้น อัตราการอบแห้งจึงสูงขึ้น

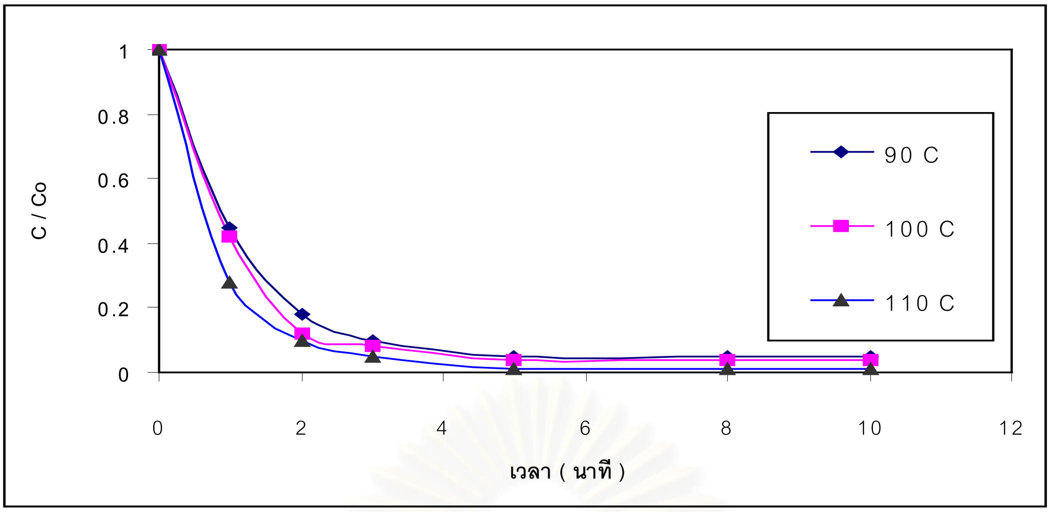
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



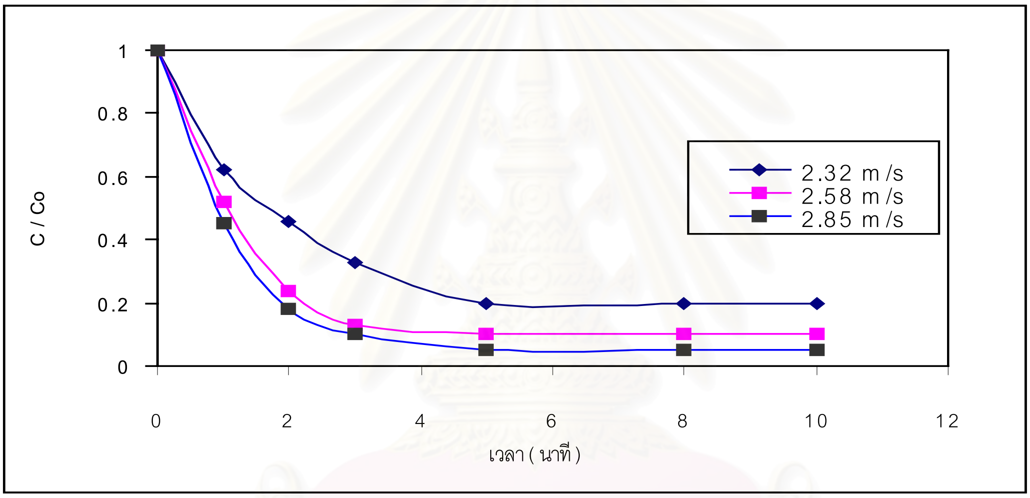
รูปที่ 4.28 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องที่ความเร็วลม 2.32 m/s



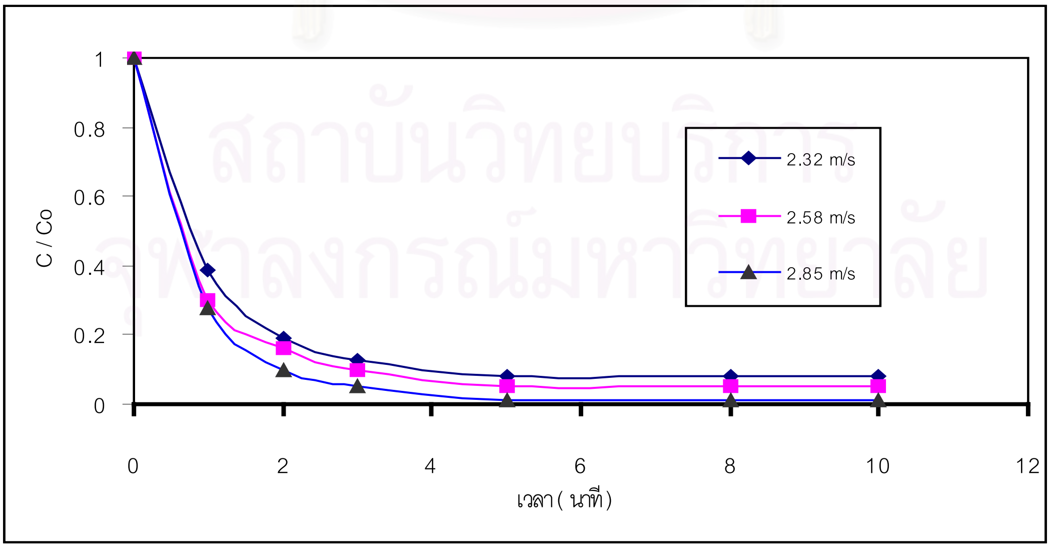
รูปที่ 4.29 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องที่ความเร็วลม 2.58 m/s



รูปที่ 4.30 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องที่ความเร็วลม 2.85 m/s



รูปที่ 4.31 ผลของความเร็วลมการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 100 °C



รูปที่ 4.32 ผลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 110 °C

4.7 การหาภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมโดยการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่อง

ในการศึกษาหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมนั้นได้มีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาว่า ให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงและสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้ ความชื้นเริ่มต้นของเปลือกไม้ 55 % โดยน้ำหนักเปียก ความชื้นหลังการอบแห้งเปลือกไม้ต้องต่ำกว่า 10 % โดยน้ำหนักเปียก เนื่องจากเงื่อนไขดังกล่าวเมื่อนำเปลือกไม้ไปเผาแล้วจะสามารถลุกติดไฟได้และทำให้ไม่เกิดควันคำ การหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมมีสมมุติฐานดังนี้คือ ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดได้มาจาก ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำและความร้อนที่ทำให้อากาศร้อนขึ้น โดยไม่คิดผลของการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งภาวะที่ใช้ในการพิจารณามีดังต่อไปนี้คือ

4.7.1 การพิจารณาผลของความชื้นหลังการอบแห้ง

เนื่องจากเงื่อนไขของการอบแห้งคือ ความชื้นหลังการอบแห้งต้องน้อยกว่า 10 % โดยน้ำหนักเปียก ซึ่งมีค่าความชื้นที่เวลาใดๆต่อความชื้นเริ่มต้น (C / Co) น้อยกว่า 0. ดังนั้นจากตารางที่ ก 2 แสดงข้อมูลของผลการทดลองการอบแห้งแบบต่อเนื่อง จะพบว่า ภาวะที่ไม่เหมาะสมในการทดลองคือที่ ความเร็วลม 2.32 m/s อุณหภูมิ 90 และ 100 $^{\circ}$C และที่ความเร็วลม 2.58 m/s อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C เนื่องจากภาวะดังกล่าวให้ความชื้นหลังการอบแห้งมากกว่า 10 % โดยน้ำหนักเปียก นอกเหนือจากภาวะดังกล่าวนี้ภาวะอื่นที่ใช้ในการทดลองสามารถใช้ได้ทั้งหมด

4.7.2 การพิจารณาผลของความเร็วลมและอุณหภูมิที่มีผลต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง

จากรูปที่ 4.33 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วลมสูงขึ้นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งก็จะมากกว่าที่ความเร็วลมต่ำๆ เนื่องจากใช้ปริมาณอากาศที่มากกว่าในขณะที่การเคลื่อนที่ของน้ำถูกควบคุมด้วยการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ดังนั้นที่ความเร็วลมสูงกว่าจึงใช้พลังงานความร้อนในการอบแห้งมากกว่า และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งก็จะมากขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นทำให้ตัวให้ความร้อนต้องให้พลังงานความร้อนให้อากาศร้อนเพิ่มขึ้น ขณะที่การแพร่ภายในของน้ำถูกจำกัดด้วยการแพร่ของน้ำภายในวัสดุ ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้พลังงานความร้อนน้อยที่สุดคือ 90 $^{\circ}$C

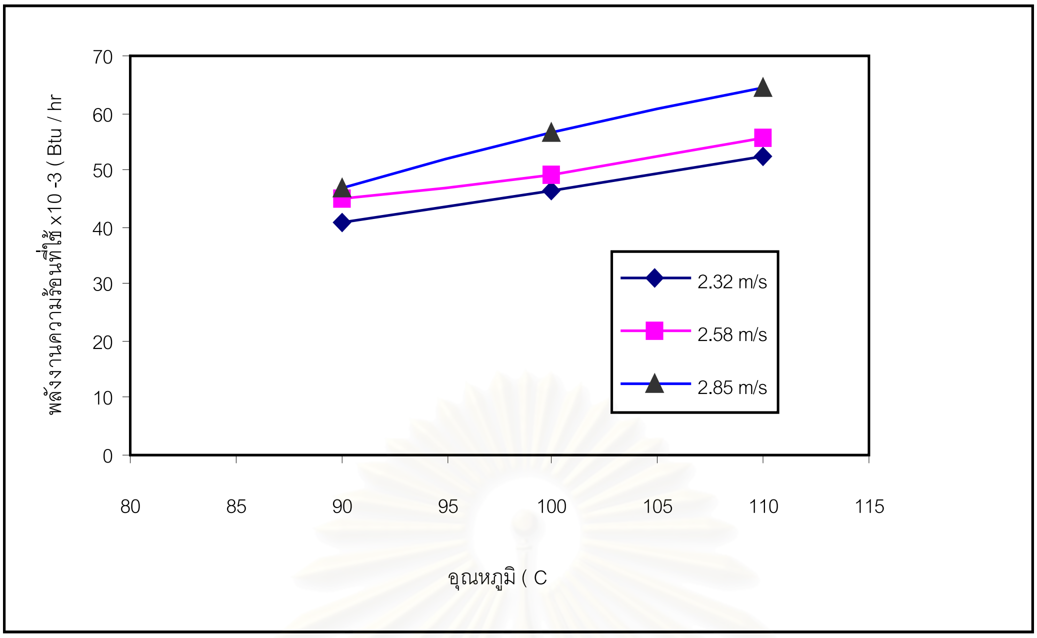
พิจารณารูปที่ 4.33 ที่ความเร็วลม 2.32 m/s พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งก็จะมากขึ้น ในการอบแห้งที่ความเร็วลมดังกล่าวควรอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 110 $^{\circ}$C ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง 52,417.60 Btu / hr มีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 18.10 % ดังรูปที่ 4.34 เนื่องจากเป็นอุณหภูมิเดียวที่สามารถลดความชื้นสุดท้ายได้น้อยกว่า 10 % โดยน้ำหนักเปียก ในช่วงความเร็วลม 2.32 m/s

พิจารณาที่ความเร็วลม 2.58 m/s พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งก็จะมากขึ้น ในการอบแห้งที่ความเร็วลมดังกล่าวควรอบแห้งที่ อุณหภูมิอากาศ 100 $^{\circ}$C เนื่องจากในการอบแห้งที่ความเร็วลมดังกล่าวไม่สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C ได้ถึงแม้ว่าความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งจะน้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงที่สุด เพราะไม่สามารถลดความชื้นสุดท้ายของเปลือกไม้ให้เหลือน้อยกว่า 10 % โดยนำหนักเปียกได้ ดังนั้นควรเลือกที่อุณหภูมิ 100 $^{\circ}$C เพราะมีประสิทธิภาพ 20.74 % ดังรูปที่ 4.34 ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง 49,173.15 Btu / hr

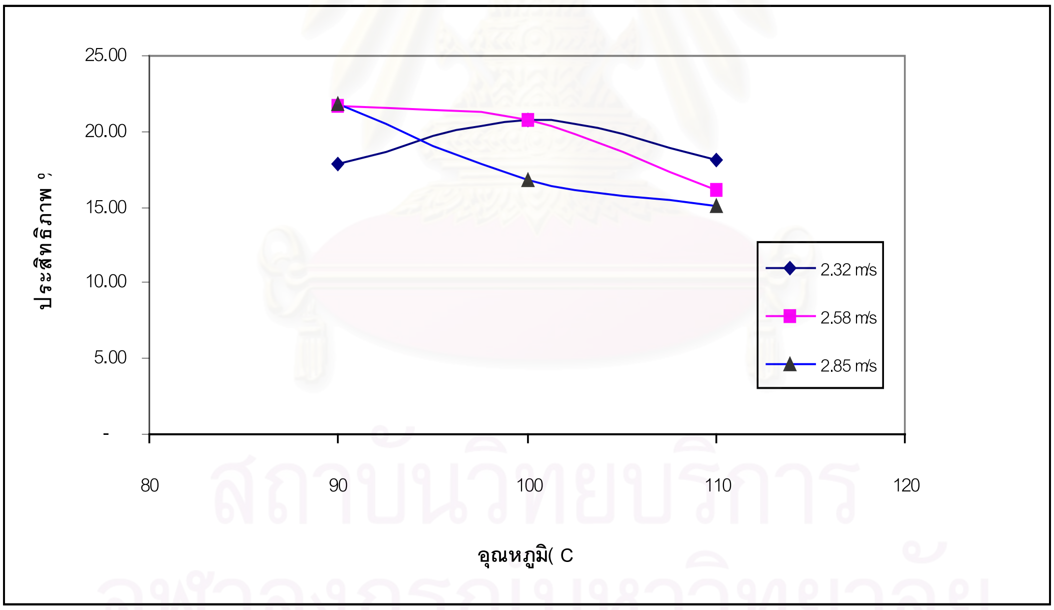
พิจารณาที่ความเร็วลม 2.85 m/s พบว่าความร้อนที่ใช้จะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นในการอบแห้งที่ความเร็วลมดังกล่าวควรเลือกที่ อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C มีประสิทธิภาพ 21.88 % ซึ่งสูงที่สุด ดังรูปที่ 4.34 ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง 46,890.20 Btu / hr

เมื่อพิจาณาถึงความร้อนที่ใช้และประสิทธิภาพในการอบแห้งในช่วงความเร็วลม 2.32 – 2.85 m/s ดังรูปที่ 4.34 ควรเลือกที่ความเร็วลม 2.85 m/s อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C เพราะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่ใช้พลังงานความร้อนในการอบแห้งต่ำเมื่อเทียบกับอุณหภูมิและความเร็วลมอื่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.35 ผลของความเร็วลมที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ทั้งหมดกับอุณหภูมิในการอบแห้ง



รูปที่ 4.36 ประสิทธิภาพของการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่อง

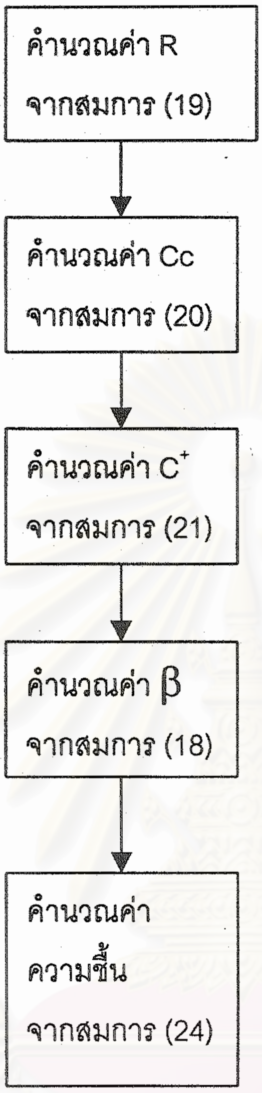
4.8 การเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งจากการทดลองแบบต่อเนื่องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้จะได้ใช้แบบจำลองของ Chandran et al. (1990)[10] และ Vanecek et al. (1966)[11] ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับการอบแห้งแบบต่อเนื่องมีข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณดังนี้คือ อุณหภูมิของอากาศร้อน ความชื้นเริ่มต้นของเปลือกไม้ ความเร็วลม อัตราการไหลของอากาศ เวลาในการอบแห้ง ความสูงของเบด และค่า Hold up ค่าต่างๆที่แบบจำลองสามารถทำนายได้ ได้แก่ อัตราการอบแห้ง ความชื้นวิกฤต ความชื้นสมดุลและความชื้นหลังการอบแห้งที่เวลาใดๆ

กำหนดข้อมูลเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณโดยหาค่า Hold up จากการทดลอง จากนั้นคำนวณหาค่าอัตราการอบแห้ง (R) โดยใช้สมการ (19) โดยสมมุติค่าคงที่ k_1 เท่ากับ 4,800 จากนั้นคำนวณค่าความชื้นวิกฤต (Cc) โดยใช้สมการ (20) โดยสมมุติค่าคงที่ k_2 เท่ากับ 0.55 จากนั้นจึงคำนวณค่า C^+ จากสมการ (21) โดยสมมุติค่าคงที่ k_3 เท่ากับ 1.35 จากนั้นนำค่า R , Cc และ C^+ ที่ได้ไปคำนวณได้ค่า β จากสมการ (18) นำค่า R , Cc และ C^+ และ β ที่คำนวณได้ไปแทนลงในสมการ (24) เพื่อหาค่าความชื้นที่ช่วงเวลาใดๆ ขั้นตอนการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.35

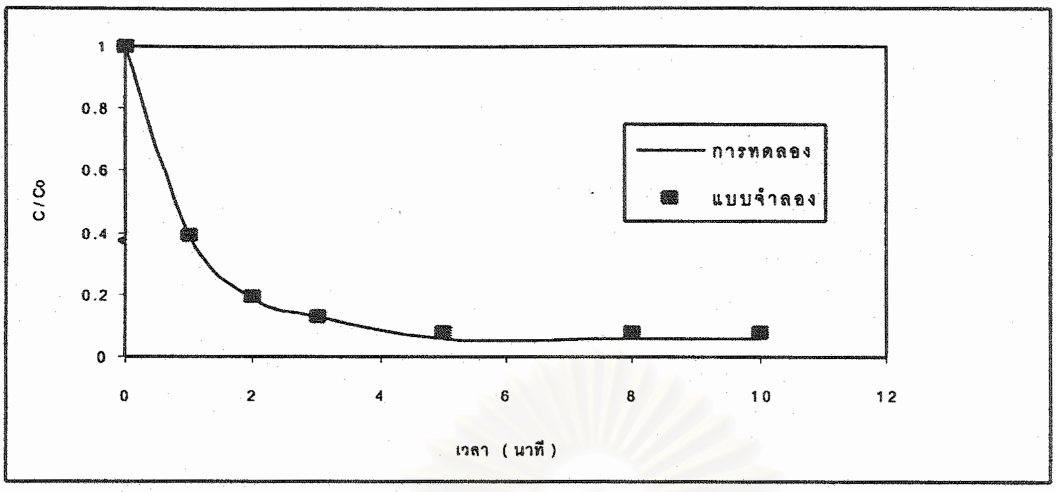
จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 90 , 100 และ 110 $^{\circ}$C โดยนำไปเขียนกราฟดังรูปที่ 4.36 – 4.38 ซึ่งจะพบว่าได้ความชื้นหลังการอบแห้งใกล้เคียงกับผลการทดลอง ต่อมาได้ทำการทดลองเปลี่ยนความเร็วลมที่ 2.32 , 2.58 และ 2.85 m/s พบว่าได้ความชื้นหลังการอบแห้งใกล้เคียงกับผลการทดลองเช่นกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

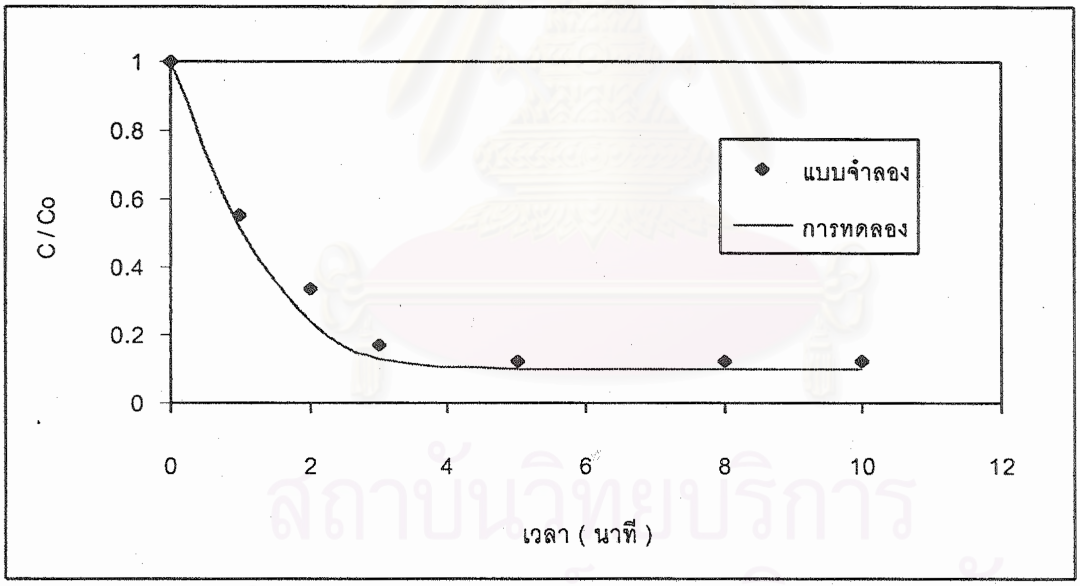


รูปที่ 4.35 แผนผังการคำนวณความชื้นจากแบบจำลอง

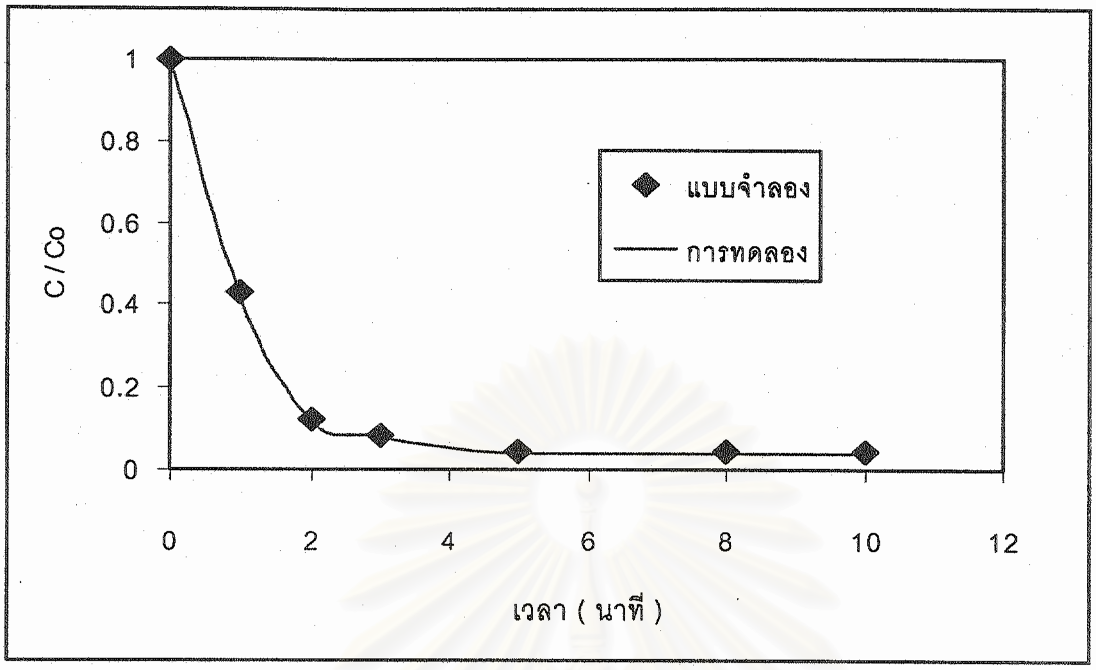
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.36 ผลของการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่อุณหภูมิ 110 °C ความเร็วลม 2.32 m/s



รูปที่ 4.37 ผลของการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วลม 2.58 m/s



รูปที่ 4.38 ผลของการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่องเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่อุณหภูมิ 100 °C ความเร็วลม 2.85 m/s

4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง

ในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งจากภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งฟลูอิไดซ์เบดมีการดำเนินการแบบกะและแบบต่อเนื่อง เปลือกไม้ที่ใช้อบมีความชื้นเริ่มต้น 55 - 60 % น้ำหนักเปียก อบแห้งให้เหลือ 10 %น้ำหนักเปียก

จากการอบแห้งแบบกะ ภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใช้อุณหภูมิ 80 $^{\circ}$C ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 9.5 cm ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด 6,017.99 Btu เครื่องอบแห้งมีกำลังการผลิต 1.5 กิโลกรัม เวลาที่ใช้ในการอบแห้งแต่ละการทดลอง 10 นาที

รายละเอียดในการคิดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานมีดังนี้

1. ค่าเชื้อเพลิง :

โดยใช้แก๊ส LPG เป็นแหล่งให้ความร้อน ค่า Heating value 21,245 Btu / lb

ราคาแก๊ส LPG 10 บาท / kg

ปริมาณแก๊สที่ใช้ 6,017.99 (Btu) / 21,245 (Btu / lb) = 0.28 lb หรือ 0.13 kg

ราคาของแก๊ส 1.3 บาท ต่อ การทดลอง

2. ค่าไฟฟ้า :

กำลังไฟฟ้าของ มอเตอร์ เท่ากับ 0.7 Kw , พัดลม 1.5 Kw

พลังงานไฟฟ้าพัดลม เท่ากับ 1.5 Kw x 0.167h = 0.25 Kw-h

พลังงานไฟฟ้ามอเตอร์ เท่ากับ 0.7 Kw x 0.25h = 0.175 Kw-h

พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 0.25 + 0.175 = 0.425 Kw-h

ค่าไฟฟ้าต่อการทดลอง = 0.425 x 3 = 1.28 บาท

รวมค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมเปลือกเปียก = (1.3 +1.28) / 1.5 = 1.72 บาท/กก.

จากการอบแห้งแบบต่อเนื่อง ภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใช้อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C ความเร็วลม 2.85 m/s เครื่องอบแห้งมีกำลังการผลิต 0.125 กิโลกรัมต่อนาที ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด 46,890.20 Btu / hr เวลาทีใช้ในการทดลอง 10 นาที

รายละเอียดในการคิดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานมีดังนี้

1. ค่าเชื้อเพลิง :

โดยใช้แก๊ส LPG เป็นแหล่งให้ความร้อน ค่าHeating value 21,245 Btu / lb

ราคาแก๊สLPG 10 บาท / kg

ปริมาณแก๊สที่ใช้ 46,890.2 (Btu / hr) / 21,245 (Btu/ lb) = 2.2 lb / hr หรือ 1 kg / hr

ราคาของแก๊ส 10 บาท / ชั่วโมง หรือ 1.67 บาท ต่อการทดลอง

2. ค่าไฟฟ้า :

กำลังไฟฟ้าของ มอเตอร์ เท่ากับ 0.7 Kw ,พัดลม 1.5 Kw

พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด เท่ากับ 2.2 Kw x 0.167h = 0.3674 Kw-h

ค่าไฟฟ้าต่อการทดลอง = 0.3674 x 3 = 1.10 บาท

รวมค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมเปลือกเปียก = (1.67 +1.10)/1.25 = 2.14 บาท/กก.

เมื่อสรุปผลของค่าใช้จ่ายในการทดลองการอบแห้งพบว่า การอบแห้งแบบต่อเนื่องมีค่าใช้จ่ายมากกว่าในการอบแห้งแบบกะ 19 % เนื่องจากในการทดลองแบบต่อเนื่องมีอัตราการผลิต 1.25 กิโลกรัม ต่อการทดลอง 10 นาที ซึ่งมีอัตราการผลิตน้อยกว่าแบบกะ แต่ถ้าดำเนินการทดลองในช่วงเวลาที่มากกว่านี้ การอบแห้งแบบต่อเนื่องจะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำกว่าเนื่องจากไม่ต้องเสียเวลาในการนำผลผลิตออกจากเครื่อง อัตราการผลิตต่อวันของการอบแห้งแบบต่อเนื่องจะมากกว่า

สมมุติให้เครื่องอบแห้งมีการดำเนินการ 10 ชั่วโมงต่อวัน ดังนั้นการอบแห้งแบบต่อเนื่องจะให้อัตราการผลิต 75 กิโลกรัมต่อวัน ในขณะที่การอบแห้งแบบกะต้องเสียเวลาในการนำวัตถุดิบเข้าและออกจากเครื่องประมาณ 10 นาที อัตราการผลิตเท่ากับ 1.5 กิโลกรัมต่อ 20 นาที หรือ 45 กิโลกรัมต่อวัน

ค่าเชื้อเพลิงของการอบแห้งแบบต่อเนื่อง

ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งแบบต่อเนื่อง 46,890.2 (Btu / hr) x 10 h = 468,902 Btu / day

ปริมาณแก๊สที่ใช้ 468,902 (Btu / day) / 21,245 (Btu / lb) = 22. 07 lb / day หรือ 10 .03 กิโลกรัมต่อวัน

ราคาแก๊ส 10.03 กิโลกรัมต่อวัน x 10 บาท = 100 .3 บาทต่อวัน

ค่าแก๊สต่อกิโลกรัมเปียก 100.3 บาทต่อวัน / 75 กิโลกรัมต่อวัน = 1.33 บาท / กิโลกรัม

ค่าเชื้อเพลิงของการอบแห้งแบบกะ

ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งแบบต่อเนื่อง 6,017.99 (Btu / 10 min) x 10 h = 361,079.4 Btu / day

ปริมาณแก๊สที่ใช้ 361,079.4 (Btu / day) / 21,245 (Btu / lb) = 17 lb / day หรือ 7.72 กิโลกรัมต่อวัน

ราคาแก๊ส 7.72 กิโลกรัมต่อวัน x 10 บาท = 77.25 บาทต่อวัน

ค่าแก๊สต่อกิโลกรัมเปียก 77.25 บาทต่อวัน / 45 กิโลกรัมต่อวัน = 1.71 บาท / กิโลกรัม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 ตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในฟลูอิไดซ์เบดแบบกะ มีดังต่อไปนี้คือ

5.1.1 อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นโดยเฉพาะเมื่ออยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

5.1.2 ความเร็วลม เมื่อความเร็วลมสูงขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น

5.1.3 ความสูงของเบด เมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งลดลง

ดังนั้นภาวะภายนอกจะไม่มีผลต่อช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เนื่องจากการแพร่ของความชื้นจะถูกควบคุมโดยความต้านทานภายใน

5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งที่ได้นำมาใช้กับการทดลองแบบกะและแบบต่อเนื่อง พบว่าสามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ดีกับการทดลองแบบต่อเนื่อง เนื่องจากให้ค่าใกล้เคียงกับทุกช่วงอุณหภูมิและทุกช่วงความเร็วลม ส่วนการทดลองแบบกะนั้นนั้นสามารถทำนายได้ดีพอสมควร กล่าวคือในช่วงเวลาการอบแห้งที่ความสูงของเบดต่ำๆ สามาถทำนายความชื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลองแต่ไม่สามารถใช้ได้กับที่ความสูงเบด 9.5 cm เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคกับตัวกลางไม่คงที่และเกิดฟองแก๊สมาก

5.3 การหาภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง

ในการอบแห้งนั้นสิ่งที่ควรคำนึงถึงคือ ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ ประสิทธิภาพสูง ซึ่งภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแบบกะ คือ ความสูงเบด 9.5 cm ความเร็วลม 2.32 m/s และอุณหภูมิ 80 $^{\circ}$C ส่วนภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแบบต่อเนื่อง คือ อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C ความเร็วลม 2.85 m/s อัตราการป้อน 0.125 กิโลกรัม ต่อนาที ความสูงของเบด 10 เซนติเมตร

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ควรขยายขนาดเพื่อศึกษาความเหมาะสมของการอบแห้งเปลือกไม้โดยวิธีฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง

5.4.2 ควรมีการศึกษาการนำอากาศร้อนที่ใช้ทดลองแล้วหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน และนำไปคำนวณค่าใช้จ่ายในการอบแห้งซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงลงได้

5.4.3 ควรเปลี่ยนมอเตอร์เป็นแบบปรับรอบได้เพื่อศึกษาอัตราการไหลของวัสดุที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, " ฟลูอิไดเซชัน ," สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ,2528.
2. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, " การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท," หนังสือในโครงการส่งเสริมการสร้าง ตำราสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ,2540.
3. สมเกียรติ ปรัชญาวรากาการ, " การอบแห้งข้าวเปลือกที่ช่วงความชื้นสูงโดยวิธีฟลูอิไดเซชัน," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,2534.
4. อรอนงค์ ศรีพวาทกุล, " การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิไดเซชันแบบต่อเนื่อง, " วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,2534.
5. ปราโมทย์ อำพันและ ศุภวัฒน์ นาควิมล, " การอบแห้งเมล็ดข้าวโพดในฟลูอิไดซ์เบด ,"โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2542.
6. Abid ,M. , Gibert, R.and Laguerie,C., " An experimental and Theoretical Analysis of the Mechanisms of Heat and Mass Transfer during the Drying of Corn Grains in a Fluidized bed," International Chemical Engineering 30, No.4, pp. 632-642 (1990).
7. Hoebink, J.H.B.J. and Rietema ,K., " Drying Granular Solids in Fluidized Bed," Chemical Engineering Science 35, pp. 2135-2140 (1980).
8. Soponronnarit, S., Pongtornkulpanich, A. and Prachayawarakorn, S., " Drying Characteristics of Corn in Fluidized Bed Dryer, " Drying Technology 15, No. 5,pp.1603-1615 (1997).
9. Swasdisevi, T., Soponronnarit, S. , Prachayawarakorn, S. and Phetdasada, W., " Drying of Chopped Spring Onion Using Fluidization Technique," Drying Technology 17, No. 6 , pp.1191-1199 (1999).
10. Chandran, A.N., Subba Rao, S. and Varma, Y.B.G.," Fluidized Bed Drying of Solids," AIChE Journal 36, No. 1 , pp.29 – 38 (1990).
11. Vanecek, V., Markavart, M., Drbohlav, R. and Hummel, R.L., " Experimental Evidence on Operation of Continuous Fluidized Bed Drier," Chem. Eng. Prog. Sym. Ser.,66 (105), 243 (1970).

12. Kunii,D., " Fluidization Engineering, " New York, John Wiley and Sons, New York, pp.66-120 (1969).

13. Luikov, A. V., " Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies, " Pergamon Press, Oxford 1966.

14. G. G. Brown et al., " Unit Operation , " John Wiley and Sons, New York 1950.

15. Beran, Z., and J. Lutcha, " Optimising Particle Residence Time in a Fluidized Bed Dryer, " The Chem. Engr., 678 (1975).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตาราง ก1 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองการอบแห้งแบบกะกับผลการทำนายจากแบบจำลองคณิตศาสตร์

การทดลองที่ 1 ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงเบด 3.5 cm น้ำหนักเบด 0.5 kg

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C / Co)					
	อุณหภูมิ 80 °C		อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1
1	0.81	0.81	0.76	0.75	0.7	0.68
2	0.62	0.62	0.5	0.49	0.38	0.36
3	0.42	0.42	0.23	0.24	0.1	0.07
5	0.13	0.14	0.1	0.11	0.04	0.03
8	0.054	0.058	0.05	0.038	0.03	0.01
10	0.054	0.053	0.05	0.036	0.03	0.01

การทดลองที่ 2 ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงเบด 6.5 cm น้ำหนักเบด 1.0 kg

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C / Co)					
	อุณหภูมิ 80 °C		อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1
1	0.9	0.91	0.86	0.86	0.78	0.77
2	0.75	0.82	0.71	0.73	0.55	0.54
3	0.59	0.73	0.51	0.59	0.24	0.22
5	0.22	0.230	0.19	0.22	0.1	0.14
8	0.16	0.12	0.13	0.11	0.1	0.13
10	0.16	0.12	0.13	0.09	0.1	0.13

การทดลองที่ 3 ความเร็วลม 2.32m/s ความสูงเบด9.5 cm น้ำหนักเบด 1.5 kg

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C / Co)					
	อุณหภูมิ 80 °C		อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1
1	0.92	0.94	0.89	0.94	0.86	0.92
2	0.8	0.89	0.74	0.87	0.67	0.85
3	0.68	0.68	0.58	0.81	0.49	0.77
5	0.43	0.46	0.32	0.23	0.22	0.62
8	0.18	0.2	0.15	0.12	0.13	0.14
10	0.18	0.13	0.15	0.08	0.13	0.07

การทดลองที่ 4 ความเร็วลม 3.25m/s ความสูงเบด3.5 cm น้ำหนักเบด 0.5 kg

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C / Co)					
	อุณหภูมิ 80 °C		อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1
1	0.76	0.76	0.72	0.72	0.62	0.61
2	0.53	0.51	0.44	0.43	0.28	0.28
3	0.35	0.27	0.17	0.15	0.09	0.08
5	0.13	0.12	0.05	0.03	0.04	0.04
8	0.02	0.028	0.02	0.02	0.01	0.01
10	0.02	0.028	0.02	0.02	0.01	0.01

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 5 ความเร็วลม 3.25 m/s ความสูงเบด 6.5 cm น้ำหนักเบด 1.0 kg

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C / Co)					
	อุณหภูมิ 80 °C		อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1
1	0.82	0.83	0.8	0.84	0.65	0.63
2	0.65	0.66	0.58	0.69	0.31	0.31
3	0.45	0.49	0.327	0.54	0.11	0.11
5	0.18	0.16	0.098	0.09	0.04	0.04
8	0.07	0.04	0.04	0.02	0.03	0.04
10	0.07	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04

การทดลองที่ 6 ความเร็วลม 3.25 m/s ความสูงเบด 9.5 cm น้ำหนักเบด 1.5 kg

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C / Co)					
	อุณหภูมิ 80 °C		อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1
1	0.85	0.85	0.82	0.86	0.79	0.79
2	0.7	0.7	0.66	0.73	0.57	0.57
3	0.52	0.55	0.449	0.59	0.36	0.36
5	0.19	0.18	0.16	0.18	0.109	0.16
8	0.12	0.12	0.07	0.04	0.05	0.05
10	0.12	0.12	0.07	0.02	0.05	0.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 7 ความเร็วลม 3.81 m/s ความสูงเบด 3.5 cm น้ำหนักเบด 0.5 kg

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C / Co)					
	อุณหภูมิ 80 °C		อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1
1	0.74	0.74	0.68	0.68	0.41	0.4
2	0.52	0.5	0.38	0.37	0.11	0.1
3	0.31	0.31	0.18	0.16	0.04	0.04
5	0.11	0.08	0.06	0.05	0.02	0.02
8	0.02	0.02	0.01	0.01	0.005	0.005
10	0.02	0.02	0.01	0.01	0.005	0.005

การทดลองที่ 8 ความเร็วลม 3.81 m/s ความสูงเบด 6.5 cm น้ำหนักเบด 1.0 kg

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C / Co)					
	อุณหภูมิ 80 °C		อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1
1	0.79	0.74	0.72	0.69	0.48	0.48
2	0.59	0.56	0.4	0.34	0.16	0.14
3	0.39	0.31	0.23	0.21	0.064	0.061
5	0.16	0.14	0.08	0.03	0.046	0.049
8	0.05	0.04	0.02	0.02	0.046	0.049
10	0.05	0.04	0.02	0.02	0.046	0.049

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 9 ความเร็วลม 3.81 m/s ความสูงเบด 9.5 cm น้ำหนักเบด 1.5 kg

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C / Co)					
	อุณหภูมิ 80 °C		อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1
1	0.8	0.77	0.77	0.79	0.7	0.7
2	0.6	0.54	0.58	0.58	0.4	0.4
3	0.42	0.31	0.38	0.42	0.13	0.13
5	0.18	0.17	0.15	0.15	0.05	0.04
8	0.08	0.13	0.05	0.03	0.05	0.04
10	0.08	0.13	0.05	0.03	0.05	0.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก2. การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองการอบแห้งแบบต่อเนื่องกับแบบจำลองทาง

การทดลองที่ 1 ความเร็วอากาศ 2.32 m/s

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C/Co)					
	อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C		อุณหภูมิ 110 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1
1	0.62	0.6	0.58	63	0.39	0.39
2	0.43	0.44	0.39	0.46	0.19	0.18
3	0.3	0.33	0.27	0.32	0.13	0.13
5	0.2	0.19	0.16	0.17	0.08	0.06
8	0.2	0.19	0.16	0.17	0.08	0.06
10	0.2	0.19	0.16	0.17	0.08	0.06

การทดลองที่ 2 ความเร็วอากาศ 2.58 m/s

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C/Co)					
	อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C		อุณหภูมิ 110 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1
1	0.52	0.55	0.49	0.49	0.3	0.3
2	0.24	0.34	0.2	0.21	0.16	0.16
3	0.13	0.17	0.11	0.11	0.1	0.1
5	0.1	0.12	0.06	0.09	0.05	0.02
8	0.1	0.12	0.06	0.09	0.05	0.02
10	0.1	0.12	0.06	0.09	0.05	0.02

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 3 ความเร็วอากาศ 2.85 m/s

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น (C/Co)					
	อุณหภูมิ 90 °C		อุณหภูมิ 100 °C		อุณหภูมิ 110 °C	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
0	1	1	1	1	1	1.00
1	0.45	0.45	0.42	0.43	0.28	0.29
2	0.18	0.16	0.12	0.12	0.1	0.10
3	0.1	0.1	0.08	0.08	0.05	0.05
5	0.05	0.05	0.04	0.04	0.01	0.01
8	0.05	0.05	0.04	0.04	0.01	0.01
10	0.05	0.05	0.04	0.04	0.01	0.01

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก3 ผลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบกะ

การทดลองที่ 1 ผลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้ที่อุณหภูมิ 80 °C

ความสูงของเบด 3.5 cm

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น(C / Co)		
	ความเร็วลม 2.32 m/s	ความเร็วลม 3.25 m/s	ความเร็วลม3.81 m/s
0	1	1	1
1	0.81	0.76	0.74
2	0.62	0.53	0.52
3	0.42	0.35	0.31
5	0.18	0.13	0.11
8	0.06	0.02	0.01
10	0.06	0.02	0.01

การทดลองที่ 2 ผลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้ที่อุณหภูมิ 90 °C

ความสูงของเบด 6.5 cm

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น(C / Co)		
	ความเร็วลม 2.32 m/s	ความเร็วลม 3.25 m/s	ความเร็วลม3.81 m/s
0	1	1	1
1	0.86	0.8	0.71
2	0.71	0.58	0.4
3	0.51	0.33	0.23
5	0.19	0.1	0.08
8	0.1	0.05	0.02
10	0.1	0.05	0.02

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 3 ผลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้ที่อุณหภูมิ 100 °C

ความสูงของเบด 6.5 cm

เวลา	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น(C / Co)		
(นาที)	ความเร็วลม 2.32 m/s	ความเร็วลม 3.25 m/s	ความเร็วลม3.81 m/s
(นาที)	2.32 m/s	3.25 m/s	3.81 m/s
0	1	1	1
1	0.78	0.65	0.48
2	0.55	0.31	0.16
3	0.24	0.11	0.06
5	0.17	0.04	0.046
8	0.13	0.03	0.046
10	0.13	0.03	0.046

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก4 ผลของความสูงเบดที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบกะ

การทดลองที่ 1 ผลของความสูงเบดที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้ที่อุณหภูมิ 80 °C

ความเร็วลม 3.25 m/s

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น(C / Co)		
	ความสูงเบด 3.5 cm	ความสูงเบด 6.5 cm	ความสูงเบด 9.5 cm
0	1	1	1
1	0.76	0.82	0.85
2	0.53	0.65	0.7
3	0.35	0.45	0.52
5	0.13	0.18	0.19
8	0.021	0.07	0.12
10	0.021	0.07	0.12

การทดลองที่ 2 ผลของความสูงเบดที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้ที่อุณหภูมิ 90 °C

ความเร็วลม 3.25 m/s

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น(C / Co)		
	ความสูงเบด 3.5 cm	ความสูงเบด 6.5 cm	ความสูงเบด 9.5 cm
0	1	1	1
1	0.72	0.8	0.82
2	0.44	0.58	0.66
3	0.14	0.327	0.45
5	0.04	0.07	0.11
8	0.02	0.05	0.07
10	0.02	0.05	0.07

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 3 ผลของความสูงเบดที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้ที่อุณหภูมิ 80 $^{\circ}$C ความเร็วลม 3.81 m/s

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น(C / Co)		
	ความสูงเบด 3.5 cm	ความสูงเบด 6.5 cm	ความสูงเบด 9.5 cm
0	1	1	1
1	0.74	0.79	0.8
2	0.52	0.59	0.6
3	0.31	0.39	0.42
5	0.11	0.16	0.18
8	0.02	0.05	0.08
10	0.02	0.05	0.08

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก5 ผลของควาเร็วลมที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 1 ผลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้ที่อุณหภูมิ 90 °C

เวลา	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น(C / Co)		
(นาที)	ความเร็วลม 2.32 m/s	ความเร็วลม 2.58 m/s	ความเร็วลม2.85 m/s
0	1	1	1
1	0.62	0.52	0.45
2	0.46	0.24	0.18
3	0.33	0.13	0.1
5	0.2	0.1	0.05
8	0.2	0.1	0.05
10	0.2	0.1	0.05

การทดลองที่ 2 ผลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้ที่อุณหภูมิ 100 °C

เวลา	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น(C / Co)		
(นาที)	ความเร็วลม 2.32 m/s	ความเร็วลม 2.58 m/s	ความเร็วลม2.85 m/s
1	0.58	0.49	0.42
2	0.42	0.2	0.12
3	0.32	0.11	0.08
5	0.16	0.06	0.04
8	0.16	0.06	0.04
10	0.16	0.06	0.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 3 ผลของความเร็วลมที่มีต่อการอบแห้งเปลือกไม้ที่อุณหภูมิ 110 °C

เวลา (นาที)	ความชื้น / ความชื้นเริ่มต้น(C / Co)		
	ความเร็วลม 2.32 m/s	ความเร็วลม 2.58 m/s	ความเร็วลม2.85 m/s
0	1	1	1
1	0.39	0.3	0.28
2	0.19	0.16	0.1
3	0.13	0.1	0.05
5	0.08	0.05	0.01
8	0.08	0.05	0.01
10	0.08	0.05	0.01

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก6. ผลของพลังงานความร้อนที่ใช้และประสิทธิภาพในการอบแห้งเปลือกไม้แบบกะ

อุณหภูมิ °C	ความสูงเบด cm	ความเร็วลม m/s	ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ Btu	ความร้อนที่ใช้ทั้งหมด Btu	ประสิทธิภาพ %
80	3.5	2.32	581.52	5,115.00	11.37
90	3.5	2.32	451.82	5,751.82	7.86
100	3.5	2.32	610.54	7,465.43	8.18
80	3.5	3.25	720.46	7,296.06	9.87
90	3.5	3.25	767.55	8,594.87	8.93
100	3.5	3.25	621.07	9,622.03	6.45
80	3.5	3.81	790.53	8,028.81	9.85
90	3.5	3.81	686.08	10,235.82	6.70
100	3.5	3.81	645.33	10,631.20	6.07
80	6.5	2.32	1,160.44	5,572.09	20.83
90	6.5	2.32	1,043.63	6,133.00	17.02
100	6.5	2.32	948.67	7,700.46	12.32
80	6.5	3.25	1,440.93	8,187.11	17.60
90	6.5	3.25	1,393.47	9,680.39	14.39
100	6.5	3.25	1,268.27	10,164.21	12.48
80	6.5	3.81	1,193.88	8,585.95	13.90
90	6.5	3.81	1,307.91	10,627.01	12.31
100	6.5	3.81	1,097.02	11,359.84	9.66
80	9.5	2.32	1,418.87	6,017.99	23.58
90	9.5	2.32	1,873.94	7,600.69	24.65
100	9.5	2.32	1,944.67	8,405.91	23.13
80	9.5	3.25	1,504.81	8,251.06	18.24
90	9.5	3.25	1,839.69	9,903.35	18.58
100	9.5	3.25	1,893.26	10,710.37	17.68
80	9.5	3.81	2,156.22	9,855.85	21.88
90	9.5	3.81	1,905.36	10,686.21	17.83
100	9.5	3.81	1,845.30	12,460.45	14.81

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก7 ผลของพลังงานความร้อนที่ใช้และประสิทธิภาพในการทดลองอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่อง

อุณหภูมิ C	ความเร็วลม m/s	ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (Btu/hr)	ความร้อนที่ใช้ทั้งหมด Btu/hr	ประสิทธิภาพ %
90	2.32	7,265.39	40,646.49	17.87
100	2.32	9,587.42	46,189.22	20.76
110	2.32	9,489.72	52,417.60	18.10
90	2.58	9,698.62	44,794.88	21.65
100	2.58	10,198.65	49,173.15	20.74
110	2.58	9,023.03	55,727.10	16.19
90	2.85	10,257.31	46,890.20	21.88
100	2.85	9,502.77	56,706.85	16.76
110	2.85	9,694.56	64,282.43	15.08

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

ตัวแปรที่มีผลต่อเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในเครื่อง

ความเร็วลม

จากผลการทดลองตามตารางที่ ข.1 ที่ความเร็วลม 2.32 , 2.58 และ 2.85 m/s พบว่าเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มมากขึ้น ค่า Hold up จะลดลงเนื่องจากเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มมากขึ้นทำให้เปลือกไม้ไหลออกจากส่วนอบแห้งได้เร็วขึ้นและในเบดมีช่องว่างมากขึ้น ดังนั้นเมื่อหยุดเครื่องจึงทำให้มีค่า Hold up น้อยลง ส่งผลทำให้เวลาเฉลี่ยที่อยู่ในเครื่องลดลง สมการคำนวณค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในเครื่อง (Mean Residence Time) คือ

$$\tau = \frac{\text{Hold up}}{\text{Feed rate}}$$

ตารางที่ ข.1 ผลของความเร็วลมที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในเครื่อง

Feed rate (kg/min)	ความเร็วลม (m/s)	Hold up (kg)	เวลาเฉลี่ยที่อยู่ในเครื่อง (min)
0.125	2.32	0.191	1.528
0.125	2.58	0.181	1.448
0.125	2.85	0.168	1.344

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณหาความชื้นของการอบแห้งเปลือกไม้แบบกะ โดยใช้แบบจำลองของ Chandran [10]

กำหนดตัวแปรเริ่มต้น $k_1 = 4800$ $k_2 = 0.55$ $k_3 = 1.35$

ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 35 mm

อุณหภูมิอากาศร้อน 353 K อัตราการไหลของอากาศ 0.167 m^3 /s

น้ำหนักของเบด 0.5 kg ความชื้นเริ่มต้น1.06 (kg water / kg dry solid)

เส้นผ่านศูนย์กลางเปลือกไม้ 0.5 cm

การคำนวณ

คำนวณอัตราการอบแห้งจากสมการที่ 19

$$(RW / p_g \overset{\circ}{Q}) = k_1 (u^2 / gd)^{0.6} (d / h)^{0.2} \exp(-4000 / T) \quad (19)$$

$$\frac{(R \times 0.5)}{0.98 \times 0.167} = 4800 \times (2.32^2 / 9.81 \times 0.5)^{0.6} (0.5 / 35)^{0.2} \exp(-4000/353)$$

$$R = 0.0033 \text{ kg water /kg dry solid / s}$$

คำนวณค่าความชื้นวิกฤตจากสมการ 20

$$Cc = k_2 (p_g \overset{\circ}{Q})^{-0.03} W^{0.12} d^{-0.18} Co^{0.35} \exp(-T / 1000) \quad (20)$$

$$Cc = 0.55 \times (0.98 \times 0.167)^{-0.03} \times 0.5^{0.12} \times 0.5^{-0.18} \times 1.06^{0.35} \times \exp(-353 / 1000)$$

$$= 0.286 \text{ kg water / kg dry solid}$$

คำนวณความชื้นสมดุลจากสมการ 21

$$\left[1 - \frac{C^+}{Co}\right] = k_3 (p_g \overset{\circ}{Q})^{0.04} d^{-0.33} Co^{0.260} \exp(1500 / T) \quad (21)$$

$$\left[1 - \frac{C^+}{1.06}\right] = 1.35 (0.98 \times 0.167)^{0.04} 0.5^{-0.33} \times 1.06^{0.26} \exp(1500 / 353)$$

$C^{+} = 0.054$ kg water / kg dry solid

คำนวณค่า β จากสมการ

$$\beta = R / [Cc - C^{+}]$$
$$= 0.00339 / [\, 0.287 - 0.055 \,]$$
$$= 0.014$$

คำนวณค่าความชื้นที่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่จากสมการ 15

$$C = Co - Rt \qquad (15)$$
$$C_{1} = 1.06 - 0.00339 \text{ X } 60$$
$$= 0.86 \text{ kg water / kg dry solid}$$
$$C_{2} = 1.06 - 0.00339 \text{ X } 120$$
$$= 0.65 \text{ kg water / kg dry solid}$$
$$C_{3} = 1.06 - 0.00339 \text{ X } 180$$
$$= 0.45 \text{ kg water / kg dry solid}$$

คำนวณความชื้นช่วงอัตราการอบแห้งลดลงจากสมการที่ 17

$$C = C^{+} + (\, Cc - C^{+}) \exp [\, -\beta(t-tc)] \qquad (17)$$
$$C_{5} = 0.055 + (\, 0.29 - 0.055 \,)\exp (0.015\, (\, 300 - 240)\,)$$
$$= 0.15 \text{ kg water / kg dry solid}$$
$$C_{8} = 0.055 + (\, 0.29 - 0.055 \,)\exp (0.015\, (\, 480 - 240)\,)$$
$$= 0.06 \text{ kg water / kg dry solid}$$
$$C_{10} = 0.055 + (\, 0.29 - 0.055 \,)\exp (0.015\, (\, 600 - 240)\,)$$
$$= 0.05 \text{ kg water / kg dry solid}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณหาความชื้นของการอบแห้งเปลือกไม้แบบต่อเนื่อง โดยใช้แบบจำลอง Chandran [10]

กำหนดตัวแปรเริ่มต้น $k_1 = 4800$ $k_2 = 0.55$ $k_3 = 1.35$

ความเร็วลม 2.32 m/s ความสูงของเบด 100 mm

อุณหภูมิอากาศร้อน 363 K อัตราการไหลของอากาศ 0.167 m^3 /s

น้ำหนักของเบด 0.191 kg ความชื้นเริ่มต้น1.24(kg water / kg dry solid)

เส้นผ่านศูนย์กลางเปลือกไม้ 0.5 cm อัตราการป้อน 0.125 kg /min

การคำนวณ

คำนวณอัตราการอบแห้งจากสมการที่ 19

$$(RW / p_g \mathring{Q}) = k_1 (u^2 / gd)^{0.6} (d / h)^{0.2} \exp (-4000 / T) \quad (19)$$

$$\frac{(R \times 0.191)}{0.98 \times 0.167} = 4800\times(2.32^2 / 9.81 \times 0.5)^{0.6} (0.5 / 100)^{0.2} \exp (-4000/363)$$

$$R = 0.0129 \text{ kg water /kg dry solid / s}$$

คำนวณค่าความชื้นวิกฤตจากสมการ 20

$$Cc = k_2 (p_g \mathring{Q})^{-0.03} W^{0.12} d^{-0.18} Co^{0.35} \exp (- T / 1000) \quad (20)$$

$$Cc = 0.55 \times (0.98 \times 0.167)^{-0.03} \times 0.191^{0.12} \times 0.5^{-0.18} \times 1.24^{0.35} \times \exp(-363 / 1000)$$

$$= 0.267 \text{ kg water / kg dry solid}$$

คำนวณความชื้นสมดุลจากสมการ 21

$$\left[1- \frac{C^+}{Co} \right] = k_3 (p_g \mathring{Q})^{0.04} d^{-0.33} Co^{0.260} \exp (1500 /T) \quad (21)$$

$$\left[1- \frac{C^+}{1.24} \right] = 1.35 (0.98 \times 0.167)^{0.04} 0.5^{-0.33} \times 1.24^{0.26} \exp (1500 / 363)$$

$$C^+ = 0.0067 \text{ kg water / kg dry solid}$$

คำนวณค่า β จากสมการ

$$\beta = R / [Cc - C^{+}]$$

$$= 0.013 / [\ 0.27 – 0.0.0068\ ]$$

$$= 0.049$$

เวลาเฉลี่ยที่อยู่ในเครื่อง = Hold up / Feed rate

= 0.191 kg / 0.125 kg /min

= 91.97 s

คำนวณความชื้นจากสมการ 24

$$\frac{\overline{C}}{Co} = 1 + \frac{R\overline{t}}{Co}\left[\frac{\beta\overline{t}\exp(-\theta c)}{\beta\overline{t}+1} - 1\right] \qquad (24)$$

$$C_1 / Co = 1 + \frac{0.013 \times 91.97}{1.24}\left[\frac{(0.0498 \times 91.97)}{0.0498 \times 91.97 + 1}\exp\frac{60}{180} - 1\right]$$

$$= 0.60 \text{ kg water / kg dry solid}$$

$$C_2 / Co = 1 + \frac{0.013 \times 91.97}{1.24}\left[\frac{(0.0498 \times 91.97)}{0.0498 \times 91.97 + 1}\exp\frac{120}{180} - 1\right]$$

$$= 0.44 \text{ kg water / kg dry solid}$$

$$C_3 / Co = 1 + \frac{0.013 \times 91.97}{1.24}\left[\frac{(0.0498 \times 91.97)}{0.0498 \times 91.97 + 1}\exp\frac{180}{180} - 1\right]$$

$$= 0.32 \text{ kg water / kg dry solid}$$

$$C_5 / Co = 1 + \frac{0.013 \times 91.97}{1.24}\left[\frac{(0.0498 \times 91.97)}{0.0498 \times 91.97 + 1}\exp\frac{300}{180} - 1\right]$$

$$= 0.18 \text{ kg water / kg dry solid}$$

$$C_8 / Co = 1 + \frac{0.013 \times 91.97}{1.24}\left[\frac{(0.0498 \times 91.97)}{0.0498 \times 91.97 + 1}\exp\frac{480}{180} - 1\right]$$

$$= 0.18 \text{ kg water / kg dry solid}$$

$$C_{10} / Co = 1 + \frac{0.013 \times 91.97}{1.24}\left[\frac{(0.0498 \times 91.97)}{0.0498 \times 91.97 + 1}\exp\frac{600}{180} - 1\right]$$

$$= 0.18 \text{ kg water / kg dry solid}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

น.ส.จำลักษณ์ ศรีนาคเรือง เกิดเมื่อวันที่ 29 สิงหาคม พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย