

การจำลองแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง



นาย ชีระยุทธ หลีจิตร

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

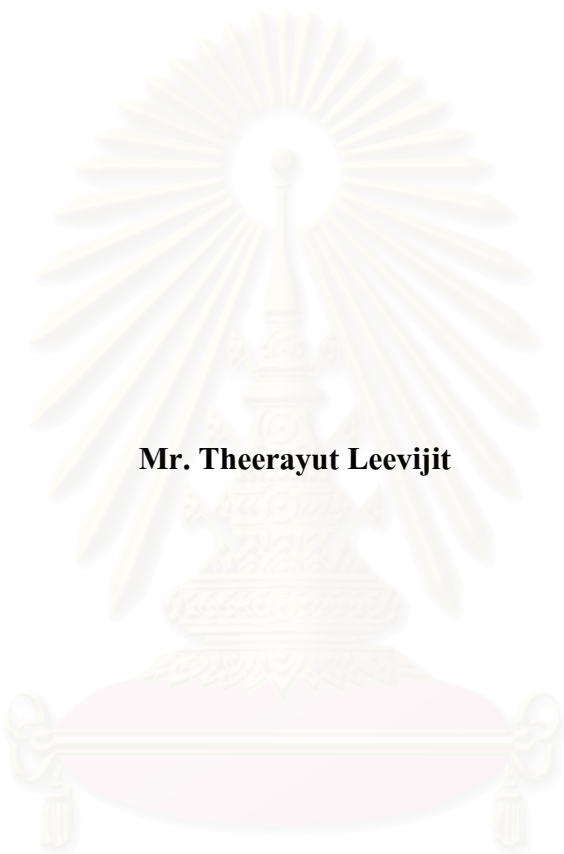
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-519-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SIMULATION OF THE COUNTER FLOW BAGASSE DRYER



Mr. Theerayut Leevijit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-346-519-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง
โดย นาย ธีระยุทธ หลีวิจิตร
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรัญญากรณ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศรี จรุงเรือง)

ธีระยุทธ หลีวิจิตร : การจำลองแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง (SIMULATION OF THE COUNTER FLOW BAGASSE DRYER) : อ.ที่ปรึกษา :รศ.ดร.มานิจ ทองประเสริฐ 170หน้า
ISBN 974-346-519-7

วัตถุประสงค์หลักของการวิจัย เป็นการศึกษาเพื่อหารูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อย สำหรับใช้ในการจำลองแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง เพื่อใช้ในการช่วยออกแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

การศึกษาได้กระทำทั้งการทดลองและการจำลองแบบของเครื่องอบแห้งกากอ้อย 2 แบบ คือ เครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิ่ง และเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง ซึ่งมีขนาด 22.5 x 22.5 x 40 เซนติเมตร และ 22.5 x 22.5 x 30 เซนติเมตรตามลำดับ และใช้ตัวอย่างกากอ้อยจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลจังหวัดสุพรรณบุรี ทดลองที่ช่วงอุณหภูมิร้อน 170 ถึง 200 °C ความชื้นลมร้อน 0.016186 ถึง 0.019059 กก.น้ำ ต่อ กก.อากาศแห้ง ความเร็วลมร้อน 0.610 ถึง 0.804 เมตรต่อวินาที ความชื้นตั้งต้นของกากอ้อย 70 ถึง 125 % มาตรฐานแห้ง และที่อัตราการไหล 14 ถึง 18 กก.กากอ้อยขึ้น ต่อ ชม.สำหรับเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

ผลสรุปที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองแบบรูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยที่ได้อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\frac{(M - M_c)}{(M_i - M_c)} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-ckt)$$

เมื่อ $a = \frac{8}{\pi^2}$

c - ค่าคงที่ได้จากการทดลอง(ในที่นี้ได้ค่าเท่ากับ 10.0)

และ $k = 0.0019 \exp(0.0073T) + 0.0292 \exp(-0.89 A_b) + 0.00078 V_a + 0.00057 W^{-0.57} - 0.00088V \exp(-0.895) - 0.0314$

เมื่อ T - อุณหภูมิลมร้อน (°C)

A_b - ขนาดอนุภาคกากอ้อย(m.)

V_a - ความเร็วลมร้อน(m/s)

W - ความชื้นสัมบูรณ์ลมร้อน(kg/kg dry air)

และจากการประเมินโรงงานตัวอย่างที่มีกำลังการหนี้อ้อยที่ 100 ตันต่อชม.เมื่อมีการอบแห้งกากอ้อยจากความชื้น 50 % ให้เหลือ 35 % มาตรฐานเปียก โดยการใช้แหล่งความร้อนจากก๊าซไอเสียของโรงงานที่ 200 °C สามารถประหยัดการใช้กากอ้อยเพิ่มขึ้นได้ 2 ตันต่อชม. ซึ่งคิดเป็นปริมาณการประหยัดกากอ้อยได้เพิ่มขึ้น 8 % ของปริมาณการใช้กากอ้อยเดิม

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา..... 2543

ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

THEERAYUT LEEVIJIT : SIMULATION OF THE COUNTER FLOW BAGASSE
 DRYER : THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. MANIT THONGPRASERT , Ph.D.
 170 PP. ISBN 974-346-519-7

The main object of this research is to find the appropriate form of thin layer equation of bagasse drying for using in simulation of the counter flow bagasse dryer that to aid for design process of the counter flow bagasse dryer.

This research included experiment and simulation of two types of bagasse dryer , packed bed and counter flow bagasse dryer. Test sections of dryer are 22.5 x 22.5 x 40.0 cms and 22.5 x 22.5 x 30.0 cms, respectively. Sample bagasse use bagasse from State Enterprise Group factory, Suphanburi. Testing conditions are hot air temperature at 170 to 200 °C , hot air humidity at 0.016180 to 0.019059 kg water kg dry air⁻¹ , hot air velocity at 0.610 to 0.804 ms⁻¹ , initial bagasse moisture at 70 to 125 % dry basis and mass flowrate of moist bagasse at 14 to 18 kg moist bagasse hr⁻¹ for counter flow bagasse dryer.

Conclusion from investigation and comparison of results of experiment and simulation shows that the appropriate thin layer equation of bagasse drying in following form.

$$\frac{(M - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-ckt)$$

Where $a = \frac{8}{\pi^2}$

c – experimental constant (in this research is 10.0)

And $k = 0.0019 \exp(0.0073T) + 0.0292 \exp(-0.89 A_b) + 0.00078 V_a + 0.00057 W^{0.57} - 0.00088 V_a \exp(-0.895) - 0.0314$

Where T – Hot air temperature (°C)

A_b – Dimension of bagasse particle(m.)

V_a – Hot air velocity(ms⁻¹)

W – Hot air absolute humidity(kg water kg dry air⁻¹)

And from, evaluation of sample factory that has production rate at 100 tonnes cane per hour , by using bagasse drying from initial moisture 50 % to 35 % wet basis , that use heat source from 200 °C flue gas , can increase bagasse save is 2 tonnes per hour that equivalent to 8 % of bagasse consumption.

Department..... Mechanical Engineering
 Field of study..... Mechanical Engineering
 Academic year..... 2000

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รศ.ดร.มานิจ ทองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ ซึ่งท่านอาจารย์ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ งานวิจัยได้สำเร็จออกมา

กราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ ตลอดจนคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ที่กรุณามอบทุนสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณ ภูสิฏฐ อิศระญาณพงศ์ และ คุณ สิริพงศ์ เอี่ยมชัยมงคล ที่ได้ช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และ น้องๆปริญญาโท และบุคคลที่เกี่ยวข้องที่ได้ให้กำลังใจ คำแนะนำ และการช่วยเหลือมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ชายทั้งสองคน ซึ่งสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ส่วนประกอบของกากอ้อย.....	5
2.3 ค่าความร้อนของการเผาไหม้.....	7
2.4 การพัฒนาเครื่องอบแห้งกากอ้อย.....	9
2.5 การศึกษากระบวนการอบแห้งกากอ้อยทางทฤษฎี.....	12
3 ทฤษฎีพื้นฐานของการอบแห้ง.....	14
3.1 บทนำ.....	14
3.2 ความรู้พื้นฐานในการอบแห้ง.....	14
3.3 ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ.....	15
3.4 ช่วงการอบแห้งที่อัตราการอบแห้งคงที่.....	15
3.5 ช่วงการอบแห้งที่อัตราการอบแห้งลดลง.....	16
3.5.1 บทนำเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน.....	16
3.5.2 The Liquid Diffusion Theory.....	17
3.5.3 Capillary Flow Theory.....	19
3.5.4 Internal Evaporation.....	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5.5 Empirically Based Equations.....	20
4 การวิเคราะห์สมการของระบบอบแห้ง.....	22
4.1 บทนำ.....	22
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง.....	22
4.2.1 พิจารณาการสมดุลทางพลังงานของลมร้อน.....	25
4.2.2 พิจารณาการสมดุลของพลังงานความร้อนของกากอ้อย.....	27
4.2.3 พิจารณาการสมดุลมวลของลมร้อนและกากอ้อย.....	30
4.2.4 สมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อย.....	32
4.3 สรุประบบสมการคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง...	33
5 การจำลองแบบของระบบอบแห้ง.....	34
5.1 บทนำ.....	34
5.2 ความสัมพันธ์พื้นฐานสำหรับการจำลองแบบ.....	34
5.2.1 ค่าคงที่ของการอบแห้งของกากอ้อย.....	34
5.2.2 สมการชั้นบางของการอบแห้ง.....	35
5.2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	36
5.2.4 การอิมิตัวของลมร้อนที่ใช้อบ.....	37
5.2.5 ความชื้นสมดุล.....	39
5.3 การจำลองแบบสำหรับเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่ง.....	39
5.3.1 ทั่วไป.....	39
5.3.2 การหาผลเฉลยของการจำลองแบบ.....	39
5.4 การจำลองแบบสำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง.....	43
5.4.1 ทั่วไป.....	43
5.4.2 การหาผลเฉลยของการจำลองแบบ.....	45
6 การทดลอง.....	48
6.1 บทนำ.....	48
6.2 ลักษณะของกากอ้อยที่ใช้ในการทดลอง.....	49
6.3 เครื่องทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิ่ง.....	51
6.4 ขั้นตอนการทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิ่ง.....	52
6.5 เครื่องทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง.....	53
6.6 ขั้นตอนการทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง.....	53

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
7 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำลองแบบ.....	70
7.1 บทนำ.....	70
7.2 เครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิง.....	70
7.2.1 ผลการทดลอง.....	70
7.2.2 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองแบบ.....	79
7.3 เครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง.....	98
7.3.1 ผลการทดลอง.....	98
7.3.2 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองแบบ.....	102
7.4 สรุปผล.....	110
8 การประเมินสภาวะการทำงานของโรงงานน้ำตาลตัวอย่าง.....	111
8.1 บทนำ.....	111
8.2 ศักยภาพของความร้อนจากก๊าซไอเสียที่ไซบอบแห้งกากอ้อยได้.....	111
8.3 การออกแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง.....	114
9 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	117
9.1 สรุปผลการวิจัย.....	117
9.2 ข้อเสนอแนะ.....	120
รายการอ้างอิง.....	122
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง.....	126
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการจำลองแบบ.....	137
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลในเตาเผา.....	148
ภาคผนวก ง โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง.....	153
ประวัติผู้เขียน.....	170

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Average Ultimate Analysis of The Chemical composition of Dry Bagasse.....	6
2.2 Analysis of Whole Bagasse.....	7
5.1 ความชื้นสมดุลของไม้(มาตรฐานแห้ง).....	38
6.1 ขนาดตะแกรง.....	49
6.2 ขนาดอนุภาคกากอ้อย.....	50
6.3 อัตราส่วนโดยมวลของกากอ้อยแต่ละขนาด.....	50
7.1 สภาวะการทดลองเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบเบดนิ่ง.....	71
7.2 ระยะเวลาการอบแห้ง(เครื่องอบแห้งแบบเบดนิ่ง).....	81
7.3 ความชื้นกากอ้อยเฉลี่ยทั้งเบดที่เวลาสุดท้าย.....	82
7.4 สภาวะการทดลองเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง.....	98
7.5 ความชื้นของกากอ้อยที่ทางออกของเครื่องอบแห้ง ณ เวลาสุดท้าย.....	102
7.6 ระยะเวลาการอบแห้ง(เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง).....	103
8.1 ผลการจำลองแบบขนาดเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง.....	114

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงลักษณะของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง.....	22
4.2 การเคลื่อนที่ของลมร้อนและกากอ้อยผ่านชั้นบางตลอดความ หนาของเครื่องอบแห้ง.....	24
4.3 แสดงการใช้ค่าตัวแปร Input และ Output ของชั้นบาง.....	24
4.4 การพิจารณาชั้นบางที่มีความหนา dx	25
5.1 การเคลื่อนที่ของลมร้อนผ่านชั้นบางตลอดความหนาของ เครื่องอบแห้ง.....	40
5.2 แสดงการใช้ค่าตัวแปร Input และ Output ของชั้นบาง.....	40
5.3 การเคลื่อนที่ของลมร้อนและกากอ้อยผ่านชั้นบางตลอด ความหนาของเครื่องอบแห้ง.....	44
5.4 แสดงการใช้ค่าตัวแปร Input และ Output ของชั้นบาง.....	45
5.5 การพิจารณาชั้นบางที่มีความหนา Δx	46
6.1 ภาพแสดงอนุภาคกากอ้อย – Size No.1.....	55
6.2 ภาพแสดงอนุภาคกากอ้อย – Size No.2.....	56
6.3 ภาพแสดงอนุภาคกากอ้อย – Size No.3.....	57
6.4 ภาพแสดงอนุภาคกากอ้อย – Size No.4.....	58
6.5 ภาพแสดงอนุภาคกากอ้อย – Size No.5.....	59
6.6 ภาพแสดงเครื่องมือวัดขนาดอนุภาคกากอ้อย.....	60
6.7 ภาพแสดงระบบอุปกรณ์การทดลองของเครื่อง อบแห้งแบบเบดนิ่ง.....	61
6.8 ภาพแสดงระบบอุปกรณ์การทดลองของเครื่อง อบแห้งแบบไหลสวนทาง.....	62
6.9 ภาพแสดงชุดอุปกรณ์การทดลอง.....	63
6.10 ภาพแสดง Blower, Flow Control Valva และ Flow Meter(Orifice).....	63
6.11 ภาพแสดง Heater และ Temperature Control Unit.....	64
6.12 ภาพแสดง Test Section ของเครื่องอบแห้งแบบเบดนิ่ง.....	65
6.13 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิลมร้อนภายใน Test Section ของเครื่องอบแห้งแบบเบดนิ่ง.....	66

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14 ภาพแสดง Feed & Discharge Hopper, Test Section และ Screw Conveyer ของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง.....	67
6.15 ภาพแสดง Motor และ Speed Control Unit ของเครื่อง อบแห้งแบบไหลสวนทาง.....	67
6.16 ภาพแสดงอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	68
6.17 ภาพแสดงเครื่องซึ่งละเอียดแบบดิจิตอล.....	68
6.18 ภาพแสดงตู้ที่ใช้ในการอบหาความชื้นของกากอ้อย.....	69
กราฟแสดงผลการทดลองของเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่ง	
7.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#1.....	72
7.2 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 360 วินาที Experiment#1.....	72
7.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#2.....	73
7.4 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 360 วินาที Experiment#2.....	73
7.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#3.....	74
7.6 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 360 วินาที Experiment#3.....	74
7.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#4.....	75
7.8 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 480 วินาที Experiment#4.....	75
7.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#5.....	76
7.10 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 360 วินาที Experiment#5.....	76
7.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#6.....	77
7.12 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 450 วินาที Experiment#6.....	77
7.13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#7.....	78
7.14 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 360 วินาที Experiment#7.....	78

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองแบบโดยใช้สมการชั้นบางที่ 7.1 ของเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่ง	
7.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#1.....	84
7.16 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 360 วินาที Experiment#1.....	84
7.17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#2.....	85
7.18 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 360 วินาที Experiment#2.....	85
7.19 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#3.....	86
7.20 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 360 วินาที Experiment#3.....	86
7.21 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#4.....	87
7.22 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 480 วินาที Experiment#4.....	87
7.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#5.....	88
7.24 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 360 วินาที Experiment#5.....	88
7.25 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#6.....	89
7.26 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 450 วินาที Experiment#6.....	89
7.27 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#7.....	90
7.28 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 360 วินาที Experiment#7.....	90
กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองแบบโดยใช้สมการชั้นบางที่ 7.2 ของเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่ง	
7.29 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนภายในเบต Experiment#1.....	91
7.30 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ที่เวลา 360 วินาที Experiment#1.....	91

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.31 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความร้อนภายในเบด Experiment#2.....	92
7.32 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 360 วินาที Experiment#2.....	92
7.33 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความร้อนภายในเบด Experiment#3.....	93
7.34 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 360 วินาที Experiment#3.....	93
7.35 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความร้อนภายในเบด Experiment#4.....	94
7.36 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 480 วินาที Experiment#4.....	94
7.37 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความร้อนภายในเบด Experiment#5.....	95
7.38 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 360 วินาที Experiment#5.....	95
7.39 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความร้อนภายในเบด Experiment#6.....	96
7.40 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 450 วินาที Experiment#6.....	96
7.41 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความร้อนภายในเบด Experiment#7.....	97
7.42 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 360 วินาที Experiment#7.....	97
กราฟแสดงผลการทดลองของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง	
7.43 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#8.....	99
7.44 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#9.....	99
7.45 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#10.....	100
7.46 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#11.....	100
7.47 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#12.....	101

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.48 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#13.....	101
กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและ ผลการจำลองแบบโดยใช้สมการชั้นบางที่ 7.2 ของเครื่อง อบแห้งแบบไหลสวนทาง	
7.49 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#8.....	104
7.50 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#9.....	104
7.51 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#10.....	105
7.52 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#11.....	105
7.53 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#12.....	106
7.54 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ที่เวลา 15 นาที Experiment#13.....	106
7.55 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออก ที่เวลาต่าง ๆ Experiment#8.....	107
7.56 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออก ที่เวลาต่าง ๆ Experiment#9.....	107
7.57 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออก ที่เวลาต่าง ๆ Experiment#10.....	108
7.58 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออก ที่เวลาต่าง ๆ Experiment#11.....	108
7.59 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออก ที่เวลาต่าง ๆ Experiment#12.....	109
7.60 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออก ที่เวลาต่าง ๆ Experiment#13.....	109

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่

หน้า

8.1 ภาพแสดงระบบการเผาไหม้เมื่อมีเครื่องอบแห้งกากอ้อย เหลือความชื้น 35 % มาตรฐานเปียก,280 % อากาศตามทฤษฎี...	116
ค.1 ภาพแสดงการทำสมดุลมวลของเตาเผาสำหรับกากอ้อยชื้น 50 % มาตรฐานเปียก,280 % อากาศตามทฤษฎี.....	152
ง.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	154



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	
a	ค่าคงที่สำหรับสมการชั้นบาง	
A	พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง,	m^2
A_b	ขนาดอนุภาคของกากอ้อย, m	
c	ค่าคงที่จากการทดลอง	
C_a	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง,	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$
C_b	ค่าความร้อนจำเพาะของกากอ้อยแห้ง,	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$
C_{pb}	ค่าความร้อนจำเพาะของกากอ้อยแห้ง,	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$
C_{pw}	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ,	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$
C_v	ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ,	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$
C_w	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ,	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$
d	ขนาดอนุภาคของวัสดุ,	m
D	สัมประสิทธิ์การแพร่	
G	อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ,	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
G_a	อัตราการไหลของลมร้อน,	$kg\ s^{-1}$
G_b	อัตราไหลของกากอ้อยขึ้น,	$kg\ s^{-1}$
h	เอนทัลปีของลมร้อนก่อนการอบ,	$J\ (kg\ dry\ air)^{-1}$
h'	เอนทัลปีของลมร้อนหลังการอบ,	$J\ (kg\ dry\ air)^{-1}$
$h_c A_s$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน,	$J\ m^{-3}\ s^{-1}\ K^{-1}$
h_f	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน,	$kJ\ s^{-1}\ ^\circ C^{-1}\ m^{-2}$
h_{fg}	ความร้อนในการระเหยของน้ำ,	$kJ\ kg^{-1}$
H_G	ความชื้นของอากาศที่ใช้ออบ, $kg\ kg^{-1}$	
H_S	ความชื้นอิ่มตัวของอากาศที่ใช้ออบ, $kg\ kg^{-1}$	
k	ค่าคงที่ของการอบแห้ง	
K	ค่าคงที่	
K_H	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล,	$kg\ s^{-1}\ m^{-2}$
2ℓ	ความหนาของอนุภาค	
m	น้ำหนักของวัสดุขึ้น,	kg
m_d	น้ำหนักของวัสดุแห้ง,	kg
M	ความชื้นของกากอ้อย,	dry basis
M_1	ความชื้นของกากเข้าของชั้นบางที่ 1,	dry basis

คำอธิบายสัญลักษณ์และค่าย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

M'_1	ความชื้นของกากออกของชั้นบางที่1, dry basis	
M_2	ความชื้นของกากเข้าของชั้นบางที่2, dry basis	
M'_2	ความชื้นของกากออกของชั้นบางที่2, dry basis	
M_b	ความชื้นของกากอ้อยก่อนการอบ, dry basis	
M'_b	ความชื้นของกากอ้อยหลังการอบ, dry basis	
$M_{b1,t1}$	ความชื้นของกากอ้อยเข้าของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที่1, dry basis	
$M'_{b1,t1}$	ความชื้นของกากอ้อยออกของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที่1, dry basis	
$M_{b1,t2}$	ความชื้นของกากอ้อยเข้าของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที่2, dry basis	
$M'_{b1,t2}$	ความชื้นของกากอ้อยออกของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที่2, dry basis	
$M_{b2,t1}$	ความชื้นของกากอ้อยเข้าของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที่1, dry basis	
$M'_{b2,t1}$	ความชื้นของกากอ้อยออกของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที่1, dry basis	
$M_{b2,t2}$	ความชื้นของกากอ้อยเข้าของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที่2, dry basis	
$M'_{b2,t2}$	ความชื้นของกากอ้อยออกของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที่2, dry basis	
M_e	ความชื้นสมดุลของกากอ้อย, dry basis	
M_i	ความชื้นของกากอ้อยตอนเริ่มต้น, dry basis	
p	ความดันบรรยากาศ, kPa	
p_w	ความดันย่อยของไอน้ำ, kPa	
R_b	ความหนาแน่นของกากอ้อยแห้ง, kg dry m ⁻³	
S_a	พื้นที่ผิวจำเพาะกากอ้อย, m ² m ⁻³	
S	พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง, m ²	
t	เวลา, sec.	
$t1$	ช่วงเวลาที่1	
$t2$	ช่วงเวลาที่2	
t_d	อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, °C	
t_G	อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบ, °C	
t_s	อุณหภูมิผิวของวัสดุ, °C	
T	อุณหภูมิลมร้อน, °C	
T_1	อุณหภูมิลมร้อนเข้าของชั้นบางที่1, °C	
T'_1	อุณหภูมิลมร้อนออกของชั้นบางที่1, °C	
T_2	อุณหภูมิลมร้อนเข้าของชั้นบางที่2, °C	

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
T'_2	อุณหภูมิลมออกเข้าของชั้นบางที่2, $^{\circ}\text{C}$
T_a	อุณหภูมิของลมร้อนก่อนการอบ, $^{\circ}\text{C}$
$T_{a1,t1}$	อุณหภูมิของลมร้อนเข้าของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที1, $^{\circ}\text{C}$
$T'_{a1,t1}$	อุณหภูมิของลมร้อนออกของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที1, $^{\circ}\text{C}$
$T_{a1,t2}$	อุณหภูมิของลมร้อนเข้าของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที2, $^{\circ}\text{C}$
$T'_{a1,t2}$	อุณหภูมิของลมร้อนออกของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที2, $^{\circ}\text{C}$
$T_{a2,t1}$	อุณหภูมิของลมร้อนเข้าของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที1, $^{\circ}\text{C}$
$T'_{a2,t1}$	อุณหภูมิของลมร้อนออกของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที1, $^{\circ}\text{C}$
$T_{a2,t2}$	อุณหภูมิของลมร้อนเข้าของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที2, $^{\circ}\text{C}$
$T'_{a2,t2}$	อุณหภูมิของลมร้อนออกของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที2, $^{\circ}\text{C}$
T'_a	อุณหภูมิของลมร้อนหลังการอบ, $^{\circ}\text{C}$
T_b	อุณหภูมิของกากอ้อยก่อนการอบ, $^{\circ}\text{C}$
T'_b	อุณหภูมิของกากอ้อยหลังการอบ, $^{\circ}\text{C}$
$T_{b1,t1}$	อุณหภูมิของกากอ้อยเข้าของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที1, $^{\circ}\text{C}$
$T'_{b1,t1}$	อุณหภูมิของกากอ้อยออกของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที1, $^{\circ}\text{C}$
$T_{b1,t2}$	อุณหภูมิของกากอ้อยเข้าของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที2, $^{\circ}\text{C}$
$T'_{b1,t2}$	อุณหภูมิของกากอ้อยออกของชั้นบางที่1ช่วงเวลาที2, $^{\circ}\text{C}$
$T_{b2,t1}$	อุณหภูมิของกากอ้อยเข้าของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที1, $^{\circ}\text{C}$
$T'_{b2,t1}$	อุณหภูมิของกากอ้อยออกของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที1, $^{\circ}\text{C}$
$T_{b2,t2}$	อุณหภูมิของกากอ้อยเข้าของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที2, $^{\circ}\text{C}$
$T'_{b2,t2}$	อุณหภูมิของกากอ้อยออกของชั้นบางที่2ช่วงเวลาที2, $^{\circ}\text{C}$
V_a	ความเร็วลมร้อน, ms^{-1}
V_b	ความเร็วของกากอ้อย, ms^{-1}
w	ความชื้นของวัสดุ, dry basis
w_c	ค่าความชื้นวิกฤต, dry basis
w_e	ความชื้นสมดุล, dry basis
w_i	ความชื้นเริ่มต้น, dry basis
W	ความชื้นลมร้อน, $\text{kg water (kg dry air)}^{-1}$
W_1	ความชื้นของลมร้อนเข้าของชั้นบางที่1, $\text{kg water (kg dry air)}^{-1}$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
W'_1	ความชื้นของลมร้อนออกของชั้นที่บางที่1, kg water (kg dry air) ⁻¹
W_2	ความชื้นของลมร้อนเข้าของชั้นที่บางที่2, kg water (kg dry air) ⁻¹
W'_2	ความชื้นของลมร้อนออกของชั้นที่บางที่2, kg water (kg dry air) ⁻¹
W_a	ความชื้นของลมร้อนก่อนการอบ, kg water (kg dry air) ⁻¹
W'_a	ความชื้นของลมร้อนหลังการอบ, kg water (kg dry air) ⁻¹
$W_{a1,t1}$	ความชื้นของลมร้อนเข้าของชั้นบางที่1 ช่วงเวลาที่1, kg (kg dry air) ⁻¹
$W'_{a1,t1}$	ความชื้นของลมร้อนออกของชั้นบางที่1 ช่วงเวลาที่1, kg (kg dry air) ⁻¹
$W_{a1,t2}$	ความชื้นของลมร้อนเข้าของชั้นบางที่1 ช่วงเวลาที่2, kg (kg dry air) ⁻¹
$W'_{a1,t2}$	ความชื้นของลมร้อนออกของชั้นบางที่1 ช่วงเวลาที่2, kg (kg dry air) ⁻¹
$W_{a2,t1}$	ความชื้นของลมร้อนเข้าของชั้นบางที่2 ช่วงเวลาที่1, kg (kg dry air) ⁻¹
$W'_{a2,t1}$	ความชื้นของลมร้อนออกของชั้นบางที่2 ช่วงเวลาที่1, kg (kg dry air) ⁻¹
$W_{a2,t2}$	ความชื้นของลมร้อนเข้าของชั้นบางที่2 ช่วงเวลาที่2, kg (kg dry air) ⁻¹
$W'_{a2,t2}$	ความชื้นของลมร้อนออกของชั้นบางที่2 ช่วงเวลาที่2, kg (kg dry air) ⁻¹
W_d	ความชื้นมาตรฐานแห้ง
W_w	ความชื้นมาตรฐานเปียก
λ	ความร้อนในการระเหยของน้ำ, kJ kg ⁻¹
θ	เวลา, secs.
α	$\ln(p_w)$
ω	ความชื้นของวัสดุ, dry basis
λ	ความร้อนในการระเหยของน้ำ, kJ kg ⁻¹
ρ_a	ความหนาแน่นของลมร้อน, kg m ⁻³
ρ_b	ความหนาแน่นของกากอ้อยแห้ง, kg dry m ⁻³
ρ_s	ความหนาแน่นของวัสดุ, kg m ⁻³
φ	อุณหภูมิของกากอ้อย, °C
φ_1	อุณหภูมิของกากอ้อยเข้าของชั้นบางที่1, °C
φ'_1	อุณหภูมิของกากอ้อยออกของชั้นบางที่1, °C
φ_2	อุณหภูมิของกากอ้อยเข้าของชั้นบางที่2, °C
φ'_2	อุณหภูมิของกากอ้อยออกของชั้นบางที่2, °C
ε	เปอร์เซ็นต์ช่องว่างในกองกากอ้อย
ΔM	ผลต่างความชื้นของกากอ้อย, dry basis

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
Δt	ผลต่างของเวลา, s
Δw	ผลต่างความชื้นของลมร้อน, kg water (kg dry air) ⁻¹
Δx	ผลต่างของความหนา, m
$\frac{dw}{d\theta}$	อัตราการอบแห้ง (kg s ⁻¹)
$\frac{\partial w}{\partial \theta}$	อัตราการอบแห้ง
$\frac{\partial w}{\partial \theta_c}$	อัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ kg h ⁻¹ (kg dry solid) ⁻¹
$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}$	ความแตกต่างของความชื้นในทิศทาง x,y,z

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิทยานิพนธ์

ปกติกากอ้อยที่ได้จากการกระบวนการหีบอ้อยเพื่อผลิตน้ำตาลในโรงงานน้ำตาลโดยทั่วไป จะมีความชื้นประมาณ 50% (มาตรฐานเปียก) และประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

น้ำ	50 %
น้ำตาล	2 %
ไฟเบอร์	46 %
อื่นๆ	2 %

กากอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างมากมาย เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ อาหารสัตว์ ฯลฯ แต่ที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันนี้คือการใช้กากอ้อยเป็น เชื้อเพลิงในโรงงานน้ำตาลนั่นเอง ปัจจุบันอุตสาหกรรมโรงงานน้ำตาลในประเทศไทยมี 46 โรงงาน ซึ่งหีบอ้อยปีละประมาณ 50 ล้านตัน และมีกากอ้อยประมาณ 15 ล้านตัน เทียบเท่าปริมาณ พลังงานความร้อน 15×10^7 GJ/ปี หรือเทียบเท่า 3.3×10^6 ตันน้ำมันปิโตรเลียม

ในโรงงานน้ำตาลสามารถแบ่งการใช้พลังงานของโรงงานออกได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ ดังนี้ ส่วนแรกจะเป็นส่วนสกัดน้ำหวานออกจากอ้อย ในส่วนนี้จะใช้ superheat steam ที่กังหันไอน้ำเพื่อขับลูกกลิ้งบด (Roller Mill) เพื่อหีบน้ำอ้อย และส่วนที่สองใช้ไอน้ำอิมตัวที่ออกจากกังหัน ไอน้ำเพื่อระเหยน้ำออกจากน้ำอ้อย การจัดการเกี่ยวกับพลังงานของโรงงานน้ำตาลในปัจจุบันนี้ จะใช้แหล่งพลังงานความร้อนมาจากการเผาไหม้กากอ้อยในเตาเผาของหม้อกำเนิดไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำความดันปานกลางประมาณ 2 MPa ถึง 3 MPa ที่จะใช้ในการขับกังหันไอน้ำและเป็นแหล่งความร้อนให้กับกระบวนการผลิตน้ำตาลภายในโรงงาน

ดังนั้น ประสิทธิภาพของหม้อกำเนิดไอน้ำจะมีผลต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของโรงงานน้ำตาลเป็นอย่างมาก ซึ่งนอกเหนือจากประสิทธิภาพของหม้อกำเนิดไอน้ำแล้ว ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิง คือ ปริมาณความชื้นของกากอ้อยที่จะใช้เป็น เชื้อเพลิง ซึ่งถ้าเราสามารถลดปริมาณความชื้นของกากอ้อยที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงลงได้ เราก็จะสามารถประหยัดปริมาณการใช้กากอ้อยลงได้ด้วย ดังตัวอย่างผลการตรวจวัดและคำนวณการใช้พลังงานของโรงงานน้ำตาลมิตรภู-เวียง จ.ขอนแก่นที่มีกำลังการหีบอ้อย 20,731

ตัน/วัน ในรายงานการศึกษาเรื่องการใช้และการประหยัดพลังงานในโรงงานน้ำตาลโดยสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย[6] เมื่อใช้กากอ้อยความชื้น 35 % เผาไหม้กับอากาศ 161% แทนการใช้กากอ้อยความชื้น 51% จะได้ว่าความร้อนสูญเสียทางก๊าซร้อนซึ่งลดลงจาก 2305.20 kJ/kg(กากอ้อย) เป็น 2154.64 kJ/kg(กากอ้อย) และปริมาณการใช้กากอ้อยรวมลดลง จาก 4282 ตัน/วัน เป็น 3839 ตัน/วัน เมื่อคิดที่อัตราการผลิตไอน้ำเฉลี่ย 399.9 ตัน/ชั่วโมง ส่วนข้อดีอื่นๆของการอบแห้งกากอ้อยที่นอกเหนือจากการประหยัดพลังงานแล้ว ได้แก่

1. ทำให้การสันดาปของกากอ้อยดีขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพของหม้อกำเนิดไอน้ำ
2. ลดต้นทุนการผลิตน้ำตาล เนื่องจากสามารถนำกากอ้อยที่เหลือเพิ่มขึ้นไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นหรือนำไปขายได้ที่ราคาประมาณ 250 บาท/ตัน
3. มีกากอ้อยเหลือเพื่อใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นมากขึ้น

ก๊าซร้อนของเตาหม้อกำเนิดไอน้ำจะใช้เพื่ออุ่นอากาศก่อนป้อนเข้าเตาเผากากอ้อย แล้วปล่อยทิ้งที่อุณหภูมิ 200 °C ที่อัตราการไหล 647.8 ตัน/ชั่วโมง ซึ่งถ้าหากเราสามารถออกแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยที่มีประสิทธิภาพดี และมีความเหมาะสมกับสภาพการดำเนินงานของ โรงงานได้ ก็จะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนการผลิตน้ำตาลในประเทศเราได้

จากข้อมูลของรูปแบบของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งวัสดุประเภทต่างๆ Perry Chemical Engineers' Handbook[3] จะได้ว่าเพื่อให้เกิดความประหยัดในการลงทุนและการดำเนินการ รวมถึงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนที่ดี สำหรับการอบแห้งกากอ้อยอย่างต่อเนื่องโดยใช้ก๊าซร้อนจากปล่องไอเสียของโรงงานน้ำตาล จึงควรเลือกเครื่องอบแห้งที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนโดยตรง 1 ใน 3 แบบดังต่อไปนี้

- 1.Counterflow
- 2.Fluidize-bed
- 3.Pneumatic conveying

และจากการศึกษาผลงานวิจัย Ashworth และ Carter [46] พบว่าในการดำเนินการ อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนแบบต่างๆ ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานจะสำคัญกว่าค่าใช้จ่ายหลัก ดังนั้นในการออกแบบเครื่องอบแห้งจึงต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และอัตราการผลิตเป็นหลัก และเมื่อพิจารณาเรื่องข้อได้เปรียบของประสิทธิภาพเชิงพลังงานแล้วจะได้ว่าเครื่องอบแห้งแบบ Counter flow จะมีค่าสูงที่สุดเนื่องจากมีค่าความ สูญเสียพลังงานเนื่องจากความดันตกคร่อมเบดและพลังงานจลน์สูญเสียของลมร้อนที่ทางออกน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งอีก 2 แบบที่เหลือ

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นโครงการวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งศึกษาวิจัยเพื่อหารูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยสำหรับใช้ในการจำลองแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง ซึ่งสามารถนำรูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยที่ได้ไปสร้างแบบจำลองเพื่อช่วยในการออกแบบและกำหนดตัวแปรสถานะของการทำงานของเครื่องอบแห้ง กากอ้อยแบบไหลสวนทางที่สอดคล้องต่อสภาพการทำงานของโรงงานน้ำตาลต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการอบแห้งของกากอ้อย เพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งของ กากอ้อย
2. ศึกษาวิจัยเพื่อหารูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยสำหรับใช้ในการจำลองแบบของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง
3. ประเมินการประหยัดพลังงานของโรงงานน้ำตาลตัวอย่าง ในกรณีที่มีการใช้เครื่อง อบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางโดยอาศัยแหล่งความร้อนจากปล่องไอเสียของโรงงาน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งกากอ้อย
2. ออกแบบและสร้างเครื่องมือทดลองของเครื่องอบแห้งกากอ้อย 2 แบบ คือ เครื่อง อบแห้งกากอ้อยแบบเบดนิ่ง และเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง ซึ่งมีขนาด 22.5 x 22.5 x 40 เซนติเมตร และ 22.5 x 22.5 x 30 เซนติเมตร ตามลำดับ และใช้ตัวอย่างกากอ้อยจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลจังหวัดสุพรรณบุรี ทดลองที่ช่วงอุณหภูมิความร้อน 170 ถึง 200°C ความชื้นลมร้อน 0.016186 ถึง 0.019059 กก.น้ำ ต่อ กก.อากาศแห้ง ความเร็วลมร้อน 0.610 ถึง 0.804 เมตรต่อวินาที ความชื้นตั้งต้นของกากอ้อย 70 ถึง 125 % มาตรฐานแห้งและที่อัตราการไหล 14 ถึง 18 กก.กากอ้อยชื้น ต่อ ชม.สำหรับเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง เพื่อใช้ศึกษาหารูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการจำลองแบบของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง
3. ทดลองและสรุปผลหารูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยสำหรับใช้ในการจำลองแบบของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง
4. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับช่วยในการศึกษาการจำลองแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง
5. ทำการประเมินการประหยัดพลังงานของโรงงานน้ำตาลตัวอย่าง ในกรณีที่มีการใช้ เครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางโดยอาศัยแหล่งความร้อนจากปล่องไอเสียของโรงงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.ทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งของกากอ้อย
- 2.ทราบถึงรูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยสำหรับใช้ในการจำลองแบบของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นการรวบรวมความรู้ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการอบแห้ง กากอ้อย เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากอ้อยและค่าคุณสมบัติทางความร้อน(thermal properties) โดยเฉพาะค่าความร้อนของการเผาไหม้(calorific value) สำหรับในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งกากอ้อยในอุตสาหกรรมโรงงานน้ำตาลนั้น เริ่มตั้งแต่ช่วงต้นของศตวรรษ (1912) จนถึงปัจจุบัน ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่แล้วจะเป็นในลักษณะของการพัฒนารูปแบบของเครื่องอบแห้ง การพัฒนาระบบการอบแห้งและลักษณะเด่นของมัน โดยจะเน้นอยู่ที่การทดลองและพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างที่ได้จากผลการทดลอง ในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงความรู้เกี่ยวกับการอบแห้งกากอ้อยเชิงทฤษฎี ที่พิมพ์เผยแพร่ถึงปัจจุบัน

2.2 ส่วนประกอบของกากอ้อย

ส่วนประกอบโดยทั่วไปของกากอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาล ได้แสดงไว้โดย Bouvet [22] มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

ความชื้น (Moisture)	50 %
ไฟเบอร์ (Fiber)	48 %
Soluble Solid (ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล)	2 %

เกศสุชา [20] ได้ศึกษาส่วนประกอบของกากอ้อยโดยใช้ตัวอย่างกากอ้อยที่ได้จากโรงงานผลิตน้ำตาลในประเทศไทย ค่าเฉลี่ยของส่วนประกอบเป็นดังนี้

ความชื้น (Moisture)	46-52 %
ไฟเบอร์ (Fiber)	43-52 %
Soluble Solid (ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล)	2-6 %

และได้เปรียบเทียบขนาดไฟเบอร์กับพืชชนิดอื่นดังนี้

ชนิดของพืช	ขนาดของไฟเบอร์เฉลี่ย	
	ความยาว (มม.)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ไมครอน)
กากอ้อย	1.2-1.7	20
ฟางข้าว	0.5	8.5
ไม้ไผ่	3.0-4.0	14
ไม้ใบกว้าง	0.7-1.6	20-40

ซึ่งโดยทั่วไปลักษณะคุณภาพของอ้อยจะขึ้นอยู่กับการผลิตของโรงงานด้วย

ค่าประมาณส่วนประกอบของธาตุต่างๆของกากอ้อยเป็นดังนี้[23]

คาร์บอน	47.0 %
ไฮโดรเจน	6.5 %
ออกซิเจน	44.0 %
ธาตุอื่นๆ	2.5 %

ข้อมูลนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบ กับแหล่งข้อมูลที่ได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้แล้ว จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 Average Ultimate Analysis of The Chemical Composition of Dry Bagasse

	Kelly[14] (1938)	Deerr[13]	Davis[15] (1947)	M.R.*[16] (1939)	Thromp[45]	Gregory[18] (1944)
Carbon	49.55	46.50	47.90	46.70	44.00	49.00 48.10
Hydrogen	6.20	6.50	6.70	6.20	6.00	7.40 6.10
Oxygen	44.32	46.00	45.40	47.00	48.00	41.80 43.30
Ash,e	1.0	2.0	-	1.2	2.0	1.8 2.5

*M.R.-Mean of results of Kerstein, Geerilgs , Bolk , Kreke and Spencer

ค่าส่วนประกอบของกากอ้อยที่แท้จริงจะขึ้นอยู่กับพันธุ์ของอ้อย ลักษณะของดิน และรูปแบบของกระบวนการผลิตของแต่ละโรงงานด้วย

ส่วนของไฟเบอร์แข็งจะประกอบด้วย cellulose , hemicellulose และ lignin ดังได้แสดงสัดส่วนไว้ในตารางที่ 2.2 [21]

ตารางที่ 2.2 Analysis of Whole Bagasse

VARIETY	AVERAGE SAMPLE 1	AVERAGE SAMPLE 2
Ash	2.5	2.5
Alcohol-Benzene Ext.	3.2	4.4
Pentosan	24.3	21.8
Lignin	21.7	21.7
Cross and Bevan Cellulose	57.2	50.0
Total	108.9	100.4
Crude Cellulose	48.3	49.6

2.3 ค่าความร้อนของการเผาไหม้

2.3.1 บทนำ

ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของกากอ้อยเป็นปริมาณความร้อนที่ถูกปล่อยจากการเผาไหม้ต่อหน่วยน้ำหนักของกากอ้อยที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ปกติจะนิยมใช้กัน 2 ค่า คือ - Gross Calorific Value (G.C.V.) หรือค่าความร้อนสูง และ Net Calorific Value (N.C.V.) หรือค่าความร้อนต่ำ

2.3.2 สมการคำนวณค่าความร้อนของกากอ้อย

Behne[24] ได้รายงานค่า Gross Calorific Value ของกากอ้อยจากการนำกากอ้อยจากหลายๆที่มาทดลองและได้ค่าเฉลี่ย $19,520 \text{ kJ kg}^{-1}$ (dry and ash-free)

Adams et al [26] ได้รายงานค่า Gross Calorific Value สำหรับกากอ้อยของ Louisiana มีค่าเท่ากับ 19,300 kJ kg⁻¹ (dry and ash-free)

และได้มีการศึกษาและการรายงานผลการทดลองเรื่องค่าความร้อนของกากอ้อยของผู้วิจัยรายอื่นๆอีก ซึ่งจะมีความแตกต่างกันออกไป แต่ผลที่ได้จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 19,046 ถึง 19,507 kJ kg⁻¹(dry and ash-free) [14]

Hessey[25] ได้พัฒนาสมการสำหรับคำนวณค่า Gross Calorific Value และค่า Net Calorific Value สำหรับกากอ้อยของออสเตรเลีย

$$\text{G.C.V.} = 19,410 - 51.4\text{P} - 194.10\text{W} \quad \text{kJ kg bagasse}^{-1}$$

$$\text{N.C.V.} = 18,104 - 51.4\text{P} - 205.32\text{W} \quad \text{kJ kg bagasse}^{-1}$$

เมื่อ P-pol % bagasse
W-moisture % bagasse

ซึ่งสมการนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง และจะใช้ได้ในช่วงที่ชี้เถ้าคงที่เท่ากับ 2.7 % เมื่อมีการพิจารณาถึงผลของปริมาณชี้เถ้าด้วย เพื่อให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำมากขึ้น เราจะได้สมการดังนี้

$$\text{G.C.V.} = 199.5(100 - 0.17\text{B} - \text{W} - \text{A} + 0.07\text{AW}) \quad \text{kJ kg}^{-1}$$

$$\text{N.C.V.} = 186.1(100 - 0.18\text{B} - 1.13\text{W} - \text{A} + 0.07\text{AW}) \quad \text{kJ kg}^{-1}$$

เมื่อ A-ash content % dried bagasse
B-brix % bagasse
W-moisture % bagasse

von Pritzelwitz van der Horst [25] ได้พัฒนาสูตรสำหรับคำนวณจากส่วนประกอบของกากอ้อย และมีการใช้อย่างแพร่หลายเช่นเดียวกัน

$$\text{G.C.V.} = 19,037 - 42\text{P} - 190.4\text{W} \quad \text{kJ kg}^{-1}$$

$$\text{N.C.V.} = 17,791 - 42\text{P} - 200.8\text{W} \quad \text{kJ kg}^{-1}$$

เมื่อ P - pol % bagasse
W - moisture % bagasse

Maranhao[12] ได้ศึกษาการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของกากอ้อย เมื่อปริมาณความชื้นลดลง และได้ให้สมการที่ใช้คำนวณค่า Gross Calorific Value (G.C.V.) และ Net Calorific Value (N.C.V.) ของกากอ้อยที่ค่าความชื้นต่างๆ ตามกฎของ Hugot ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{G.C.V.} &= 4,600-12s-46W && \text{kJ kg}^{-1} \\ \text{N.C.V.} &= 4,250-12s-48.5W && \text{kJ kg}^{-1} \end{aligned}$$

โดยที่ W = ความชื้นของกากอ้อย (%)
s = ปริมาณของแข็ง (ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำตาล , %)

จากผลการศึกษาที่ University of West Indies, Trinidad[27] โดยการวัดค่าความร้อนของกากอ้อยจะได้ค่า 15,129 ถึง 4,617 kJ kg⁻¹ และ 15,813 ถึง 5,296 kJ kg⁻¹ สำหรับกากอ้อยที่มีความชื้นจาก 25 % ถึง 65 % (wet basis)

จากผลการศึกษาของสถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย[6] ได้ว่าค่าความร้อนสูงของการเผาไหม้กากอ้อยสำหรับกากอ้อยในประเทศไทยจะมีค่าอยู่ในช่วง 17,830 ถึง 19,482 kJ/kg(กากอ้อยแห้ง)

2.4 การพัฒนาเครื่องอบแห้งกากอ้อย

เป็นที่ยอมรับกันตั้งแต่ช่วงเริ่มแรกของการทำอุตสาหกรรมน้ำตาลแล้วว่า การลดความชื้นของกากอ้อยจะสามารถปรับปรุงการประสิทธิภาพการทำงานของหม้อกำเนิดไอน้ำได้ และก่อนที่จะมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งกากอ้อยขึ้นได้มีการอบแห้งกากอ้อยแบบวิธีต่างๆโดยการตากแห้ง [28]

รายงานฉบับแรกของเครื่องอบแห้งเชิงกลมีขึ้นในปี 1911 เมื่อ Kerr [29] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งกากอ้อยซึ่งสามารถลดความชื้นลงเหลือ 44.5% เครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีลักษณะเป็น โครงสร้างคล้ายหอสูงขนาดใหญ่ซึ่งกากอ้อยจะตกลงมาตามชั้นพื้นเอียงลื่นที่วางซ้อนกันเป็นชั้นๆก๊าซไอน้ำร้อนจะไหลสวนทางขึ้นไปด้านบน อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งแบบนี้ไม่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมน้ำตาล

เครื่องอบแห้งกากอ้อยซึ่งถูกเรียกว่า 'SECHERIES' ถูกใช้ใน Mauritius [28] ตอนประมาณปี 1918 ซึ่งประกอบด้วยระบบสายพานลำเลียงกากอ้อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยจะผ่านเข้าไปอบแห้งกับก๊าซไอเสียร้อนก่อนที่บริเวณฐานของปล่องไอเสีย

ประมาณในช่วงเวลาเดียวกันในประเทศอียิปต์[28] ได้มีการใช้สกรูในการลำเลียงกากอ้อยให้เคลื่อนที่ไปรอบๆปล่องควัน และ กล่องควันของหม้อกำเนิดไอน้ำ ซึ่งส่งผลให้เกิดการอบแห้ง กากอ้อยขึ้นได้ แต่ไม่มีข้อมูลที่เป็นจำนวนตัวเลขของเครื่องอบแบบนี้

การอบแห้งกากอ้อยในประเทศจาเมกาเริ่มมีขึ้นประมาณปี 1928 โดย Holgate [30] สามารถทำให้เครื่องอบแห้งนี้ประสบความสำเร็จได้เป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถช่วยแก้ปัญหาเรื่องเชื้อเพลิงและสามารถทำให้มีกากอ้อยเหลือเพิ่มขึ้นได้ อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยเครื่องลำเลียง กากอ้อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะเป็นรูปวง ก๊าซไอเสียร้อนจะเข้ามาทางด้านล่างผ่านชั้นด้านบนและแทรกซึมผ่านชั้นกากอ้อยไป

เครื่องอบแห้งเพื่อการทดลองถูกพัฒนาขึ้นในประเทศได้วันระหว่างปี 1958 [31] ซึ่งใช้หลักการของการไหลสวนทางของสำหรับกากอ้อยและก๊าซไอเสียร้อน โดยทำการป้อนกากอ้อยเข้าทางด้านบนตกลงมาชิดแซกผ่านและสัมผัสกับก๊าซไอเสียร้อนที่กำลังเคลื่อนที่ขึ้น ผลที่ได้จากการทดลองนี้ สามารถลดความชื้นกากอ้อยลงเหลือ 32%

ในช่วงไม่กี่ปีมานี้ เครื่องอบแห้งแบบ Co-current rotary dryer ได้รับความนิยมและ ประสบผลสำเร็จมากที่สุดสำหรับการติดตั้งเพื่อใช้ในงานอบแห้งกากอ้อย Furines[32] ได้รายงานผลการทดลองของเขาโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบนี้ใน Louisiana เขาได้สรุปปัญหาสำหรับเครื่องอบแห้งแบบนี้เอาไว้ด้วย

การทดลองที่ Raceland ในรัฐหลุยเซียนา สหรัฐอเมริกา[33] ค่าความชื้นของกากอ้อยจะลดลงอยู่ในช่วง 38 ถึง 44 % ซึ่งเป็นค่าความชื้นของกากอ้อยที่มีความเหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งแบบ Rotary dryer ปัญหาต่างๆ ที่มี จะเกิดไฟติดย้อนกลับขึ้นมาที่ตัวป้อนกากอ้อยขึ้น ถ้าอบแห้งกากอ้อยให้มีความชื้นต่ำเกินไป อนุภาคของชี้ถ้าจะติดมากับก๊าซไอเสียร้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้งเมื่อเครื่องแยกอนุภาคทำงานได้ไม่สมบูรณ์ เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนของกากอ้อยทำให้เกิดการเผาไหม้และการทำความสะอาดเตาเผาได้ยากขึ้น

Arrascaeta และ Friedman [34] ได้เสนอแนะการรวมกันของเครื่องอบแบบ Fluidised-Pneumatic transport dryer โดยการใช้ก๊าซร้อนจากปล่องไอเสียในการอบแห้งและแยกกากอ้อย โดยจะมีการป้อนกากอ้อยเข้าสู่ท่อในแนวดิ่ง กากอ้อยที่มีขนาดเล็กจะถูกเป่าให้ลอยขึ้นซึ่งจะเป็น Pneumatic dryer และแยกอนุภาคโดยใช้ไซโคลน อนุภาคกากอ้อยที่มีขนาดใหญ่จะตกลงมาตามท่อซึ่งจะเคลื่อนที่สวนกับลมร้อนที่กำลังเคลื่อนที่ขึ้น ผลของการทดลองในเครื่องต้นแบบที่ 7 ต้นต่อชั่วโมง[35] แสดงให้เห็นว่ากากอ้อยจะถูกอบแห้งจากความชื้น 46 % ลดลงเหลือ 28 % ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพของหม้อกำเนิดไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 72 % เป็น 82 % และการผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 2.25 เป็น 2.59 กิโลกรัมไอน้ำต่อกิโลกรัมกากอ้อย (50 % basis)

The Sugar Research Institute in Mackay , Australia ได้ทำการทดลองโดยการออกแบบท่ออบแห้ง [36] ซึ่งเป็นแบบ fluidised /pneumatic type เพื่อที่จะอบแห้งกากอ้อยให้เหลือ 35 % ปรากฏว่าต้องใช้ท่ออบแห้งที่มีความยาวเพียงไม่กี่เมตร และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 3 ถึง 5 วินาที

Neto [37] ก็ได้ใช้เครื่องอบแห้งแบบ fluidised /pneumatic type โดยใช้ก๊าซไอเสียในการลำเลียงและอบแห้งที่อุณหภูมิ 300 °C พวกเขาได้ความชื้นของกากอ้อยที่ทำได้ 23.9 % ในขณะที่ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 69 % เป็น 80 %

Sharma และ Kochhar [7] ได้ศึกษาข้อมูลของโรงงานตัวอย่าง โดยใช้ระบบอบแห้งแบบ novel pneumatic/suspension drying system พวกเขาสามารถลดความชื้นกากอ้อยได้เหลือ 42 % ที่อัตราการไหลของกากอ้อยที่ 2 t h⁻¹ ในระบบการอบแห้งแบบนี้ส่วนผสมของก๊าซร้อนและกากอ้อยจะถูกเป่าผ่านท่อที่มีความสูง 12 เมตร ในระหว่างที่มีการอบแห้ง

Chen,C.H. และ Tso,H.C. [17] ได้สร้างเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบพาหะลมโดยใช้ความร้อนทิ้งจากไอเสียสำหรับหม้อผลิตไอน้ำแบบ CE 65 t/h และได้ทดลองเดินเครื่องเป็นระยะเวลา 21 ชม. โดยใช้อัตราการป้อนกากอ้อยที่ 25 t/h ผลที่ได้สามารถลดความชื้นกากอ้อยจาก 47.6 % ให้เหลือ 35 % ซึ่งค่า Net Calorific Value ของกากอ้อยเพิ่มขึ้นจาก 1,914 เป็น 2,519 kcal/kg สามารถเผาไหม้ได้ง่ายขึ้นกับปริมาณอากาศส่วนเกินน้อยกว่า, เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหม้อผลิตไอน้ำ , ปริมาณกากอ้อยเหลือเพิ่มขึ้น 1.6 % ของอ้อยที่ใช้ และช่วยลดปริมาณฝุ่นในไอเสีย

ในการพิจารณาเครื่องอบแห้งที่เป็น pneumatic dryer แบบอื่นๆ Maranhao[4] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งซึ่งมีประจำสำหรับแต่ละเตาเผา ซึ่งในเครื่องอบแห้งแบบนี้ก๊าซร้อนและกากอ้อยจะถูกเป่าผ่านขึ้นไปในท่อที่ต่อไปยังไซโคลน จากนั้นกากอ้อยที่ผ่านการอบแล้วจะถูกป้อนเข้าสู่เตาเผา ผลที่ได้จะเพิ่มการผลิตไอน้ำจาก 15.5 เป็น 18.3

% และจะลดความชื้นของกากอ้อยลง 10 ถึง 15 % และระบบนี้ยังต้องการกำลังเพียง 54 % เท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการอบแห้งกากอ้อยแบบอื่นที่มีอยู่แล้ว

และได้มีการประเมินเครื่องอบแห้งที่มีการให้ความร้อนทางอ้อมในอินเดีย Roy et al [5] ได้ออกแบบระบบที่ประกอบด้วยตัวลำเลียงกากอ้อยไปสู่ห้องเผาไหม้ซึ่งก๊าซร้อนจะเคลื่อนที่สวนทางกับกากอ้อย ก๊าซร้อนจะถูกจ่ายมาจากเครื่องอุ่นอากาศโดยใช้ก๊าซไอเสียร้อนเป็นแหล่งความร้อน ในระบบนี้จะต้องการพัฒน์เพิ่มขึ้นมา หรือการเพิ่มขนาดของพัฒน์สำหรับหม้อกำเนิดไอน้ำ การศึกษาการอบดีไมของการอบแบบทำในเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งความชื้นของกากอ้อยจะลดลงเหลือ 47.4 %

อีกตัวอย่างหนึ่งของการศึกษาการอบแห้งโดยการให้ความร้อนทางอ้อม เครื่องอบแห้งเป็นแบบ การพาแบบต่อเนื่อง ซึ่งถูกออกแบบที่ความจุ 10 t h^{-1} [10] อากาศแห้งถูกทำให้ร้อนโดยก๊าซไอเสีย ความชื้นของกากอ้อยที่ลดลงได้ถึง 7 ถึง 10 หน่วย และสามารถเพิ่มการผลิตไอน้ำได้ 10 % ซึ่งผลได้จากการดำเนินการตลอดช่วง 3 ฤดู และได้มีการรายงานเรื่องความเป็นไปได้ในด้านของเศรษฐศาสตร์ด้วย

2.5 การศึกษากระบวนการอบแห้งกากอ้อยทางทฤษฎี

จากที่ผ่านมามองเห็นว่างานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องลักษณะการอบแห้งของกากอ้อยและประยุกต์ใช้ทฤษฎีการอบแห้งโดยตรงในการอบแห้งกากอ้อยนั้นมึ้น้อยมาก

จากการศึกษากระบวนการอบแห้งกากอ้อยเชิงทฤษฎีของ A.C.Pilgrim และ D.R.McGaw[11] ซึ่งได้ทำการทดลองหาสมการความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณค่าคงที่ของการอบแห้งของ กากอ้อยโดยใช้ตัวอย่างกากอ้อยจากแถบแคริบเบียน และได้สรุปผลเป็นสมการเอาไว้ดังสมการที่ (2.1) ซึ่งอัตราการ อบแห้งของกากอ้อยจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลัก 4 ตัว ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน ความชื้นสัมบูรณ์ลมร้อน ขนาดอนุภาคของกากอ้อย และความเร็วของลมร้อน แนวโน้มของค่าคงที่ของการอบแห้งของกากอ้อยจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลมร้อนและความเร็วลมร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อค่าของความชื้นลมร้อนและขนาดอนุภาคของกากอ้อยมีค่าลดลง

$$k = 0.0019 \exp(0.0073T) + 0.0292 \exp(-0.89A_p) + 0.00078V_a + 0.00057 W^{-0.57} - 0.00088V_a \exp(-0.895) - 0.0314 \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- T - อุณหภูมิลมร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
 - A_0 - ขนาดอนุภาคกากก้อย(m.)
 - V_a - ความเร็วลมร้อน(m/s)
 - W - ความชื้นสัมบูรณ์ลมร้อน (kg/kg dry air)

เพราะฉะนั้น ในงานวิจัยนี้จะใช้สมการการคำนวณค่าคงที่ของการอบแห้งกากก้อยของ A.C.Pilgrim และ D.R.McGaw เป็นแนวทางในการวิจัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐานของการอบแห้ง

3.1 บทนำ

ในตอนต้นของบทนี้จะกล่าวถึงความรู้โดยทั่วไปของสิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบแห้งวัสดุ จากนั้นจะแสดงถึงรายละเอียดของกระบวนการในการวิเคราะห์หาสมการชั้นบางของ การอบแห้งโดยอาศัยแบบจำลองทางทฤษฎีในรูปแบบที่แตกต่างกัน และในตอนท้ายของบทนี้ได้แสดงตัวอย่างสมการชั้นบางของการอบแห้งที่มีรูปแบบแตกต่างจากรูปแบบของผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางทฤษฎี ซึ่งนักวิจัยหลายคนได้พัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับกรณีที่ สมการชั้นบางของการอบแห้งที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางทฤษฎีไม่สอดคล้องกับ ข้อมูลการทดลองของพวกเขาเหล่านั้น

3.2 ความรู้พื้นฐานในการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อให้ได้ความชื้นออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย การอบแห้งโดยวิธีที่วัสดุสัมผัสกับลมร้อนโดยตรง (Direct Heating) เมื่อวัสดุขึ้นได้รับความร้อนอุณหภูมิของวัสดุก็จะเพิ่มสูงขึ้น และจะระเหยความชื้นออกสู่ลมร้อนที่ไหลผ่าน ซึ่งมีผลทำให้ความชื้นของวัสดุขึ้นมีค่าลดลง การอบแห้งจะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อวัสดุขึ้นมีความชื้น สมดุลกับความชื้นของลมร้อน

ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุที่ต้องการอบแห้ง จะนิยามในเทอมของความชื้น (Moisture content) ซึ่งจะอยู่ในรูปอัตราส่วน ดังนี้

ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis)

$$W_w = \frac{m - m_d}{m} \quad (3.1)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis)

$$W_d = \frac{m - m_d}{m_d} \quad (3.2)$$

และความสัมพันธ์ระหว่าง W_w และ W_d เป็นดังต่อไปนี้

$$W_w = \frac{W_d}{1 + W_d} \quad (3.3)$$

$$W_d = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (3.4)$$

เมื่อ m - น้ำหนักของวัสดุขึ้น(kg)
 m_d - น้ำหนักของวัสดุแห้ง(kg)
 W_w - ความชื้นมาตรฐานเปียก
 W_d - ความชื้นมาตรฐานแห้ง

โดยทฤษฎีของการอบแห้งแล้วกระบวนการอบแห้งจะเกี่ยวข้องกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนและความชื้นจากอนุภาคชื้นสู่ลมร้อนที่ไหลรอบ โดยปกติแล้วขั้นตอนพื้นฐานในการอบแห้ง จะเริ่มต้นด้วยวัสดุที่มีความชื้นสูงและลดต่ำลงจนเข้าสู่ค่าความชื้นสมดุล ซึ่งสามารถแบ่งกระบวนการอบแห้งได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

1. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ(Heating up period)
2. ช่วงการอบแห้งที่อัตราการอบแห้งคงที่(Constant rate drying period)
3. ช่วงการอบแห้งที่อัตราการอบแห้งลดลง(Falling rate drying period)

3.3 ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ

ในการพัฒนาหลักพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับ 3 ขั้นตอนของการอบแห้ง เป็นการง่ายที่จะสมมุติว่าวัสดุที่นำมาอบเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง โดยที่อุณหภูมิผิวของวัสดุอิ่มตัวด้วยน้ำ ลมร้อนที่ไหลรอบอยู่ที่อุณหภูมิที่เหนือกว่าอุณหภูมิห้อง เมื่อมีการสัมผัสกัน การระเหยจากผิวอิมตัวจะเกิดขึ้น และผลจากการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนจะทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้น

3.4 ช่วงการอบแห้งที่อัตราการอบแห้งคงที่

เมื่อผ่านช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุแล้ว อุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน เมื่อถึงจุดนี้และผิวของวัสดุยังอิมตัวอยู่ อุณหภูมิของวัสดุจะยังคงที่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก ในช่วงนี้อัตราการหายไปของความชื้น สมดุลได้โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนสู่ผิวตามสมการนี้

$$\frac{d\omega}{d\theta} = h A(t_G - t_s)/\lambda \quad (3.5)$$

$$\frac{d\omega}{d\theta} = K_H A(H_s - H_G) \quad (3.6)$$

เมื่อ	$\frac{dw}{d\theta}$	- อัตราการอบแห้ง (kg s ⁻¹)
	h	- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (kJs ⁻¹ °C ⁻¹)
	A	- พื้นที่ของวัสดุ (m ²)
	t _G	- อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบ (°C)
	t _s	- อุณหภูมิผิวของวัสดุ (°C)
	H _G	- ความชื้นของอากาศที่ใช้ออบ (kg kg ⁻¹)
	H _s	- ความชื้นอิ่มตัวของอากาศที่ใช้ออบ (kg kg ⁻¹)
	λ	- ความร้อนในการระเหยของน้ำ (kJ kg ⁻¹)
	K _H	- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (kg s ⁻¹ m ⁻²)

อัตราการถ่ายเทความร้อนจะถูกควบคุมจากปัจจัยภายนอกและสามารถปรับได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าสภาวะภายนอก เช่น ความเร็ว ความชื้น และอุณหภูมิของลมร้อน

3.5 ช่วงการอบแห้งที่อัตราการอบแห้งลดลง

3.5.1 บทนำเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

เมื่อความชื้นที่ผิววัสดุน้อยกว่าความชื้นอิ่มตัว สภาวะของอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะหายไป อุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มมีค่าสูงขึ้นและจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ออบในที่สุด

ซึ่งช่วงแรกของช่วงการอบแห้งที่อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการสูญเสียความชื้นจะลดลงตามพื้นที่ผิวเปียกที่ลดลง อัตราการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในไม่เพียงพอที่จะทำให้อยู่ในสภาวะผิวอิ่มตัว ในช่วงที่สองของช่วงการอบแห้งที่อัตราการอบแห้งลดลงระนาบของการระเหย (plane of evaporation) จะเคลื่อนตัวจากผิวนอกเข้าสู่ภายในวัสดุ ความชื้นจะเคลื่อนตัวจากจุดกลางของวัสดุสู่ระนาบของการระเหยโดยการแพร่ของของเหลว(liquid diffusion) หรือ โดยแรงคาпилลารี(capillary forces) ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนที่จนถึงจุดกลางของวัสดุในที่สุด เมื่อการอบแห้งสิ้นสุดลง ค่าความชื้นจะมีค่าเท่ากับค่าความชื้นสมดุล

ได้มีการเสนอทฤษฎีที่อธิบายถึงกระบวนการการถ่ายเทความชื้นที่เกิดขึ้นในช่วงการ อบแห้งที่อัตราการอบแห้งลดลงไว้หลายทฤษฎี ซึ่ง Kisakurek[38] ได้จัดไว้เป็นหมวดหมู่ที่สำคัญ ดังนี้

- 1.The Liquid diffusion theory
- 2.Capillary flow theory
- 3.Heat and mass transfer with internal evaporation

3.5.2 The Liquid Diffusion Theory

ในทฤษฎีนี้ ตัวที่ควบคุมการถ่ายเทความชื้นคือการแพร่ของของเหลว ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างอากาศและผิวของอนุภาค ทฤษฎีนี้มีการยืนยันแล้วว่าสามารถใช้สมการการแพร่ที่สภาวะไม่คงตัวพื้นฐาน (basic unsteady state diffusion equation) ได้

$$\frac{\partial \omega}{\partial \theta} = D \left[\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right] \quad (3.7)$$

เมื่อ	$\frac{\partial \omega}{\partial \theta}$	- อัตราการอบแห้ง
	D	- สัมประสิทธิ์การแพร่
	$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}$	- ความแตกต่างของความชื้นในทิศทาง x,y,z

สมการในระบบแกนมุมฉากนี้ปกติจะใช้กับวัสดุที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม ซึ่งมีความใกล้เคียงกับลักษณะของอนุภาคกากอ้อยที่เป็นแท่งสี่เหลี่ยมสำหรับการพิจารณาในการวิจัยนี้ และได้มีการพัฒนาสมการในลักษณะที่เหมือนกันนี้สำหรับระบบแกนทรงกระบอกและแกนทรงกลมเพื่อใช้ในการพิจารณาสำหรัวัสดุที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกและทรงกลม Sherwood[39] ได้พัฒนาผลเฉลยของสมการตั้งต้นดังกล่าวสำหรับวัสดุที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมและมีความยาว (long slab) โดยคิดการถ่ายเทความชื้นจาก 2 ด้าน ซึ่งได้ผลเฉลยทั่วไปดังรูปสมการที่ 3.8

$$\frac{w - w_e}{w_i - w_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-D\theta \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 \right] + \frac{1}{9} \exp \left[-9D\theta \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 \right] + \frac{1}{25} \exp \left[-25D\theta \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 \right] + \dots$$

...(3.8)

- เมื่อ $2l$ - ความหนาของอนุภาค
 w - ความชื้น(dry basis)
 w_i - ความชื้นเริ่มต้น(dry basis)
 w_e - ความชื้นสมดุล(dry basis)
 θ - เวลา(secs.)

สำหรับกรณีที่ค่าน้อยๆของ l และ ค่ามากๆของ D หรือ θ เมื่อผลรวมของเทอมที่สองและเทอมถัดไปในสมการ 3.8 มีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมที่หนึ่ง สมการ 3.8 จะลดรูปลงเป็นดังนี้

$$\frac{w - w_e}{w_i - w_e} = a \exp(-k\theta) \quad (3.9)$$

- เมื่อ $a = 1$
 $k = D \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2$ (ค่าคงที่ของการอบแห้ง)

ซึ่งผลเฉลยของสมการในระบบแกนทรงกระบอกและแกนทรงกลม จะลดรูปลงอยู่ใน รูปแบบของสมการที่เหมือนกัน

ถึงแม้ว่าสมการนี้จะถูกพิสูจน์มาเพื่อใช้กับลักษณะรูปร่างที่เฉพาะ แต่เนื่องจากสมการนี้อยู่ในรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนและสามารถนำมาใช้ได้สะดวก จึงพบว่ามีการประยุกต์ใช้สมการนี้บ่อยครั้งในการวิเคราะห์หาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง(Drying Characteristic Curve)สำหรับวัสดุที่มีรูปร่างที่ต่าง ๆ กัน

อย่างไรก็ตามเมื่อผลเฉลยดังรูปสมการที่ 3.9 ไม่สอดคล้องกับผลจากการทดลองซึ่ง จำเป็นต้องมีการปรับแก้โดยการเพิ่มค่าคงที่จากการทดลองเข้าไปในสมการที่ 3.9 ซึ่งจะเป็นกรณีเดียวกันกับเมื่อผลรวมของเทอมที่สองและเทอมถัดไปมีความหมายเมื่อเทียบกับเทอมที่หนึ่งของสมการที่ 3.8 รูปแบบสมการของผลเฉลยที่ได้จะมีรูปแบบสมการเป็นดังนี้

$$\frac{w - w_e}{w_i - w_e} = a \exp(-k\theta) + (1 - a) \exp(-c\theta) \quad (3.10)$$

- เมื่อ $a = \frac{8}{\pi^2}$
 k - ค่าคงที่ของการอบแห้ง
 c - ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

ถ้าผลเฉลยของสมการการแพร่ที่สภาวะไม่คงตัวพื้นฐานถูกใช้ในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งของที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ก็ไม่ต้องใช้เทอมของสัมประสิทธิ์การแพร่ และ ค่าคงที่ k ในสมการจะถูกอ้างอิงเป็นค่าคงที่ของการอบแห้ง

3.5.3 Capillary Flow Theory

ทฤษฎีนี้มีสมมติฐานว่า เงื่อนไขที่ควบคุมการถ่ายเทความชื้นเกิดขึ้นเนื่องจากผลของ แรงคาпилลารีที่บริเวณช่องว่าง(pores)และรอยแยก(crevices)ภายในของวัสดุที่อบ ดังนั้นความชื้นจะถูกดึงจากภายในสู่ผิวโดยแรงเหล่านี้

โดยแบบจำลองนี้ การหาอัตราการอบแห้งสามารถคำนวณได้แม่นยำเพียงพอ [40] ภายใต้ช่วงความชื้นที่ต้องการ โดยสมการ

$$\frac{d\omega}{d\theta} = -K(\omega - \omega_e) \quad (3.11)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่
แต่

$$K = \frac{(d\omega/d\theta_c)}{\omega_c - \omega_e} \quad (3.12)$$

เมื่อ $\frac{\partial \omega}{\partial \theta_c}$ - อัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ $\text{kg h}^{-1} (\text{kg dry solid})^{-1}$
 ω_c - ค่าความชื้นวิกฤต (dry basis)

เนื่องจากสำหรับช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

$$\frac{d\omega}{d\theta_c} = \frac{h(t_g - t_s)}{\rho_s d\lambda} \quad (3.13)$$

เมื่อ t_g - อุณหภูมิของก๊าซร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
 t_s - อุณหภูมิผิวของวัสดุ ($^{\circ}\text{C}$)
 λ - ความร้อนในการระเหยของน้ำ (kJ kg^{-1})
 d - ขนาดอนุภาคของวัสดุ (m)
 ρ_s - ความหนาแน่นของวัสดุ (kg m^{-3})
 h - สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{kJ s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ m}^{-2}$)

แทนสมการ 3.13 ลงใน 3.12 และ 3.12 ลงใน 3.11 จะได้

$$\frac{d\omega}{d\theta} = \frac{-h(t_G - t_s)(w - w_e)}{\rho_s \lambda d(w_c - w_e)} \quad (3.14)$$

โดยการอินทิเกรตสมการ 3.14 จะได้

$$\theta = \frac{\rho_s \lambda d(w_c - w_e)}{h(t_G - t_s)} \ln \frac{w_c - w_e}{w - w_e} \quad (3.15)$$

หรือ

$$\frac{w - w_e}{w_c - w_e} = \exp(-B\theta) \quad (3.16)$$

เมื่อ

$$B = \frac{h(t_G - t_s)}{\rho_s \lambda d(w_c - w_e)}$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(w - w_e/w_c - w_e)$ กับ θ จะได้เส้นตรง เฉพาะช่วงที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ ($t_G - t_s$) มีค่าน้อยๆหรือคงที่เท่านั้น

3.5.4 Internal Evaporation

Internal Evaporation เป็นอีกทฤษฎีหนึ่งซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในช่วง การอบแห้งที่ ความเร็วลดลง ทฤษฎีนี้จะตั้งอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าระนาบของการระเหยจะถอยเข้าไปภายในวัสดุเมื่อ ความชื้นของวัสดุลดลง กระบวนการการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้โดยระบบสมการอนุพันธ์ ผลเฉลยได้จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของขอบเขต kisakurek [38] ได้รวบรวมผลงานของนักวิจัยหลายคนที่ใช้วิธีการนี้ หรือประยุกต์กับการวิเคราะห์ผลการอบแห้งของพวกเขา

3.5.5 Empirically Based Equations

เมื่อสมการ 3.9 และ 3.10 ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง นักวิจัยจะมองหาารูปแบบอื่นของสมการที่จะใช้แทนสมการข้างบนของการอบแห้ง โดยใช้วิธีการ curve-fit techniques

ดังนั้น Page[41] พบว่าจำเป็นต้องใส่ตัวแปรอื่นเข้าไปอีกในสมการ 3.9 เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูล การทดลองอบแห้ง shelled corn ของเขา

$$\frac{w - w_e}{w_i - w_e} = \exp(-k\theta^n) \quad (3.17)$$

Overhults et al [42] ได้ปรับปรุงสมการเพิ่มขึ้นอีกสำหรับผลการทดลองอบแห้งถั่วเหลืองของเขา

$$\frac{w - w_e}{w_i - w_e} = \exp(-k\theta)^n \quad (3.18)$$

แบบจำลองของ Thompson[43] สำหรับข้าวโพด

$$\theta = A \ln\left(\frac{w - w_e}{w_i - w_e}\right) + B \left\{ \ln\left(\frac{w - w_e}{w_i - w_e}\right) \right\}^2 \quad (3.19)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง

สมการกำลัง 2 ดังข้างล่างนี้ถูกพบโดย Wang [44] สำหรับการอบข้าวเมล็ดยาว

$$\frac{w - w_e}{w_i - w_e} = 1 + A_1\theta + B_1^2\theta \quad (3.20)$$

เมื่อ A_1 และ B_1 เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง ขึ้นอยู่กับตัวแปรในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

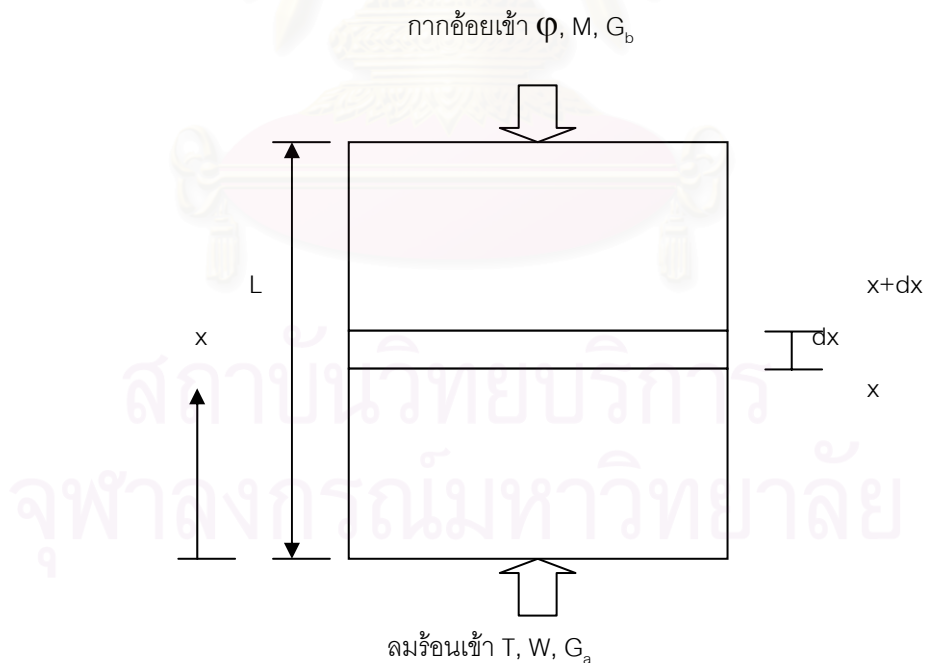
การวิเคราะห์สมการของระบบอบแห้ง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อหาระบบสมการที่ใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง ซึ่งเริ่มด้วยการกล่าวถึงลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องอบแห้งและสมมุติฐาน จากนั้นได้แสดงรายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์ โดยใช้หลักการสำคัญ คือ สมการการอบแห้งชั้นบางของกากอ้อย การพิจารณาสมดุลพลังงานทางความร้อน และการพิจารณาการสมดุลมวล และได้สรุประบบสมการที่ใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางไว้ในตอนสุดท้าย

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

เครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางจะมี ห้องอบซึ่งมีลักษณะเป็น Column ที่มี กากอ้อยไหลเข้าทางส่วนบนและมีลมร้อนไหลเข้าทางด้านล่างของเครื่องดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

กากอ้อย

ไหลเข้าด้วยอัตราไหล	G_b
ความเร็ว	V_b
อุณหภูมิ	φ
ความชื้น	M
พื้นที่ผิวจำเพาะกากอ้อย	S_a

ลมร้อน

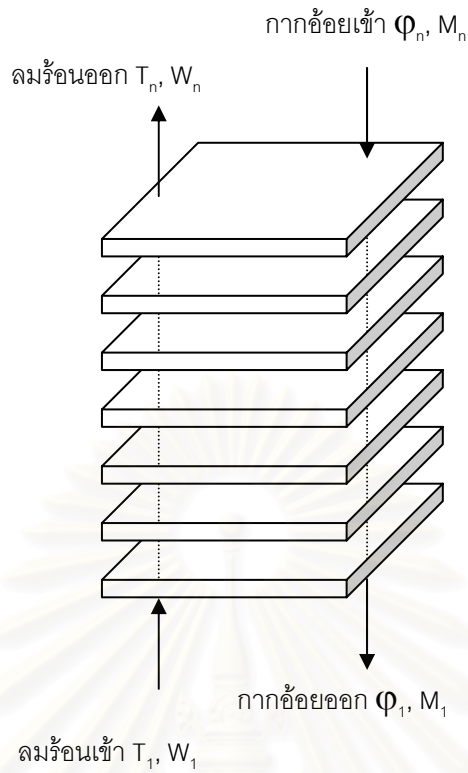
ไหลเข้าด้วยอัตราการไหล	G_a
ความเร็ว	V_a
อุณหภูมิ	T
อัตราส่วนความชื้น	W

ในการจำลองแบบเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง จะพิจารณาห้องอบที่มีลักษณะเป็นชั้นหน้าให้เป็นชั้นบางหลายๆชั้นที่วางเรียงต่อกัน ดังรูปที่ 4.2

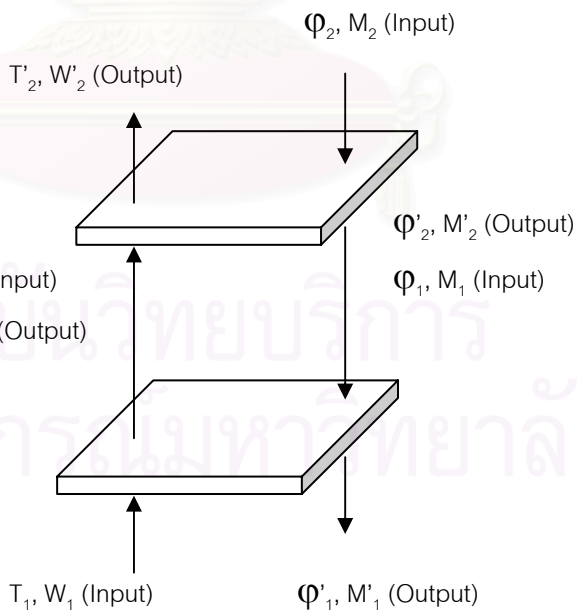
พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของลมร้อน โดยลมร้อนจะเข้าสู่เบตที่ชั้นบาง ชั้นแรก ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่อุณหภูมิและความชื้นค่าหนึ่ง เมื่อลมร้อนได้ผ่านชั้นบาง ชั้นแรกคุณสมบัติของลมร้อนจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อลมร้อนผ่านชั้นบางชั้นแรกมาแล้วก็จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นบางที่สอง และชั้นบางในชั้นที่อยู่ถัดไปเป็นลำดับ จนกระทั่งผ่านออกสู่บรรยากาศภายนอกในที่สุด

ในการทำงานเดียวกันสำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของกากอ้อย โดยกากอ้อยจะเริ่มเข้าสู่เบตที่ชั้นบางชั้นบนสุด ซึ่งมีกากอ้อยที่เข้าที่มีอุณหภูมิและความชื้นค่าหนึ่งเช่นกัน เมื่อกากอ้อยได้ผ่านชั้นบางชั้นบนสุดลงมา คุณสมบัติของกากอ้อยจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อกากอ้อยผ่านชั้นบางชั้นบนสุดมาแล้วก็จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นบางในชั้นที่อยู่ถัดลงมาเป็นลำดับจนกระทั่งผ่านออกสู่บรรยากาศภายนอกในที่สุด

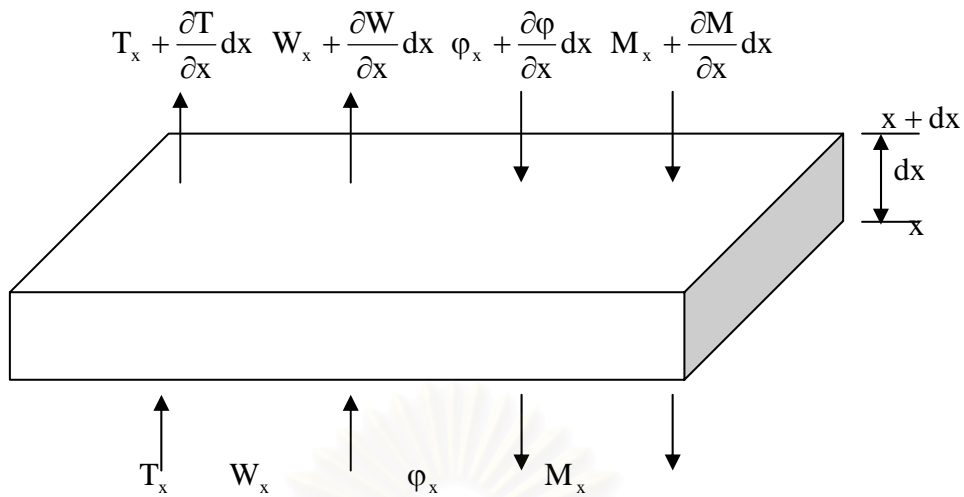
ในการจำลองแบบการกำหนดค่าตัวแปรที่เป็น Input และ Output ของอากาศร้อนและกากอ้อยในแต่ละช่วงเวลาแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 การเคลื่อนที่ของลมร้อนและกากอ้อยผ่านชั้นบางตลอดความหนาของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 4.3 แสดงการใช้ค่าตัวแปร Input และ Output ของชั้นบาง



รูปที่ 4.4 การพิจารณาชั้นบางที่มีความหนา dx

ในการวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางในสภาวะคงตัว จะใช้หลักการการสมดุลพลังงานแลสมดุลมวล ซึ่งอ้างอิงหลักการพิจารณาของ จีระวัฒน์[48] โดยจะเริ่มพิจารณาปริมาตรควบคุมเล็กๆ ($S \cdot dx$) ของห้องอบ ดังรูปที่ 4.4 โดยมีข้อสมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. ในขณะที่ทำการอบนั้นปริมาตรของกากอ้อยไม่เปลี่ยนแปลง
2. ไม่มีการนำความร้อนระหว่างอนุภาคกากอ้อย
3. ไม่มีความแตกต่างอุณหภูมิของอนุภาคกากอ้อยที่อยู่ติดกันที่ระดับเดียวกัน
- 4.ผนังของเครื่องอบแห้งไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น
5. อัตราการไหลของกากอ้อยและลมร้อนมีค่าคงที่
6. $\frac{\partial T}{\partial t}$ และ $\frac{\partial W}{\partial t}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\frac{\partial T}{\partial x}$ และ $\frac{\partial W}{\partial x}$ จึงไม่นำมาคิด
7. สมการการอบแห้งชั้นบางของกากอ้อยทราบแล้ว

4.2.1 พิจารณาการสมดุลทางพลังงานของลมร้อน

จากกฎการสมดุลของพลังงาน จะได้พลังงานความร้อนที่ส่งถ่ายออกโดยการพา มีค่าเท่ากับความแตกต่างของพลังงานความร้อนของลมร้อนที่ไหลเข้าและไหลออกจากปริมาตร ควบคุม $S \cdot dx$ บวกกับการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานความร้อนของลมร้อนที่อยู่ตามรูพรุนระหว่างกากอ้อยในปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$

พิจารณามวลของลมร้อนที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ในเวลา dt ซึ่งประกอบด้วยมวลอากาศแห้งและไอน้ำมีค่าเท่ากับ

$$(\rho_a \cdot V_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W_x) \cdot S \cdot dt \quad (4.1)$$

พลังงานความร้อนของลมร้อนที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ที่ระยะ x ใดๆ ในเวลา dt จะมีค่าเท่ากับ

$$(\rho_a \cdot V_a \cdot C_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W_x \cdot C_v) \cdot T_x \cdot S \cdot dt \quad (4.2)$$

พลังงานความร้อนของลมร้อนที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ที่ระยะ $x + dx$ ในเวลา dt จะมีค่าเท่ากับ

$$(\rho_a \cdot V_a \cdot C_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W_x \cdot C_v) \cdot T_{x+dx} \cdot S \cdot dt \quad (4.3)$$

เนื่องจาก

$$T_{x+dx} = T_x + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx \quad (4.4)$$

แทนค่าจาก สมการ 4.4 ลงใน 4.3 จะได้

$$(\rho_a \cdot V_a \cdot C_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W_x \cdot C_v) \left(T_x + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot S \cdot dt \quad (4.5)$$

ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนของลมร้อนภายในระยะ dx มีค่า เท่ากับสมการ 4.5-4.2 จะได้

$$(\rho_a \cdot V_a \cdot C_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W_x \cdot C_v) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx \cdot S \cdot dt \quad (4.6)$$

การเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนของลมร้อนในปริมาตรควบคุม ซึ่งมีปริมาตร เท่ากับ $\epsilon \cdot S \cdot dx$ ในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับ

$$(\rho_a \cdot C_a + \rho_a \cdot W_x \cdot C_v) \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dt \cdot S \cdot dx \quad (4.7)$$

เมื่อลมร้อนไหลผ่านกากอ้อยจะมีการพาความร้อนสู่กากอ้อยในปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ในเวลา dt เท่ากับ

$$q = h_f \cdot S_a \cdot (T - \varphi) \cdot S \cdot dx \cdot dt \quad (4.8)$$

โดยสมดุลทางพลังงานความร้อนจะได้

$$\begin{aligned} -h_f \cdot S_a \cdot (T_x - \varphi) \cdot S \cdot dx \cdot dt &= (\rho_a \cdot V_a \cdot C_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W_x \cdot C_v) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx \cdot S \cdot dt \\ &+ (\rho_a \cdot C_a + \rho_a \cdot W_x \cdot C_v) \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dt \cdot S \cdot dx \end{aligned} \quad (4.9)$$

หารสมการ 4.9 ตลอดด้วย $S \cdot dx \cdot dt$ และจากสมมุติฐานข้อ 6) เทอม $(\partial T / \partial t)$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอม $(\partial T / \partial x)$ จึงสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นสมการ 4.9 จะลดรูปลงเหลือ

$$-h_f \cdot S_a \cdot (T_x - \varphi) = (\rho_a \cdot V_a \cdot C_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W_x \cdot C_v) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.10)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-h_f \cdot S_a \cdot (T - \varphi)}{(\rho_a \cdot V_a \cdot C_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W_x \cdot C_v)} \quad (4.11)$$

4.2.2 พิจารณาการสมดุลของพลังงานความร้อนของกากอ้อย

จากกฎการสมดุลของพลังงาน จะได้ พลังงานความร้อนที่กากอ้อยได้รับโดยการพา มีค่าเท่ากับความร้อนที่ใช้ทำให้กากอ้อยแห้งและน้ำในกากอ้อยที่ไม่ระเหยมีอุณหภูมิสูงขึ้น บวกกับค่าความร้อนแฝงที่ทำให้ความชื้นในกากอ้อยระเหยออกไป บวกกับพลังงานความร้อนที่ทำให้ไอน้ำที่ระเหยมีอุณหภูมิสูงขึ้น

พลังงานความร้อนที่เข้าของกากอ้อยแห้งและน้ำที่ไม่ระเหยที่ระนาบ $x + dx$ สู่ปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ในระยะเวลา dt เท่ากับ

$$(\rho_b \cdot V_b \cdot C_b + \rho_b \cdot V_b \cdot M_x \cdot C_w) \cdot \varphi_{x+dx} \cdot S \cdot dx \cdot dt \quad (4.12)$$

เมื่อ

$$\varphi_{x+dx} = \varphi_x + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot dx \quad (4.13)$$

แทนค่าจากสมการ 4.13 ลงใน 4.12 จะได้

$$(\rho_b \cdot V_b \cdot C_b + \rho_b \cdot V_b \cdot M_x \cdot C_w) \left(\varphi_x + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot S \cdot dt \quad (4.14)$$

พลังงานความร้อนออกของกากอ้อยแห้งและน้ำที่ไม่ระเหยที่ระนาบ x จากปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ในระยะเวลา dt เท่ากับ

$$(\rho_b \cdot V_b \cdot C_b + \rho_b \cdot V_b \cdot M_x \cdot C_w) \cdot \varphi_x \cdot S \cdot dt \quad (4.15)$$

พลังงานความร้อนที่ทำให้กากอ้อยแห้งและน้ำที่ไม่ระเหยมีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับสมการ 4.15-4.14 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$-(\rho_b \cdot V_b \cdot C_b + \rho_b \cdot V_b \cdot M_x \cdot C_w) \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot S \cdot dx \cdot dt \quad (4.16)$$

มวลไอน้ำที่ระเหยออกจากกากอ้อยในปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ภายในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของลมร้อนที่ไหลผ่านปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$

มวลของไอน้ำภายในลมร้อนที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ที่ระนาบ x ในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับ

$$(\rho_a \cdot V_a \cdot W_x) \cdot S \cdot dt \quad (4.17)$$

มวลของไอน้ำภายในลมร้อนที่ออกจากปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ที่ระนาบ $x + dx$ ในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับ

$$(\rho_a \cdot V_a \cdot W_{x+dx}) \cdot S \cdot dt \quad (4.18)$$

จาก

$$W_{x+dx} = W_x + \frac{\partial W}{\partial x} \cdot dx \quad (4.19)$$

แทนค่าจากสมการ 4.19 ลงใน 4.18 จะได้

$$\left(\rho_a \cdot V_a \cdot \left(W_x + \frac{\partial W}{\partial x} \cdot dx \right) \right) \cdot S \cdot dt \quad (4.20)$$

มวลไอน้ำที่ระเหยออกจากกากอ้อยในปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ภายในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับ สมการ 4.20-4.17 จะได้

$$\rho_a \cdot V_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot S \cdot dx \cdot dt \quad (4.21)$$

พลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากกากอ้อยในปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับ

$$h_{fg} \cdot \rho_a \cdot V_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot S \cdot dx \cdot dt \quad (4.22)$$

พลังงานความร้อนที่ทำให้ไอน้ำอุณหภูมิ ϕ มีอุณหภูมิเท่ากับ T ภายในปริมาตร ควบคุม $S \cdot dx$ ในระยะเวลา dt เท่ากับ

$$C_v \cdot (T - \phi) \cdot \rho_a \cdot V_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot S \cdot dx \cdot dt \quad (4.23)$$

พลังงานความร้อนที่กากอ้อยได้รับโดยจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนในปริมาตร ควบคุม $S \cdot dx$ ในเวลา dt เท่ากับ

$$q = h_f \cdot S_a \cdot (T - \phi) \cdot S \cdot dx \cdot dt \quad (4.24)$$

โดยสมดุลทางพลังงานความร้อนจะได้

$$\begin{aligned} h_f \cdot S_a \cdot (T - \phi) \cdot S \cdot dx \cdot dt &= -(\rho_b \cdot V_b \cdot C_b + \rho_b \cdot V_b \cdot M_x \cdot C_w) \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot S \cdot dx \cdot dt \\ &+ h_{fg} \cdot \rho_a \cdot V_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot S \cdot dx \cdot dt \\ &+ C_v \cdot (T - \phi) \cdot \rho_a \cdot V_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot S \cdot dx \cdot dt \end{aligned} \quad (4.25)$$

หารตลอดสมการ 4.25 ด้วย $S \cdot dx \cdot dt$ จะได้

$$h_f \cdot S_a \cdot (T - \phi) = -(\rho_b \cdot V_b \cdot C_b + \rho_b \cdot V_b \cdot M_x \cdot C_w) \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} + h_{fg} \cdot \rho_a \cdot V_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} + C_v \cdot (T - \phi) \cdot \rho_a \cdot V_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \quad (4.26)$$

เมื่อ $G_a = V_a \cdot \rho_a \quad (4.27)$

$$G_b = V_b \cdot \rho_b \quad (4.28)$$

จัดรูปสมการ 4.26 ใหม่จะได้

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{-h_f \cdot S_a \cdot (T - \phi)}{G_b \cdot (C_b + C_w \cdot M_x)} + \frac{G_a \cdot (h_{fg} + C_v \cdot (T - \phi))}{G_b \cdot (C_b + C_w \cdot M_x)} \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \quad (4.29)$$

4.2.3 พิจารณาการสมดุลมวลของลมร้อนและกากอ้อย

จากกฎการสมดุลมวล (mass balance) จะได้ว่าปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปของ กากอ้อย จะมีค่าเท่ากับปริมาณของไอน้ำในอากาศที่ลมร้อนนำเข้าไปปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ที่ระนาบ x ลบด้วยปริมาณที่นำออกที่ระนาบ $x + dx$ บวกด้วยปริมาณที่เปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณความชื้นของอากาศภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคกากอ้อย

มวลของน้ำในกากอ้อยที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ที่ระนาบ $x + dx$ ในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับ

$$\rho_b \cdot V_b \cdot M_{x+dx} \cdot S dt \quad (4.30)$$

เนื่องจาก

$$M_{x+dx} = M_x + \frac{\partial M}{\partial x} \cdot dx \quad (4.31)$$

แทนค่าจากสมการ 4.31 ลงใน 4.30 จะได้สมการใหม่เป็น

$$\rho_b \cdot V_b \cdot \left(M + \frac{\partial M}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot S dt \quad (4.32)$$

มวลของน้ำในกากอ้อยที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ที่ระนาบ x ในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับ

$$\rho_b \cdot V_b \cdot M_x \cdot S \cdot dt \quad (4.33)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณมวลของน้ำในกากอ้อยในปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับ สมการ 4.33 – 4.32 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$- \rho_b \cdot V_b \cdot \frac{\partial M}{\partial x} \cdot S \cdot dx \cdot dt \quad (4.34)$$

มวลของน้ำในอากาศที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ที่ระนาบ x ในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับ

$$\rho_a \cdot V_a \cdot W_x \cdot S \cdot dt \quad (4.35)$$

มวลของน้ำในอากาศที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ที่ระนาบ $x + dx$ ในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับ

$$\rho_a \cdot V_a \cdot \left(W_x + \frac{\partial W}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot S \cdot dt \quad (4.36)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณมวลของน้ำในอากาศในปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับสมการ 4.36-4.35

$$\rho_a \cdot V_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot S \cdot dx \cdot dt \quad (4.37)$$

การเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นของอากาศภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคกากอ้อย ในปริมาตรควบคุม $S \cdot dx$ ในระยะเวลา dt มีค่าเท่ากับ

$$\varepsilon \cdot S \cdot dx \cdot \frac{\partial W}{\partial t} \cdot dt \quad (4.38)$$

โดยการสมมูลมวลของน้ำในกากอ้อยและอากาศ จะได้ว่า

$$-\rho_b \cdot V_b \cdot \frac{\partial M}{\partial x} \cdot dx \cdot S \cdot dt = \rho_a \cdot V_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot dx \cdot S \cdot dt + \varepsilon \cdot S \cdot dx \cdot \frac{\partial W}{\partial t} \cdot dt \quad (4.39)$$

หารตลอดสมการ 4.39 ด้วย $S \cdot dx \cdot dt$ และจากสมมติฐานข้อ 6) เทอม $\varepsilon \cdot S \cdot dx \cdot \frac{\partial W}{\partial t} \cdot dt$ จะมีค่าน้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นสมการ 4.39 จะลดรูปลงเป็น

$$-\rho_b \cdot V_b \cdot \frac{\partial M}{\partial x} = \rho_a \cdot V_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \quad (4.40)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{G_b}{G_a} \cdot \frac{\partial M}{\partial x} \quad (4.41)$$

4.2.4 สมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อย

จากสมมติฐานข้อ 7) เมื่อทราบค่าสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยเรียบร้อยแล้ว การคำนวณหาค่าอัตราการอบแห้งของกากอ้อย ($\frac{\partial M}{\partial t}$) สามารถคำนวณได้จากสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยได้ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{สมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อย} \quad (4.42)$$

และจากความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของกากอ้อย เมื่อกากอ้อยเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_b คงที่ ทำให้สามารถคำนวณเวลาที่กากอ้อยใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านไปในแต่ละชั้นบาง ได้ดังนี้

$$dt = \frac{dx}{V_b} \quad (4.43)$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial x} = -\frac{1}{V_b} \cdot \frac{\partial M}{\partial t} \quad (4.44)$$

4.3 สรุประบบสมการคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

สมการของระบบอบแห้งประกอบด้วย 5 สมการหลัก คือ

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-h_f \cdot S_a \cdot (T - \varphi)}{(\rho_a \cdot V_a \cdot C_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W_x \cdot C_v)} \quad (4.45)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{-h_f \cdot S_a \cdot (T - \varphi)}{G_b \cdot (C_b + C_w \cdot M_x)} + \frac{G_a \cdot (h_{fg} + C_v \cdot (T - \varphi))}{G_b \cdot (C_b + C_w \cdot M_x)} \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \quad (4.46)$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{G_b}{G_a} \cdot \frac{\partial M}{\partial x} \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = -\frac{1}{V_b} \cdot \frac{\partial M}{\partial t} \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{สมการชั้นบางของการอบแห้งของกากอ้อย} \quad (4.49)$$

สำหรับปัญหาที่มีเงื่อนไข ดังนี้

$$T(0,t) = T(\text{inlet})$$

$$\varphi(1,t) = \varphi(\text{inlet})$$

$$W(0,t) = W(\text{inlet})$$

$$M(l,t) = M(\text{inlet})$$

ระบบสมการคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถใช้ Numerical techniques ในการแก้ปัญหาได้ โดยใช้วิธีการแบบ finite-difference method

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การจำลองแบบของระบบอบแห้ง

5.1 บทนำ

การจำลองแบบระบบอบแห้งโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถสร้างขึ้นได้จากความสัมพันธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการทำนายลักษณะของกระบวนการอบแห้งที่เกิดขึ้นภายในของห้องอบแห้ง ซึ่งถ้าหากสามารถหาแบบจำลองที่ให้ผลของการจำลองแบบสอดคล้องกับกระบวนการอบแห้งที่เกิดขึ้นจริงได้อย่างถูกต้อง ก็สามารถใช้แบบจำลองที่ได้ดังกล่าวช่วยในกระบวนการออกแบบเครื่องอบแห้งและการกำหนดสภาวะในการดำเนินการได้อย่างเหมาะสม โดยจะมีความประหยัดและมีความสะดวกมากขึ้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการในการจำลองแบบเครื่องอบแห้ง 2 แบบ ซึ่งได้แก่เครื่อง อบแห้งแบบเบตนิ่ง และเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง ซึ่งเริ่มด้วยการกล่าวถึงความสัมพันธ์ พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองแบบ จากนั้นได้กล่าวถึงวิธีการหาผลเฉลยของการจำลองแบบของเครื่องอบแห้งทั้ง 2 แบบ

5.2 ความสัมพันธ์พื้นฐานสำหรับการจำลองแบบ

5.2.1 ค่าคงที่ของการอบแห้งของกากอ้อย

จากการศึกษากระบวนการอบแห้งกากอ้อยเชิงทฤษฎีของ A.C.Pilgrim และ D.R.McGaw ซึ่งได้ทำการทดลองหาสมการความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณค่าคงที่ของการอบแห้งของกากอ้อยโดยใช้ตัวอย่างกากอ้อยจากแถบแคริบเบียนและได้สรุปผลเป็นสมการเอาไว้ดังสมการที่ 5.1 ซึ่งอัตราการอบแห้งของกากอ้อยจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลัก 4 ตัว ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน ความชื้นสัมบูรณ์ลมร้อน ขนาดอนุภาคของกากอ้อย และความเร็วของลมร้อน แนวโน้มของค่าคงที่ของการ อบแห้งของกากอ้อยจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลมร้อนและความเร็วลมร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อค่าของความชื้นลมร้อนและขนาดอนุภาคของกากอ้อยมีค่าลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$k = 0.0019 \exp(0.0073T) + 0.0292 \exp(-0.89A_b) + 0.00078V_a + 0.00057 W^{0.57} - 0.00088V_a \exp(-0.895) - 0.0314 \quad (5.1)$$

- เมื่อ
- T - อุณหภูมิลมร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
 - A_b - ขนาดอนุภาคกากกักข้อย(m.)
 - V_a - ความเร็วลมร้อน(m/s)
 - W - ความชื้นสัมบูรณ์ลมร้อน(kg/kg dry air)

5.2.2 สมการชั้นบางของการอบแห้ง

จากทฤษฎีการแพร่ของของเหลว (Liquid diffusion theory) ซึ่ง Sherwood[39] ได้พัฒนา ผลเฉลยไว้สำหรับวัสดุที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมและมีความยาว (long slab) โดยคิดการถ่ายเทความชื้นจาก 2 ด้าน ซึ่งได้ผลเฉลยทั่วไปดังรูปสมการที่ 5.2

$$\frac{w - w_e}{w_i - w_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-D\theta \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2\right] + \frac{1}{9} \exp\left[-9D\theta \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2\right] + \frac{1}{25} \exp\left[-25D\theta \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2\right] + \dots \quad \dots(5.2)$$

สำหรับกรณีนี้ที่ค่าต่างๆของ l และ ค่าต่างๆของ D หรือ θ เมื่อผลรวมของเทอมที่สองและเทอมถัดไปในสมการ 5.2 มีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมที่หนึ่ง สมการ 5.2 จะลดรูปลงเป็นดังนี้

$$\frac{w - w_e}{w_i - w_e} = a \exp(-k\theta) \quad (5.3)$$

- เมื่อ
- $a = 1.0$
 - k - ค่าคงที่ของการอบแห้ง

อย่างไรก็ตามเมื่อผลเฉลยดังรูปสมการที่ 5.3 ไม่สอดคล้องกับผลจากการทดลองซึ่งจำเป็นต้องมีการปรับแก้โดยการเพิ่มค่าคงที่จากการทดลองเข้าไปในสมการที่ 5.3 ซึ่งจะเป็นกรณีเดียวกันกับเมื่อผลรวมของเทอมที่สองและเทอมถัดไปไม่มีความหมายเมื่อเทียบกับเทอมที่หนึ่ง ของสมการ ที่ 5.2 รูปแบบสมการของผลเฉลยที่ได้จะมีรูปแบบสมการเป็นดังสมการที่ 5.4 ดังนี้

$$\frac{w - w_e}{w_i - w_e} = a \exp(-k\theta) + (1 - a) \exp(-ck\theta) \quad (5.4)$$

เมื่อ $a = \frac{8}{\pi^2}$

k - ค่าคงที่ของการอบแห้ง

c - ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

การจำลองแบบสำหรับการวิจัยนี้ จะใช้รูปแบบของสมการชิ้นบางของการอบแห้งในลักษณะที่ 2 ของผลเฉลย คือ รูปแบบสมการอย่างง่ายดังสมการที่ 5.3 และ เมื่อมีการใช้สมการที่ 5.3 ร่วมกับค่าคงที่จากการทดลองดังสมการที่ 5.4 ซึ่งสามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรต่างๆที่จะใช้ในการจำลองแบบได้ดังสมการที่ 5.5 และ 5.6 ดังนี้

$$\frac{(M - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) \quad (5.5)$$

เมื่อ $a = 1.0$

k - ค่าคงที่ของการอบแห้ง

$$\frac{(M - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-ckt) \quad (5.6)$$

เมื่อ $a = \frac{8}{\pi^2}$

k - ค่าคงที่ของการอบแห้ง

c - ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

5.2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะถูกคำนวณโดยสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Lof และ Hawley [47] ในที่นี้จะแปลงให้อยู่ในหน่วยเป็นเมตริก

$$h_c A_s = 0.0147(737.28 G / 0.0328 d)^{0.7} \quad (5.7)$$

- เมื่อ $h_c A_s$ – สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($J m^{-3} s^{-1} K^{-1}$)
 G – อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ ($kg m^{-2} s^{-1}$)
 d – ความหนาของอนุภาค-2 (cms)

สมการนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้กับวัสดุทั่วไปที่แตกต่างกัน ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความแม่นยำเพียงพอในการใช้

5.2.4 การอิมิตัวของลมร้อนที่ใช้อบ

สำหรับการจำลองแบบในที่นี้มีการตรวจสอบสมการอิมิตัวของกระแสลมร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งด้วย ซึ่งการอิมิตัวของลมร้อนในที่นี้จะใช้สมการการคำนวณหาอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point) ที่คิดมาจากค่าความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) โดยใช้สมการจากคู่มือของ ASHRAE[19] สมการนี้ใช้คำนวณหาอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศในช่วง 0 ถึง 93 °C ดังต่อไปนี้

$$t_d = C_1 + C_2 \alpha + C_3 \alpha^2 + C_4 \alpha^3 + C_5 (p_w)^{0.1984} \quad (5.8)$$

- เมื่อ t_d – อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (°C)
 $\alpha = \ln(p_w)$
 p_w – ความดันย่อยของไอน้ำ (kPa)
 $C_1 = 6.54$
 $C_2 = 14.526$
 $C_3 = 0.7389$
 $C_4 = 0.09486$
 $C_5 = 0.4569$

ในที่นี้
$$p_w = \frac{(pW)}{(0.62198 + W)} \quad (5.9)$$

- เมื่อ p – ความดันบรรยากาศ (kPa)
 W – ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ (kg / kg dry air)

ตารางที่ 5.1 ความชื้นสมดุลของไม้(มาตรฐานแห้ง)[6]

อุณหภูมิ	ความชื้นสัมพัทธ์ %																			
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	98
30	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.4	13.5	14.9	16.5	18.5	21	24.3	26.9
40	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.3	13.5	14.9	16.5	18.5	21	24.3	26.9
50	1.4	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.4	14.8	16.4	18.4	20.9	24.3	26.9
60	1.3	2.5	3.6	4.6	5.4	6.2	7	7.8	8.6	9.4	10.2	11.1	12.1	13.3	14.6	16.2	18.2	20.7	24.1	26.8
70	1.3	2.5	3.5	4.5	5.4	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.1	11	12	13.1	14.4	16	17.9	20.5	23.9	26.6
80	1.3	2.4	3.5	4.4	5.3	6.1	6.8	7.6	8.3	9.1	9.9	10.8	11.7	12.9	14.2	15.7	17.7	20.2	23.6	26.3
90	1.2	2.3	3.4	4.3	5.1	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.7	10.5	11.5	12.6	13.9	15.4	17.3	19.8	23.3	26
100	1.2	2.3	3.3	4.2	5	5.8	6.5	7.2	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.6	15.1	17	19.5	22.9	25.6
110	1.1	2.2	3.2	4	4.9	5.6	6.3	7	7.7	8.4	9.2	10	11	12	13.2	14.7	16.6	19.1	22.4	25.2
120	1.1	2.1	3	3.9	4.7	5.4	6.1	6.8	7.5	8.2	8.9	9.7	10.6	11.7	12.9	14.4	16.2	18.6	22	24.7
130	1	2	2.9	3.7	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	7.9	8.7	9.4	10.3	11.3	12.5	14	15.8	18.2	21.5	24.2
140	0.9	1.9	2.8	3.6	4.3	5	5.7	6.3	7	7.7	8.4	9.1	10	11	12.1	13.6	15.3	17.7	21	23.7
150	0.9	1.8	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.7	10.6	11.8	13.1	14.9	17.2	20.4	23.1
160	0.8	1.6	2.4	3.2	3.9	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.5	9.3	10.3	11.4	12.7	14.4	16.7	19.9	22.5
170	0.7	1.5	2.3	3	3.7	4.3	4.9	5.6	6.2	6.8	7.4	8.2	9	9.9	11	12.3	14	16.2	19.3	21.9
180	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.1	4.7	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.6	9.5	10.5	11.8	13.5	15.7	18.7	21.3
190	0.6	1.3	1.9	2.6	3.2	3.8	4.4	5	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	9.1	10.5	11.4	13	15.1	18.1	20.7
200	0.5	1.1	1.7	2.4	3	3.5	4.1	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.7	9.7	10.9	12.5	14.6	17.5	20
210	0.5	1	1.6	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4	6	6.7	7.4	8.3	9.2	10.4	12	14	16.9	19.3

5.2.5 ความชื้นสมดุล

เนื่องจากที่ผ่านมายังไม่มีผลการรายงานที่เกี่ยวข้องกับการการวิจัยค่าความชื้น สมดุลของกาก อ้อยโดยตรง ในที่นี้จึงใช้ค่าความชื้นสมดุลของไม้เนื้ออ่อน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับลักษณะ โครงสร้างของกากอ้อยมากที่สุด ค่าความชื้นสมดุลของไม้เนื้ออ่อนที่สภาวะต่างๆแสดงดังตารางที่ 5.1

5.3 การจำลองแบบสำหรับเครื่องอบแห้งแบบเบตนึ่ง

5.3.1 ทัวไป

ในการจำลองแบบเครื่องอบแห้งแบบเบตนึ่ง ซึ่งห้องอบแห้งจะมีลักษณะเป็นชั้นหนา ในที่นี้จะพิจารณา ชั้นหนาแยกเป็นชั้นบางหลายๆชั้นที่วางเรียงต่อกัน ดังรูปที่ 5.1

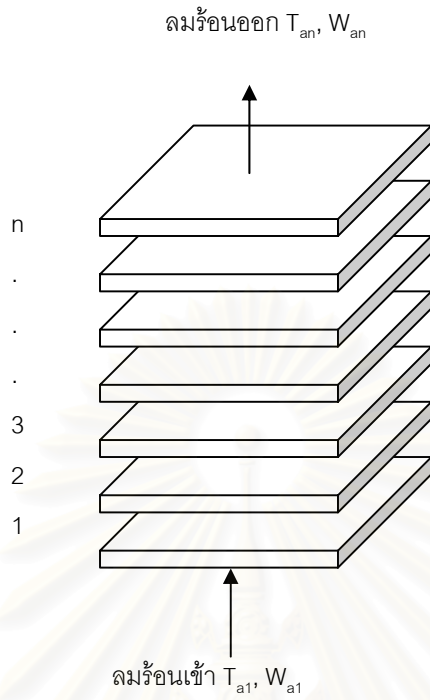
พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของลมร้อน โดยลมร้อนจะเข้าสู่เบตที่ชั้นบางชั้นแรก ซึ่งมีคุณสมบัติที่ สำคัญได้แก่อุณหภูมิและความชื้นค่าหนึ่ง เมื่อลมร้อนได้ผ่านชั้นบางชั้นแรกคุณสมบัติของลมร้อนจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อลมร้อนผ่านชั้นบางชั้นแรกแล้วก็จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นบางที่สอง และชั้นบางในชั้นถัดไปเป็นลำดับ จนกระทั่งผ่าน ออกสู่บรรยากาศภายนอกในที่สุด ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.1

สำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของกากอ้อย เราจะพิจารณาในแต่ละ ชั้นบาง โดยกาก อ้อยที่เวลาเริ่มต้นมีอุณหภูมิและความชื้นค่าหนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไป คุณสมบัติของกากอ้อยจะเปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 5.2

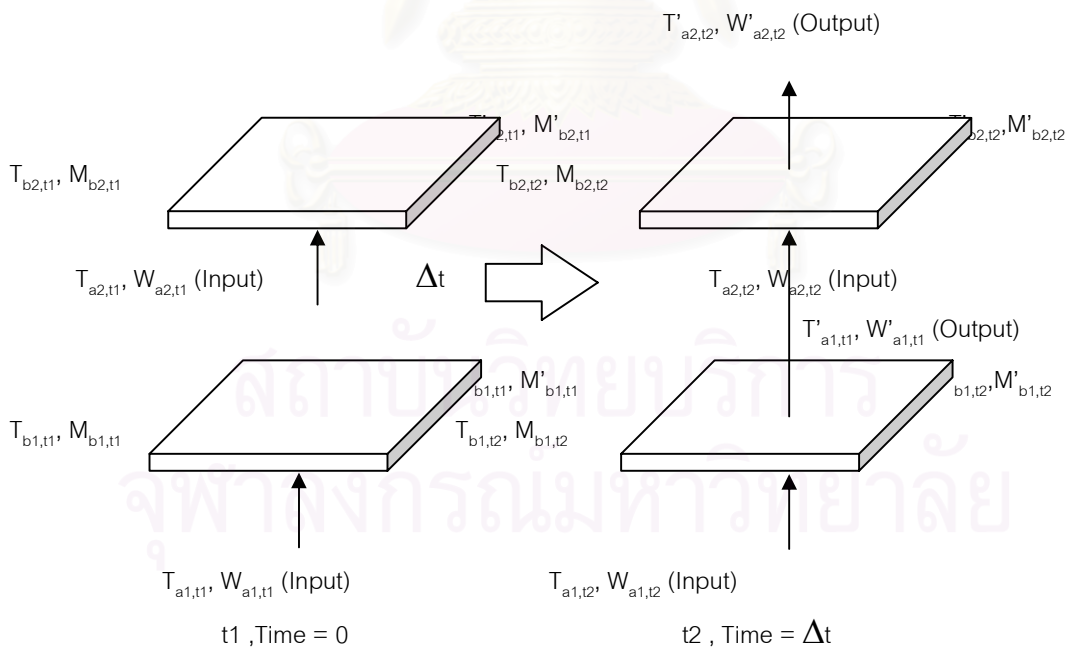
ในการจำลองแบบการกำหนดค่าตัวแปรที่เป็น Input และ Output ของอากาศร้อนและ กากอ้อยในแต่ละ ช่วงเวลาแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 5.2

5.3.2 การหาผลเฉลยของการจำลองแบบ

ค่า Output ต่างๆที่แสดงในหัวข้อ 5.3.1 ของการคำนวณแต่ละช่วงเวลาสามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 5.1 การเคลื่อนที่ของลมร้อนผ่านชั้นบางตลอดความหนาของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 5.2 แสดงการใช้ค่าตัวแปร Input และ Output ของชั้นบาง

1. อัตราการอบแห้ง

1.1 สมการชั้นบางของการอบแห้งดังรูปแบบสมการที่ 5.5

$$\frac{(M - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) \quad (5.10)$$

เมื่อ Differentiate สมการ 5.10 จะได้

$$\frac{dM}{dt} = -a.k.(M_i - M_e). \exp(-kt) \quad (5.11)$$

สำหรับช่วงเวลาสั้นๆ สมการจะกลายเป็น

$$\Delta M = -a.k.\Delta t.(M_i - M_e). \exp(-k.\Delta t) \quad (5.12)$$

1.2 สมการชั้นบางของการอบแห้งดังรูปแบบสมการที่ 5.6

$$\frac{(M - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-ckt) \quad (5.13)$$

เมื่อ Differentiate สมการ 5.13 จะได้

$$\frac{dM}{dt} = -a.k.(M_i - M_e). \exp(-kt) - ck(1 - a) \exp(-ckt) \quad (5.14)$$

สำหรับช่วงเวลาสั้นๆ สมการจะกลายเป็น

$$\Delta M = -a.k.\Delta t.(M_i - M_e). \exp(-k.\Delta t) - \Delta t.ck(1 - a) \exp(-ck.\Delta t) \quad (5.15)$$

ซึ่งจากการคำนวณหาอัตราการอบแห้งโดยใช้รูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งทั้ง 2 แบบ ในที่สุดก็จะสามารถคำนวณหาความชื้นของกากอ้อยที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการอบในแต่ละช่วงเวลา เป็นดังนี้

$$M'_b = M_b + \Delta M \quad (5.16)$$

2. การเปลี่ยนแปลงความชื้นของลมร้อน

เนื่องจากความชื้นที่ถ่ายเทออกมาจากวัสดุจะเข้าไปอยู่ในลมร้อน เพราะฉะนั้นปริมาณการเปลี่ยนแปลงความชื้นของลมร้อน จึงสามารถคำนวณได้จากการทำสมดุลมวล ดังนี้

ความชื้นที่ออกจากวัสดุ = ความชื้นที่เข้าสู่ลมร้อน

$$-A.R_b.\Delta x.(M'_b - M_b) = A.G_a.\Delta t.(W'_a - W_a) \quad (5.17)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$W'_a = W_a - \frac{R_b.\Delta x}{G_a.\Delta t}.\Delta M \quad (5.18)$$

3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อน

ในที่นี้ จะหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อน โดยใช้วิธีการคำนวณจากสมการการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนและวัสดุ ดังต่อไปนี้

พลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงของลมร้อน = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่วัสดุ

$$A.G_a.\Delta t.(h - h') = h_c A_s .A.\Delta x.\Delta t.(T_a - T_b) \quad (5.19)$$

เมื่อ h - เอนทัลปีของลมร้อนก่อนการอบ ($J \text{ kg dry air}^{-1}$)

h' - เอนทัลปีของลมร้อนหลังการอบ ($J \text{ kg dry air}^{-1}$)

T_a - อุณหภูมิของลมร้อนก่อนการอบ ($^{\circ}C$)

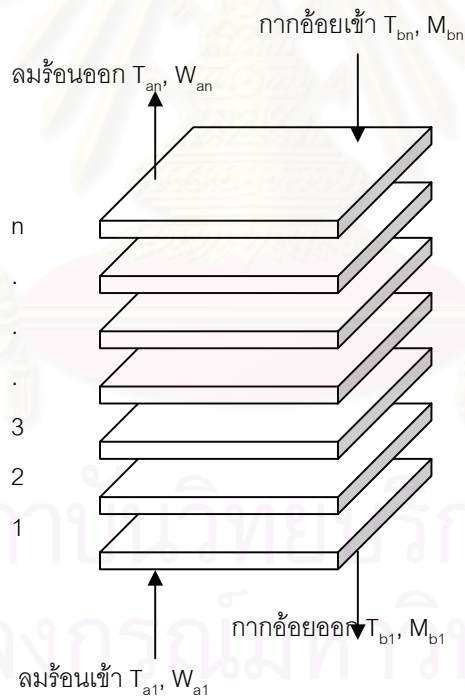
T_b - อุณหภูมิของอากาศอ้อยก่อนการอบ ($^{\circ}C$)

ในการพิจารณาในที่นี้ใช้อุณหภูมิอ้างอิงที่ $0^{\circ}C$ จะได้ค่าเอนทัลปีของลมร้อน [19] เป็นดังนี้

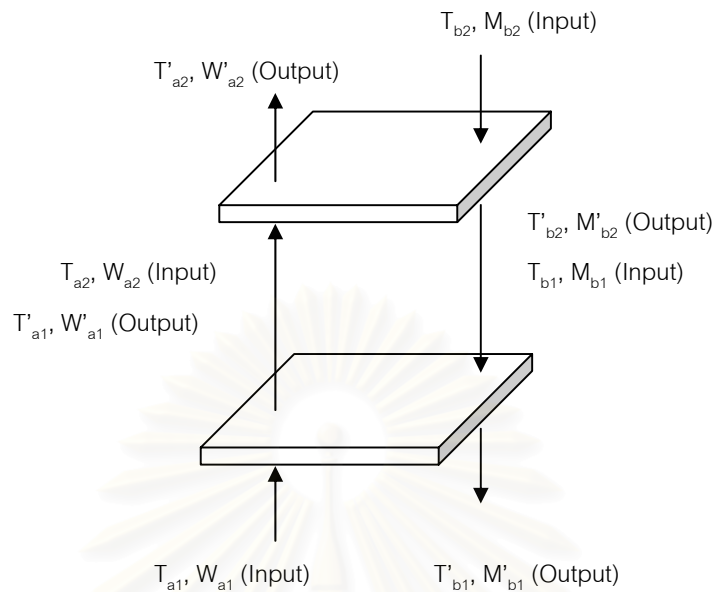
พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของลมร้อน โดยลมร้อนจะเข้าสู่เบดที่ชั้นบางชั้นแรก ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่อุณหภูมิและความชื้นค่าหนึ่ง เมื่อลมร้อนได้ผ่านชั้นบางชั้นแรกคุณสมบัติของลมร้อนจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อลมร้อนผ่านชั้นบางชั้นแรกมาแล้วก็จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นบางที่สอง และชั้นบางในชั้นที่อยู่ถัดไปเป็นลำดับจนกระทั่งผ่านออกสู่บรรยากาศภายนอกในที่สุด

ในทำนองเดียวกันสำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของกากอ้อย โดย กากอ้อยจะเริ่มเข้าสู่เบดที่ชั้นบางชั้นบนสุด ซึ่งมีกากอ้อยที่เข้าที่มีอุณหภูมิและความชื้นค่าหนึ่งเช่นกัน เมื่อกากอ้อยได้ผ่านชั้นบางชั้นบนสุดลงมา คุณสมบัติของกากอ้อยจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อ กากอ้อยผ่านชั้นบางชั้นบนสุดมาแล้วก็จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นบางในชั้นที่อยู่ถัดลงมาเป็นลำดับจนกระทั่งผ่านออกสู่บรรยากาศภายนอกในที่สุด

ในการจำลองแบบการกำหนดค่าตัวแปรที่เป็น Input และ Output ของอากาศร้อนและ กากอ้อยในแต่ละช่วงเวลาแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 การเคลื่อนที่ของลมร้อนและกากอ้อยผ่านชั้นบางตลอดความหนาของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 5.4 แสดงการใช้ค่าตัวแปร Input และ Output ของชั้นบาง

5.4.2 การหาผลเฉลยของการจำลองแบบ

ค่า Output ต่างๆที่แสดงในหัวข้อ 5.4.1 ของการคำนวณแต่ละช่วงเวลาสามารถคำนวณได้โดยการพิจารณาร่วมกับรูปของชั้นบางดังรูปที่ 5.5 ดังต่อไปนี้

1. อัตราการอบแห้ง

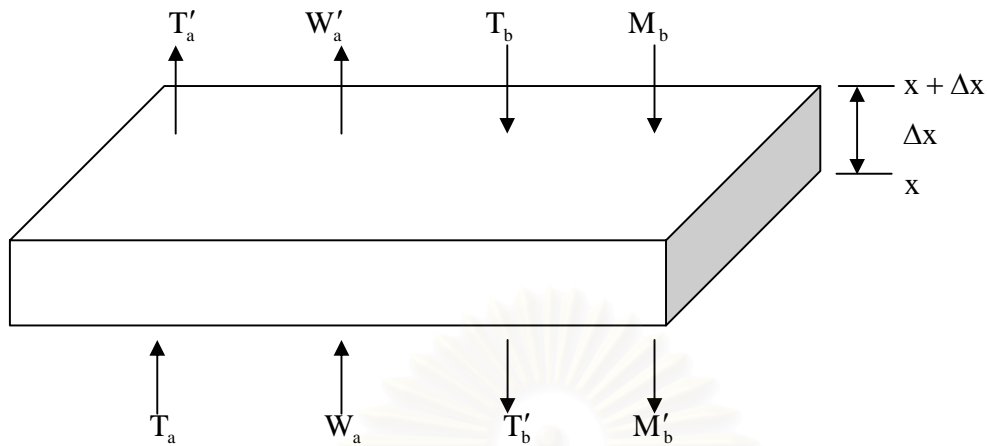
สามารถพิจารณาการคำนวณหาอัตราการอบแห้งได้เช่นเดียวกับกรณีของเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่ง ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของกระบวนการพิจารณาไว้แล้วดังในสมการที่ 5.10 ถึง 5.16

2. การเปลี่ยนแปลงความชื้นของลมร้อน

เนื่องจากความชื้นที่ถ่ายเทออกมาจากวัสดุจะเข้าไปอยู่ในลมร้อน เพราะฉะนั้นปริมาณการเปลี่ยนแปลงความชื้นของลมร้อน จึงสามารถคำนวณได้จากการทำสมดุลมวล ดังนี้

ความชื้นที่ออกจากวัสดุ = ความชื้นที่เข้าสู่ลมร้อน

$$-A \cdot \Delta t \cdot G_b \cdot (M'_b - M_b) = A \cdot \Delta t \cdot G_a \cdot (W'_a - W_a) \quad (5.27)$$



รูปที่ 5.5 การพิจารณาชั้นบางที่มีความหนา Δx

จัดรูปสมการที่ 5.27 ใหม่ จะได้

$$W'_a = W_a - \frac{G_b}{G_a} \cdot \Delta M \quad (5.28)$$

3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อน

ในที่นี้ จะหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อน โดยใช้วิธีการคำนวณจากสมการการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนและวัสดุ ดังต่อไปนี้

พลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงของลมร้อน = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่วัสดุ

$$A \cdot \Delta t \cdot G_a (h - h') = h_c A_s \cdot A \cdot \Delta x \cdot \Delta t (T_a - T_b) \quad (5.29)$$

เมื่อ h - เอนทัลปีของลมร้อนก่อนการอบ (J kg dry air⁻¹)

h' - เอนทัลปีของลมร้อนหลังการอบ (J kg dry air⁻¹)

T_a - อุณหภูมิของลมร้อนก่อนการอบ (°C)

T_b - อุณหภูมิของอากาศก่อนการอบ (°C)

กำหนดให้
$$D_2 = \frac{h_c A_s \cdot \Delta x}{G_a} \quad (5.30)$$

แทนค่าจากสมการ 5.20-5.21 และ 5.30 ลงใน 5.29 และจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$T'_a = \{h - D_2(T_a - T_b) - 2,501,000W'_a\} / (1006 + 1805W'_a) \quad (5.31)$$

4. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกากอ้อย

การคำนวณหาปริมาณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกากอ้อย ทำได้โดยการดุลพลังงาน

พลังงานความร้อนรวมก่อนการอบ = พลังงานความร้อนรวมหลังการอบ

$$A \cdot G_a \cdot \Delta t \cdot h + A \cdot G_b \cdot \Delta t \cdot (C_{pb} + C_{pw} \cdot M_b) T_b = A \cdot G_a \cdot \Delta t \cdot h' + A \cdot G_b \cdot \Delta t \cdot (C_{pb} + C_{pw} \cdot M'_b) T'_b \quad (5.32)$$

กำหนดให้
$$F_2 = \frac{G_b}{G_a} \quad (5.33)$$

แทนค่าจากสมการ 5.20, 5.21 และ 5.33 ใน 5.32 และจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$T'_b = \{h - h' + F_2 \cdot (C_{pb} + C_{pw} \cdot M_b) T_b\} / \{F_2 \cdot (C_{pb} + C_{pw} \cdot M'_b)\} \quad (5.34)$$

บทที่ 6

การทดลอง

6.1 บทนำ

เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาวิจัยในที่นี่ เป็นการศึกษาวิจัยเพื่อหารูปแบบ สมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการจำลองแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง ซึ่งความเหมาะสมในที่นี้หมายถึง สามารถทำนายกระบวนการอบแห้งกากอ้อยเชิงพฤติกรรมของตัวแปรสำคัญที่สามารถทำการวัดได้อย่างสะดวก อันได้แก่ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกากอ้อยและอุณหภูมิของลมร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งกากอ้อยได้อย่างถูกต้องเพียงพอ

ในกระบวนการทดลองของงานวิจัยชิ้นนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการทดลองกระบวนการอบแห้งของเครื่องอบแห้งชั้นหนาย่างง่าย(เครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่ง) เนื่องจากการศึกษาทดลองกระบวนการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่ง จะมีความสะดวกในการเตรียมการทดลองและการควบคุมสภาวะต่างๆของการทดลองได้ง่ายกว่าการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง และสามารถบันทึกข้อมูลตัวแปรที่มีความสำคัญต่างๆของการทดลองได้มากกว่าด้วย ดังนั้น เพื่อความสะดวกจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงลักษณะของกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง กากอ้อยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่งก่อน และเมื่อสามารถสรุปผลหารูปแบบสมการชั้นบางที่ใช้ทำนายลักษณะการกระจายตัวของตัวแปรสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบแห้งกากอ้อยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่งได้อย่างถูกต้องแล้ว จากนั้นจะทำการทดลองในส่วนที่ 2 ซึ่งก็คือการทดลอง อบแห้งกากอ้อยด้วยเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง เพื่อตรวจสอบว่าสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยที่สรุปผลมาจากการทดลองของเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่งนั้นสามารถที่จะประยุกต์ใช้กับการจำลองแบบของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางได้สอดคล้องหรือไม่ อย่างไร

และในบทนี้จะมีการกล่าวถึง รายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และขั้นตอนกระบวนการในการทดลองของแต่ละการทดลองด้วย

6.2 ลักษณะของกากอ้อยที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างกากอ้อยที่ใช้ในการทดลอง ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลจังหวัดสุพรรณบุรี ของบริษัท อุตสาหกรรมน้ำตาลจังหวัดสุพรรณบุรี จำกัด การหาขนาดของอนุภาคกากอ้อยตัวอย่าง ทำได้ด้วยการวัดขนาดโดยการคัดแยกด้วยตะแกรง กากอ้อยที่ได้จากโรงงานจะถูกร่อนด้วยตะแกรงขนาดต่างดังตารางที่ 6.1

ตาราง 6.1 –ขนาดตะแกรง

	SCREEN SIZE	
	MESH (Opening per 2.54 cms)	SIZE OF OPENINGS (cm)
Size No 1.	1.00	2.54
Size No 2.	2.00	1.27
Size No 3.	4.00	0.64
Size No 4.	8.00	0.32
Size No 5.	-	-

Size No 1 - 4 –กากอ้อยค้างอยู่บนตะแกรง

Size No 5 –กากอ้อยตกผ่านช่องเปิด 0.32 cm.

ค่าเฉลี่ยขนาดของอนุภาคกากอ้อยหาได้จากการวัดที่เหมาะสม โดยการสุ่มตัวอย่างอนุภาคกากอ้อยมา 50 ชิ้นของแต่ละช่วงขนาด ลักษณะรูปร่างของอนุภาคกากอ้อยจะไม่เป็นรูปแบบ แต่โดยทั่วไปจะมีลักษณะ ยาวและแบน ขนาดหลัก 3 ค่า คือความกว้าง ความยาว และความหนา จะถูกวัดโดย เวอร์เนียคาลิเปอร์ , ไมโครมิเตอร์ หรือไม้บรรทัด แต่ละอนุภาคจะทำการวัด 6 ค่าแล้ว หาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.2 ซึ่งตัวอย่างของอนุภาคกากอ้อยแต่ละขนาดแสดงดังรูปที่ 6.1-6.5 ส่วนรูปที่ 6.6 แสดงถึงเครื่องมือที่ใช้วัดขนาดอนุภาคกากอ้อย

ขนาดอนุภาคกากอ้อยที่มีความสำคัญในการใช้คำนวณโดยสมการหาค่าคงที่ของการอบแห้งของกากอ้อย คือ ความหนาของอนุภาคกากอ้อย

ตารางที่ 6.2 - ขนาดอนุภาคกากอ้อย

	ขนาดเฉลี่ย(cms)		
	ความยาว	ความกว้าง	ความหนา
Size No 1.	6.574	1.499	0.5101
Size No 2.	5.681	0.933	0.3600
Size No 3.	4.284	0.663	0.2841
Size No 4.	2.735	0.344	0.1486

ไม่มีการวัดขนาดอนุภาคกากอ้อย SIZE No 5.

ตารางที่ 6.3 อัตราส่วนโดยมวลของกากอ้อยแต่ละขนาด

	อัตราส่วนโดยมวล
Size No 1.	1.79
Size No 2.	5.62
Size No 3.	19.74
Size No 4.	25.24
Size No 5.	47.61

การเลือกช่วงขนาดของกากอ้อยที่จะใช้ในการทดลอง ในที่นี้จะเลือกมาทำการทดลองเพียงขนาดเดียว ซึ่งจะใช้สำหรับทั้งการทดลองอบแห้งกากอ้อยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเบดนิ่ง และเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง เพื่อให้ถือเป็นตัวแทนที่ใกล้เคียงที่สุดของกากอ้อยตัวอย่างทั้งหมด ขนาดอนุภาคกากอ้อยที่ใช้ในการทดลองถูกเลือกในช่วงของขนาดที่มีความใกล้เคียงกับอนุภาค กากอ้อยที่มีอัตราส่วนโดยมวลมากที่สุดของตัวอย่างกากอ้อยที่ได้มา แต่สำหรับกากอ้อย SIZE No 5 ซึ่งมีอัตราส่วนโดยมวลมากที่สุดก็ไม่มีที่เหมาะสม เนื่องจากจะมีส่วนของอนุภาคกากอ้อยส่วนที่เป็นฝุ่นประกอบอยู่ด้วย ซึ่งอนุภาคกากอ้อยส่วนที่เป็นฝุ่นนี้จะเกิดการติดไฟได้ง่าย และเกิดการฟุ้งกระจายออกจากเบดได้ง่ายขณะทำการทดลอง ดังนั้นเพื่อความถูกต้องของผลการทดลองและเพื่อความปลอดภัยในการทดลอง ในที่นี้จึงเลือกอนุภาคกากอ้อย SIZE No 4. มาใช้ในการทดลอง

การเตรียมกากอ้อยขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง หลังจากที่ยกขนาดกากอ้อยโดยการร่อนแยกได้ในปริมาณที่ต้องการแล้ว กากอ้อยที่จะใช้ในการทดลองนี้จะถูกนำไปเตรียมให้มีความชื้นต่างๆได้โดยการนำกากอ้อยไปผสม

คลุกเคล้าให้เข้ากันอย่างดีกับน้ำในสัดส่วนที่ต้องการ จากนั้นจะเก็บส่วนผสมเอาไว้ในถุงที่ปิดมิดชิดทิ้งไว้ 2 วันเพื่อให้ ความชื้นของกากอ้อยสม่ำเสมอเท่ากันทั้งหมด

6.3 เครื่องทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบเบดนิ่ง(PACKED BED DRYING)

เครื่องทดลองที่ใช้ในการทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบเบดนิ่งมีการจัดระบบอุปกรณ์ทดลอง โดยทั่วไปดังรูปที่ 6.7 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือส่วนของการผลิตและควบคุมอัตราการไหลของลมร้อน ซึ่งได้แก่ Blower , Flow Control Valve , Flow Meter (Orifice) แสดงดังรูปที่ 6.10 Heater และ Temperature Control Unit แสดงดังรูปที่ 6.11 อีกส่วนได้แก่ ชุดของ Test Section (ห้องอบแห้ง) แสดงดังรูปที่ 6.12 และ 6.13

ในการทดลองกากอ้อยที่ถูกเตรียมความชื้นเรียบร้อยแล้วจะถูกนำไปบรรจุในห้องอบแห้งซึ่ง ชุดห้องอบแห้ง จะมีลักษณะหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 22.5x 22.5 เซนติเมตร และมีความสูงของห้องอบแห้ง 40 เซนติเมตร ถูกหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วกันความร้อนอย่างดี เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนดัง ด้านล่างสุดของห้องอบแห้งซึ่งเป็นบริเวณที่ลมร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง ที่ ณ จุดนี้จะกำหนดให้มีค่าอ้างอิงของระยะความสูงของห้องอบแห้งเป็นศูนย์ และได้ทำการติดตั้งตะแกรงตาถี่เอาไว้ เพื่อใช้เป็นตัวรองรับกากอ้อยที่บรรจุในห้องอบแห้ง ซึ่งเป็นตัวกำหนดแนว ระยะเริ่มต้นของห้องอบแห้งให้เป็นแนวเดียวกันตลอดหน้าตัด และเป็นตัวช่วยในการกระจายลมร้อนให้มีลักษณะการ ไหลเข้าของลมร้อนสู่ห้องอบแห้งมีความสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดด้วย และสำหรับที่ระยะความสูงของห้องอบแห้งเท่ากับ 40 เซนติเมตร หรือที่ระยะบนสุดของห้องอบแห้ง ได้ทำการติดตั้งตะแกรงตาถี่เอาไว้เช่นกัน เพื่อเป็นการป้องกันและ ลดการฟุ้งกระจายของอนุภาคกากอ้อยขณะทำการทดลอง และเป็นตัวช่วยในการกระจายลมร้อนให้มีลักษณะการ ไหลออกของลมร้อนจากห้องอบแห้งมีความสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดอีกด้วย

การวัดอุณหภูมิของลมร้อนภายในเครื่องทดลอง การวัดอุณหภูมิของลมร้อนที่ทางเข้าของห้องอบแห้ง ได้ทำ การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ในตำแหน่งที่ใกล้กับตะแกรง ส่วนตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของลมร้อนในห้องอบแห้งที่ ระยะความสูงของห้องอบแห้ง เท่ากับ 5 , 15 , 25 และ 35 เซนติเมตร ได้ใช้สายเทอร์โมคัปเปิลพันกับแท่งแก้วเพื่อ กำหนดตำแหน่งวัดให้ถูกต้อง ส่วนที่ระยะห้องอบแห้ง 40 เซนติเมตรได้ทำการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลที่ใกล้กับ ตะแกรงบนเพื่อใช้วัด อุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอุณหภูมิของลมร้อนที่ทางออก

ตัวแปรสำคัญที่ได้ทำการบันทึกผลในการทดลองแบบเบดนิ่งเมื่อกำหนดสภาวะของการทดลองในที่นี้ได้แก่

1. ความชื้นของชั้นกากอ้อยทุกๆระยะ 5 เซนติเมตรตลอดความสูงของห้องอบแห้งเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนตามระยะเวลาที่กำหนดสำหรับการทดลอง

2. อุณหภูมิของลมร้อนที่ทางเข้าของห้องอบแห้ง และที่ระยะความสูงของห้องอบแห้งเท่ากับ 5 , 15 , 25 ,35 และ 40 เซนติเมตรทุกๆ 30 วินาที ตลอดระยะเวลาของการทดลอง

3. ปริมาณไอน้ำที่ไหลออกจากห้องอบแห้ง โดยทำการวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนที่ทางออกของห้องอบแห้งทุกๆ 30 วินาทีตลอดระยะเวลาของการทดลอง

6.4 ขั้นตอนการทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิ่ง

ขั้นตอนการทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิ่ง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เปิดพัดลม
2. วัดและปรับตั้งค่าอัตราการไหลของอากาศโดยการปรับวาล์ว
3. เปิดฮีตเตอร์ และปรับค่าอุณหภูมิลมร้อนที่ต้องการโดยตั้งค่าที่เทอร์โมสแตท
4. คู่เครื่องทดลองไว้ครึ่งชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำการปิดพัดลมและฮีตเตอร์
5. วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของสภาวะแวดล้อมตอนเริ่มต้น
6. เก็บตัวอย่างกากอ้อยเพื่อใช้หาความชื้นกากอ้อยเริ่มต้นทำการชั่งน้ำหนัก กากอ้อยที่ใช้ในการทดลอง บรรจุกากอ้อยในชุดทดลอง
7. เปิดพัดลมและฮีตเตอร์
8. บันทึกค่าอัตราการไหลของอากาศทุกๆ 30 วินาที
9. บันทึกค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของลมร้อนที่จุดต่างๆดังนี้ ที่ทางเข้าของ ห้องอบแห้งและที่ระยะความสูงของห้องอบแห้งเท่ากับ 5,15,25,35 เซนติเมตร และ ที่ทางออกของห้องอบแห้ง ทุกๆ 30 วินาที
10. บันทึกค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนที่ทางออกของห้องอบแห้ง ทุกๆ 30 วินาที
11. เมื่อถึงเวลาที่กำหนด ทำการปิด ฮีตเตอร์ ปิดวาล์วจ่ายลมร้อน และปิดพัดลม ทำการเก็บตัวอย่างกากอ้อยที่ระยะความสูงต่างๆของห้องอบแห้งทุกๆระยะ 5 เซนติเมตรเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความชื้นของกากอ้อย
12. วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของสภาวะแวดล้อมสุดท้าย

6.5 เครื่องทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง(COUNTERFLOW DRYING)

เครื่องทดลองที่ใช้ในการทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางมีการจัดระบบอุปกรณ์ทดลอง โดยทั่วไปดังรูปที่ 6.8 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือส่วนของการผลิตและควบคุมอัตราการไหลของลมร้อน ซึ่งได้แก่ Blower , Flow Control Valve , Flow Meter (Orifice) แสดงดังรูปที่ 6.10 Heater และ Temperature Control Unit แสดงดังรูปที่ 6.11 อีกส่วนได้แก่ Feed Hopper , Test Section ,Discharge Hopper, Screw Conveyor แสดงดังรูปที่ 6.14 และส่วนของ Motor กับ Speed Control Unit แสดงดังรูปที่ 6.15

ลักษณะของ Test Section(ห้องอบแห้ง) จะมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 22.5x 22.5 เซนติเมตร และมีความสูงของห้องอบ 30 เซนติเมตร ถูกหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วกันความร้อนอย่างดี เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

6.6 ขั้นตอนการทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

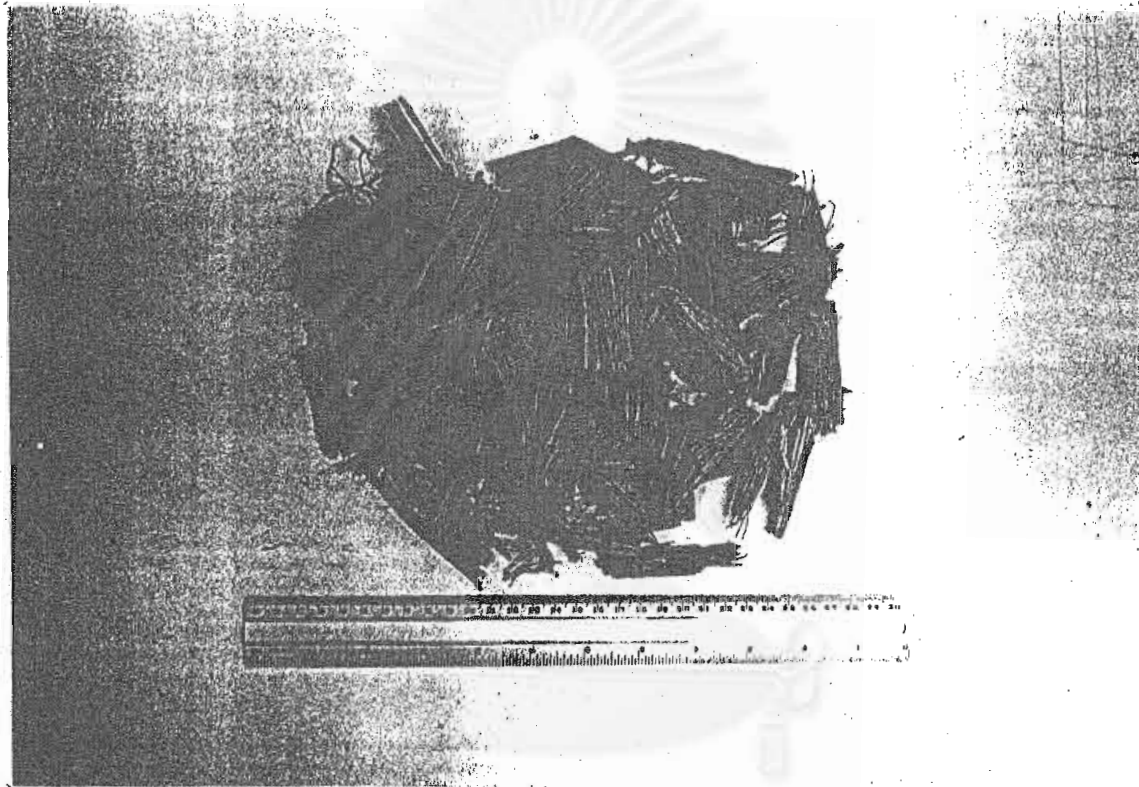
ขั้นตอนการทดลองสำหรับการอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เปิดพัดลม
2. วัดและปรับตั้งค่าอัตราการไหลของอากาศโดยการปรับวาล์ว
3. เปิดฮีตเตอร์ และปรับค่าอุณหภูมิลมร้อนที่ต้องการโดยตั้งค่าที่เทอร์มิสทิส
4. คู่เครื่องทดลองไว้ครึ่งชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำการปิดพัดลมและฮีตเตอร์
5. วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของสภาวะแวดล้อมตอนเริ่มต้น
6. เก็บตัวอย่างกากอ้อยเพื่อใช้หาความชื้นกากอ้อยเริ่มต้น บรรจุกากอ้อยในชุดทดลอง
7. เปิดสกรูคอนเวเยอร์และปรับตั้งค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ค่าอัตราการไหลของกากอ้อยตามที่ต้องการ
8. เปิดพัดลมและฮีตเตอร์
9. บันทึกผลการทดลองของค่าต่างๆดังต่อไปนี้ทุกๆ 1 นาที
 - 9.1 อัตราการไหลของอากาศ
 - 9.2 อุณหภูมิกระเปาะแห้งของลมร้อนที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง
 - 9.3 อุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนที่ทางออกของห้องอบแห้ง

10. เมื่อถึงเวลาที่กำหนด ทำการปิด สกรูคอนเวย์อร์ ฮีตเตอร์ วาล์วจ่ายลมร้อน และพัดลม ทำการเก็บตัวอย่างกากอ้อยที่ระยะความสูงต่างๆของห้องอบแห้ง ทุกระยะ 5 เซนติเมตรเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความชื้นของกากอ้อย
11. วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของสภาวะแวดล้อมตอนสุดท้าย

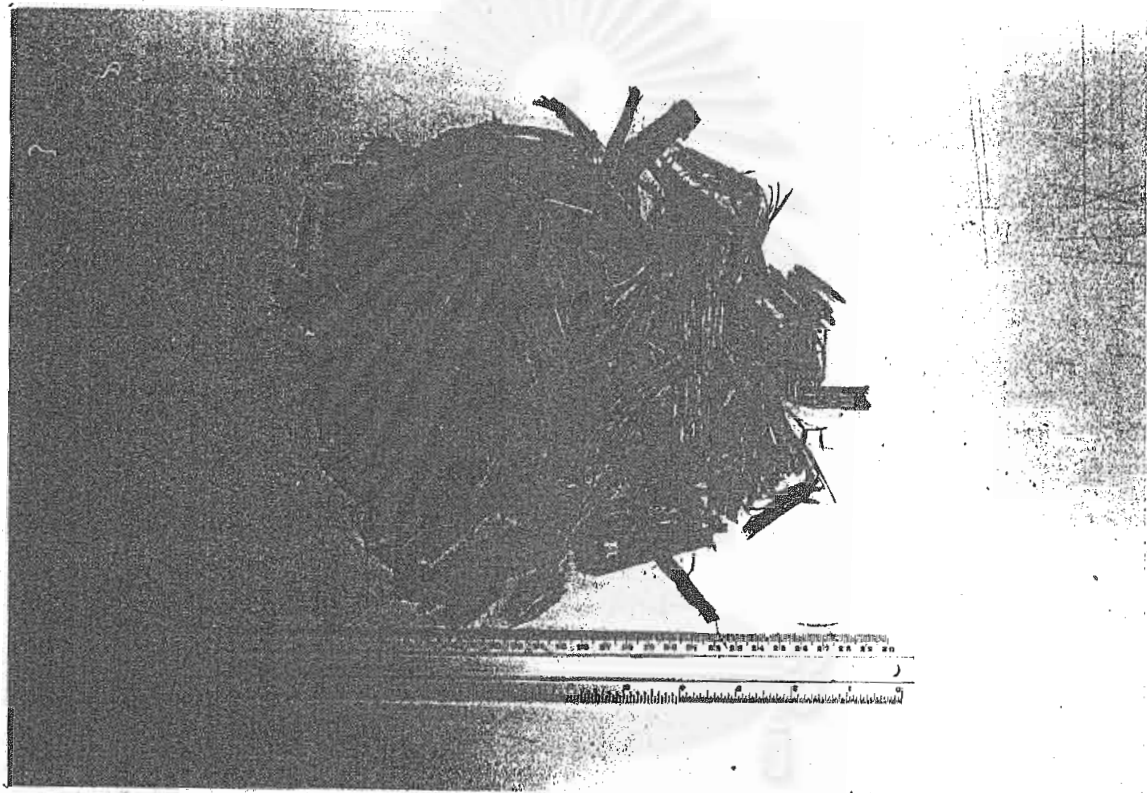


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



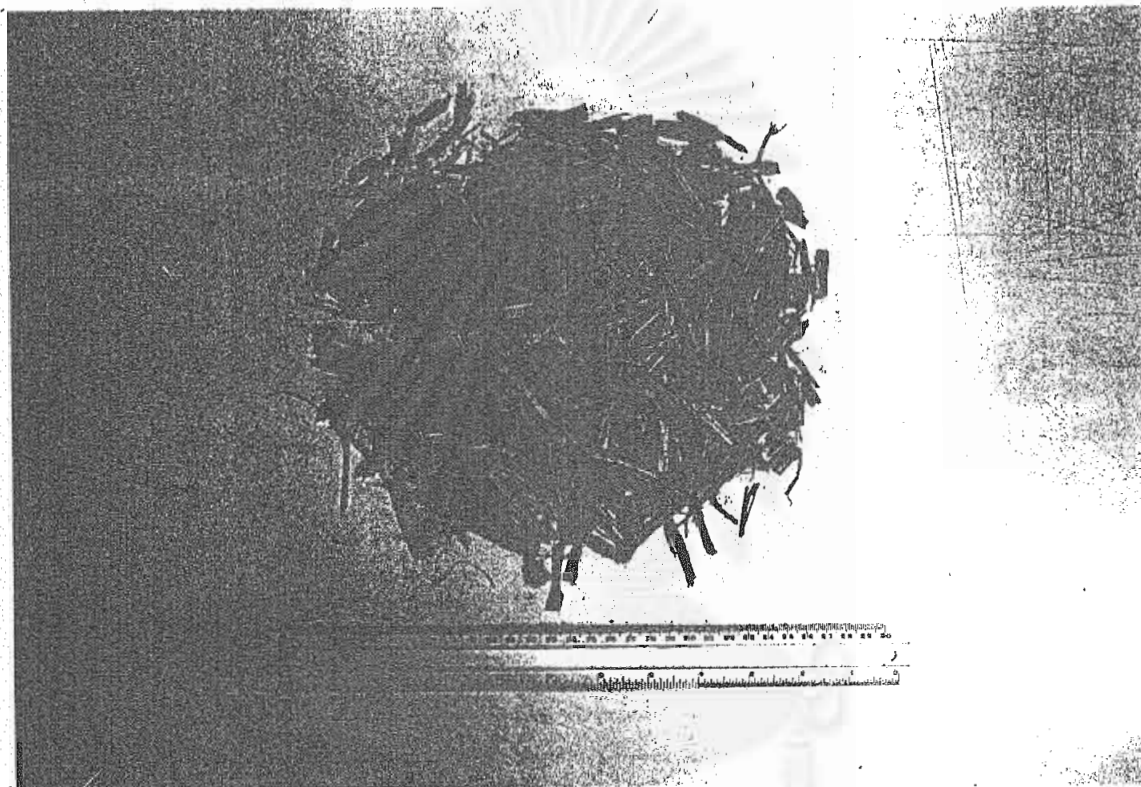
รูปที่ 6.1 ภาพแสดงอนุภาคกากอ้อย - Size No.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

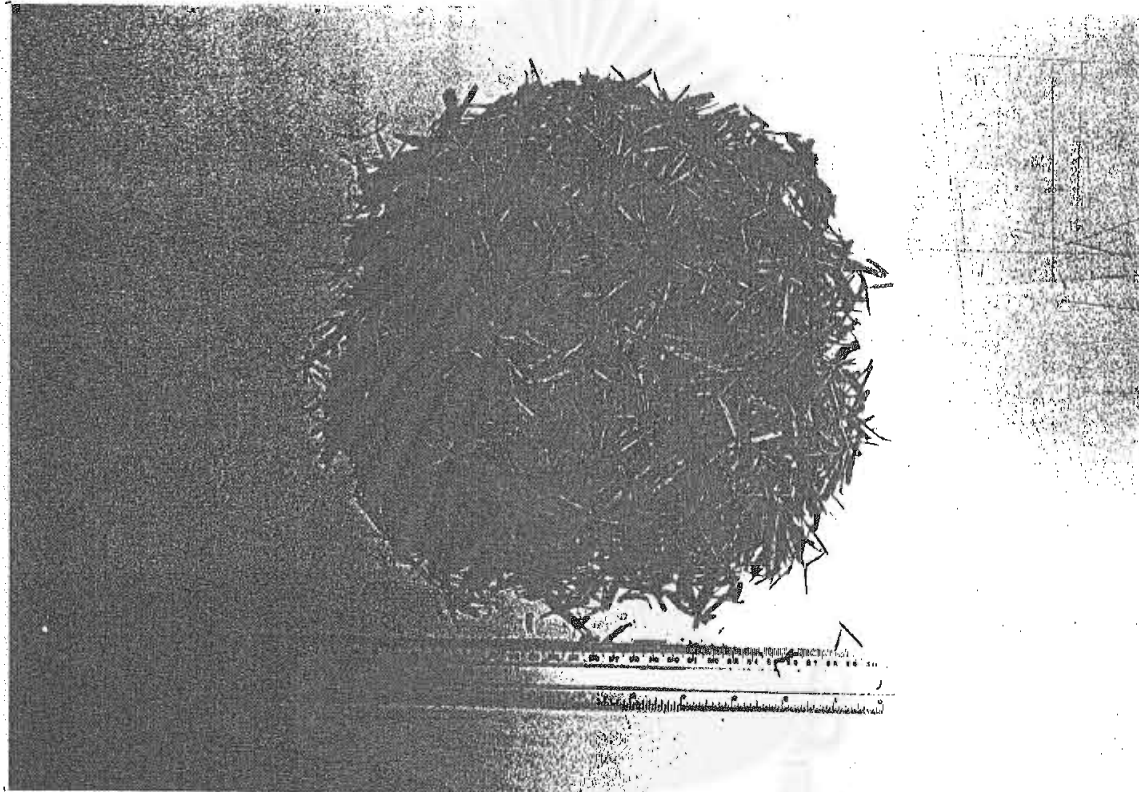


รูปที่ 6.2 ภาพแสดงอนุภาคกากอ้อย – Size No.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

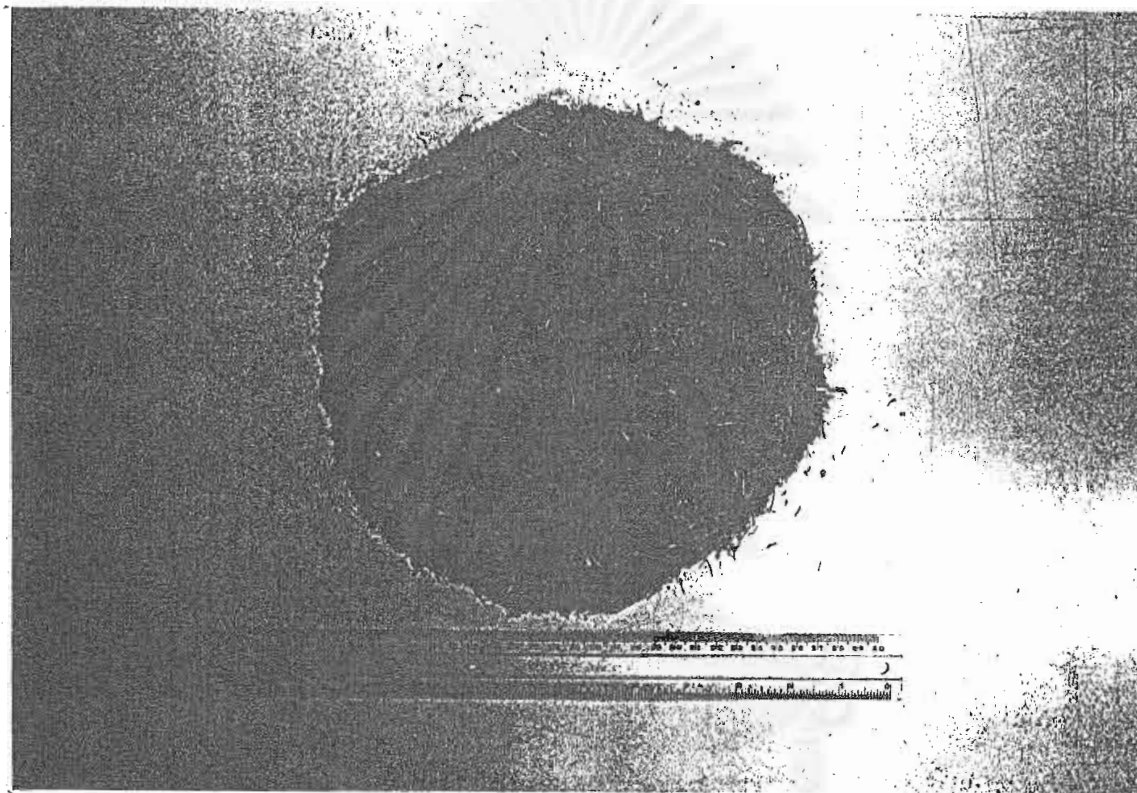


รูปที่ 6.3 ภาพแสดงอนุภาคกากอ้อย – Size No.3



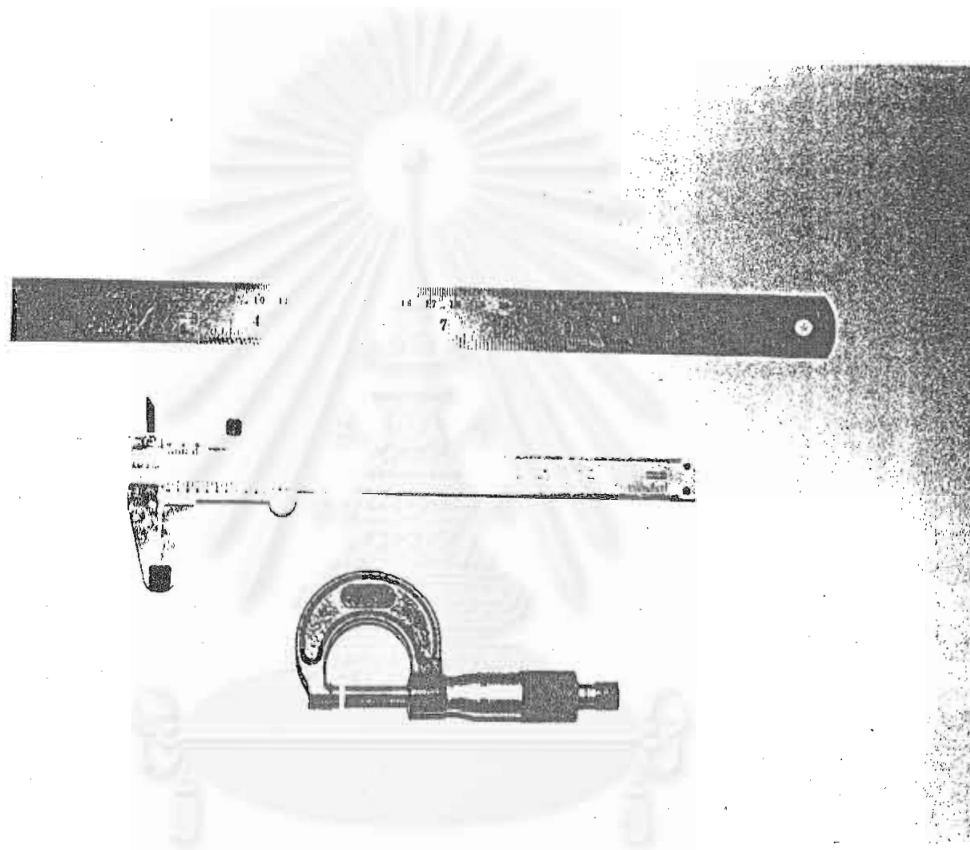
รูปที่ 6.4 ภาพแสดงอนุภาคกากอ้อย - Size No.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.5 ภาพแสดงอนุภาคกากอ้อย – Size No.5

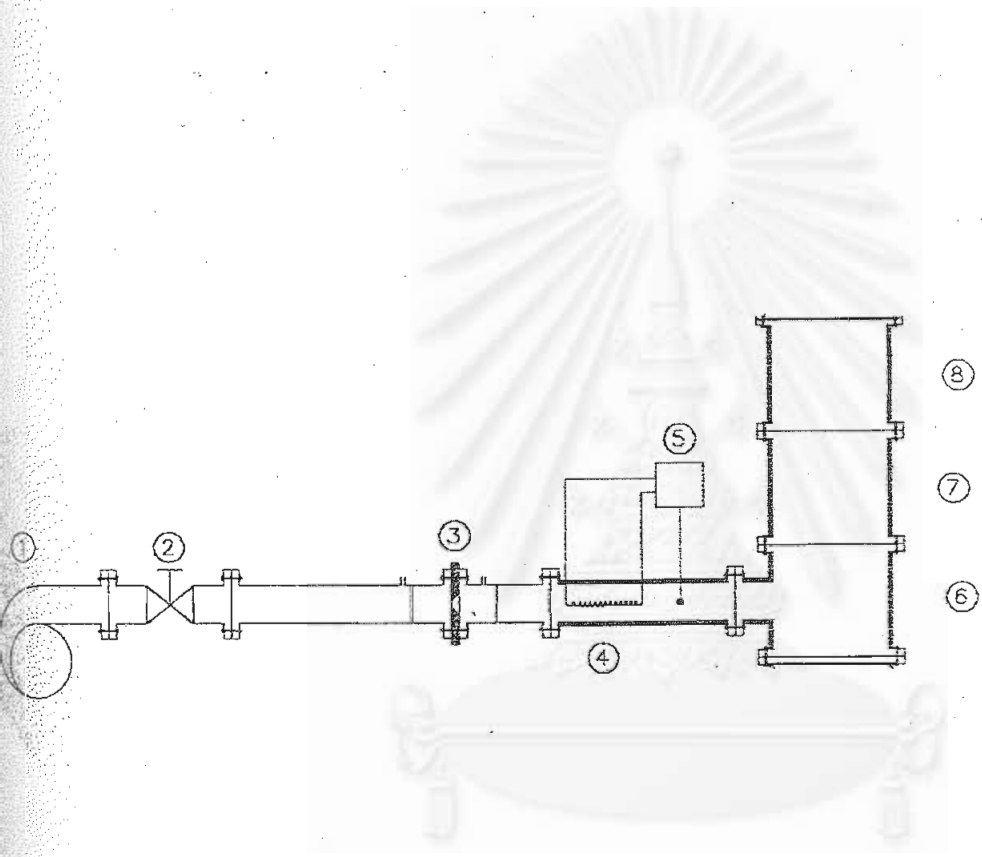
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.6 ภาพแสดงเครื่องมือวัดขนาดอนุภาคกักอ้อย

ภาพเครื่องมือการทดลอง

1. Brower
2. Flow Control Valve
3. Flow Meter (Orifice)
4. Heater
5. Temperature Control Unit
6. Test Section 1
7. Test Section 2
8. Test Section 3

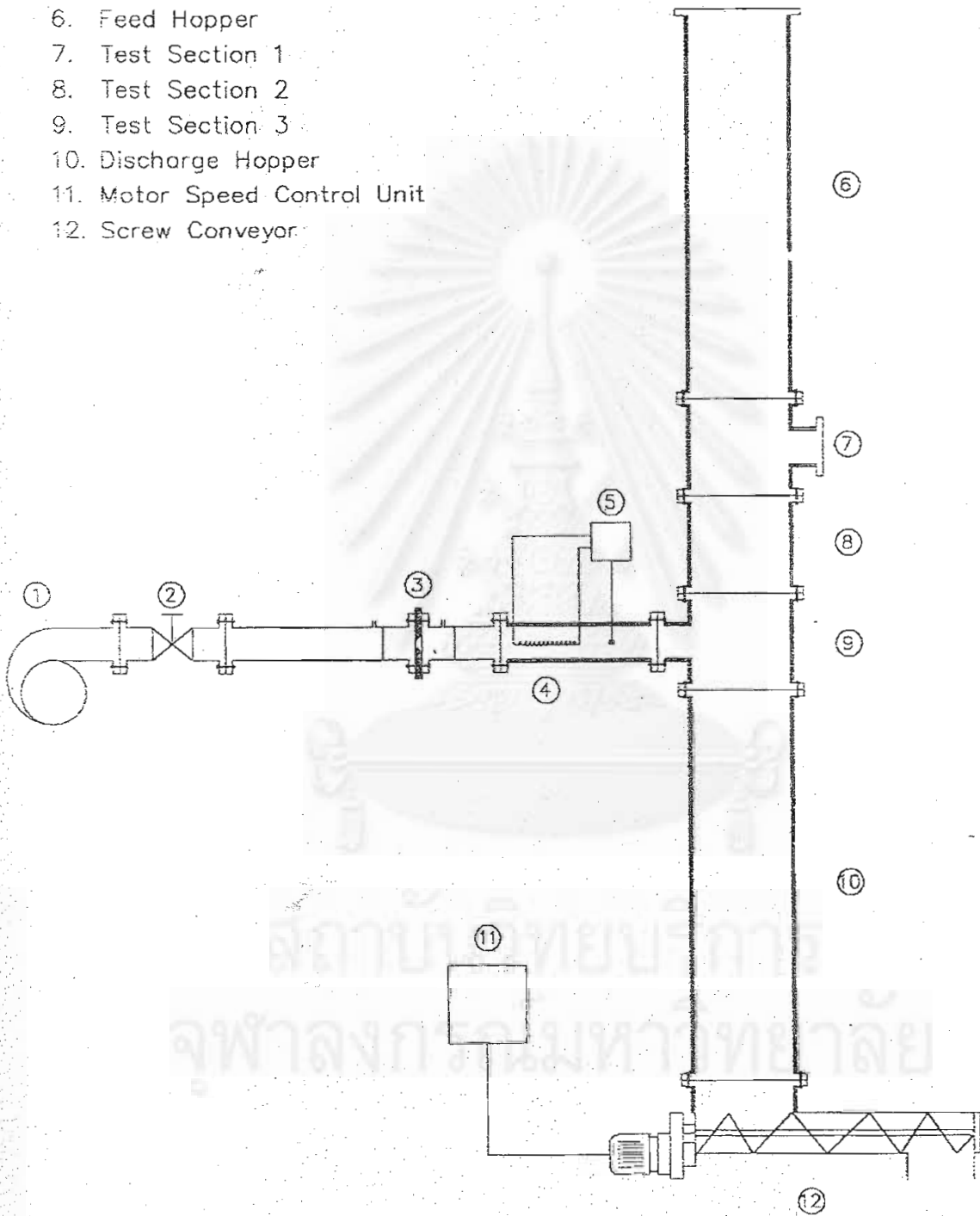


สถาบันวิทยบริการ
วาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

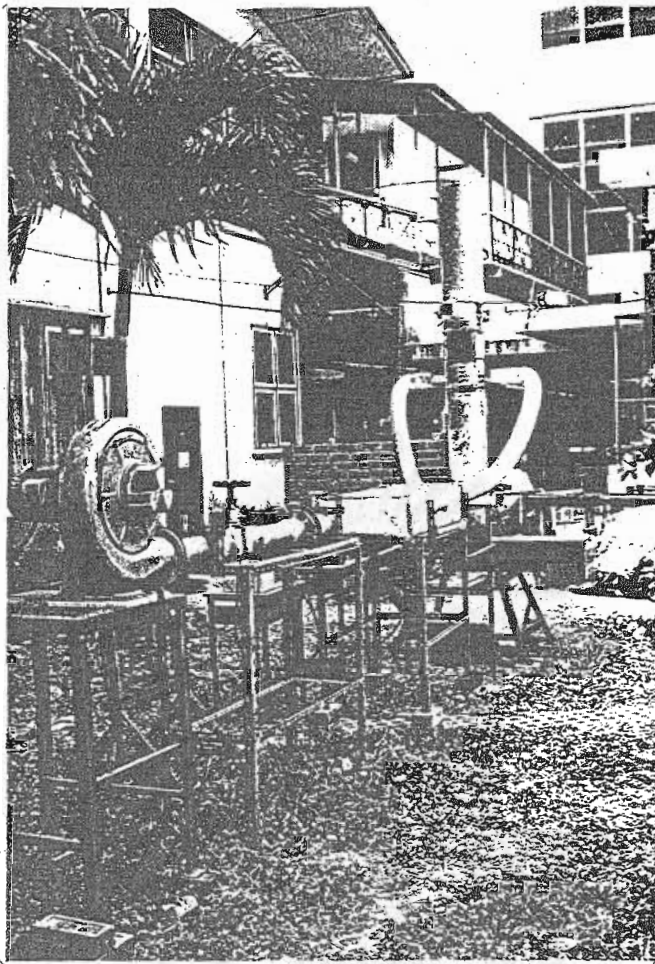
รูปที่ 6.7 ภาพแสดงระบบอุปกรณ์การทดลองของเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่ง

ภาพเครื่องมือการทดลอง

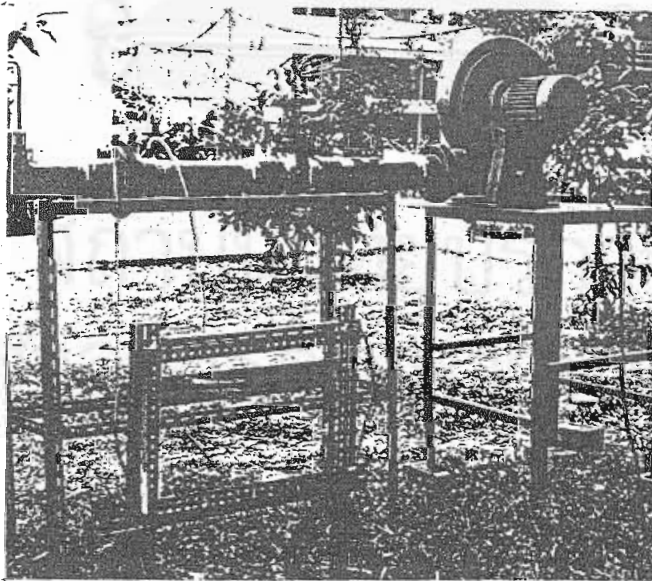
1. Brower
2. Flow Control Valve
3. Flow Meter (Orifice)
4. Heater
5. Temperature Control Unit
6. Feed Hopper
7. Test Section 1
8. Test Section 2
9. Test Section 3
10. Discharge Hopper
11. Motor Speed Control Unit
12. Screw Conveyor



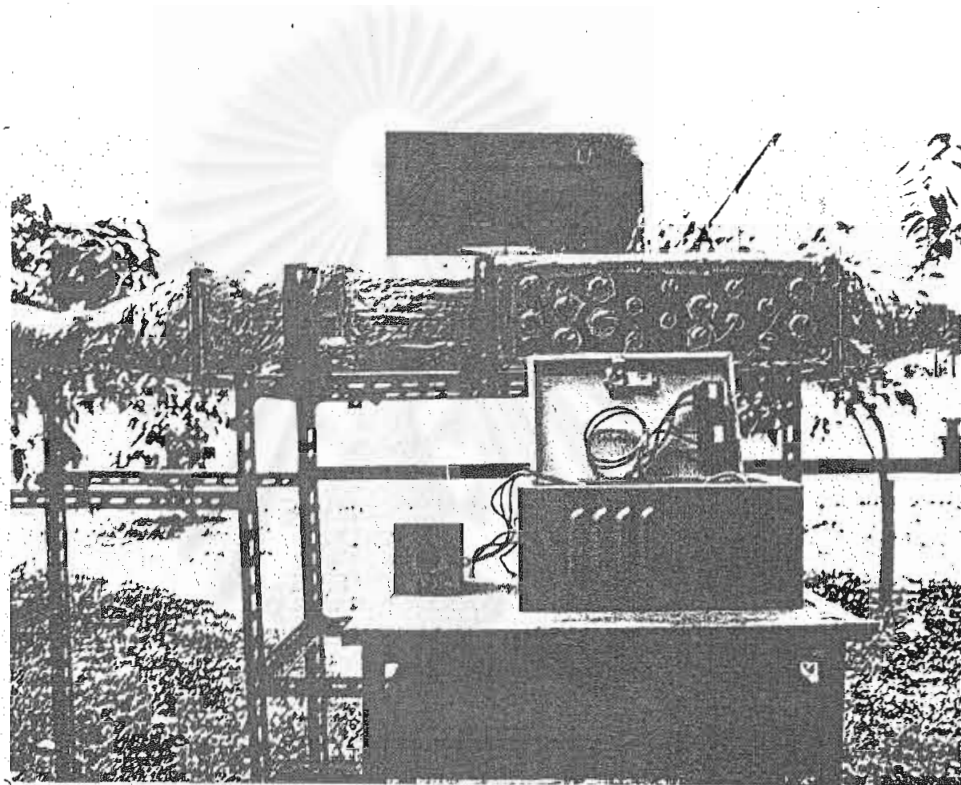
รูปที่ 6.8 ภาพแสดงระบบอุปกรณ์การทดลองของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง



รูปที่ 6.9 ภาพแสดงชุดอุปกรณ์การทดลอง

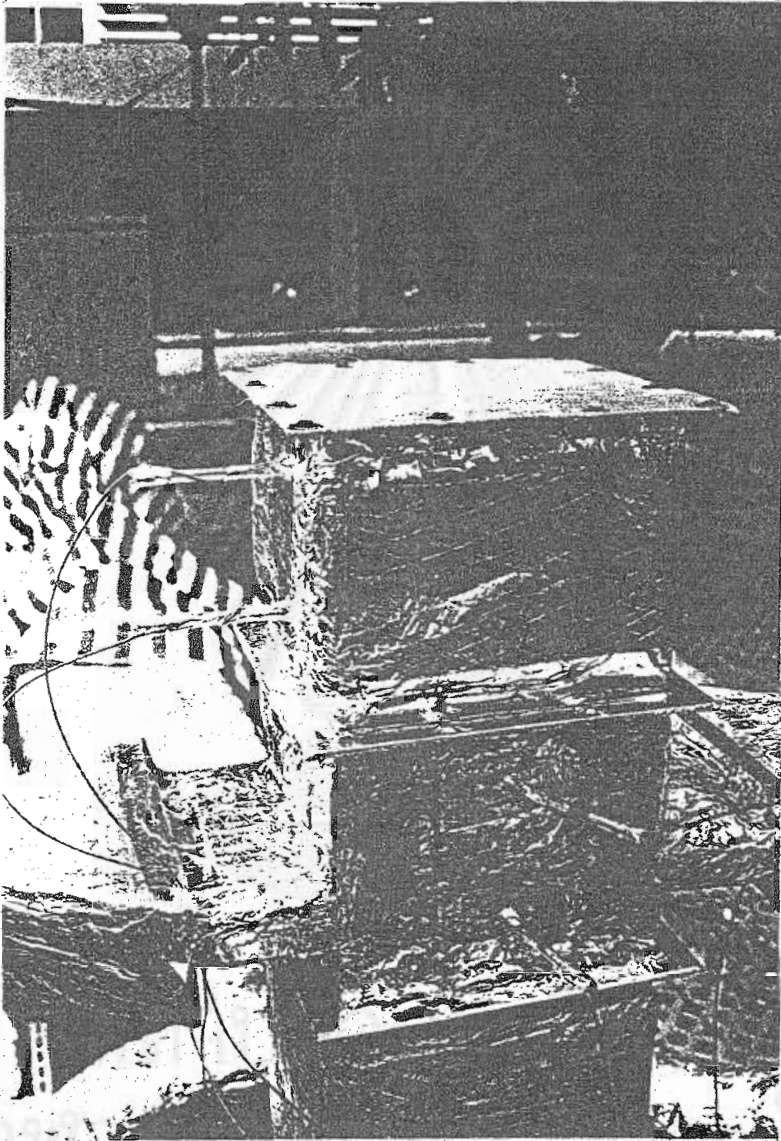


รูปที่ 6.10 ภาพแสดง Blower, Flow Control Valva และ Flow Meter(Orifice)

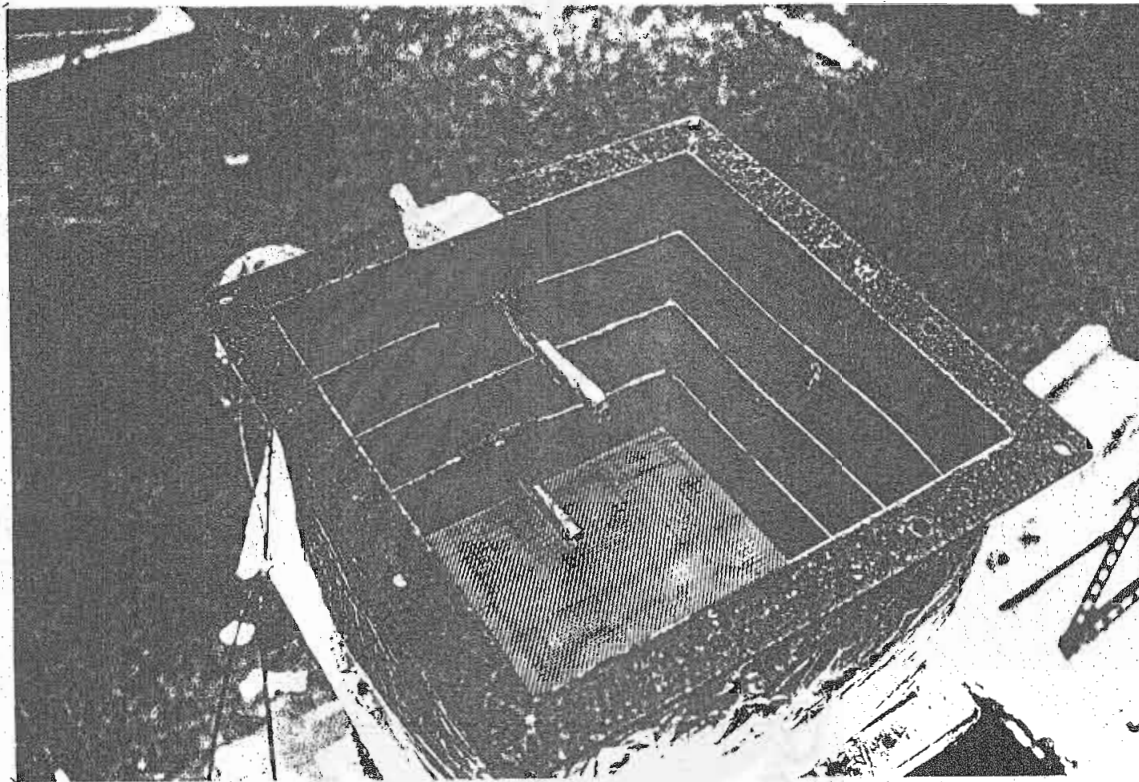


รูปที่ 6.11 ภาพแสดง Heater และ Temperature Control Unit

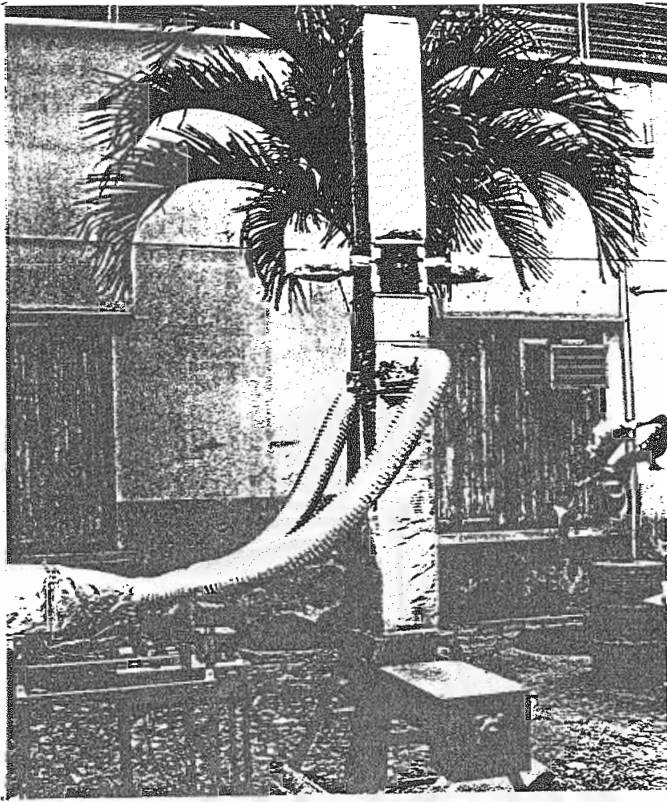
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



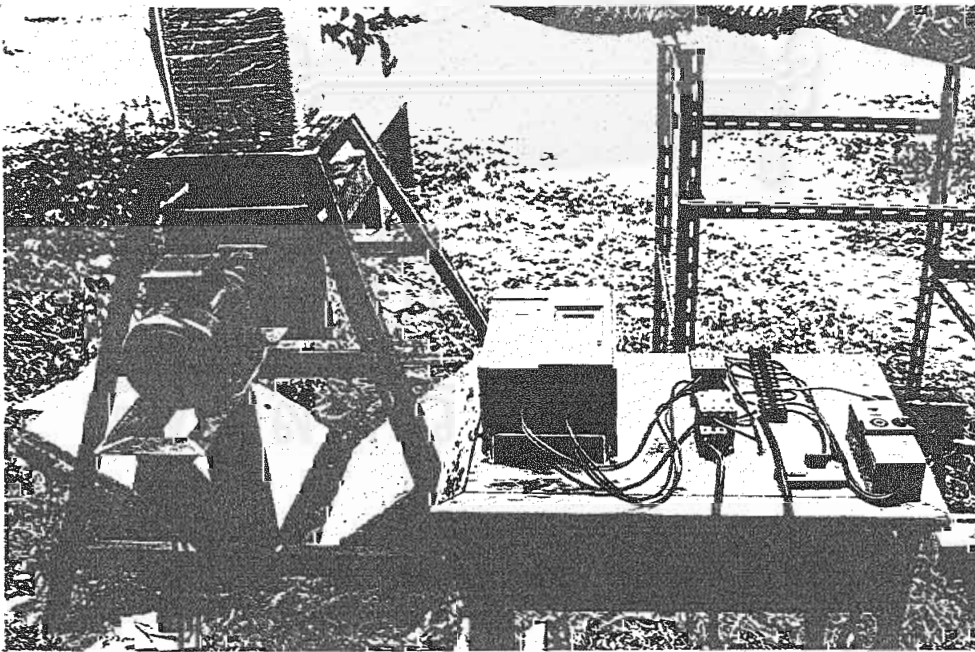
รูปที่ 6.12 ภาพแสดง Test Section ของเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่ง



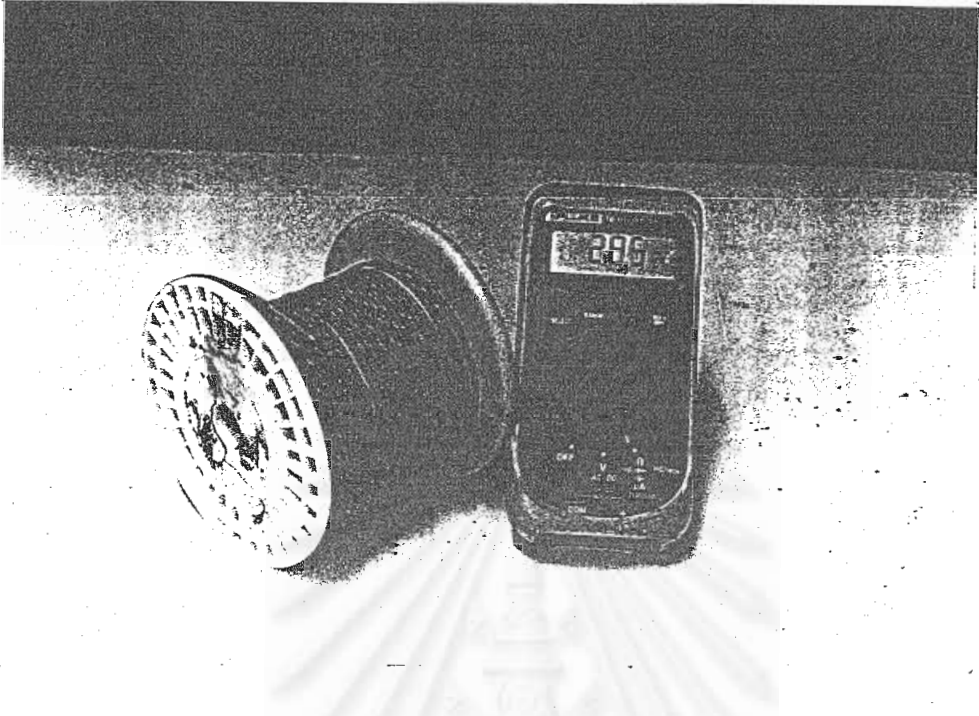
รูปที่ 6.13 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิความร้อนภายใน Test Section ของเครื่องอบแห้งแบบเบตหนึ่ง



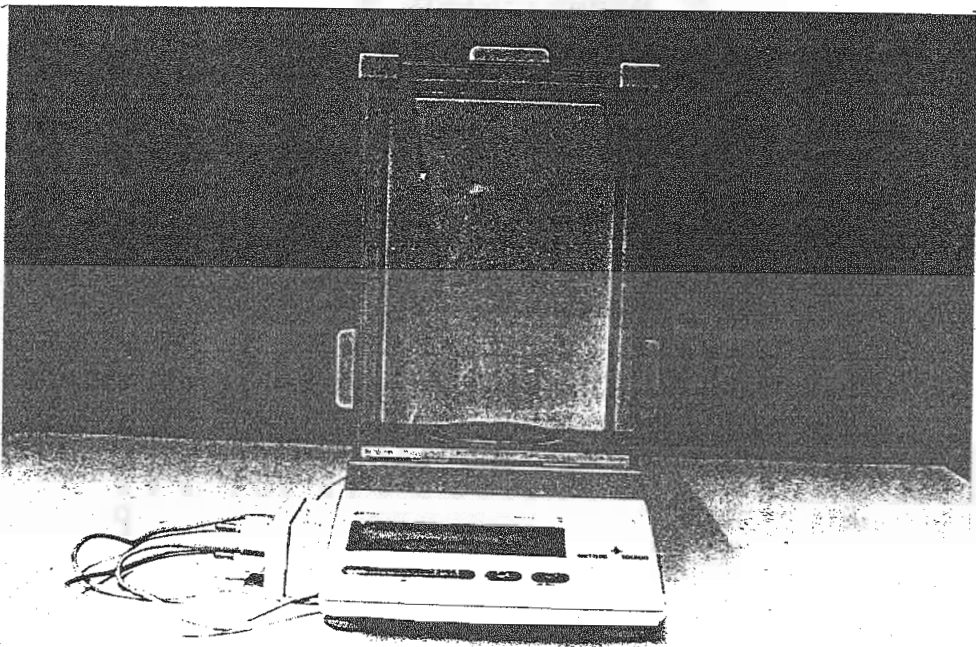
รูปที่ 6.14 ภาพแสดง Feed & Discharge Hopper, Test Section และ Screw Conveyor ของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง



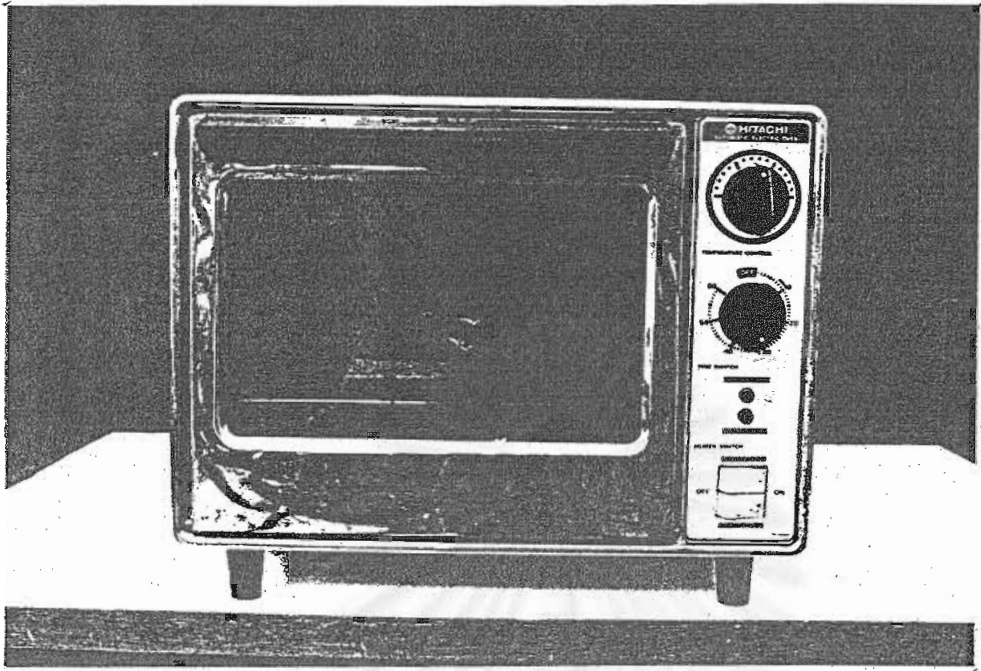
รูปที่ 6.15 ภาพแสดง Motor และ Speed Control Unit ของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง



รูปที่ 6.16 ภาพแสดงอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 6.17 ภาพแสดงเครื่องชั่งละเอียดแบบดิจิทัล



รูปที่ 6.18 ภาพแสดงตู้อบที่ใช้ในการอบหาความชื้นของกากอ้อย

สถาบันวิทยบริการ
าลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

เปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำลองแบบ

7.1 บทนำ

ในบทนี้จะแสดงถึงรายละเอียดของผลการทดลองที่ได้จากการทดลองอบแห้งกากอ้อยด้วยเครื่องอบแห้ง 2 แบบ ได้แก่เครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิง และเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง โดยในตอนต้นจะแสดงถึงผลการทดลองของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบโดยการใช้รูปแบบสมการ ชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อย 2 รูปแบบ คือทั้งกรณีที่ใช้รูปแบบสมการอย่างง่ายโดยไม่อาศัย ค่าคงที่จากการทดลอง และกรณีที่ใช้รูปแบบสมการเมื่อมีการประยุกต์ค่าคงที่จากการทดลองเข้าไป เพื่อวิเคราะห์หารูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยที่เหมาะสม จากนั้นในหัวข้อถัดไป จะแสดงถึงผลการทดลองของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง และการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลองแบบเมื่อใช้รูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยที่สรุปได้จากเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิง เพื่อยืนยันถึงความถูกต้องเมื่อนำสมการดังกล่าวไปใช้ในการจำลองแบบสำหรับกระบวนการการอบแห้งกากอ้อยของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง และในตอนท้ายของบทนี้จะเป็นการกล่าวสรุปรวมถึงผลที่ได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดลองและการจำลองแบบ

7.2 เครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิง

7.2.1 ผลการทดลอง

สำหรับการทดลองอบแห้งกากอ้อยโดยใช้เครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิง ในที่นี้ใช้เครื่องทดลองที่มีขนาดหน้าตัดของเบต 22.5 x 22.5 ซม. และมีความสูงของเบตเท่ากับ 40 ซม. ตัวอย่างกากอ้อยที่ใช้ในการทดลองได้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลจังหวัดสุพรรณบุรี ขนาดอนุภาคกากอ้อยที่ใช้ในการทดลองถูกเลือกในช่วงที่มีความเหมาะสมในการเป็นตัวแทนของตัวอย่าง กากอ้อยมากที่สุด ซึ่งในที่นี้กากอ้อยมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 1.486 มม. ส่วนช่วงสภาวะอื่นๆของการทดลองมีค่าดังต่อไปนี้ อุณหภูมิลมร้อน 169 ถึง 203 °C ความเร็วลมร้อน 0.610 ถึง

0.804 m/s ความชื้นสัมบูรณ์ลมร้อน 0.017171 ถึง 0.019059 kg/kg dry air ความชื้นกากอ้อย 93.7 ถึง 125.3 % (dry basis) ซึ่งรายละเอียดข้อมูลสภาวะการทดลองของแต่ละการทดลองแสดงดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 สภาวะการทดลองเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิ่ง

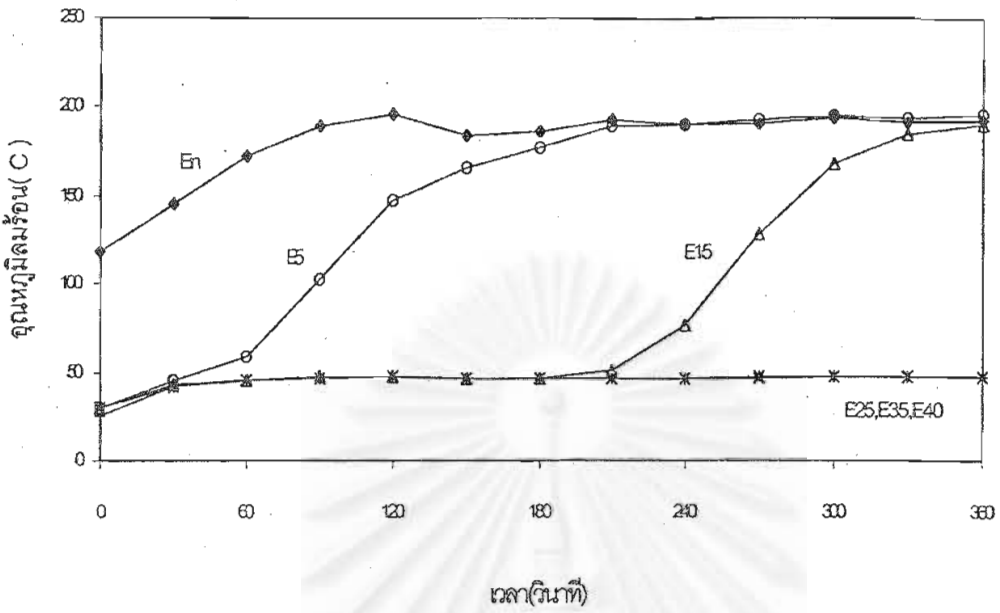
การทดลองที่	อุณหภูมิลมร้อน °C	ความเร็วลมร้อน m/s	ความชื้นลมร้อน kg/kg dry air	ความชื้นกากอ้อย %(dry basis)
Experiment#1	190	0.787	0.017432	117.7
Experiment#2	189	0.790	0.017171	120.1
Experiment#3	190	0.736	0.017975	121.1
Experiment#4	203	0.619	0.018859	106.6
Experiment#5	180	0.688	0.019059	112.6
Experiment#6	169	0.707	0.017942	93.7
Experiment#7	189	0.804	0.018424	125.3

รายละเอียดของผลการทดลองทั้ง 7 การทดลองได้แสดงเป็นกราฟผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7.1 ถึง 7.14 ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนสำหรับแต่ละการทดลอง ได้แก่ กราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบต และ กราฟการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ณ เวลาสุดท้ายของการทดลอง

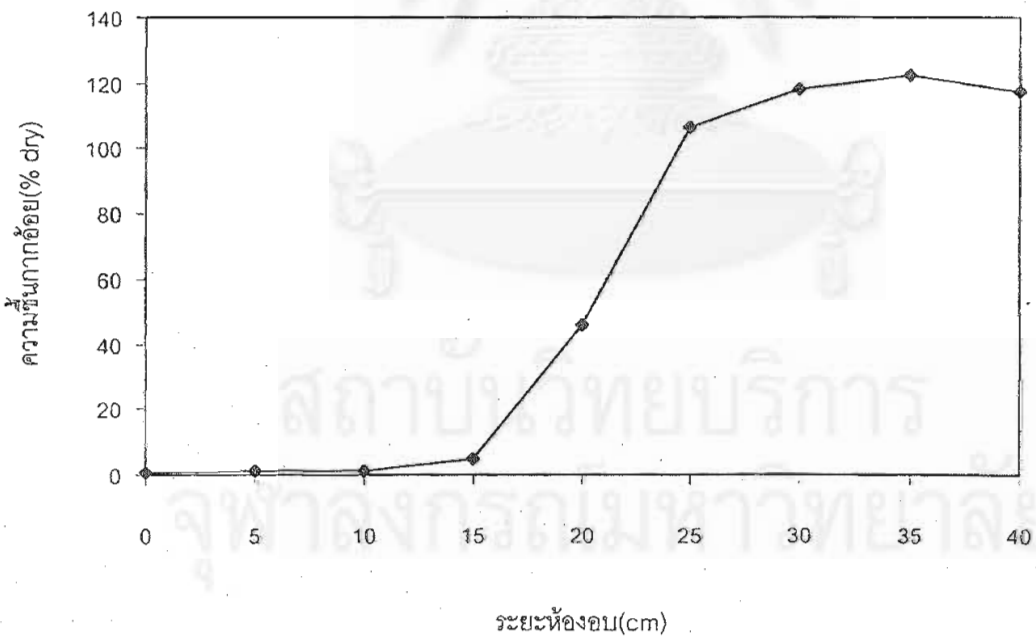
กราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบต แสดงถึงผลของการวัดอุณหภูมิของลมร้อน ณ จุดวัดที่กำหนดได้แก่จุดทางเข้าเบตและจุดต่างๆภายในเบต (ระยะความลึกของเบตเท่ากับ 5,15,25,35 และ 40 ซม.) ที่ทุกช่วงเวลา 30 วินาทีตลอดการทดลอง ซึ่งความหมายของสัญลักษณ์กำกับเส้นกราฟเป็นดังนี้ Ein หมายถึง อุณหภูมิของลมร้อนที่จุดทางเข้าเบต E5, E15, E25, E35 และ E40 หมายถึง อุณหภูมิของลมร้อนที่ระยะความลึกของเบตเท่ากับ 5,15, 25,35 และ 40 ซม.ตามลำดับ กราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบตของ Experiment#1 ถึง 7แสดงดังในรูปที่ 7.1, 7.3, 7.5, 7.7, 7.9, 7.11 และ 7.13 ตามลำดับ

กราฟการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ณ เวลาสุดท้ายของการทดลอง แสดงถึงผลการวัดความชื้นของกากอ้อยที่ระยะความลึกของเบตเท่ากับ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 ซม.ที่เวลาสุดท้ายของการทดลอง ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 7.2, 7.4, 7.6, 7.8, 7.10, 7.12 และ 7.14 สำหรับผลของ Experiment#1 ถึง 7 ตามลำดับ

Experiment # 1



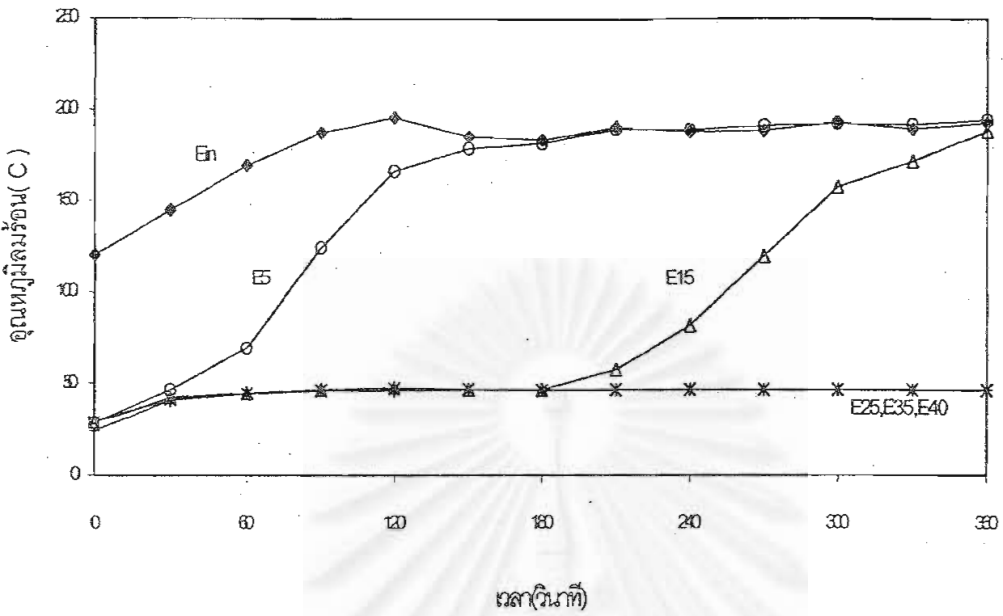
รูปที่ 7.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



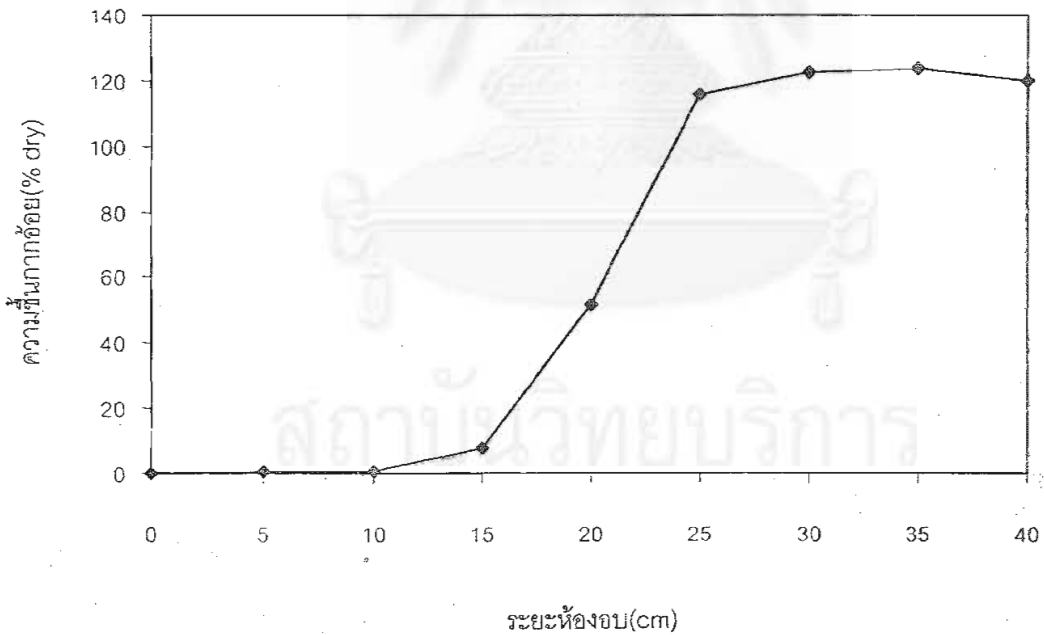
รูปที่ 7.2 การกระจายตัวของความชื้นของกากกล้วยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 190 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_a = 0.787 \text{ m/s}$, $W_a = 0.017432 \text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 117.7 \text{ \% dry}$

Experiment #2



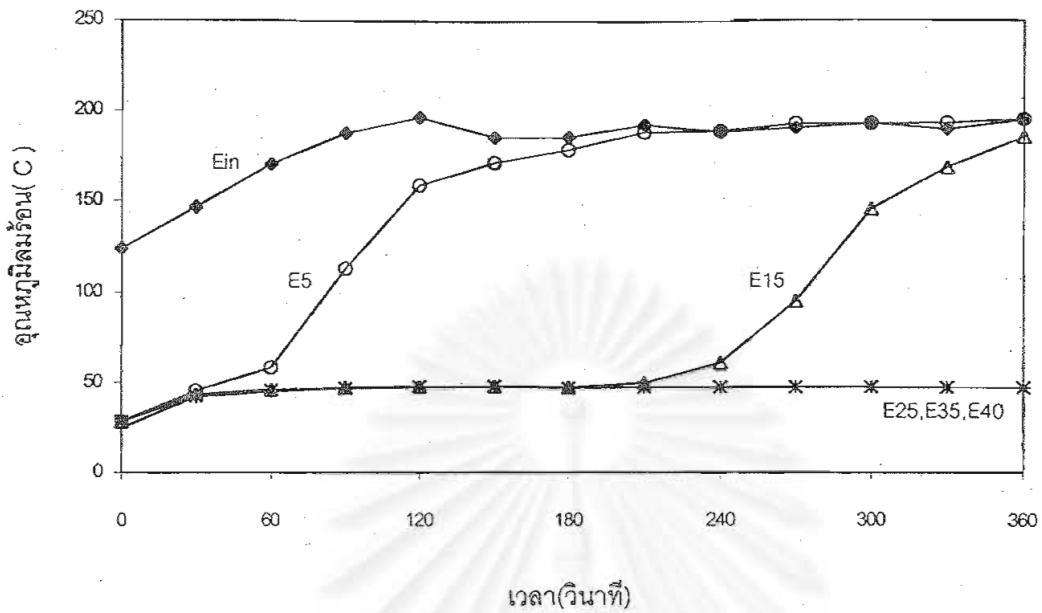
รูปที่ 7.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



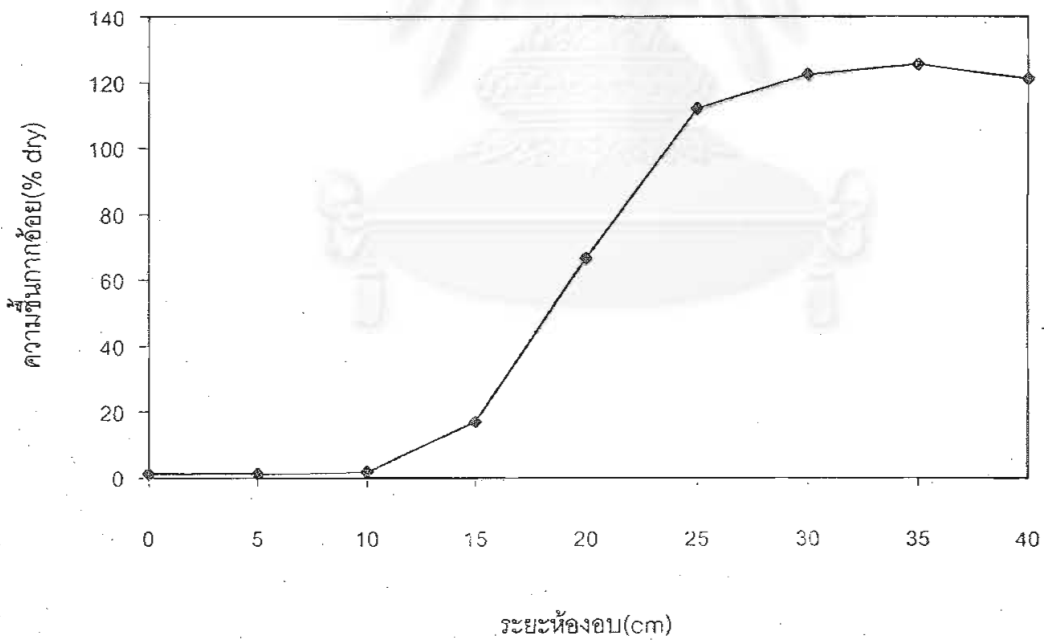
รูปที่ 7.4 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 189^\circ\text{C}$, $V_a = 0.790\text{ m/s}$, $W_a = 0.017171\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 120.1\% \text{ dry}$

Experiment # 3



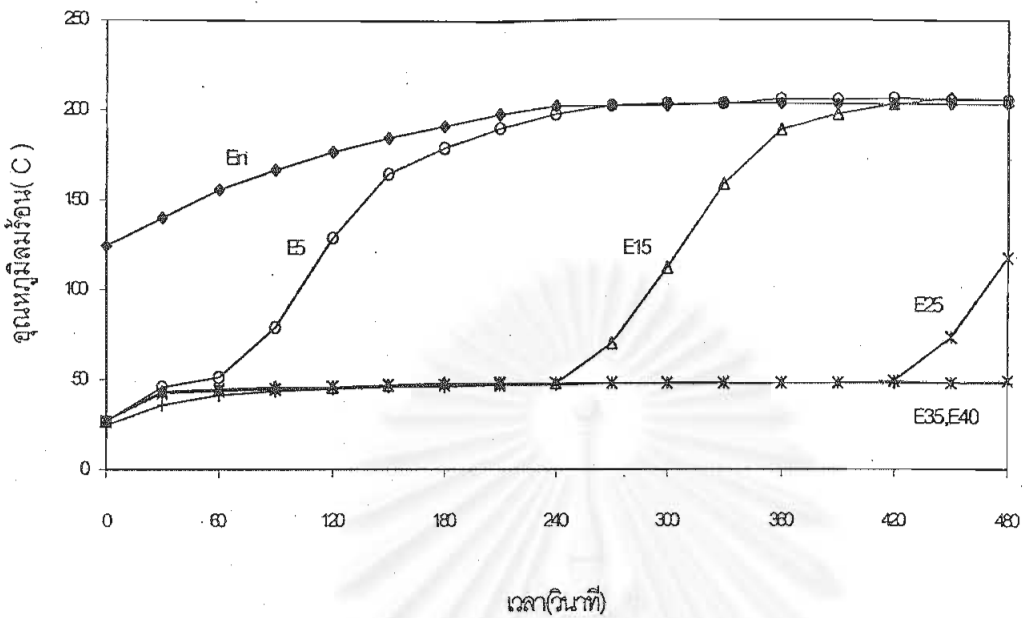
รูปที่ 7.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากของลมร้อนภายในเบด



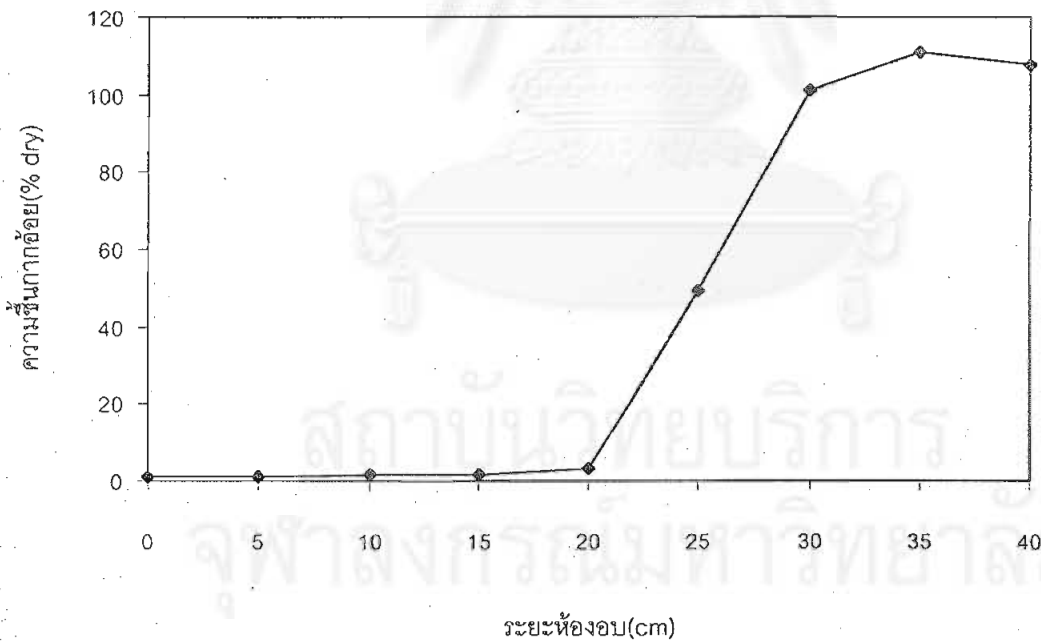
รูปที่ 7.6 การกระจายตัวของความชื้นของอากาศภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 190 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_a = 0.736 \text{ m/s}$, $W_a = 0.017975 \text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 121.1 \text{ \% dry}$

Experiment # 4



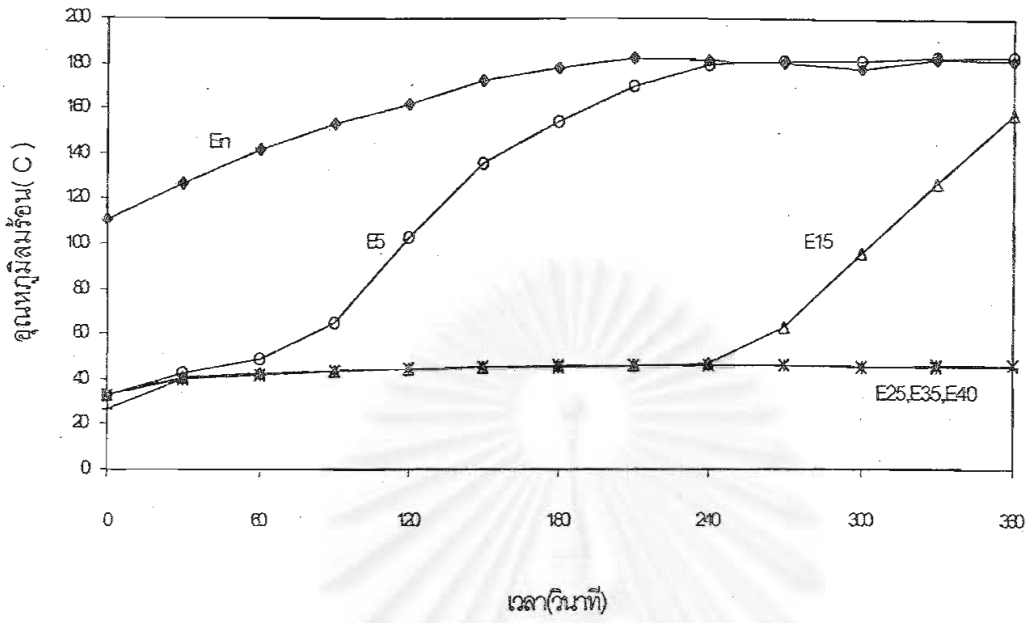
รูปที่ 7.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



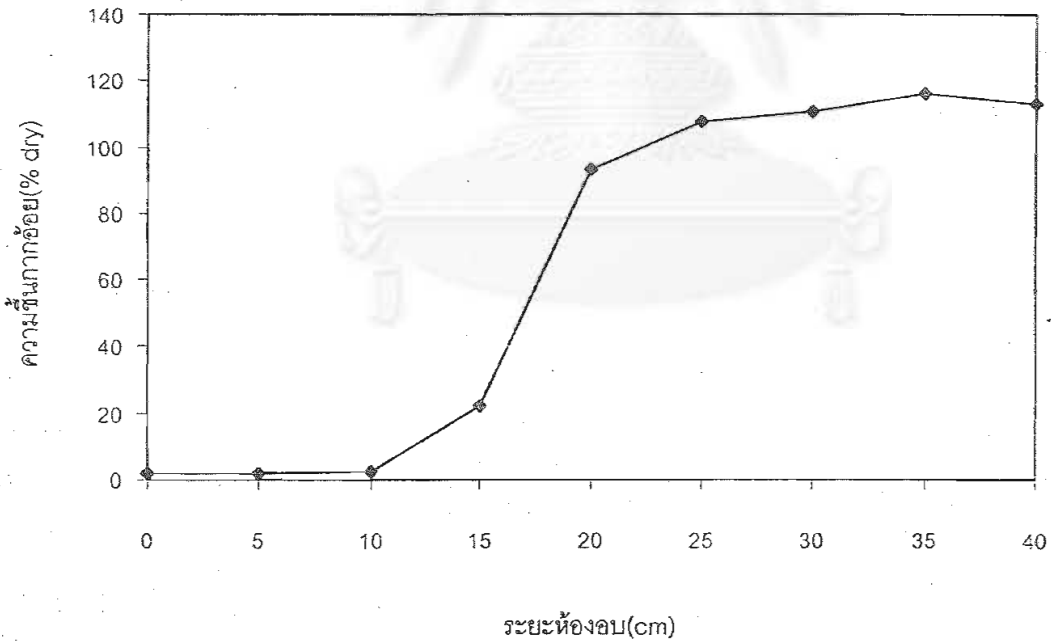
รูปที่ 7.8 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 480 วินาที

$T_a = 203 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_a = 0.619 \text{ m/s}$, $W_a = 0.018859 \text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 106.6 \text{ } \% \text{ dry}$

Experiment #5



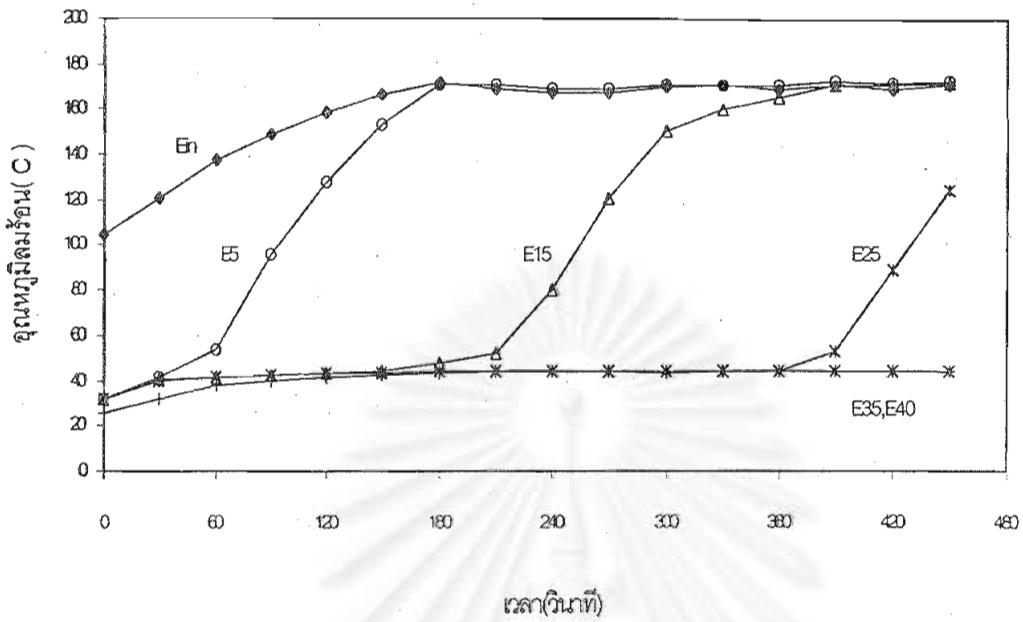
รูปที่ 7.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



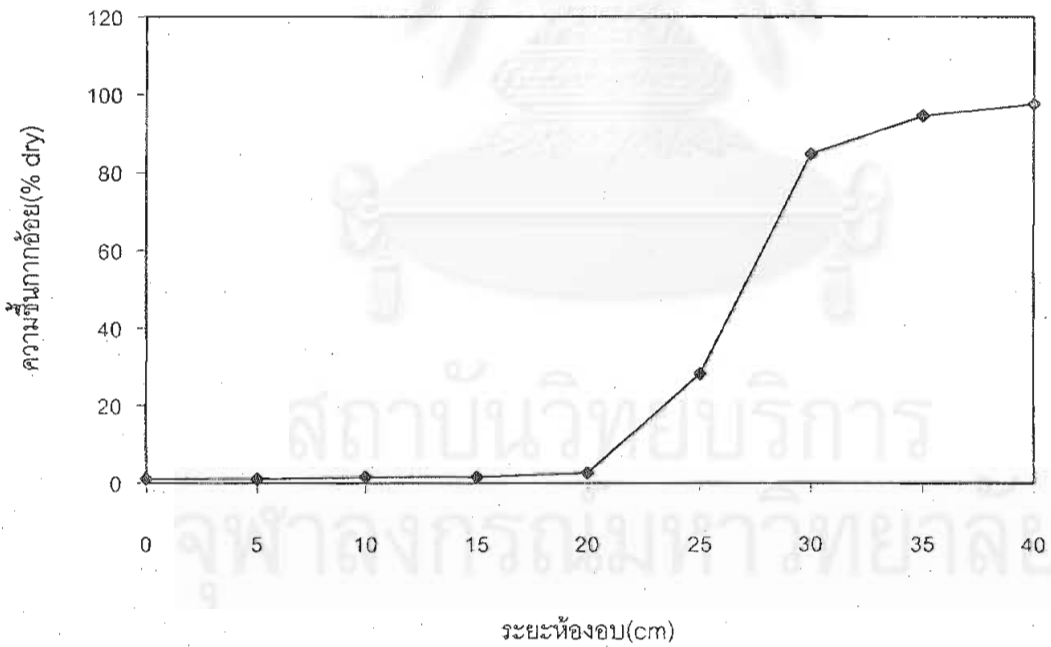
รูปที่ 7.10 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 180 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_a = 0.688 \text{ m/s}$, $W_a = 0.019059 \text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 112.6 \text{ \% dry}$

Experiment # 6



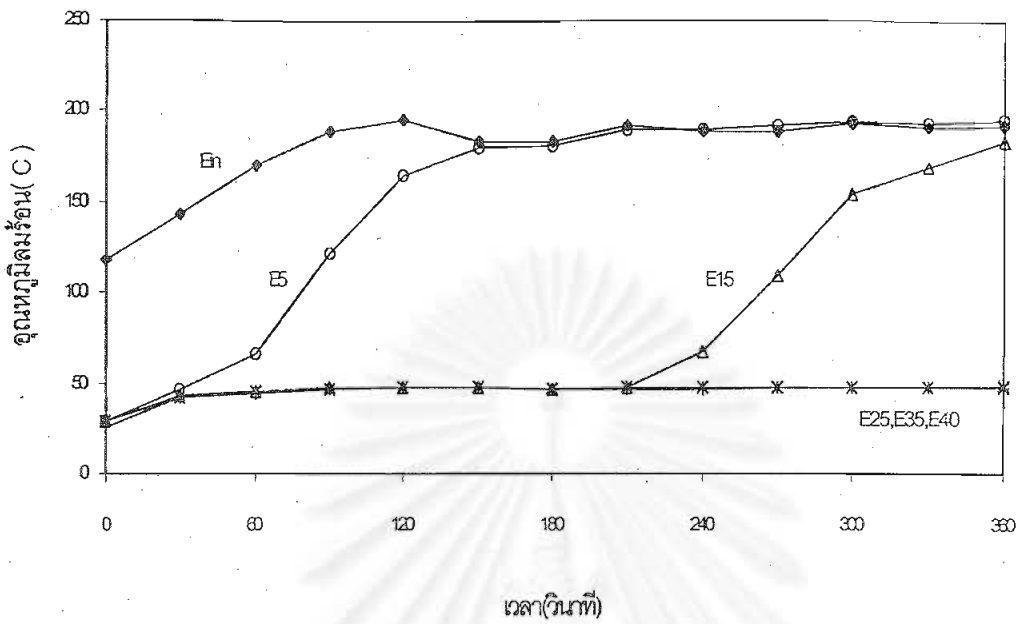
รูปที่ 7.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



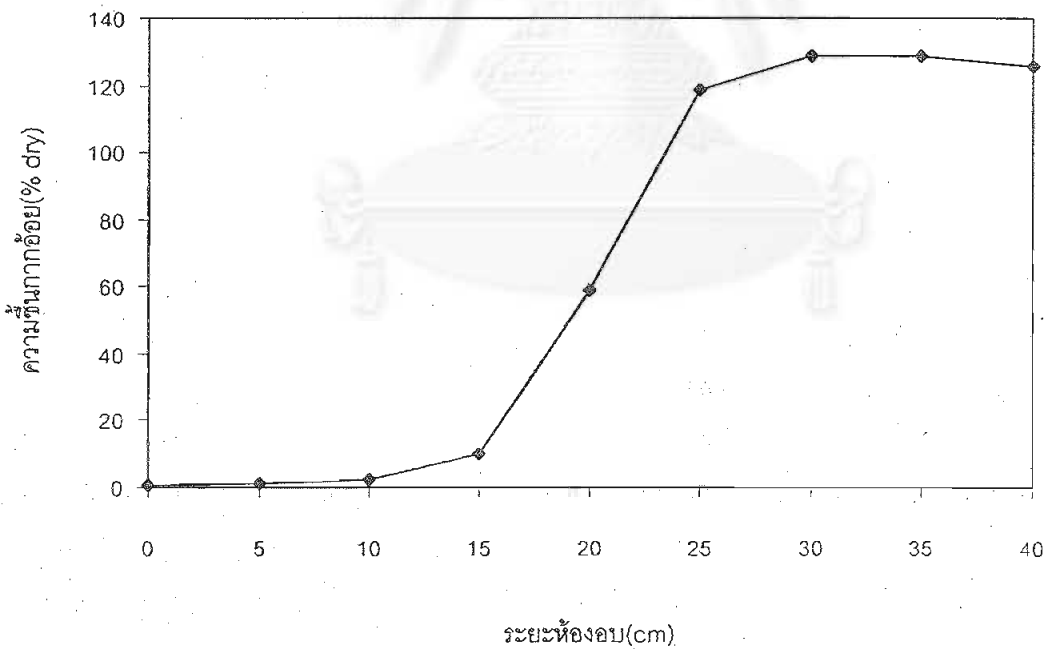
รูปที่ 7.12 การกระจายตัวของความชื้นของอากาศอ้อยภายในเบดที่เวลา 450 วินาที

$T_a = 169 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_a = 0.707 \text{ m/s}$, $W_a = 0.017942 \text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 93.7 \text{ \% dry}$

Experiment # 7



รูปที่ 7.13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



รูปที่ 7.14 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 189\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.804\text{ m/s}$, $W_a = 0.018424\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 125.3\text{ \% dry}$

7.2.2 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองแบบ

การจำลองแบบแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. จำลองแบบโดยรูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางอย่างง่ายโดยไม่อาศัยค่าคงที่จากการทดลอง ซึ่งอยู่ในรูป

$$\frac{(M - M_c)}{(M_i - M_c)} = a \exp(-kt) \quad (7.1)$$

เมื่อ $a = 1.0$

k - ค่าคงที่ของการอบแห้ง

2. จำลองแบบโดยรูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางเมื่อมีการประยุกต์ ค่าคงที่จากการทดลองเข้าไป ซึ่งอยู่ในรูป

$$\frac{(M - M_c)}{(M_i - M_c)} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-ckt) \quad (7.2)$$

เมื่อ $a = \frac{8}{\pi^2}$

k - ค่าคงที่ของการอบแห้ง

c - ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

ในการวิจัยนี้ ค่าคงที่ c ที่เหมาะสมสำหรับชุดของผลการทดลอง ถูกหามาโดยการจำลองแบบเมื่อแทนค่าคงที่ c ที่มีค่าต่างกันในช่วง 1.0 ถึง 10.5 โดยใช้ความละเอียดของค่า c เท่ากับ 0.5 ในช่วงที่สำคัญ จากนั้นจึงพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองแบบและผลที่ได้จากการทดลอง โดยพิจารณาผลการกระจายตัว ความชื้นของกากอ้อยที่ระยะต่างๆตลอดความสูงของเบต ณ เวลาสุดท้ายเป็นหลัก ผลที่ได้เมื่อหาค่ารวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของการกระจายตัวความชื้นของกากอ้อยรวมทุกการทดลอง ปรากฏว่าค่าคงที่ c มีค่าเท่ากับ 10.0 จะให้ค่ารวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุด จึงสรุปใช้ค่าคงที่ c ที่มีค่าเท่ากับ 10.0 เป็นค่าคงที่ จากการทดลอง เพราะฉะนั้นสำหรับการแสดงผลการจำลองแบบในที่นี่จะแสดงเฉพาะผลของการ จำแบบเมื่อใช้ค่าคงที่ c เท่ากับ 10.0 เท่านั้น

รูปแสดงผลการเปรียบเทียบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบต และการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ณ เวลาสุดท้าย ระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลองแบบทั้ง 2 ขั้นตอนสำหรับแต่ละการทดลอง แสดงดังในรูปที่ 7.15 ถึง 7.42

กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบตระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองแบบที่ได้จากรูปแบบสมการที่ (7.1) ของ Experiment#1 ถึง 7 แสดงดังรูปที่ 7.15, 7.17, 7.19, 7.21, 7.23, 7.25 และ 7.27 ตามลำดับ กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบตระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองแบบที่ได้จากรูปแบบสมการที่ (7.2) ของ Experiment#1 ถึง 7 แสดงดังรูปที่ 7.29, 7.31, 7.33, 7.35, 7.37, 7.39 และ 7.41 ตามลำดับความหมายของสัญลักษณ์กำกับเส้นกราฟเป็นดังนี้ Ein, E5, E15, E25, E35 และ E40 หมายถึง อุณหภูมิของลมร้อนที่ได้จากการทดลอง ณ จุดทางเข้าเบตและที่ระยะความลึกของเบตเท่ากับ 5, 15, 25, 35 และ 40 ซม.ตามลำดับ S5, S15, S25, S35 และ S40 หมายถึง อุณหภูมิของลมร้อนที่ได้จากการจำลองแบบที่ระยะความลึกของเบตเท่ากับ 5, 15, 25, 35 และ 40 ซม.ตามลำดับ ในการจำลองแบบได้กำหนดอุณหภูมิของลมร้อนที่ทางเข้าเบตเหมือนกับผลที่ได้จากการทดลอง

ผลการพิจารณากราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบตระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองแบบ จะได้ว่า เมื่อจำลองแบบโดยรูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางอย่างง่ายโดยไม่อาศัยค่าคงที่จากการทดลองดังสมการที่ (7.1) ผลที่ได้จากการจำลองแบบสอดคล้องกันไม่ได้นักกับผลการทดลอง โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระยะความลึกของเบตที่เท่ากัน จุดเวลาเริ่มต้นของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของลมร้อนที่ได้จากการจำลองแบบจะเกิดขึ้นก่อนการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากลมร้อนระหว่างการเคลื่อนตัวของ ลมร้อนผ่านชั้นกากอ้อยภายในเบตจากการจำลองแบบมีค่าน้อยกว่าการทดลอง และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือความชันของเส้นกราฟ จะเห็นว่าเส้นกราฟที่ได้จากการทดลองจะมีความชันมากกว่าการจำลองแบบ เมื่อจำลองแบบโดยรูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางเมื่อมีการประยุกต์ ค่าคงที่จากการทดลองเข้าไปดังสมการที่ (7.2) ผลที่ได้จากการจำลองแบบสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง โดยที่จุดเวลาเริ่มต้นของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของลมร้อนและลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือความชันของเส้นกราฟ และการกระจายตัวของอุณหภูมิของลมร้อนตลอดเวลาการทดลองที่ระยะความลึกต่างๆของเบตมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจาก ลมร้อนระหว่างการเคลื่อนตัวของลมร้อนผ่านชั้นกากอ้อยภายในเบตจากการจำลองแบบและการทดลองมีค่าใกล้เคียงและมีความสอดคล้องกัน

กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ณ เวลาสุดท้าย ระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองแบบที่ได้จากรูปแบบสมการที่ (7.1) ของ Experiment#1 ถึง 7 แสดงดังรูปที่ 7.16, 7.18, 7.20, 7.22, 7.24, 7.26 และ 7.28 ตามลำดับ กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ณ เวลาสุดท้าย ระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองแบบที่ได้จากรูปแบบสมการที่ (7.2) ของ Experiment#1 ถึง 7 แสดงดังรูปที่ 7.30, 7.32, 7.34, 7.36, 7.38, 7.40 และ 7.42 ตามลำดับ

ผลการพิจารณากราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ณ เวลาสุดท้าย ของการทดลองจะได้ว่า ผลที่ได้จากการจำลองแบบโดยรูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางเมื่อมีการประยุกต์ค่าคงที่จากการทดลองเข้าไปดังสมการที่ (7.2) จะมีความสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าผลที่ได้จากการจำลองแบบโดยรูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางอย่างง่ายโดยไม่อาศัยค่าคงที่จากการทดลองดังสมการที่ (7.1)

ระยะของการอบแห้งคือช่วงระยะของเบดที่มีการอบแห้งเกิดขึ้นสำหรับระยะของการอบแห้ง ณ เวลาสุดท้าย สามารถพิจารณาได้จากกราฟการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ณ เวลาสุดท้าย ตัวอย่างการพิจารณาค่าระยะของการอบแห้งของรูปที่ 7.32 ซึ่งการอบแห้งกำลังเกิดขึ้นในช่วงของเบดที่ระยะความลึกเท่ากับ 10 ถึง 25 ซม. ดังนั้นในรูปที่ 7.32 จะมีค่าระยะของการอบแห้งเท่ากับ 15 ซม. ซึ่งค่าระยะของการอบแห้งที่ได้จากการทดลองและการจำลองแบบทั้ง 2 กรณีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ระยะของการอบแห้ง(เครื่องอบแห้งแบบเบดนิ่ง)

การทดลองที่	ระยะของการอบแห้ง (เซนติเมตร)		
	ผลการทดลอง	สมการชั้นบาง(7.1)	สมการชั้นบาง(7.2)
Experiment#1	15.0	35.0	15.0
Experiment#2	10.0	35.0	10.0
Experiment#3	10.0	30.0	10.0
Experiment#4	10.0	25.0	10.0
Experiment#5	15.0	30.0	15.0
Experiment#6	15.0	35.0	15.0
Experiment#7	20	35.0	15.0

จากตารางที่ 7.2 จะเห็นได้ว่าระยะของการอบแห้งที่ได้จากการจำลองแบบโดยใช้สมการ ชั้นบางในรูปแบบสมการที่ (7.2) มีค่าสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระหว่างที่ลมร้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นกากอ้อยภายในเบด อัตราการอบแห้งที่ระยะความลึกใดๆของเบดจากการจำลองแบบและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าระยะของการอบแห้งที่ได้จากการจำลองแบบโดยใช้สมการชั้นบางในรูปแบบสมการที่ (7.1) นั้นจะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระหว่างที่ลมร้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นกากอ้อยภายในเบด อัตราการอบแห้งที่ระยะความลึกใดๆของเบดจากการจำลองแบบมีค่าน้อยกว่าอัตราการอบแห้งที่เกิดขึ้นจริงจากการทดลอง

จากกราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบด ณ เวลาสุดท้ายเมื่อทำการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟจะได้ค่าความชื้นของกากอ้อยเฉลี่ยทั้งเบดที่เหลืออยู่ ณ เวลาสุดท้าย ซึ่งผลการคำนวณที่ได้แสดงดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 ความชื้นกากอ้อยเฉลี่ยทั้งเบด ณ เวลาสุดท้าย

การทดลองที่	ความชื้นกากอ้อยเฉลี่ยทั้งเบดที่เวลาสุดท้าย		
	% (dry basis)		
	ผลการทดลอง	สมการชั้นบาง(7.1)	สมการชั้นบาง(7.2)
Experiment#1	57.4	55.4	55.2
Experiment#2	60.3	57.9	57.9
Experiment#3	63.6	63.1	61.9
Experiment#4	40.2	41.1	40.2
Experiment#5	63.9	63.1	63.8
Experiment#6	32.9	31.4	30.8
Experiment#7	64.0	62.3	61.9

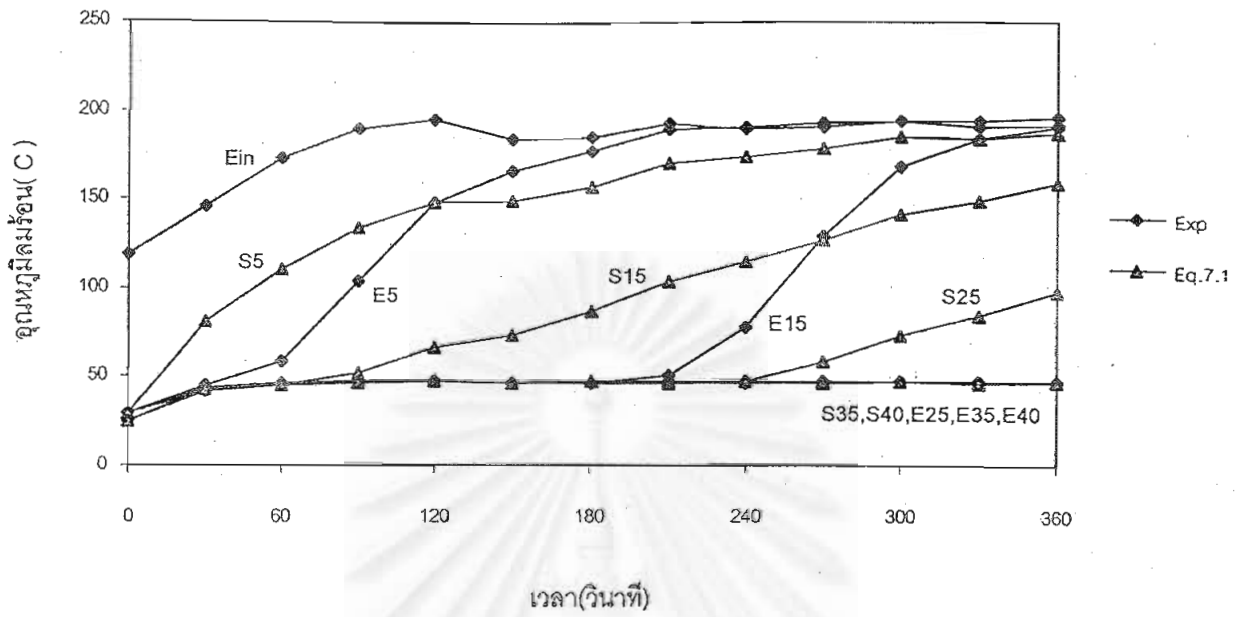
จากตารางที่ 7.3 จะเห็นว่าค่าความชื้นของกากอ้อยเฉลี่ยทั้งเบดที่เหลืออยู่ ณ เวลาสุดท้ายที่ได้จากการทดลองและจากการจำลองแบบทั้ง 2 แบบมีความใกล้เคียงกัน โดยที่ผลจากการทดลองมีค่ามากกว่าผลจากการจำลองแบบอยู่เล็กน้อยซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับความเป็นจริง สาเหตุเนื่องจากการทดลองขณะที่ลมร้อนไหลผ่านอนุภาคกากอ้อย ลมร้อนไม่สามารถสัมผัสกับอนุภาค กากอ้อยได้อย่างทั่วถึง

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองแบบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ในการจำลองแบบโดยรูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางอย่างง่ายโดยไม่อาศัยค่าคงที่จากการทดลอง ซึ่งอยู่ในรูปสมการที่ (7.1) จะให้ผลการจำลองแบบที่ไม่ค่อยสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงรูปสมการที่ (7.1) โดยการใช้ร่วมกับค่าคงที่จากการทดลอง ซึ่งอาศัยวิธีการปรับปรุงรูปแบบสมการจากผลเฉลยทั่วไปของ Sherwood[39] จะได้รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางเมื่อมีการประยุกต์ค่าคงที่จากการทดลองเข้าไปอยู่ในรูปสมการ ที่ (7.2) ซึ่งค่าคงที่จากการทดลองที่ได้จากชุดของผลการทดลองในที่มีค่าเท่ากับ 10.0 ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบโดยรูปแบบสมการที่ (7.2) มีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบของสมการผลเฉลยทั่วไปของ Sherwood ที่ได้จาก The liquid diffusion theory ดังสมการที่ (3.8) ในบทที่ 3 ในที่นี้ได้ว่าผลรวมของเทอมที่สองและเทอมถัดไปของสมการมีค่าเท่ากับ 23.4 % เมื่อเทียบกับเทอมแรก ซึ่งมีนัยสำคัญจนไม่สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้น รูปแบบของสมการชั้นบางของการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งกากอ้อยในการทดลองนี้จึงเป็นดัง สมการที่ (3.10)หรือ สมการที่ (7.2) ในบทนี้นั่นเอง

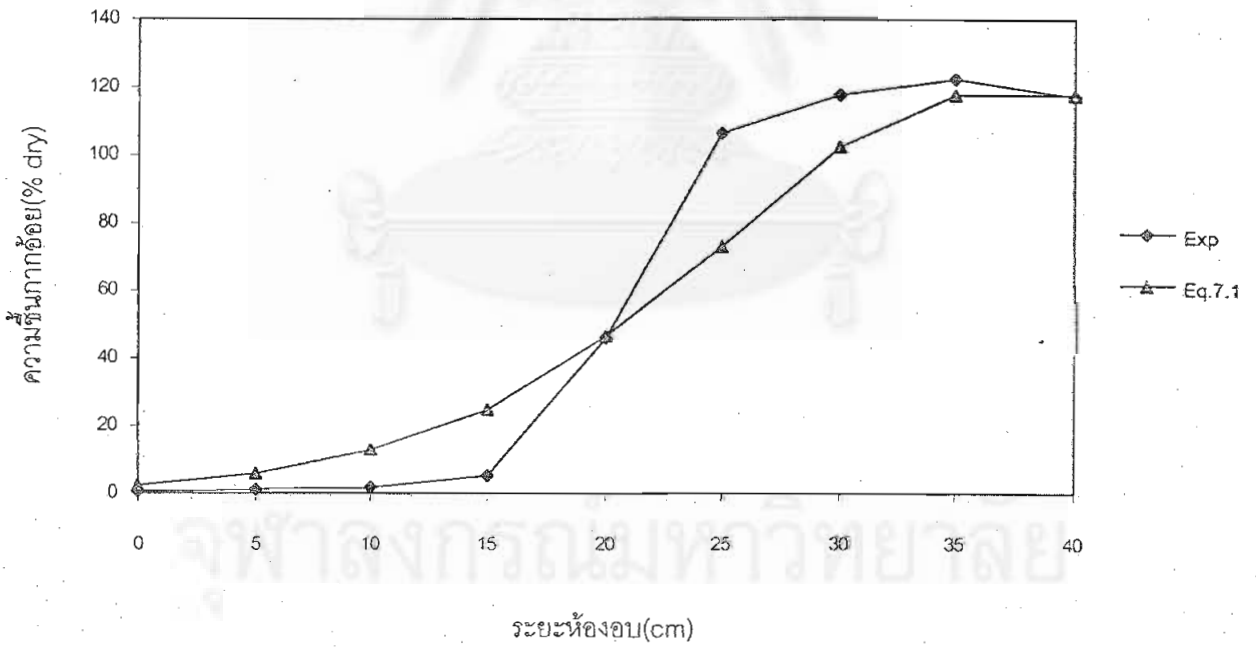


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Experiment #1



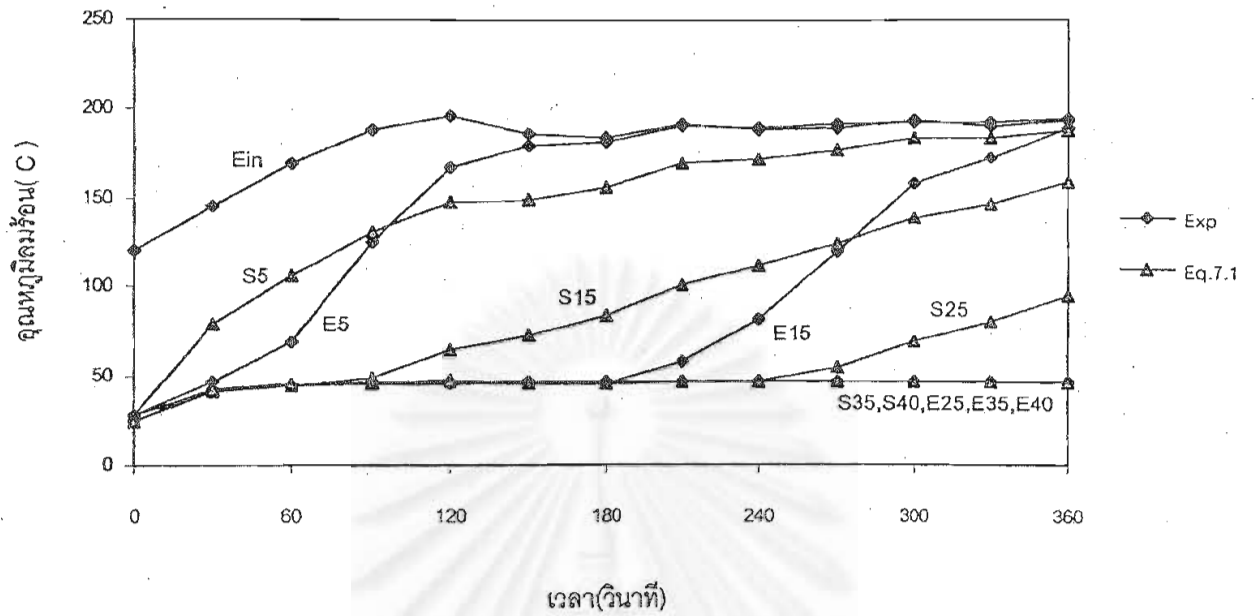
รูปที่ 7.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



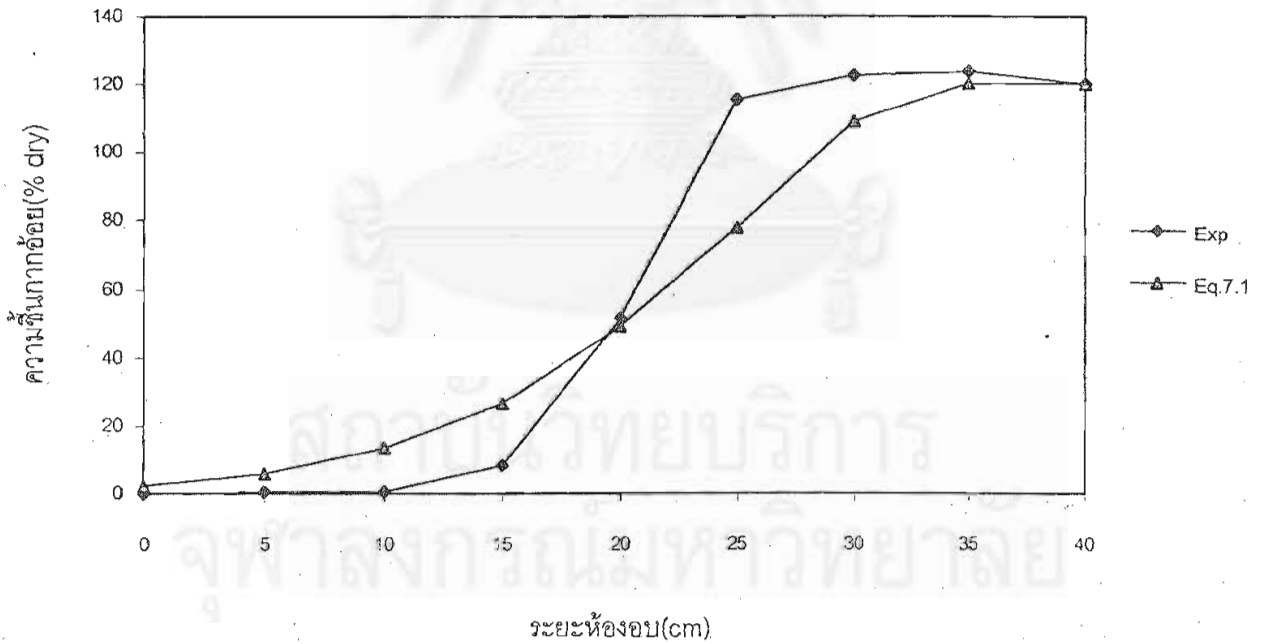
รูปที่ 7.16 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 190 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_a = 0.787 \text{ m/s}$, $W_a = 0.017432 \text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 117.7 \text{ \% dry}$

Experiment #2



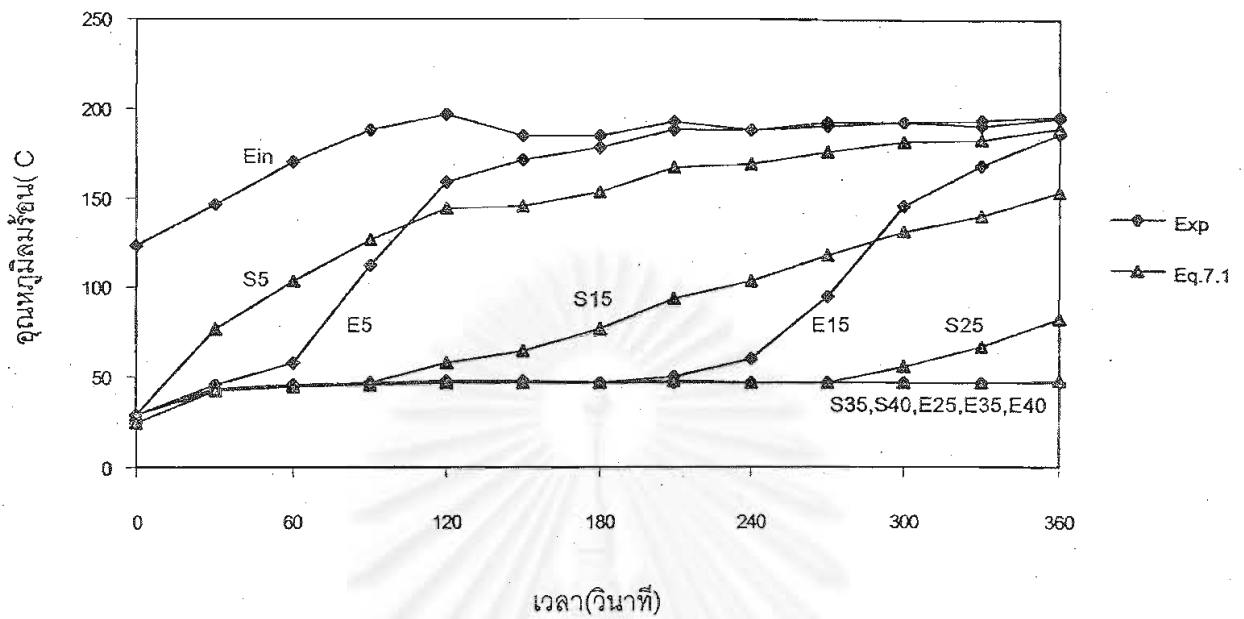
รูปที่ 7.17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



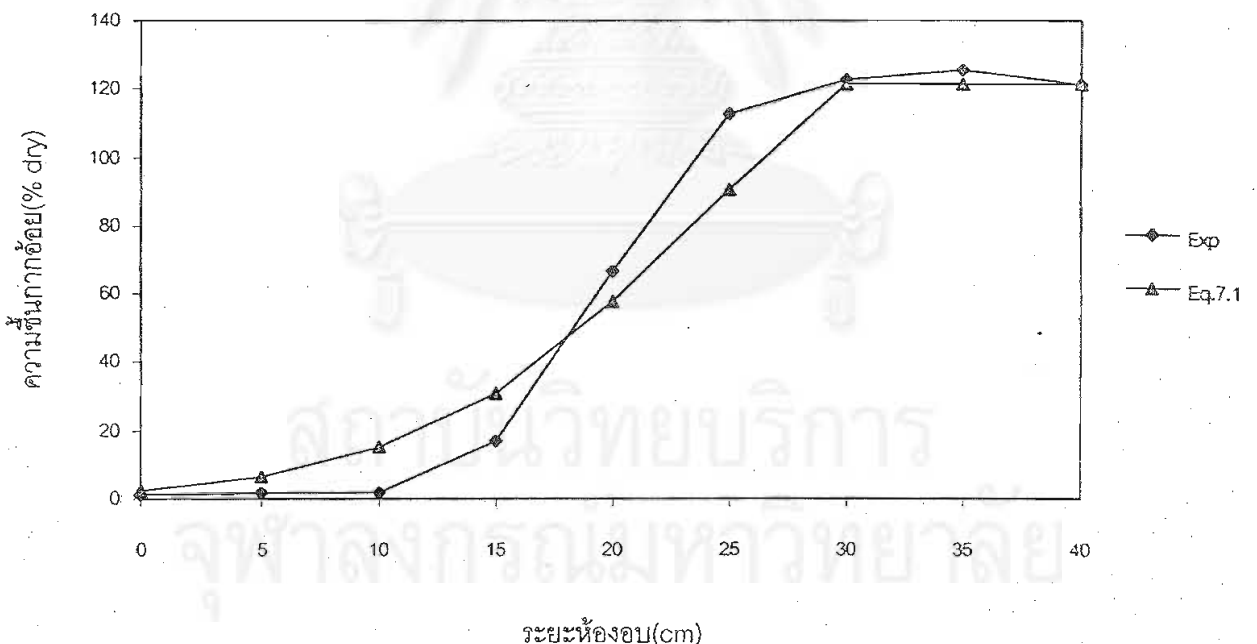
รูปที่ 7.18 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 189 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_s = 0.790 \text{ m/s}$, $W_s = 0.017171 \text{ kg/kg dry air}$, $M_o = 120.1 \text{ \% dry}$

Experiment #3



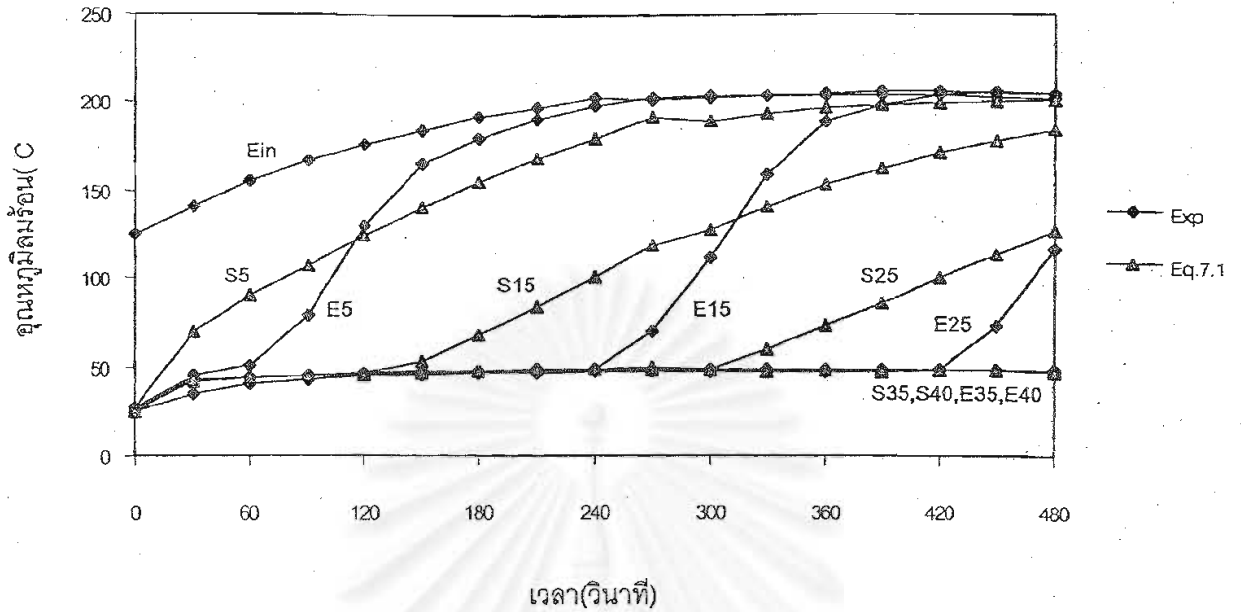
รูปที่ 7.19 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



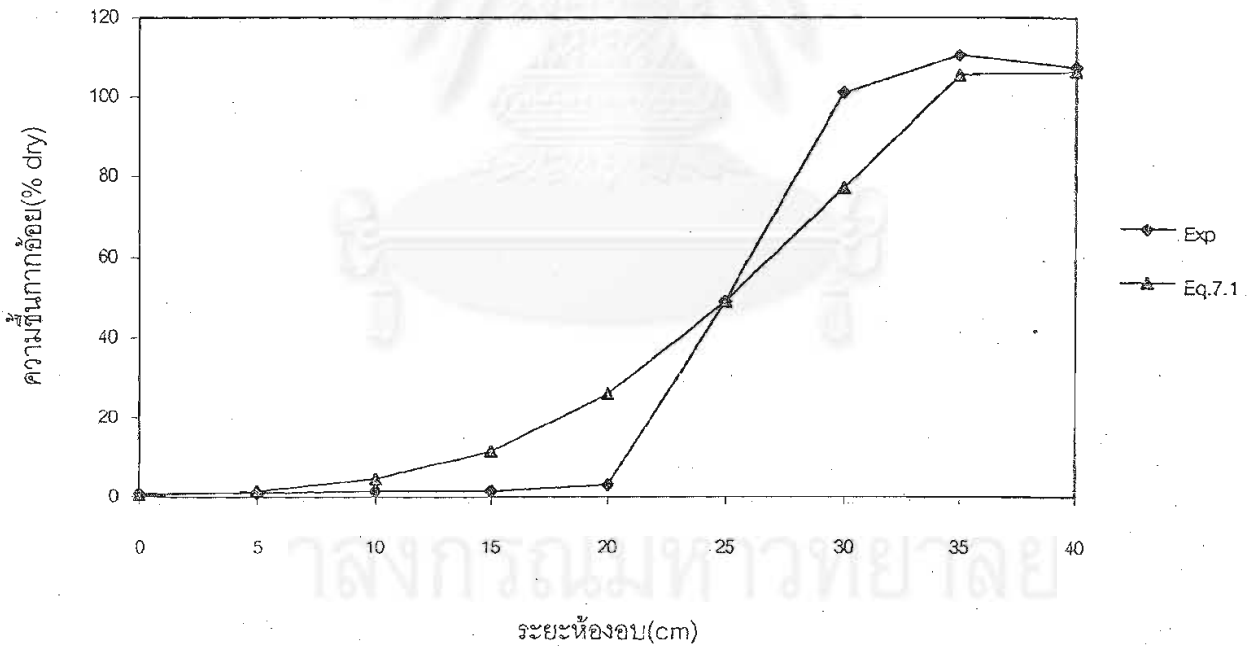
รูปที่ 7.20 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$$T_a = 190 \text{ } ^\circ\text{C}, V_a = 0.736 \text{ m/s}, W_a = 0.017975 \text{ kg/kg dry air}, M_b = 121.1 \text{ \% dry}$$

Experiment # 4



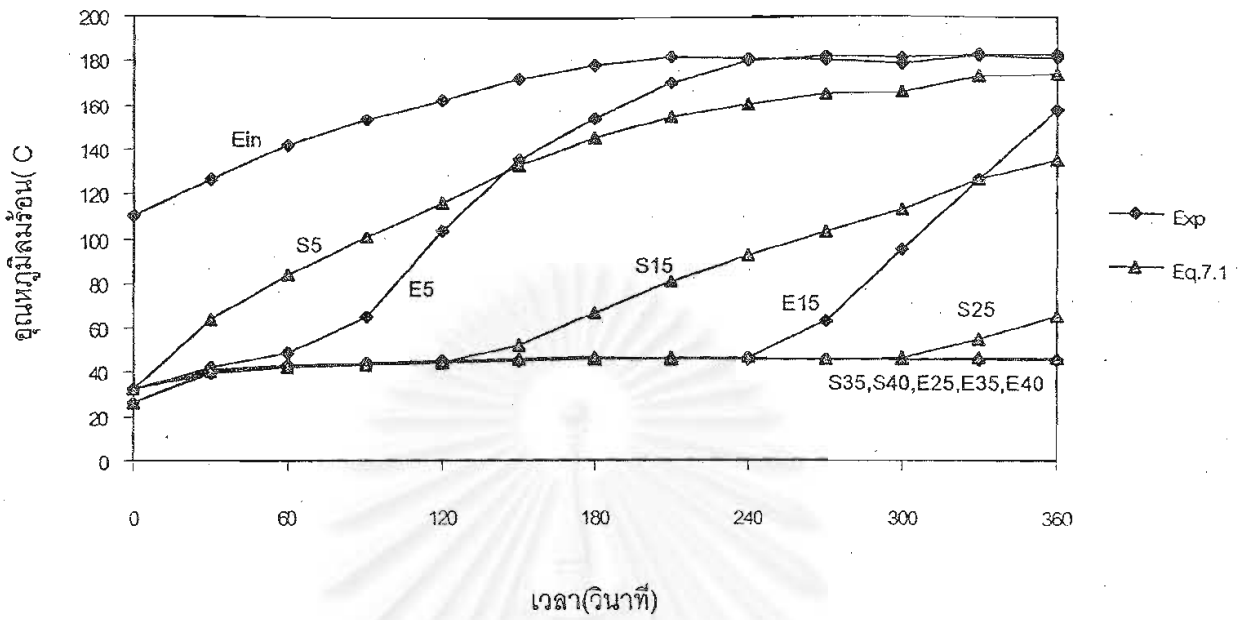
รูปที่ 7.21 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมนร้อนภายในเบด



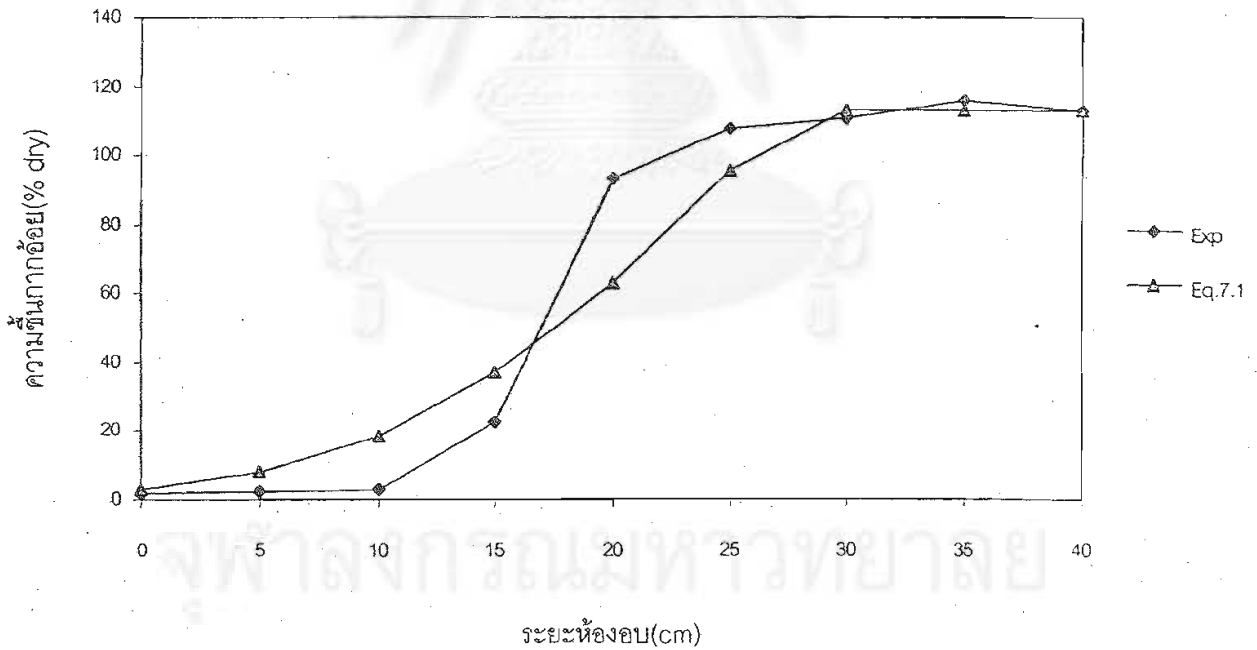
รูปที่ 7.22 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 480 วินาที

$T_a = 203 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_a = 0.619 \text{ m/s}$, $W_a = 0.018859 \text{ kg/kg dry air}$, $M_p = 106.6 \text{ \% dry}$

Experiment # 5



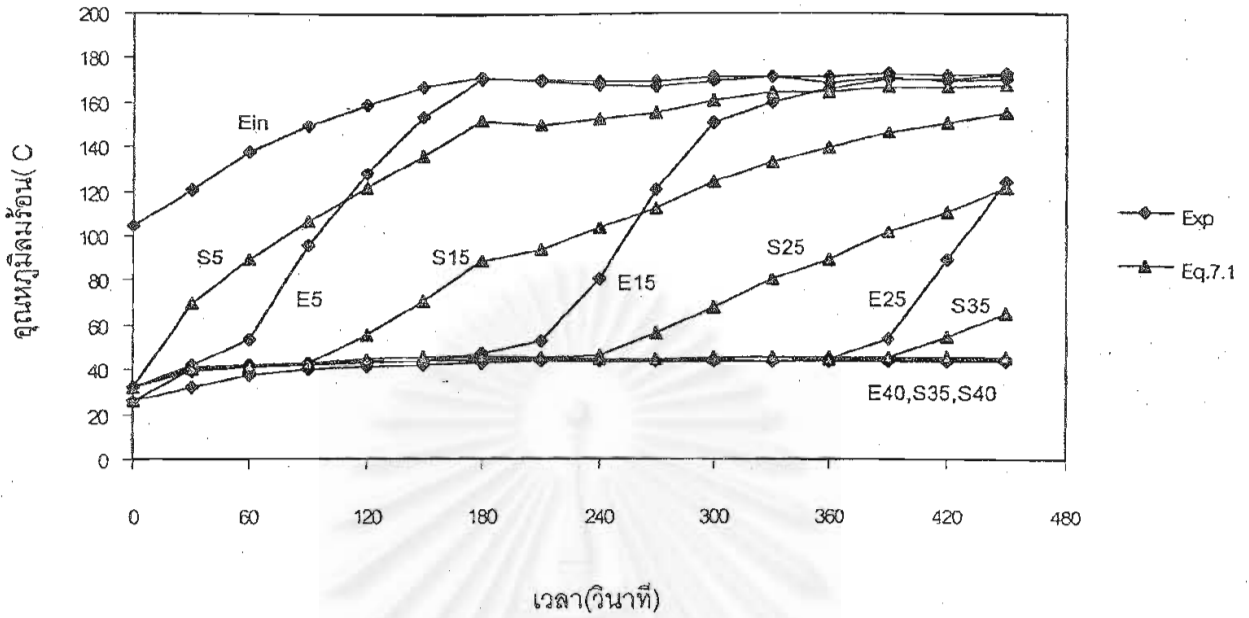
รูปที่ 7.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



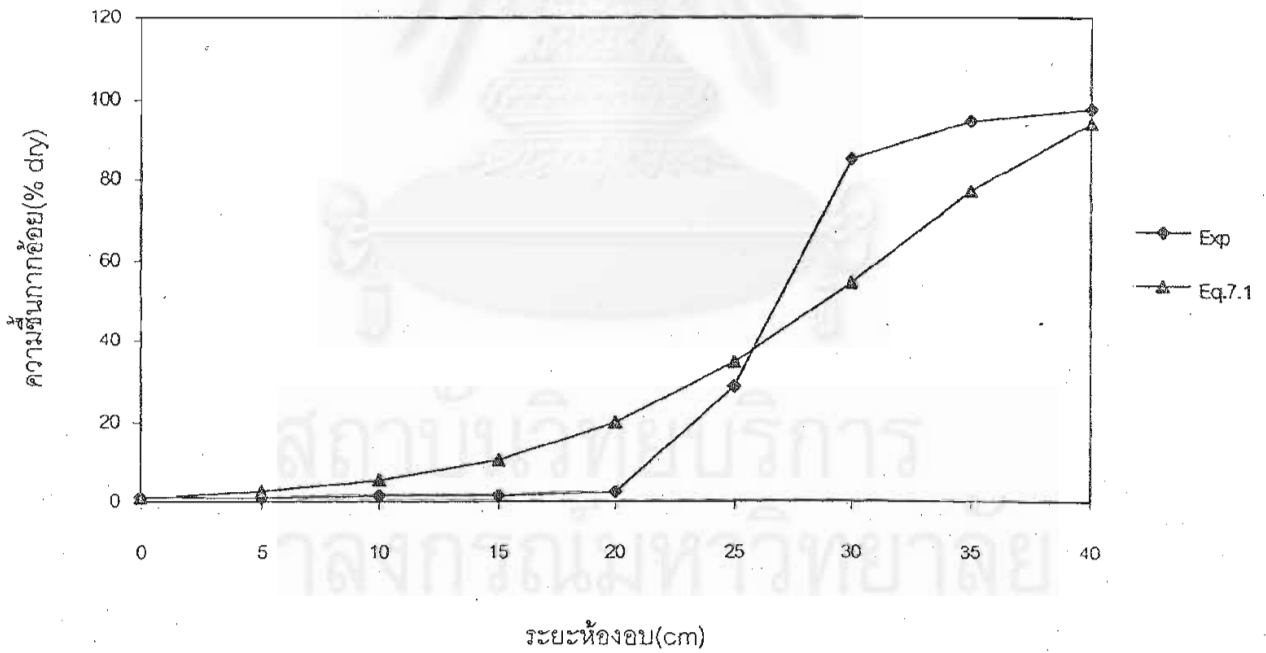
รูปที่ 7.24 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 180 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_a = 0.688 \text{ m/s}$, $W_a = 0.019059 \text{ kg/kg dry air}$, $M_o = 112.6 \text{ \% dry}$

Experiment # 6



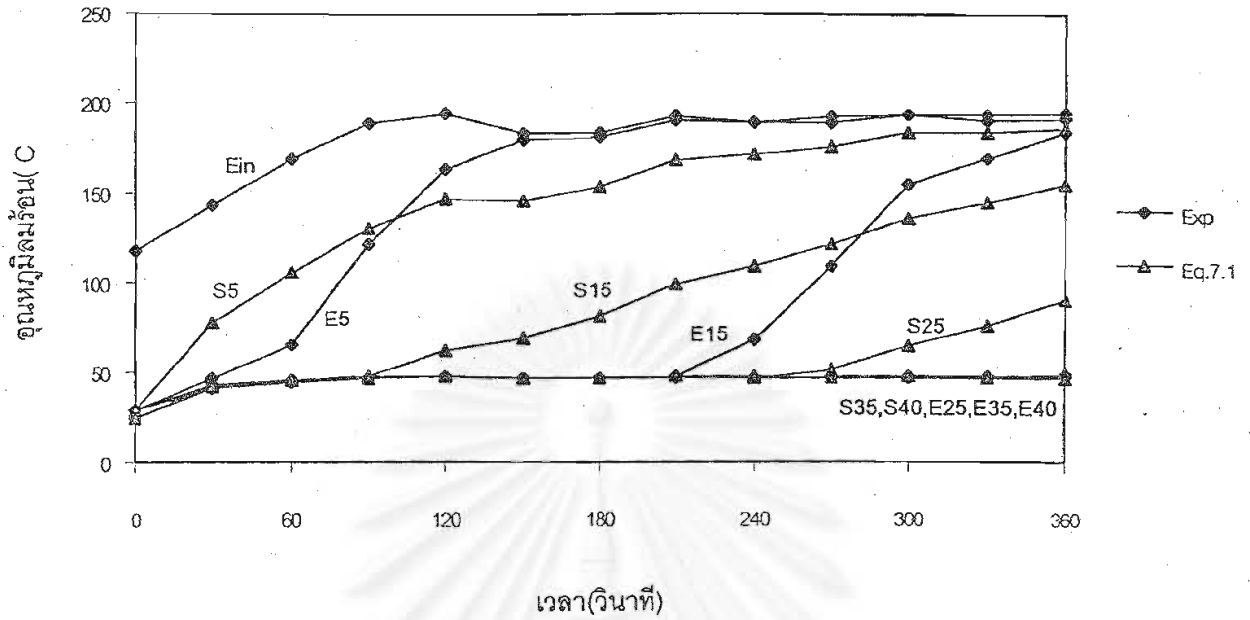
รูปที่ 7.25 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



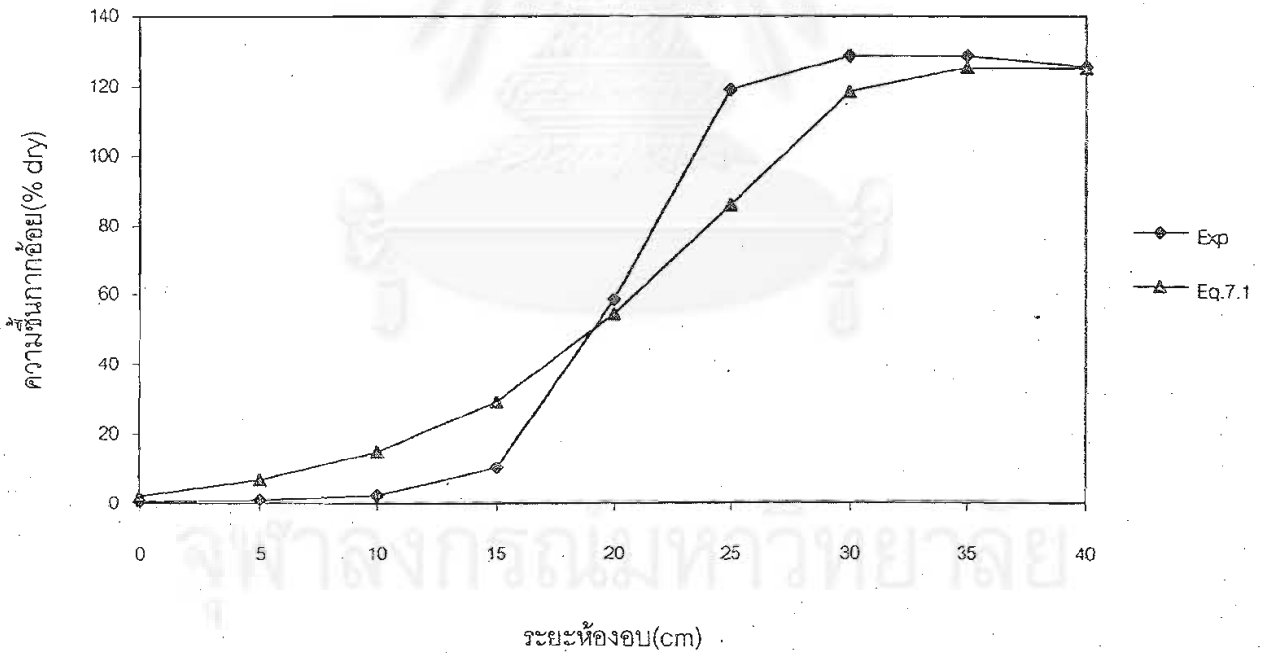
รูปที่ 7.26 การกระจายตัวของความชื้นของอากาศแห้งภายในเบดที่เวลา 450 วินาที

$T_a = 169 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_a = 0.707 \text{ m/s}$, $W_a = 0.017942 \text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 93.7 \text{ % dry}$

Experiment #7



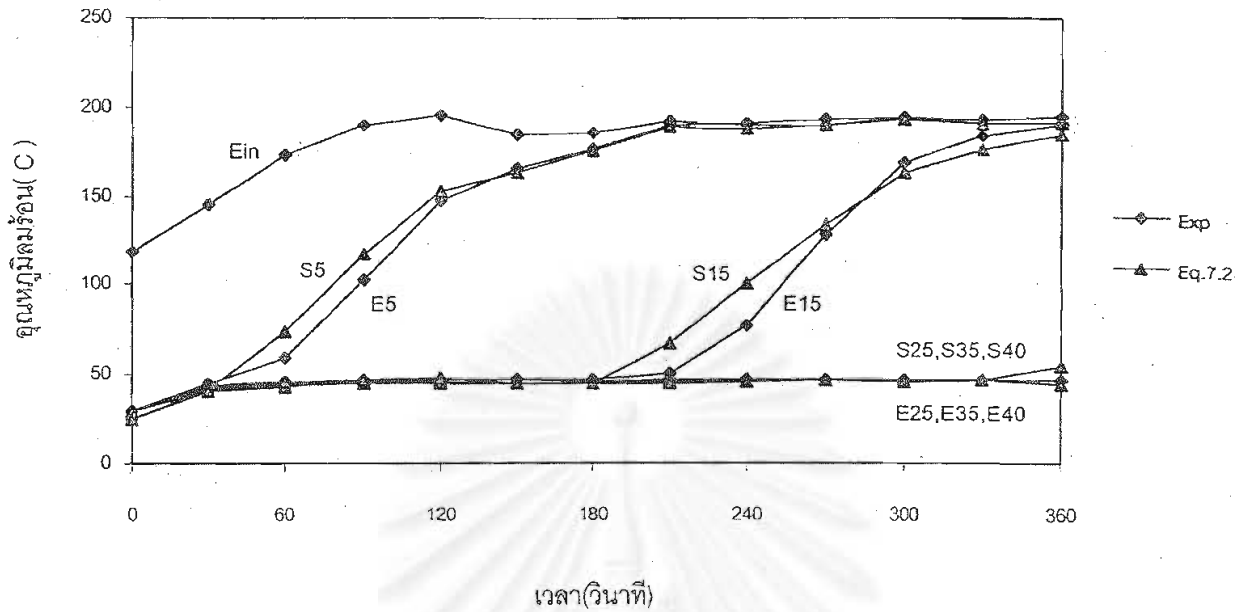
รูปที่ 7.27 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



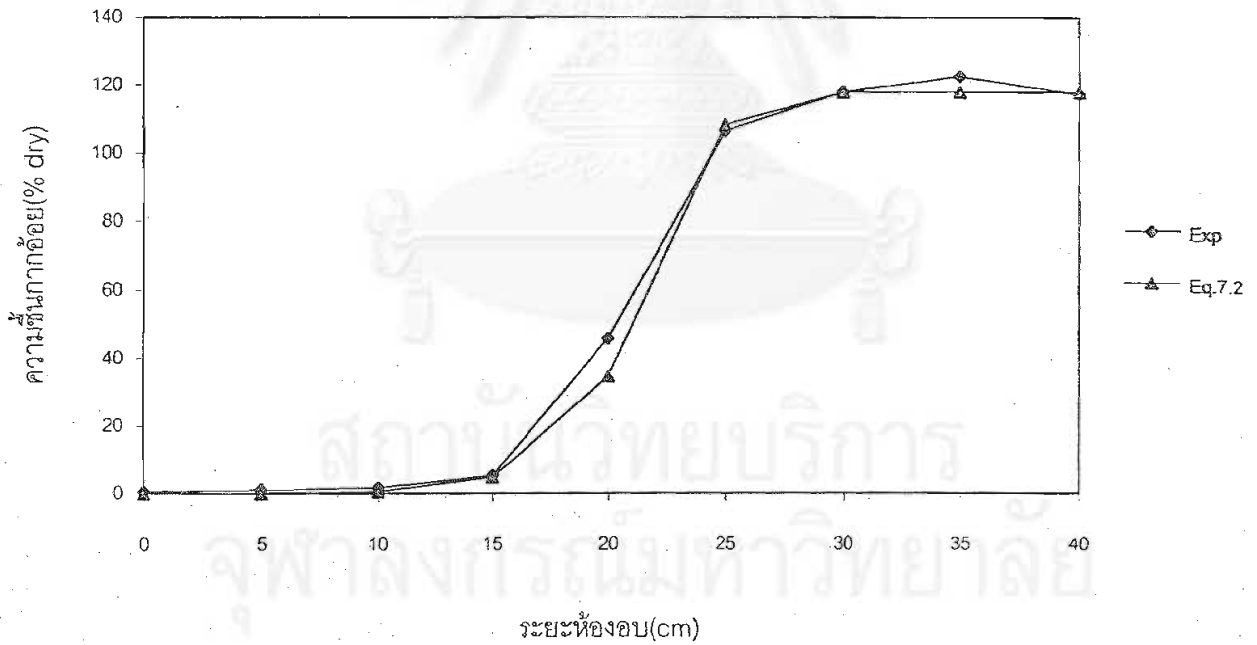
รูปที่ 7.28 การกระจายตัวของความชื้นของอากาศภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 189 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_a = 0.804 \text{ m/s}$, $W_a = 0.018424 \text{ kg/kg dry air}$, $M_p = 125.3 \text{ \% dry}$

Experiment # 1



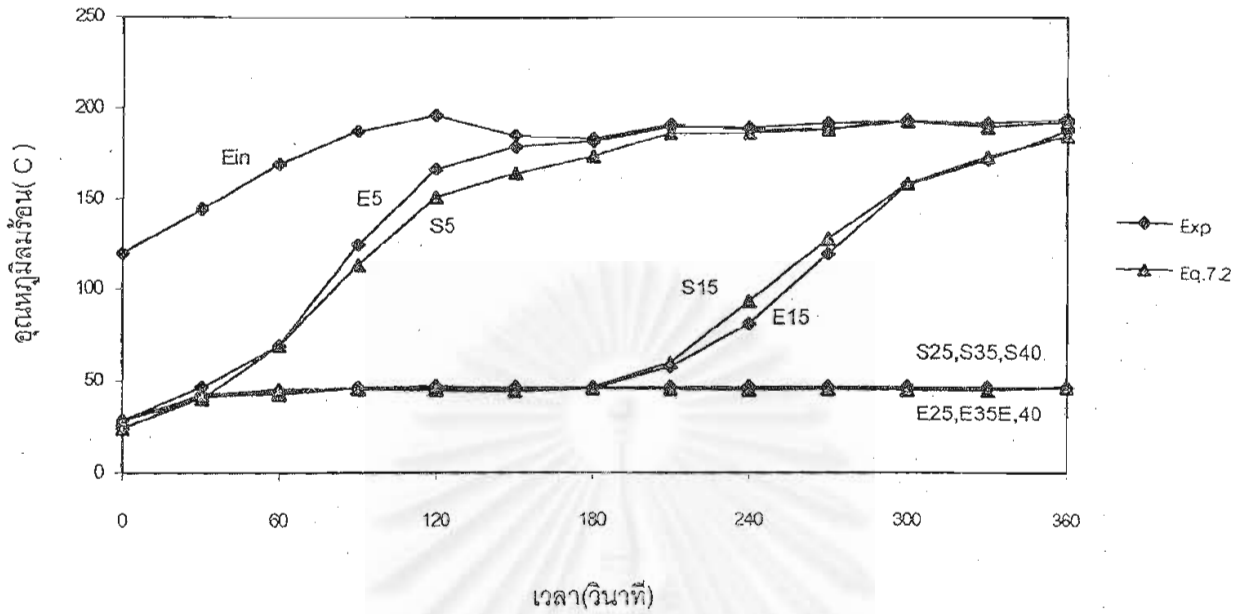
รูปที่ 7.29 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



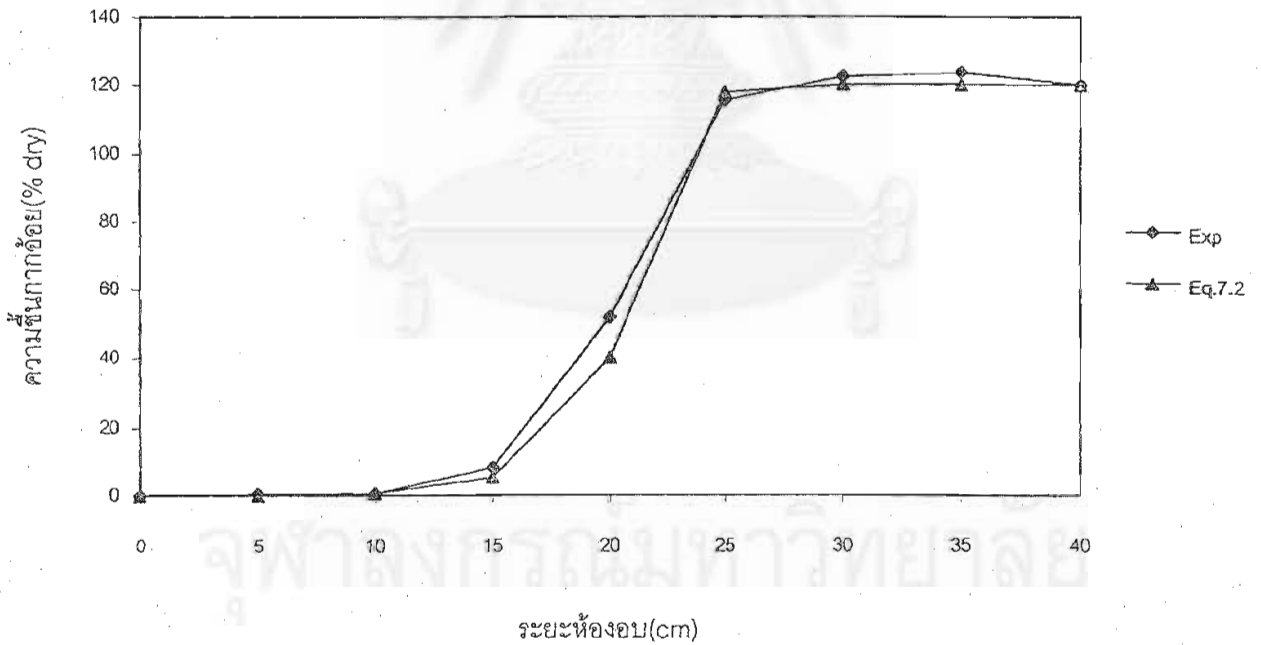
รูปที่ 7.30 การกระจายตัวของความชื้นของอากาศอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 190 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_a = 0.787 \text{ m/s}$, $W_a = 0.017432 \text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 117.7 \text{ \% dry}$

Experiment #2



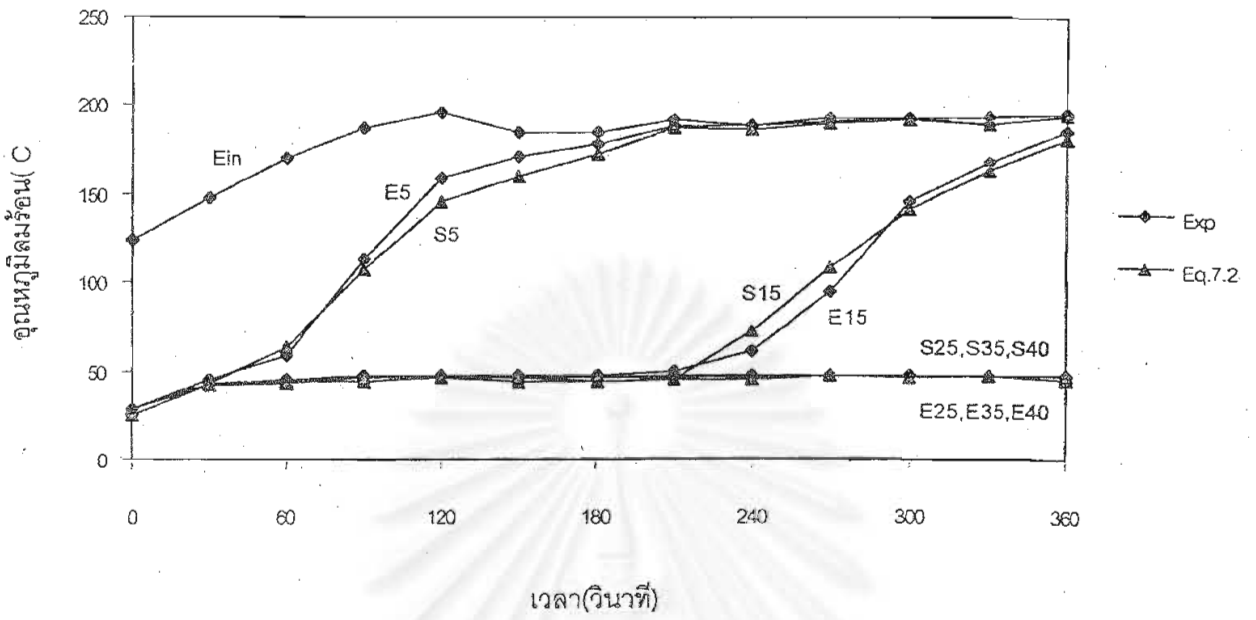
รูปที่ 7.31 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



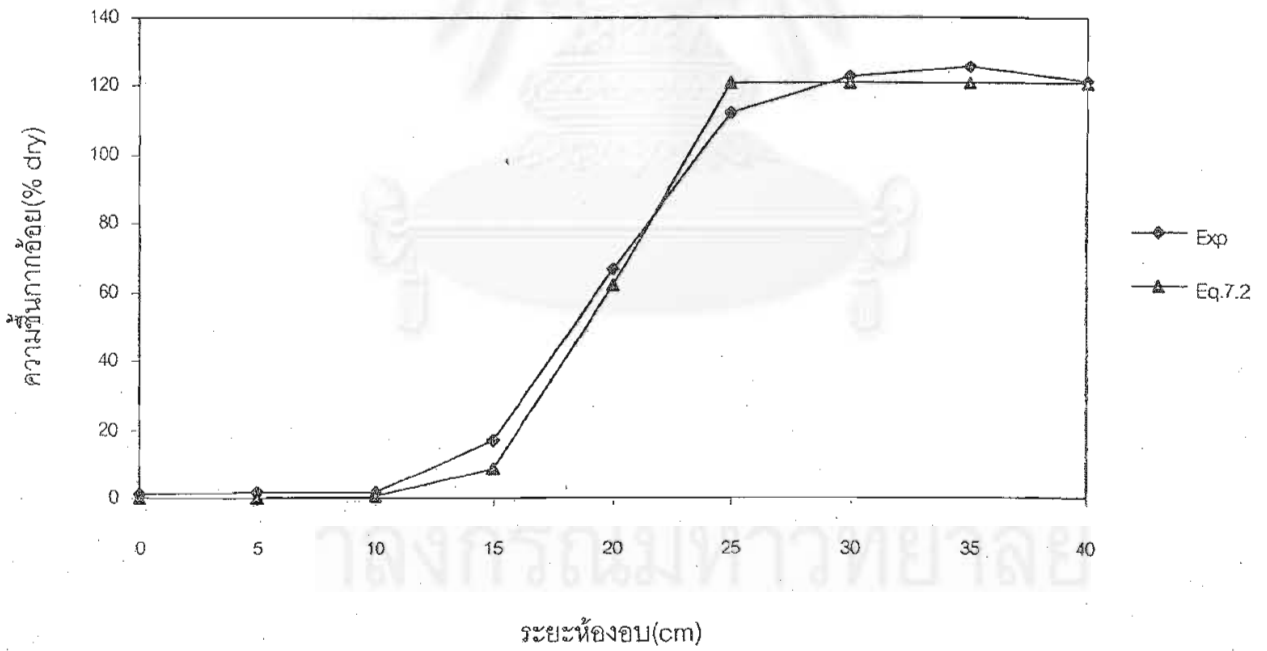
รูปที่ 7.32 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 189 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_a = 0.790 \text{ m/s}$, $W_a = 0.017171 \text{ kg/kg dry air}$, $M_p = 120.1 \text{ \% dry}$

Experiment #3



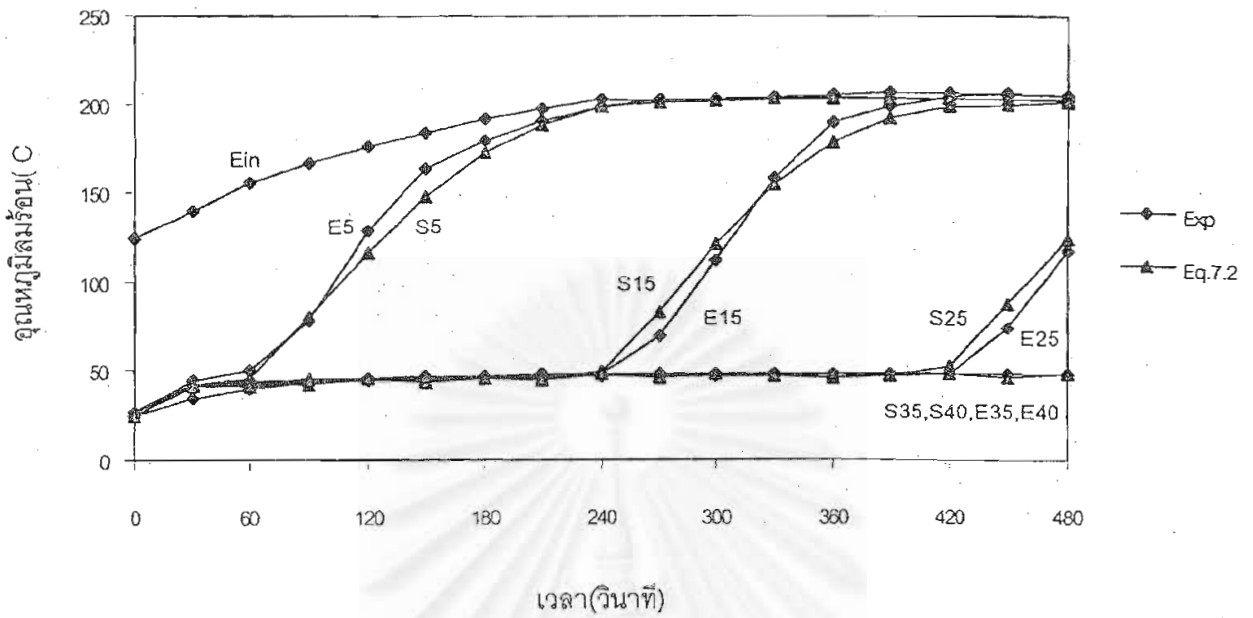
รูปที่ 7.33 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



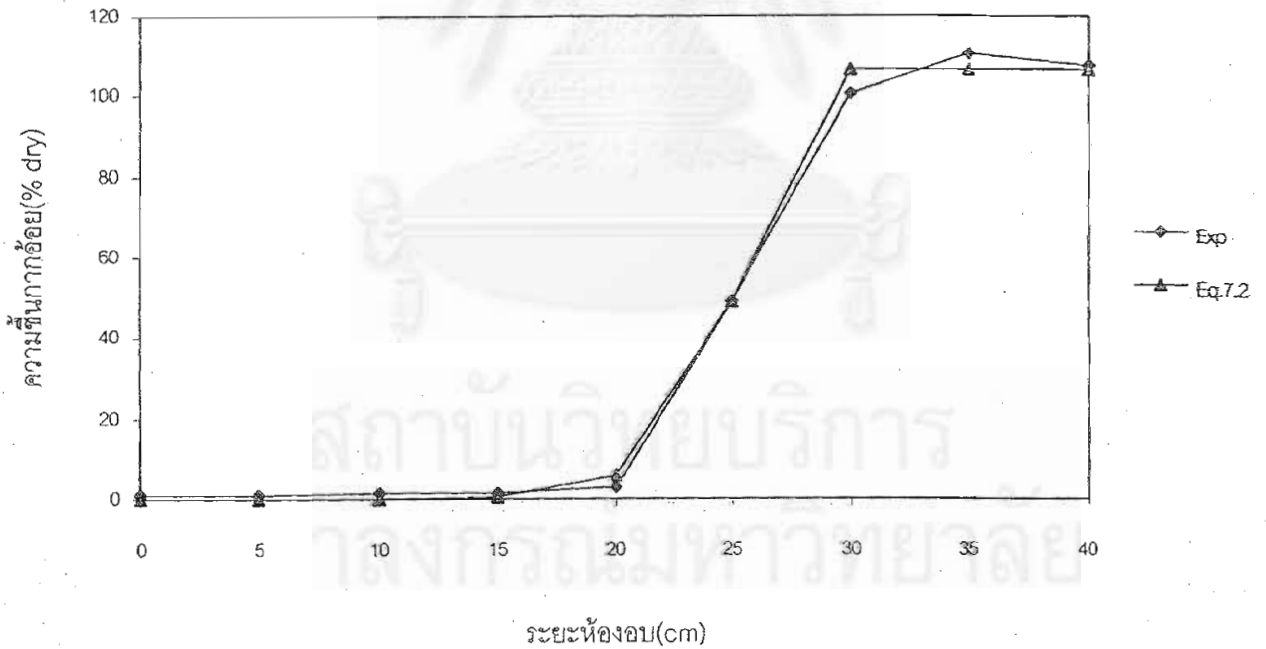
รูปที่ 7.34 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 190 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_a = 0.736 \text{ m/s}$, $W_a = 0.017975 \text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 121.1 \text{ \% dry}$

Experiment # 4



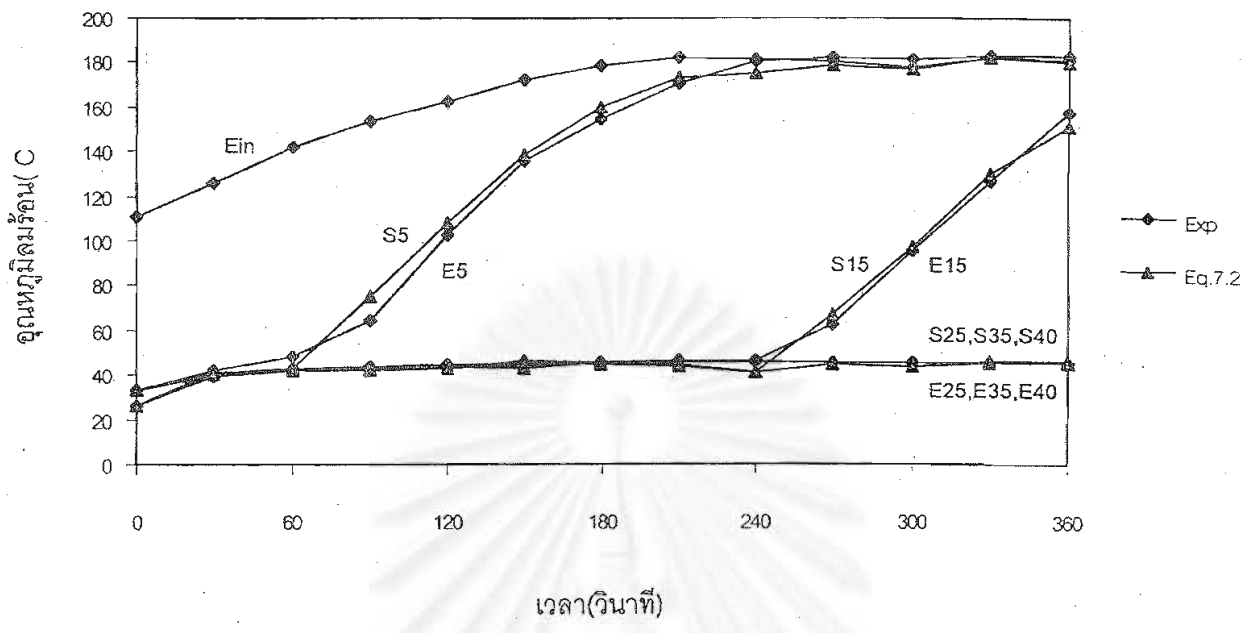
รูปที่ 7.35 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากของลมร้อนภายในเบด



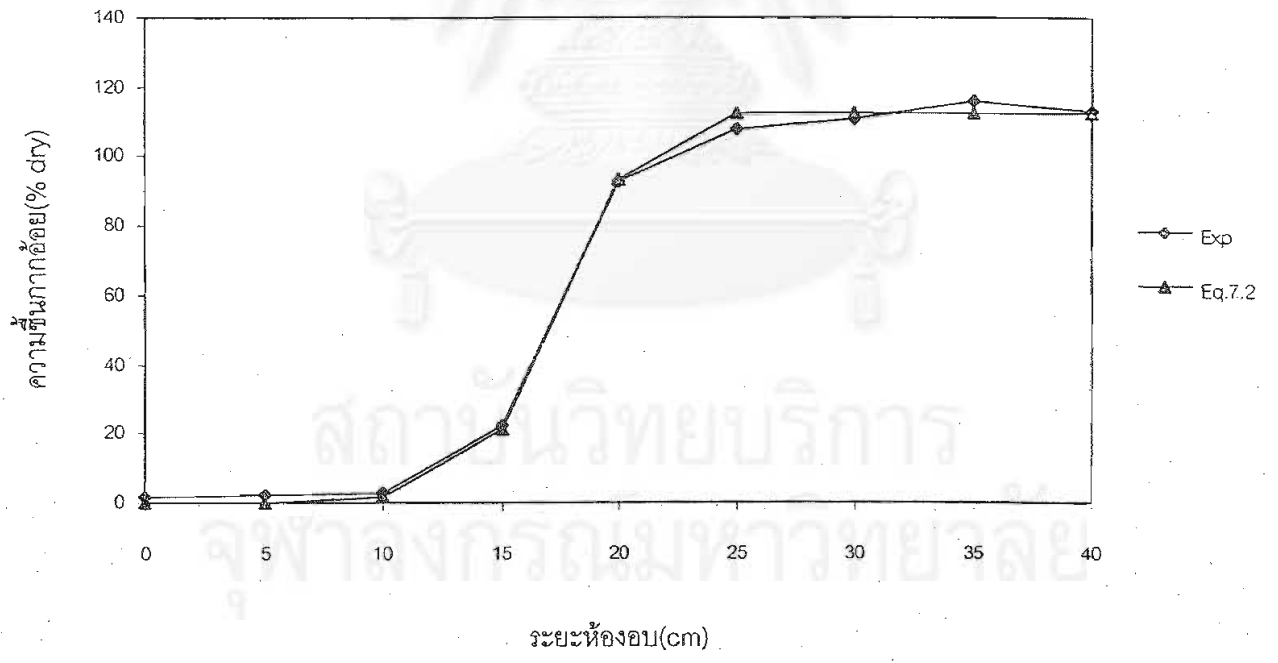
รูปที่ 7.36 การกระจายตัวของความชื้นของอากาศภายในเบดที่เวลา 480 วินาที

$T_a = 203 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_a = 0.619 \text{ m/s}$, $W_a = 0.018859 \text{ kg/kg dry air}$, $M_p = 106.6 \text{ \% dry}$

Experiment #5



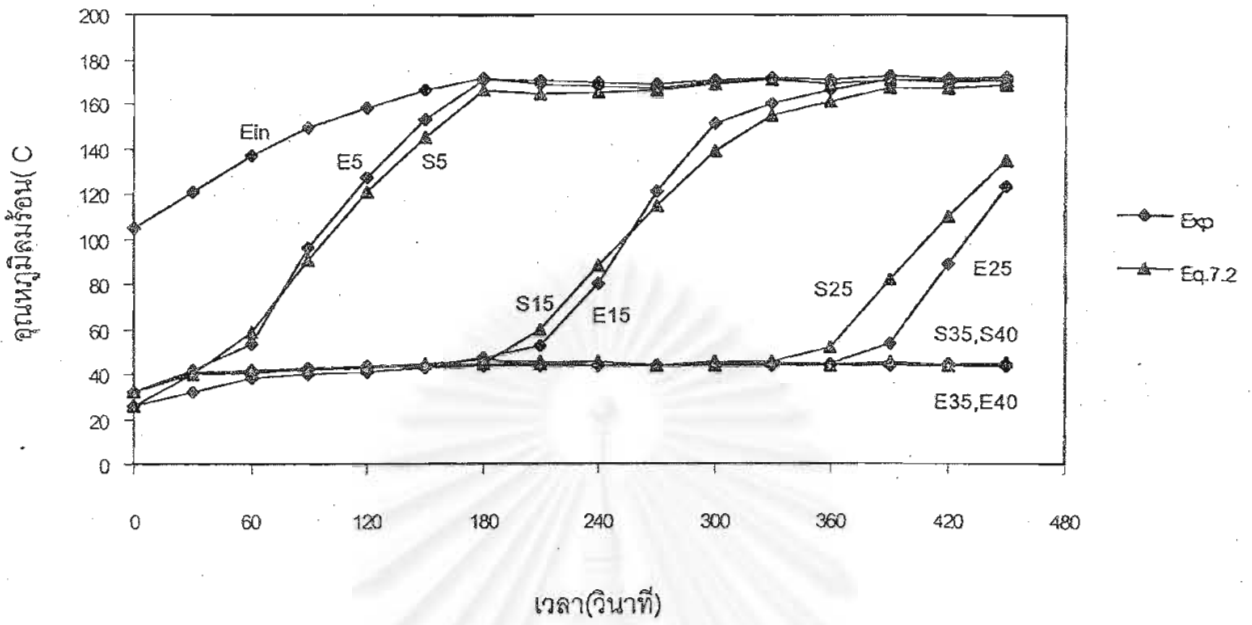
รูปที่ 7.37 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



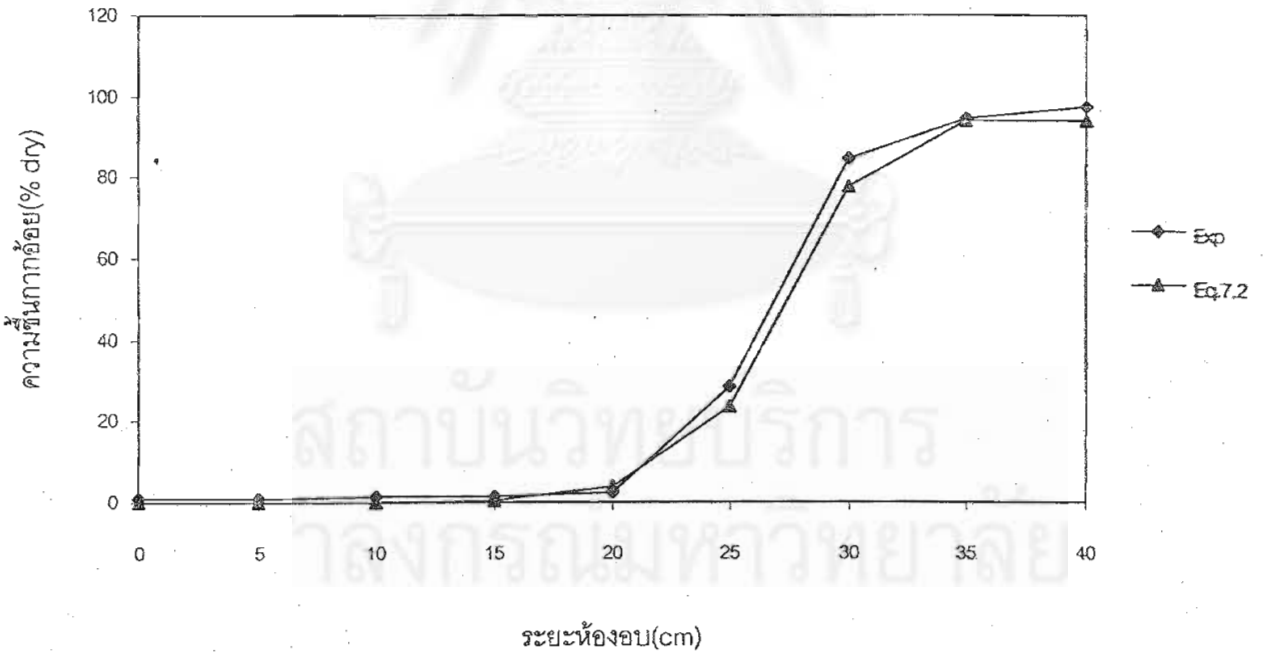
รูปที่ 7.38 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 180 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_a = 0.688 \text{ m/s}$, $W_a = 0.019059 \text{ kg/kg dry air}$, $M_o = 112.6 \text{ % dry}$

Experiment # 6



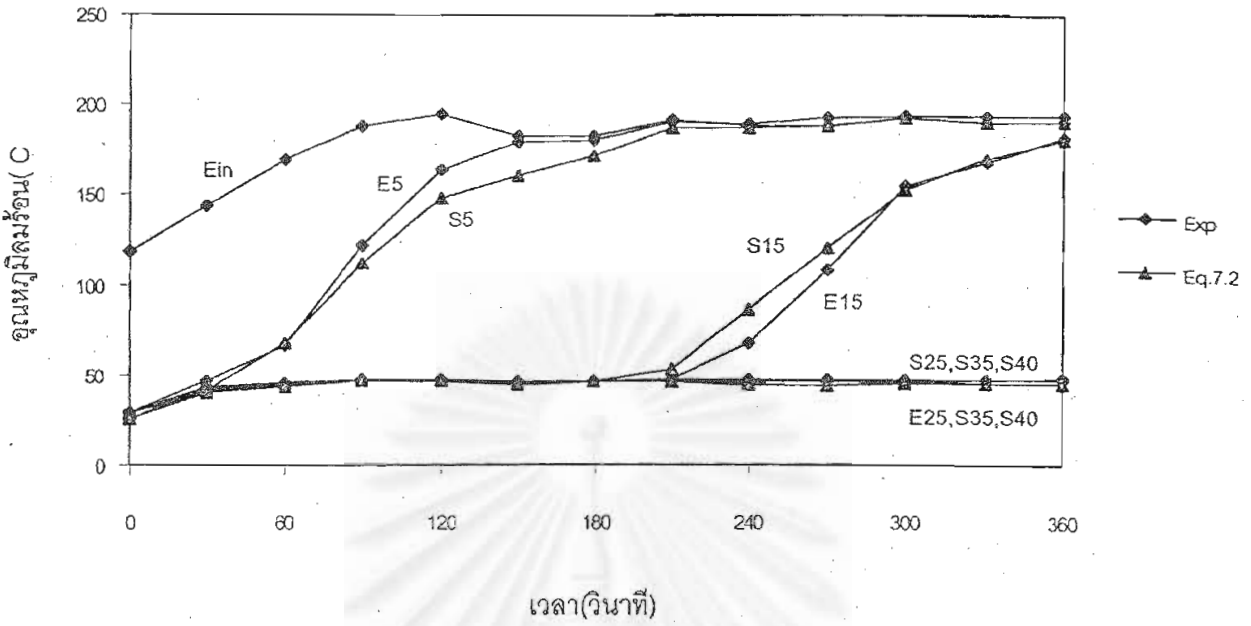
รูปที่ 7.39 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



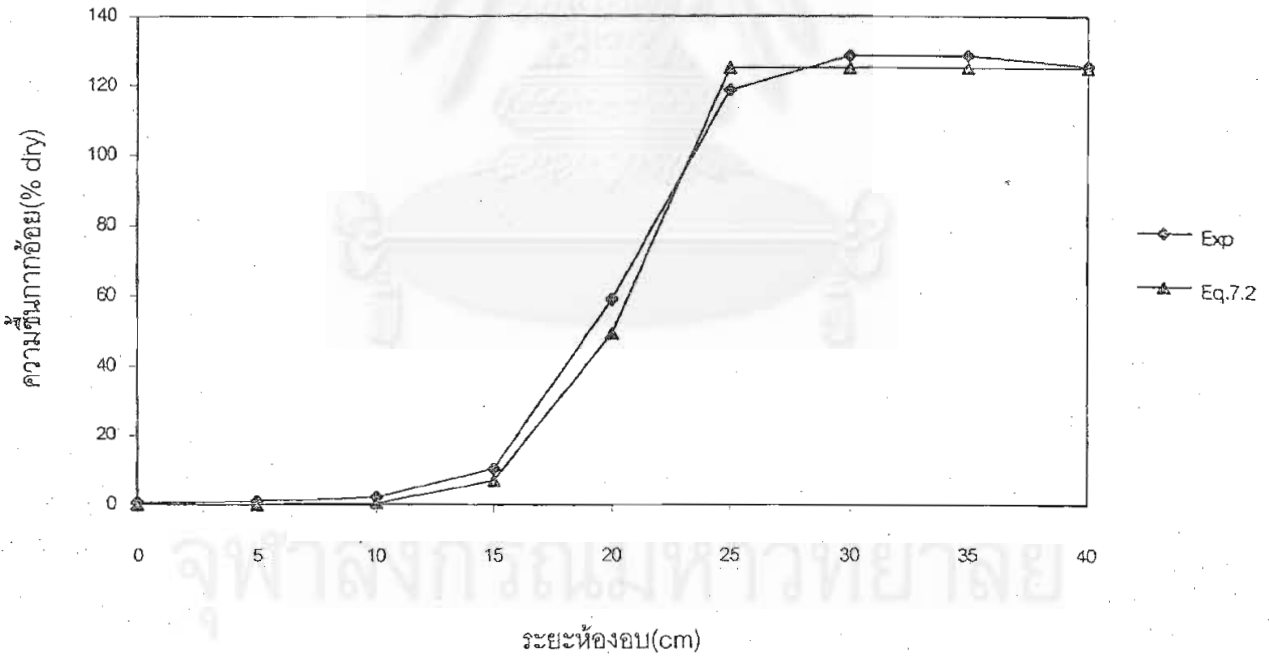
รูปที่ 7.40 การกระจายตัวของความชื้นของอากาศภายในเบดที่เวลา 450 วินาที

$T_a = 169 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_a = 0.707 \text{ m/s}$, $W_a = 0.017942 \text{ kg/kg dry air}$, $M_o = 93.7 \text{ % dry}$

Experiment #7



รูปที่ 7.41 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในเบด



รูปที่ 7.42 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 360 วินาที

$T_a = 189\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.804\text{ m/s}$, $W_a = 0.018424\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 125.3\text{ \% dry}$

7.3 เครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

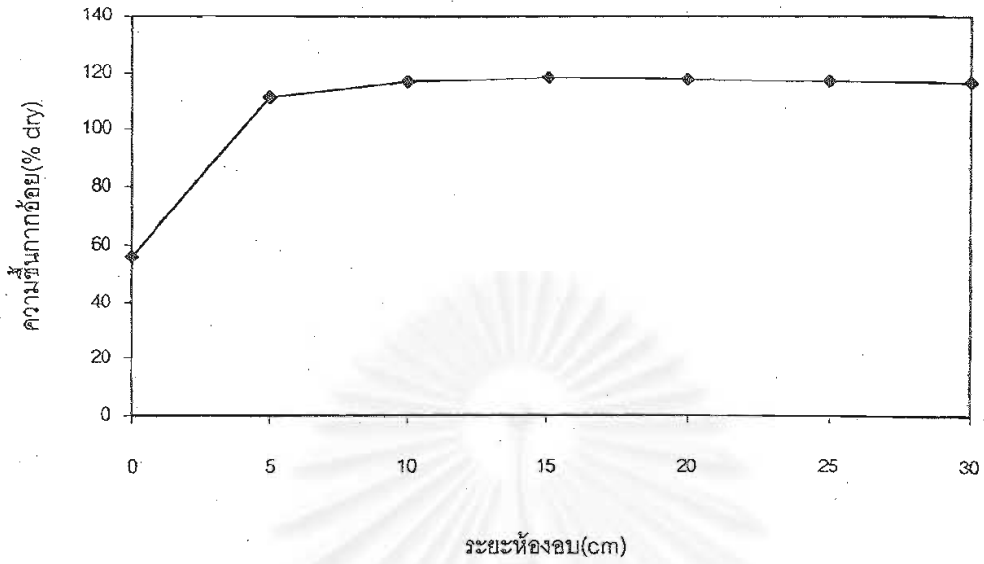
7.3.1 ผลการทดลอง

ในกระบวนการทดลองอบแห้งกากอ้อยโดยเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง ในที่นี้ใช้เครื่องทดลองที่มีขนาดหน้าตัดของเบด 22.5 x 22.5 ซม. และมีความสูงของเบดเท่ากับ 30 ซม. ตัวอย่างกากอ้อยที่ใช้ในการทดลองได้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลจังหวัดสุพรรณบุรี ขนาดอนุภาคกากอ้อยที่ใช้ในการทดลองถูกเลือกในช่วงที่มีความเหมาะสมในการเป็นตัวแทนของ ตัวอย่างกากอ้อยมากที่สุด ซึ่งในที่นี้กากอ้อยมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 1.486 มม. ส่วนช่วงสภาวะอื่นๆของการทดลองมีค่าดังนี้ อุณหภูมิลมร้อน 176 ถึง 182 °C ความเร็วลมร้อน 0.641 ถึง 0.734 m/s ความชื้นลมร้อน 0.016186 ถึง 0.017905 kg/kg dry air ความชื้นกากอ้อย 69.4 ถึง 114.8 % (dry basis) และอัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น 14.3 ถึง 18.2 kg/hr ซึ่งรายละเอียดข้อมูลสภาวะ การทดลองของแต่ละการทดลองแสดงดังตารางที่ 7.4 กราฟแสดงผลการทดลองซึ่งแสดงถึง การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยที่ระยะต่างๆตลอดความยาวของเบดที่เวลาสุดท้ายของ การอบแห้ง (15 นาที) แสดงดังรูปที่ 7.43 ถึง 7.48 สำหรับผลการทดลองของ Experiment#8 ถึง 13 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.4 สภาวะการทดลองเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

การทดลองที่	อุณหภูมิ ลมร้อน °C	ความเร็ว ลมร้อน m/s	ความชื้น ลมร้อน kg/kg dry air	ความชื้น กากอ้อย dry basis	อัตราการไหล ของกากอ้อย kg/hr
Experiment#8	178	0.734	0.017186	114.8	18.2
Experiment#9	177	0.722	0.016875	69.4	14.3
Experiment#10	180	0.685	0.016186	85.8	15.7
Experiment#11	182	0.707	0.016603	86.6	15.8
Experiment#12	182	0.689	0.017905	84.8	15.6
Experiment#13	176	0.641	0.017805	88.0	15.9

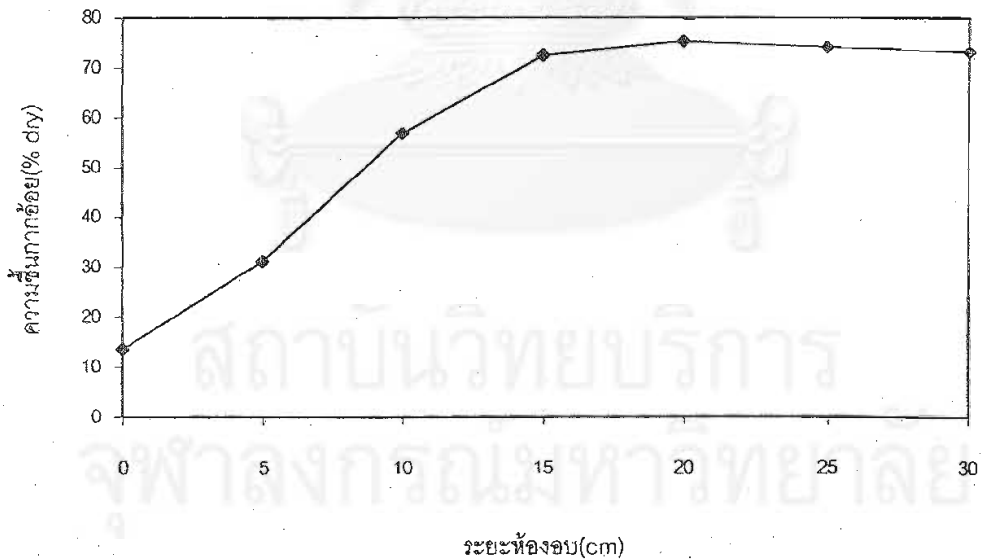
Experiment #8



รูปที่ 7.43 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 178\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.734\text{ m/s}$, $W_a = 0.017186\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 114.8\text{ % dry}$, $G_b = 18.2\text{ kg/hr}$

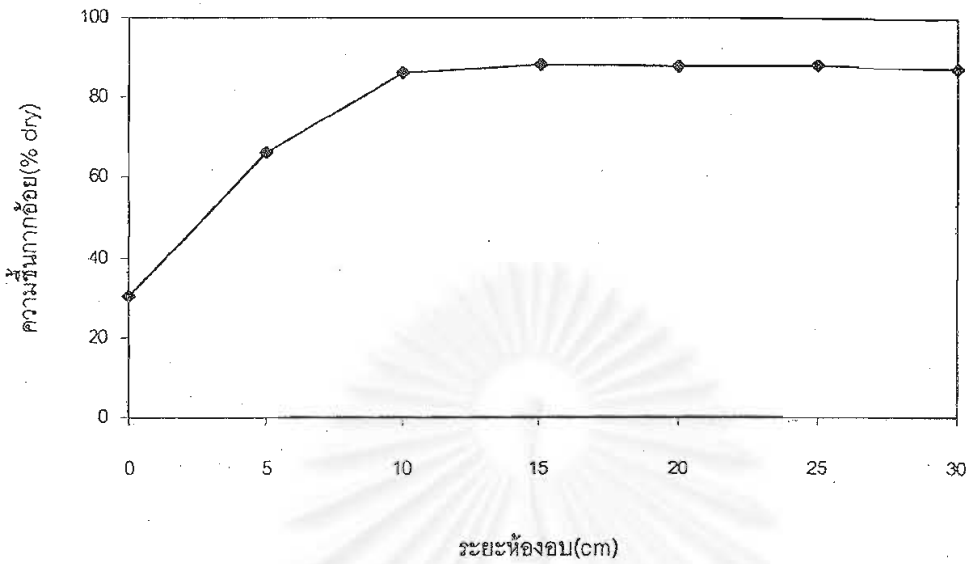
Experiment #9



รูปที่ 7.44 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 177\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.722\text{ m/s}$, $W_a = 0.016875\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 69.4\text{ % dry}$, $G_b = 14.3\text{ kg/hr}$

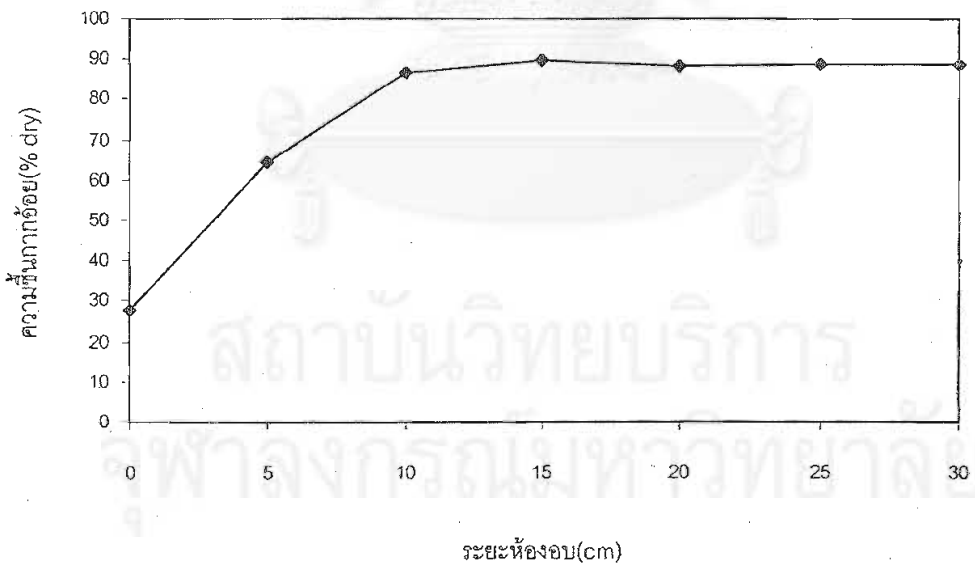
Experiment #10



รูปที่ 7.45 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.685\text{ m/s}$, $W_a = 0.016186\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 85.8\text{ \% dry}$, $G_b = 15.7\text{ kg/hr}$

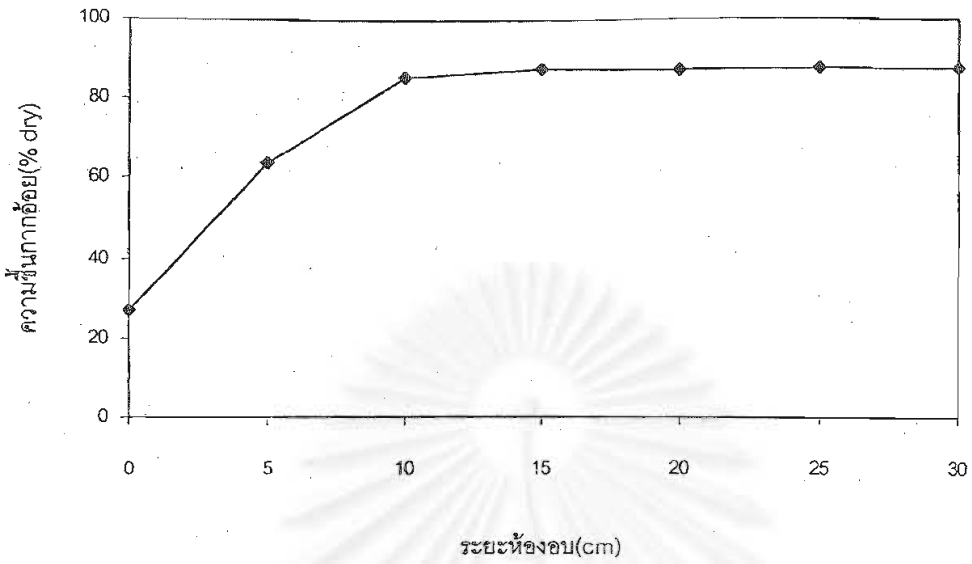
Experiment #11



รูปที่ 7.46 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 182\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.707\text{ m/s}$, $W_a = 0.016603\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 86.6\text{ \% dry}$, $G_b = 15.8\text{ kg/hr}$

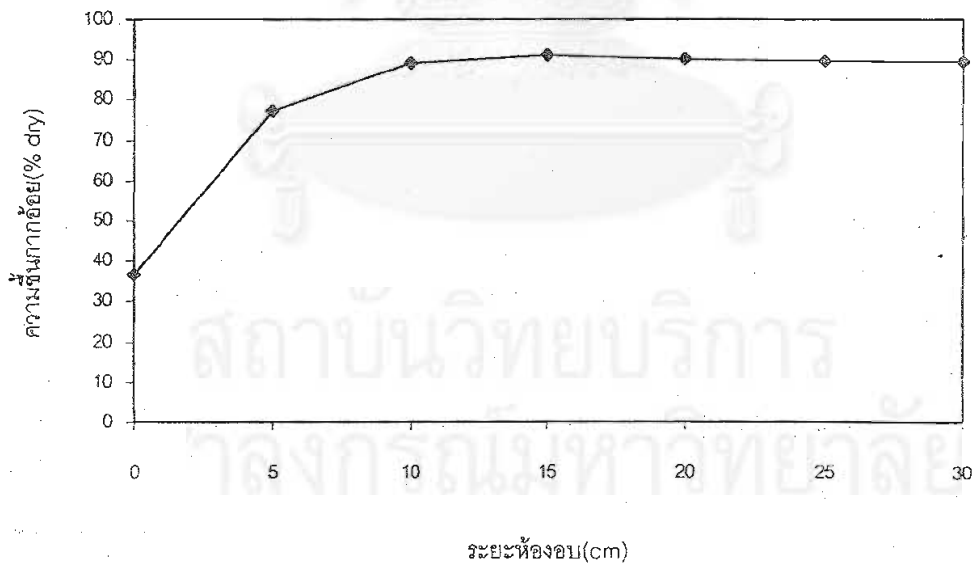
Experiment # 12



รูปที่ 7.47 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 182\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.689\text{ m/s}$, $W_a = 0.017905\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 84.8\text{ \% dry}$, $G_b = 15.6\text{ kg/hr}$

Experiment # 13



รูปที่ 7.48 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 176\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.641\text{ m/s}$, $W_a = 0.017805\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 88.0\text{ \% dry}$, $G_b = 15.9\text{ kg/hr}$

7.3.2 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองแบบ

การจำลองแบบสำหรับเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง ในที่นี้จะทำการจำลองแบบโดยใช้รูปแบบของสมการชั้นบางของการอบแห้งซึ่งเป็นผลสรุปที่ได้จากการศึกษาของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบเบตนิ่ง ซึ่งในที่นี้จะได้ว่ารูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งจะอยู่ในรูปสมการที่ (7.2) ซึ่งค่าคงที่จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 10.0

รูปแสดงผลการเปรียบเทียบของการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ณ เวลาสุดท้าย (15 นาที) ระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลองแบบแสดงดังในรูปที่ 7.49 ถึง 7.54 สำหรับของ Experiment#8 ถึง 13 ตามลำดับ ซึ่งจากกราฟเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบต ณ เวลาสุดท้ายที่ได้จากการทดลองและการจำลองแบบมีความสอดคล้องกันดีและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยลักษณะความชื้นของกากอ้อยที่ระยะเบตต่างๆจากการทดลองจะมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการจำลองแบบอยู่เล็กน้อยซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับความเป็นจริง สาเหตุเนื่องจากในการทดลองขณะที่ลมร้อนไหลผ่านอนุภาคกากอ้อย ลมร้อนไม่สามารถสัมผัสกับอนุภาคกากอ้อยได้อย่างทั่วถึง

จากรูปที่ 7.49 ถึง 7.54 เมื่อพิจารณาถึงค่าความชื้นของกากอ้อยที่ทางออกของเครื่องอบแห้ง ณ เวลาสุดท้าย สามารถสรุปและแสดงผลของ Experiment#8 ถึง 13 ได้ดังตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 ความชื้นของกากอ้อยที่ทางออกของเครื่องอบแห้ง ณ เวลาสุดท้าย

การทดลองที่	ความชื้นกากอ้อย % (dry basis)	
	ผลการทดลอง	สมการชั้นบาง(7.2)
Experiment#8	55.6	50.9
Experiment#9	13.7	9.4
Experiment#10	30.3	25.0
Experiment#11	27.9	23.4
Experiment#12	27.0	23.2
Experiment#13	36.6	32.3

จากรายการที่ 7.5 จะเห็นได้ว่าความชื้นของกากอ้อยที่ทางออกของเครื่องอบแห้ง ณ เวลาสุดท้าย ที่ได้จากการทดลองและผลการจำลองแบบมีค่าสอดคล้องใกล้เคียงกันทุกการทดลอง

ค่าระยะการอบแห้งของเบตสำหรับแต่ละการทดลองสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 7.49 ถึง 7.54 ซึ่งสามารถสรุปค่าระยะการอบแห้งของ Experiment#8 ถึง 13 ได้ดังตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.6 ระยะของการอบแห้ง(เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง)

การทดลองที่	ระยะของการอบแห้ง (เซนติเมตร)	
	ผลการทดลอง	สมการชั้นบาง(7.2)
Experiment#8	10.0	10.0
Experiment#9	15.0	15.0
Experiment#10	10.0	10.0
Experiment#11	10.0	10.0
Experiment#12	10.0	10.0
Experiment#13	10.0	10.0

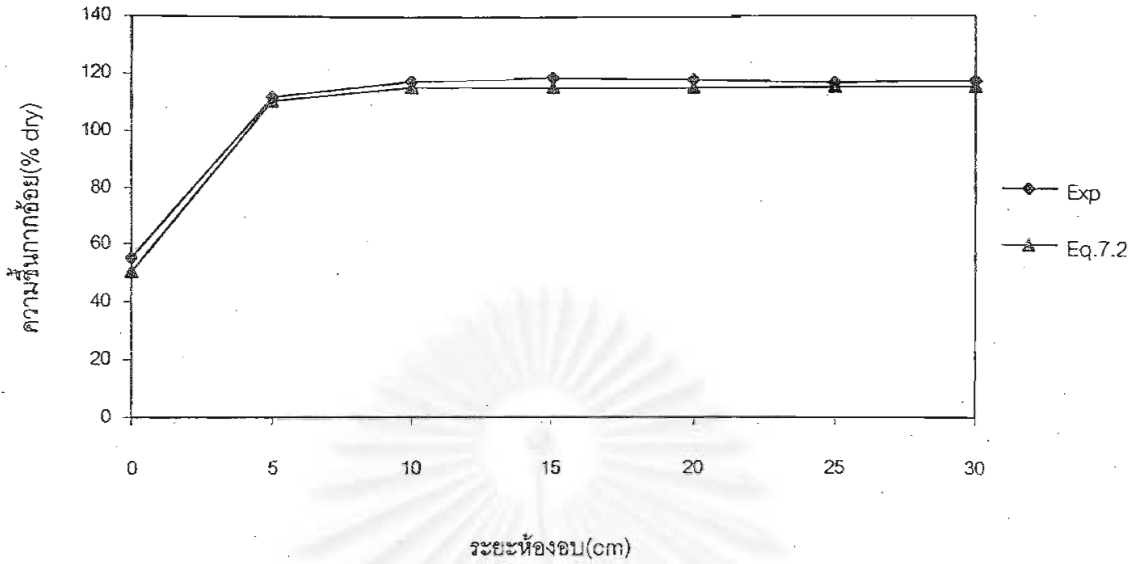
จากตารางที่ 7.6 จะเห็นได้ว่าระยะของการอบแห้งที่ได้จากผลการทดลองและผลการจำลองแบบมีค่าสอดคล้องกันทุกการทดลอง

รูปที่ 7.55 ถึง 7.60 แสดงผลการจำลองแบบของค่าความชื้นของกากอ้อยที่ไหลออกจาก หี้ออบแห้งที่ทุกช่วงเวลา 1 นาทีตลอดระยะเวลาของการทดลอง สำหรับ Experiment#8 ถึง 13 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ถึงลักษณะการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง ซึ่งสรุปได้ว่าหลังจากเวลาการอบแห้งผ่านไป 15 นาทีระบบอบแห้งจะมีความใกล้เคียงกับสภาวะคงตัวของระบบการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางโดยค่าความชื้นของกากอ้อยที่ไหลออกจากหี้ออบแห้งจะมีค่าคงที่

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองแบบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการจำลองแบบโดยการใช้รูปแบบ สมการชั้นบางของการอบแห้งดังสมการ (7.2) ที่ค่าคงที่ของการทดลองเท่ากับ 10.0 (ซึ่งสรุปได้จากการศึกษาของเครื่องอบแห้งการอ้อยแบบเบตนี้) มีความสอดคล้องกันดี



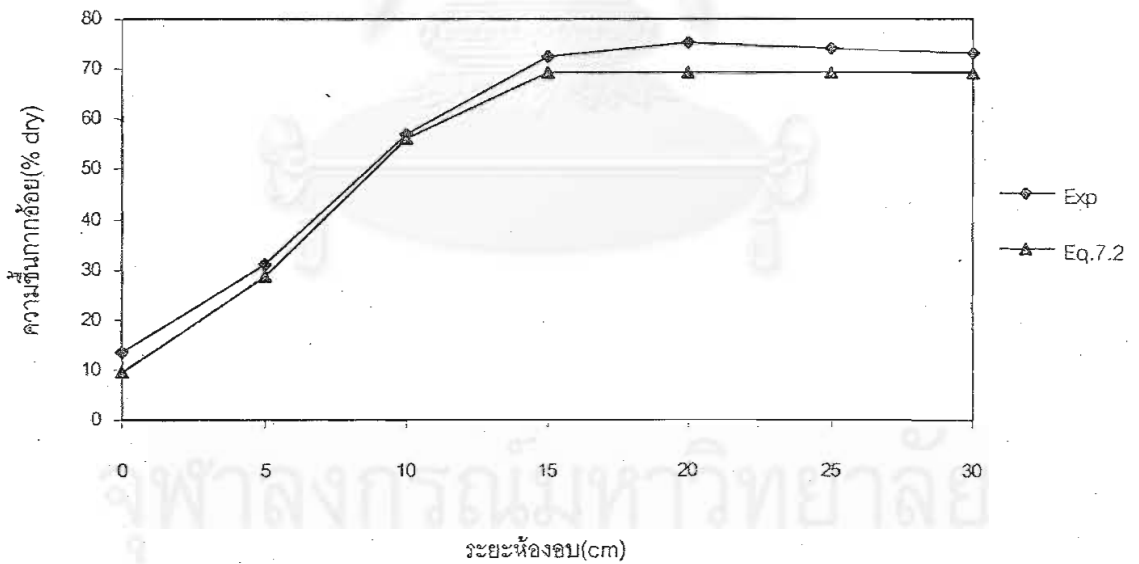
Experiment #8



รูปที่ 7.49 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 178\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.734\text{ m/s}$, $W_a = 0.017186\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 114.8\text{ \% dry}$, $G_b = 18.2\text{ kg/hr}$

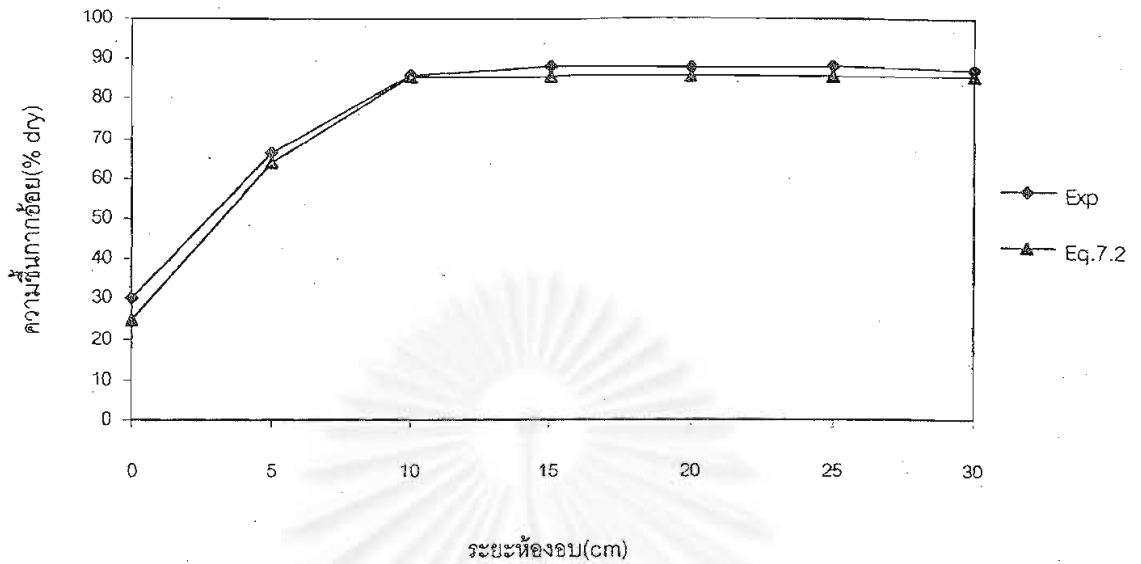
Experiment #9



รูปที่ 7.50 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 177\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.722\text{ m/s}$, $W_a = 0.016875\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 69.4\text{ \% dry}$, $G_b = 14.3\text{ kg/hr}$

Experiment # 10



รูปที่ 7.51 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.685\text{ m/s}$, $W_a = 0.016186\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 85.8\text{ \% dry}$, $G_b = 15.7\text{ kg/hr}$

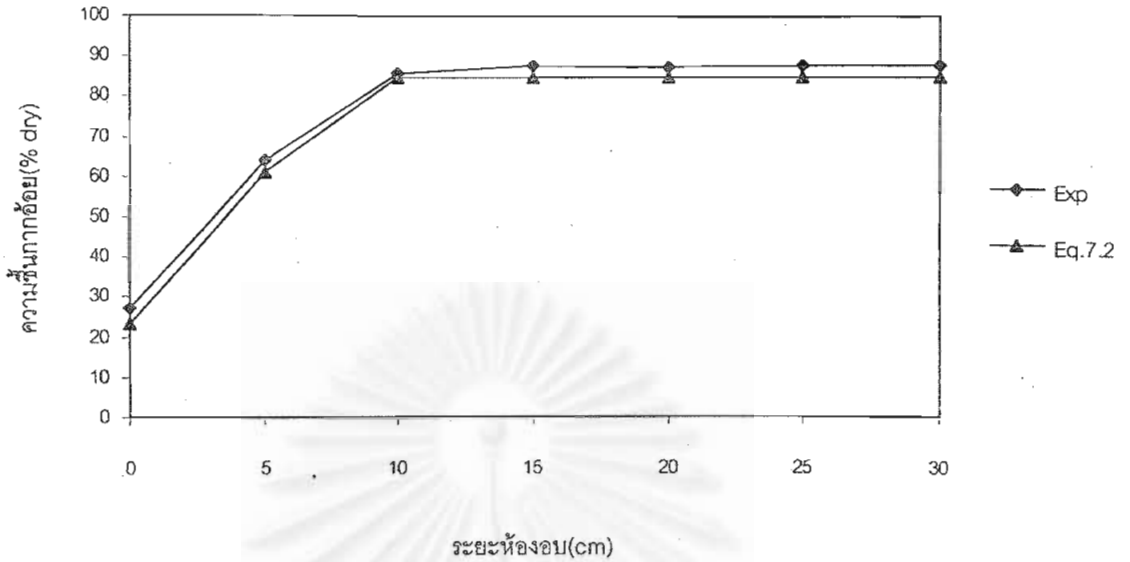
Experiment # 11



รูปที่ 7.52 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 182\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.707\text{ m/s}$, $W_a = 0.016603\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 86.6\text{ \% dry}$, $G_b = 15.8\text{ kg/hr}$

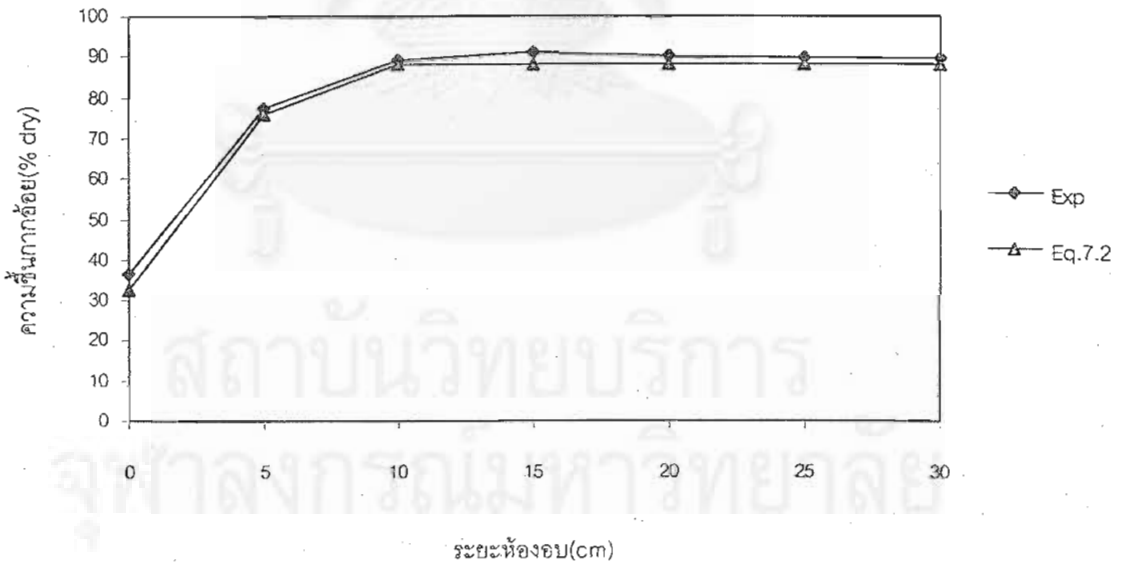
Experiment #12



รูปที่ 7.53 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 182\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.689\text{ m/s}$, $W_a = 0.017905\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 84.8\text{ \% dry}$, $G_b = 15.6\text{ kg/hr}$

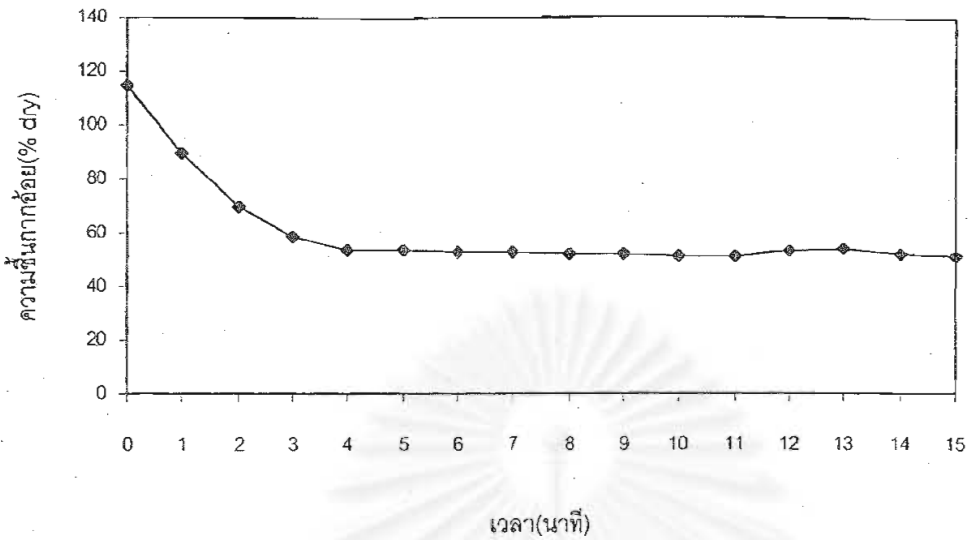
Experiment #13



รูปที่ 7.54 การกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยภายในเบดที่เวลา 15 นาที

$T_a = 176\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.641\text{ m/s}$, $W_a = 0.017805\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 88.0\text{ \% dry}$, $G_b = 15.9\text{ kg/hr}$

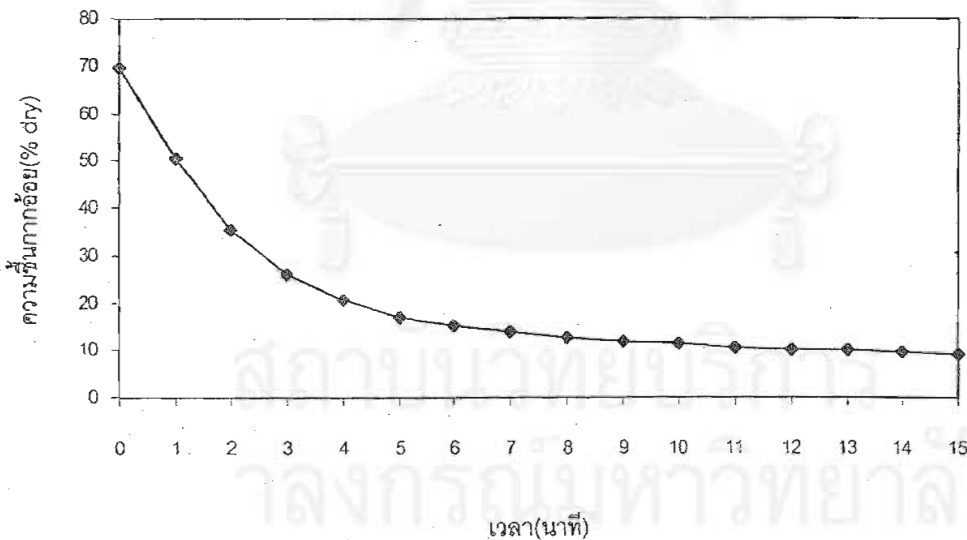
Experiment # 8



รูปที่ 7.55 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออกที่เวลาต่างๆ

$T_a = 178^\circ\text{C}$, $V_a = 0.734\text{ m/s}$, $W_a = 0.017186\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 114.8\% \text{ dry}$, $G_b = 18.2\text{ kg/hr}$

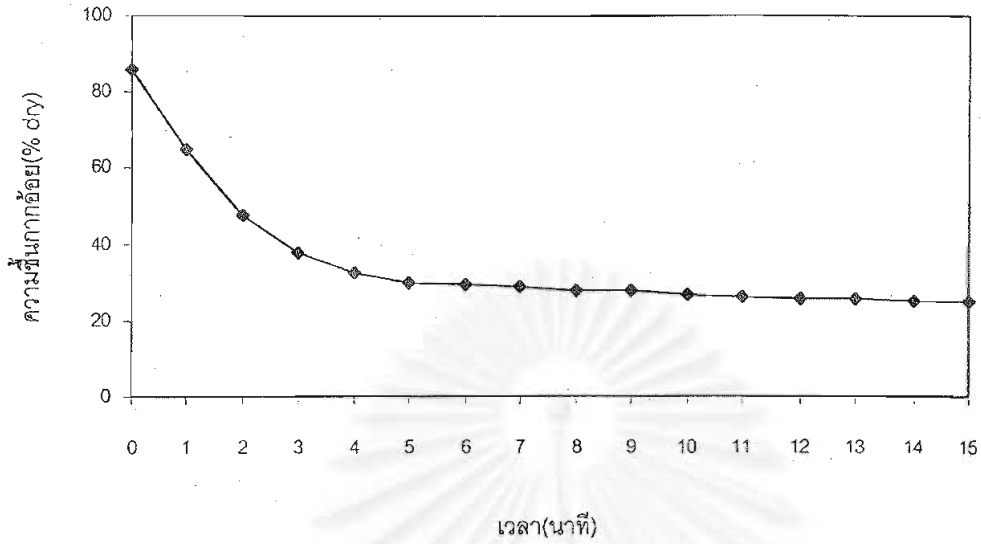
Experiment # 9



รูปที่ 7.56 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออกที่เวลาต่างๆ

$T_a = 177^\circ\text{C}$, $V_a = 0.722\text{ m/s}$, $W_a = 0.016875\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 69.4\% \text{ dry}$, $G_b = 14.3\text{ kg/hr}$

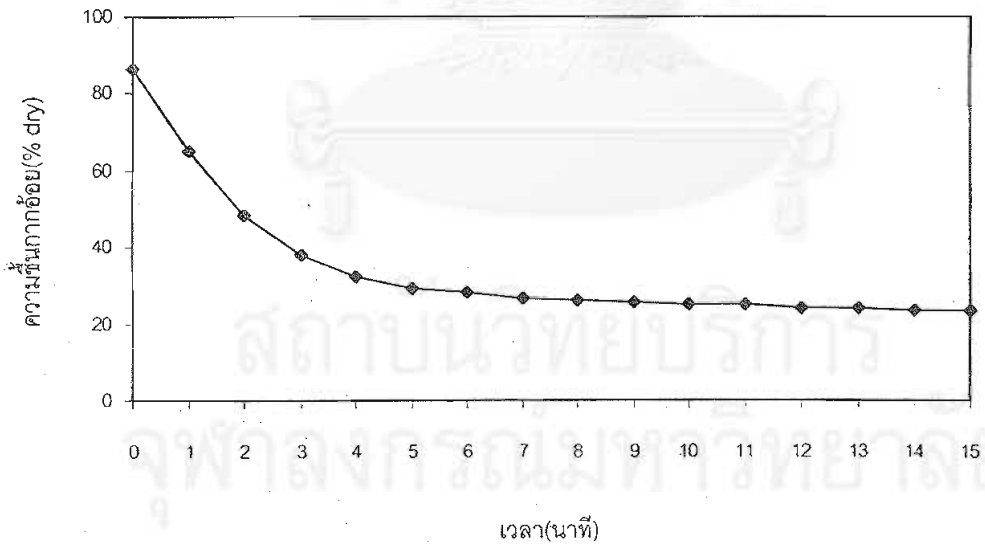
Experiment # 10



รูปที่ 7.57 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออกที่เวลาต่างๆ

$T_a = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.685\text{ m/s}$, $W_a = 0.016186\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 85.8\text{ \% dry}$, $G_b = 15.7\text{ kg/hr}$

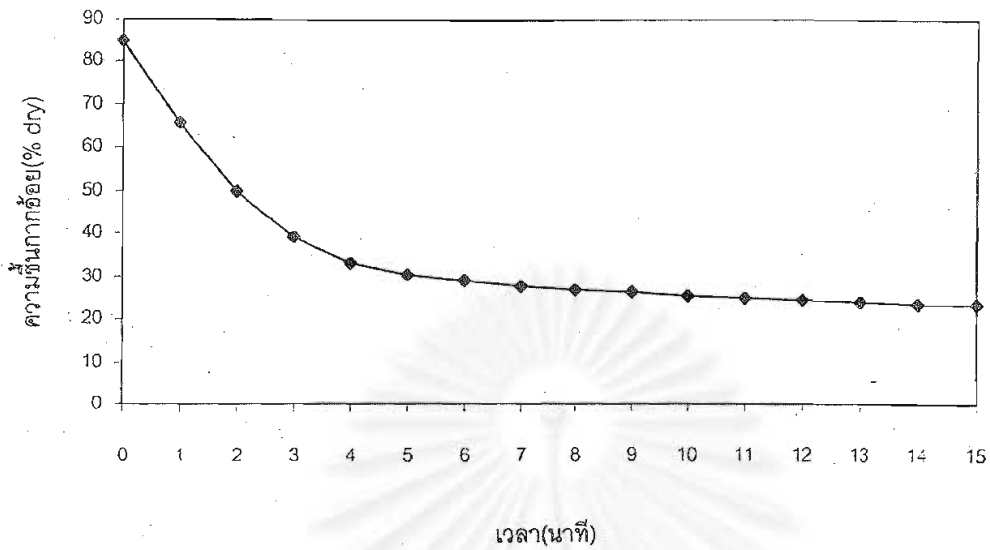
Experiment # 11



รูปที่ 7.58 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออกที่เวลาต่างๆ

$T_a = 182\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.707\text{ m/s}$, $W_a = 0.016603\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 86.6\text{ \% dry}$, $G_b = 15.8\text{ kg/hr}$

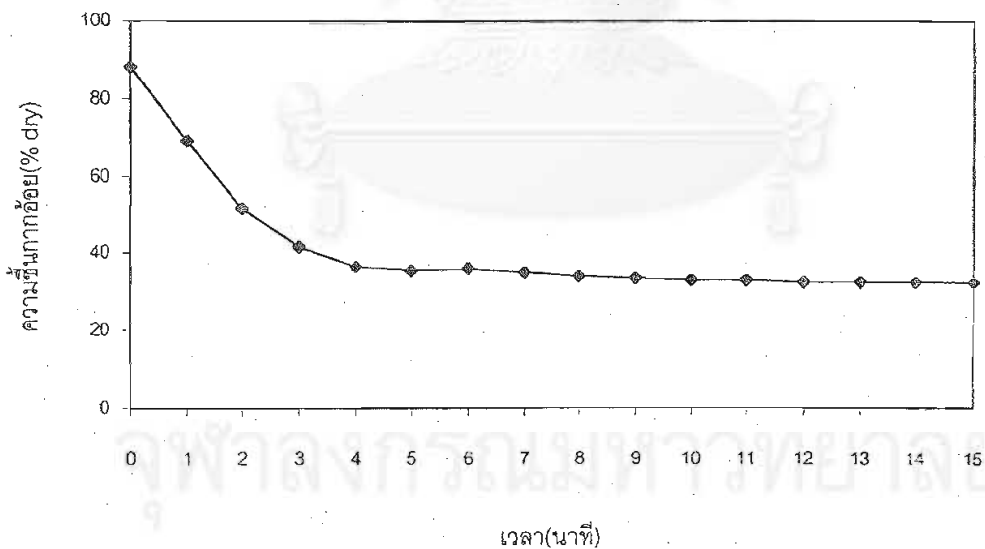
Experiment # 12



รูปที่ 7.59 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออกที่เวลาต่างๆ

$T_a = 182\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.689\text{ m/s}$, $W_a = 0.017905\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 84.8\text{ \% dry}$, $G_b = 15.6\text{ kg/hr}$

Experiment # 13



รูปที่ 7.60 ผลการจำลองแบบความชื้นของกากอ้อยที่ทางออกที่เวลาต่างๆ

$T_a = 176\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_a = 0.641\text{ m/s}$, $W_a = 0.017805\text{ kg/kg dry air}$, $M_b = 88.0\text{ \% dry}$, $G_b = 15.9\text{ kg/hr}$

7.4 สรุปผล

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองแบบทั้งหมดของเครื่อง ออบแห้งกากอ้อย แบบเบตนิ่งตั้งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 7.2.2 สามารถสรุปได้ว่า ในการจำลองแบบโดยรูปแบบสมการการอบแห้งชั้น บางอย่างง่ายโดยไม่อาศัยค่าคงที่จากการทดลอง ซึ่งอยู่ในรูปสมการ ที่ (7.1) จะให้ผลการจำลองแบบที่ไม่ค่อย สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงรูปสมการที่ (7.1) โดยการใช้ร่วมกับค่าคงที่จาก การทดลอง ซึ่งอาศัยวิธีการปรับปรุง รูปแบบสมการจากผลเฉลยทั่วไปของ Sherwood[39] จะได้รูปแบบสมการ การอบแห้งชั้นบางเมื่อมีการประยุกต์ค่าคงที่จากการทดลองเข้าไปอยู่ในรูปสมการที่ (7.2) ซึ่งค่าคงที่จากการทดลอง ที่ได้จากชุดของผลการทดลองในที่นี้มีค่าเท่ากับ 10.0 ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบโดยรูปแบบสมการ ที่ (7.2) มี ความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง ทั้งการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อย การกระจายตัวอุณหภูมิลม ร้อน และระยะการอบแห้ง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบของสมการ ผลเฉลยทั่วไปของ Sherwood ที่ได้จาก The liquid diffusion theory ดังสมการที่ (3.8) ในบทที่ 3 ในที่นี้ได้ว่าผลรวมของเทอมที่สองและเทอมถัดไปของสมการมี ค่าเท่ากับ 23.4 % เมื่อเทียบกับเทอมแรก ซึ่งมีนัยสำคัญจนไม่สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้น รูปแบบของสมการชั้นบางของ การอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งกากอ้อยในการทดลองนี้จึงเป็นดังสมการที่ (3.10)หรือ สมการที่ (7.2) ใน บทนี้นั่นเอง

เมื่อทำการจำลองแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางโดยใช้รูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้ง ดังสมการ (7.2) ที่ค่าคงที่ของการทดลองเท่ากับ 10.0 (ซึ่งสรุปได้จากการศึกษาของเครื่องอบแห้งการอ้อยแบบเบ ตนิ่ง) และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองและการจำลองแบบตั้งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 7.3.2 สามารถสรุปได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการจำลองแบบมีความสอดคล้องกันดี

บทที่ 8

การประเมินสภาวะการทำงานของโรงงานน้ำตาลตัวอย่าง

8.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการประเมินศักยภาพของการนำความร้อนจากก๊าซไอเสียทิ้งมาใช้ประโยชน์ด้วยกระบวนการอบแห้งกากอ้อยของโรงงานตัวอย่างโดยอิงข้อมูลสภาวะการดำเนินการของโรงงานน้ำตาลในประเทศไทย และการจำลองแบบเพื่อหาขนาดของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางเมื่อกำหนดสภาวะการทำงานของโรงงานตัวอย่าง

8.2 ศักยภาพของความร้อนจากก๊าซไอเสียที่ใช้ออบแห้งกากอ้อยได้

สำหรับโรงงานตัวอย่างที่มีกำลังการหีบอ้อย 100 ตัน/ชม. ซึ่งจะมีกากอ้อยเกิดขึ้น 30 % ของปริมาณอ้อยเข้าหีบ ดังนั้นจะได้ว่ามีกากอ้อยเกิดขึ้น 30 ตัน/ชม. ที่ความชื้น 50 % มาตรฐานเปียก จากข้อมูลของสถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย[6] โรงงานน้ำตาลในประเทศไทยใช้กระบวนการผลิตน้ำตาลที่คล้ายกัน ไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีคุณภาพระดับใกล้เคียงกันคือ ความดันไอดี 20 kg/cm² ถึง 30 kg/cm² และอุณหภูมิ 350 °C ถึง 370 °C ดังนั้นข้อมูลที่ใช้เพื่อประเมินการใช้กากอ้อยและกากอ้อยเหลือใช้คือ กากอ้อยที่ความชื้น 50 % มาตรฐานเปียก 1 kg ผลิต ไอน้ำดีได้ 2 kg และไอน้ำดี 1 kg ใช้ในกระบวนการหีบอ้อยได้ 2 kg เพื่อผลิตน้ำตาล ดังนั้น โรงงานที่มีกำลังการหีบอ้อย 100 ตัน/ชม. ใช้ไอน้ำดี 50 ตัน/ชม. และใช้กากอ้อยที่ความชื้น 50 % มาตรฐานเปียก 25 ตัน/ชม. ดังนั้นโรงงานจะมีกากอ้อยเหลือใช้เท่ากับ 5 ตัน/ชม.

จากข้อมูลค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของกากอ้อยสำหรับกากอ้อยในประเทศไทย[6] ซึ่งในที่นี้ใช้ค่าความร้อนสูงของการเผาไหม้ของกากอ้อยเท่ากับ 19,241 kJ/kg(กากอ้อยแห้ง) อุณหภูมิก๊าซไอเสียทิ้งที่ 200 °C อุณหภูมิเริ่มต้นของกากอ้อยเท่ากับ 30 °C การคำนวณปริมาณการระเหยดากากอ้อยเมื่อใช้กากอ้อยที่ความชื้น 35 % มาตรฐานเปียก แทนกากอ้อยที่ความชื้น 50 % มาตรฐานเปียก ในอัตราการการผลิตไอน้ำดีเท่ากัน สามารถคำนวณได้ดังนี้

สำหรับกากอ้อยขึ้น 50 % มาตรฐานเปียก 1 kg.

ความร้อนจากการเผาไหม้ของกากอ้อย	= 0.5 x 19,241	= 9620.5	kJ
ความร้อนในการอุ่นน้ำจาก 30 – 100 °C	= 0.5 x 4.186 x 70	= 146.5	kJ
ความร้อนในการระเหยน้ำ	= 0.5 x 2501	= 1250	kJ
ความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำ	= 0.5 x 100 x 1.805	= 90.25	kJ
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้	= 9620.5 - 146.5 - 1250 - 90.25	= 8133.7	kJ

สำหรับกากอ้อยขึ้น 35 % มาตรฐานเปียก 1 kg.

ความร้อนจากการเผาไหม้ของกากอ้อย	= 0.65 x 19,241	= 12,506.7	kJ
ความร้อนในการอุ่นน้ำจาก 30 – 100 °C	= 0.35 x 4.186 x 70	= 102.6	kJ
ความร้อนในการระเหยน้ำ	= 0.35 x 2501	= 875	kJ
ความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำ	= 0.35 x 100 x 1.805	= 63.2	kJ
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้	= 12,506.7 - 102.6 - 875 - 63.2	= 11,465.9	kJ

สำหรับโรงงานตัวอย่างที่มีปริมาณการใช้กากอ้อยขึ้น 50 % มาตรฐานเปียก 25 ตัน/ชม. เมื่อเทียบที่อัตราการผลิตไอน้ำเท่ากัน จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการใช้กากอ้อยขึ้น 35 \% มาตรฐานเปียก} &= (25 \times 8133.7) / 11456.9 \\ &= 17.75 \text{ ตัน/ชม.} \end{aligned}$$

ซึ่งกากอ้อยขึ้น 35 % มาตรฐานเปียก 17.75 ตัน/ชม. เตรียมได้จากกากอ้อยขึ้น 50 % มาตรฐานเปียก 23 ตัน/ชม. ดังนั้นถ้ามีการใช้กากอ้อยที่อบแห้งเหลือความชื้น 35 % มาตรฐานเปียก แทนกากอ้อยความชื้น 50 % มาตรฐานเปียก ในการเผาไหม้ ปริมาณกากอ้อยเหลือใช้จะมีเพิ่มมากขึ้นจาก 5 ตัน/ชม. เป็น 7 ตัน/ชม. ที่ความชื้น 50 % มาตรฐานเปียก ซึ่งคิดเป็นปริมาณการประหยัดกากอ้อยได้เพิ่มขึ้น 8 % ของปริมาณการใช้กากอ้อยเดิม

สำหรับการทำสมดุลมวลอย่างง่ายของห้องเผาไหม้ของโรงงานตัวอย่าง การคำนวณจะใช้วิธีของ Hugot[23] จากข้อมูลการสำรวจสภาพการทำงานของโรงงานน้ำตาลในประเทศไทยของสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย[6] จะได้ว่าลักษณะการใช้อากาศในการเผาไหม้ กากอ้อยในเตาเผาจะมีค่าแตกต่างกัน ในช่วงตั้งแต่ 161 ถึง 620 %อากาศตามทฤษฎี ซึ่งในที่นี้จะใช้ค่าเฉลี่ยของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ที่ 280 %อากาศตามทฤษฎี ส่วนประกอบของธาตุต่างๆของกากอ้อยมีดังแสดงในบทที่ 3

อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย ปกติแล้วก๊าซไอเสียจะออกจากห้องเผาไหม้ที่ประมาณ 300 °C ซึ่งก่อนที่ก๊าซไอเสียนี้จะถูกนำไปอุ่นอากาศที่จะใช้ในการเผาไหม้ หลังจากผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศแล้ว ก๊าซร้อนจะมีอุณหภูมิประมาณ 200 °C ค่าขีดจำกัดสมบูรณของก๊าซไอเสียคือเมื่อมีการดึงความร้อนออกจนถึงจุดน้ำค้าง ค่าความชื้นของก๊าซไอเสียประมาณ 0.11174 kg water (kg dry air)⁻¹ ซึ่งจะมีอุณหภูมิที่จุดน้ำค้างเท่ากับ 54.5 °C แต่ถ้าก๊าซไอเสียถูกดึงความร้อนออกจนมีอุณหภูมิใกล้จุดดังกล่าว จะมีปัญหาที่สำคัญเรื่องการเกิดสนิมขึ้นกับอุปกรณ์การทำงาน ดังนั้นในการทำงานจะเลือกอุณหภูมิต่ำสุดของก๊าซไอเสียที่ 100 °C โดยการใส่ค่าความร้อน 1.17 kJ kg⁻¹ °C⁻¹ ค่าความร้อนมากที่สุดที่ใช้งานได้ของลมร้อนมีค่าเท่ากับ 7442.5 kJ s⁻¹

การประมาณความสามารถในการอบแห้งกากอ้อยโดยใช้ความร้อนก๊าซไอเสีย สามารถหาค่าประมาณได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

ความร้อนสัมผัสที่ต้องใช้ในการอุ่นกากอ้อยและน้ำในกากอ้อย (ถ้าอุณหภูมิเริ่มต้นของ กากอ้อยเท่ากับ 30 °C) ไปจนถึงอุณหภูมิระเหย สมมติว่าค่าความจุความร้อนของกากอ้อยที่ 50 % มาตรฐานเปียก มีค่าเท่ากับ 2.93 kJ kg⁻¹ °C⁻¹ มีค่าประมาณ 6.39 x 2.93 x (100°-30°) ~1310.6 kJ s⁻¹

$$\text{ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำได้} \sim 7442.5 - 1310.6 \sim 6131.9 \text{ kJ s}^{-1}$$

$$\text{ศักยภาพของการระเหย} \sim 6131.9/2501 \sim 2.452 \text{ kg s}^{-1}$$

โดยการใส่ค่าอัตราการระเหยที่ได้นี้ ความชื้นสุดท้ายของกากอ้อยที่อบได้จะมีค่าประมาณ 19 % มาตรฐานเปียก

จากการคำนวณนี้คิดว่าสามารถนำความร้อนที่ใช้งานได้ของก๊าซไอเสียมาใช้งานได้เต็มที่ แต่ในทางเป็นจริงแล้วเป็นไปได้ ถ้าคิดที่ 76 % ของค่าดังกล่าว ความชื้นกากอ้อยสุดท้ายจะมีค่าที่ 35 % มาตรฐานเปียก

8.3 การออกแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

ในการออกแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางสำหรับหม้อกำเนิดไอน้ำของ โรงงานตัวอย่างที่มี อัตราการผลิตไอน้ำที่ 5 ตัน/ชม ซึ่งจะสามารถใช้ไอน้ำในการหีบอ้อยได้ 10 ตัน/ชม. และมีกากอ้อยเกิดขึ้น 3 ตัน/ชม. ที่ความชื้นกากอ้อย 50 % มาตรฐานเปียก เมื่อต้องการลดความชื้นของกากอ้อยที่ใช้ในการเผาไหม้จาก 50 % เป็น 35 % มาตรฐานเปียก โดยใช้แหล่งความร้อนจากก๊าซไอเสีย เมื่อกำหนดปริมาณอากาศในการเผาไหม้เท่ากับ 280 % อากาศตามทฤษฎี อุณหภูมิก๊าซไอเสียหลังจากที่ผ่านเครื่องอุ่นอากาศมีค่าเท่ากับ 200 °C ภาพแสดงสภาวะ การทำงานของระบบเมื่อมีเครื่องอบแห้งกากอ้อยแสดงดังในรูปที่ 8.1 เมื่อสภาวะต่างๆถูกกำหนดข้างต้นในการ กำหนดขนาดของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางจึงสามารถทำได้โดยการกำหนดค่าความเร็วของก๊าซไอเสีย ที่เข้าสู่ห้องอบแห้งที่ความเร็วต่างๆ จากนั้นจึงทำการคำนวณหาขนาดพื้นที่หน้าตัดและความสูงที่เหมาะสมเพื่อให้ กากอ้อยที่ออกมามีความชื้นตามที่ต้องการสำหรับแต่ละค่าความเร็วของก๊าซไอเสียที่กำหนด ผลจากการจำลอง แบบแสดงดังตาราง ที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ผลการจำลองแบบขนาดเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง

ความเร็วก๊าซไอเสีย ms ⁻¹	พื้นที่หน้าตัดห้องอบ m ²	ความหนาของห้องอบ cms
0.5	16.2	4.1
1.0	8.1	4.4

สภาวะที่กำหนดสำหรับการจำลองแบบของตารางที่ 8.1

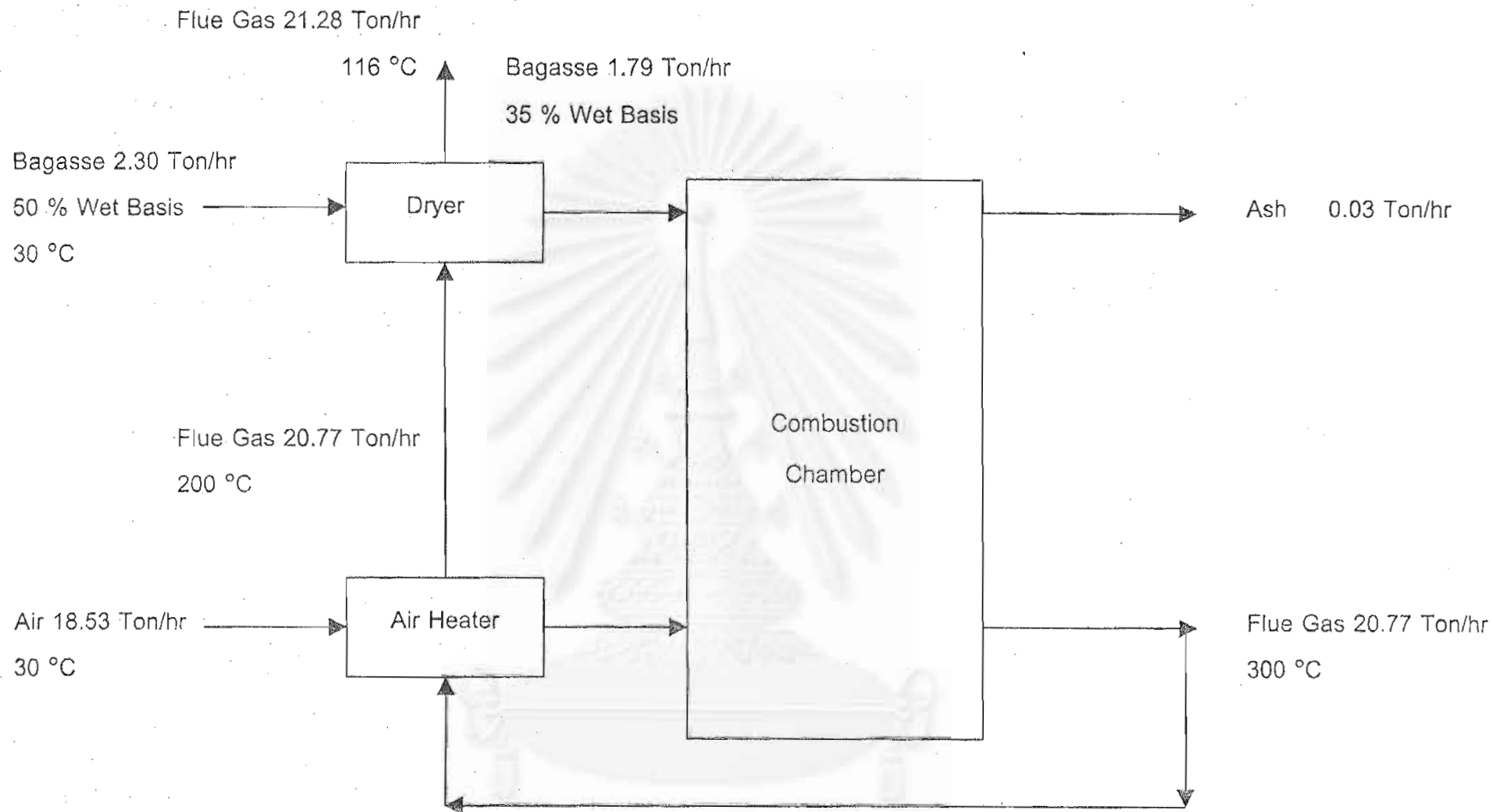
อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง	200 °C
ความชื้นสัมบูรณ์ของก๊าซไอเสียที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง	0.08369 kg/kg dry
อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย	20.8 ตัน/ชม (8.1m ³ s ⁻¹)
ความชื้นของกากอ้อยเริ่มต้น	50 % มาตรฐานเปียก
ความชื้นกากอ้อยตอนสุดท้าย	35 % มาตรฐานเปียก
อัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น 50 % มาตรฐานเปียก	2.3 ตัน/ชม.

จากผลการจำลองแบบที่ได้ (ตารางที่ 8.1) จะเห็นว่าเมื่อกำหนดค่าความเร็วของก๊าซไอเสียที่เข้าสู่ห้องอบแห้งที่ความเร็วต่างๆ ($0.5-1.0 \text{ ms}^{-1}$) ค่าของความหนาของห้องอบแห้งที่ต้องใช้ในการอบแห้งกากอ้อยให้เหลือความชื้นของกากอ้อยที่ต้องการที่คำนวณได้มีค่าน้อยคือมีค่าประมาณ 4 เซนติเมตร ในขณะที่ต้องใช้พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งมาก ($8.1-16.2 \text{ m}^2$) ซึ่งไม่เหมาะสมในการใช้งานจริงของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง สาเหตุที่ต้องใช้พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งมาก เนื่องจากจำเป็นต้องใช้อัตราการไหลของก๊าซไอเสียในการอบแห้งมาก(หากใช้อัตราการไหลของก๊าซไอเสียน้อยกว่านี้ศักยภาพความร้อนของก๊าซไอเสียจะไม่เพียงพอต่อการระเหยน้ำออกจากกากอ้อยเพื่อให้ได้ความชื้นกากอ้อยสุดท้ายที่ต้องการได้) ดังนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซไอเสียจึงมีค่ามากด้วย และเมื่อกำหนดให้ความเร็วของก๊าซไอเสียที่ทางเข้าห้องอบแห้งมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่หน้าตัดของเครื่องอบแห้งที่มีค่ามากเพื่อรักษาให้อัตราการไหลของก๊าซไอเสียได้ตามที่ต้องการ

จากผลที่สังเกตได้ขณะทำการทดลองเนื่องจากในของกากอ้อยจะมีอนุภาคกากอ้อยอยู่หลายขนาด ถ้าหากมีการเพิ่มความเร็วของก๊าซไอเสียที่เข้าสู่ห้องอบแห้งให้มีค่ามากกว่า 1.0 ms^{-1} อนุภาคกากอ้อยขนาดเล็กจะถูกพัดลอยไปกับก๊าซไอเสีย ดังนั้นสำหรับเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางจึงไม่สามารถลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งได้โดยการเพิ่มความเร็วของก๊าซไอเสียที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง

จะเห็นได้ว่าเนื่องจากเงื่อนไขที่กำหนดสำคัญ 2 ประการของเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางคือ อัตราการไหลของก๊าซไอเสียที่ต้องใช้ และความเร็วของก๊าซไอเสียที่ทางเข้าของห้องอบแห้ง ดังนั้นรูปแบบของเครื่องอบแห้งที่ได้จะมีลักษณะที่ขนาดพื้นที่หน้าตัดของเครื่องอบแห้งมีขนาดใหญ่ เมื่อหน้าตัดของเครื่องอบแห้งมีขนาดใหญ่จึงเป็นตัวบังคับให้ลักษณะการไหลของกากอ้อยที่ไหลผ่านเครื่องอบแห้งมีความเร็วต่ำ(เมื่อกำหนดอัตราการไหลของกากอ้อยดังนั้นความเร็วการไหลผ่านเครื่องอบแห้งของกากอ้อยจะถูกบังคับโดยพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง) ซึ่งจะได้ค่าความหนาของเครื่องอบแห้งที่ต้องใช้มีค่าน้อย ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะไม่มีความแตกต่างกันเมื่อจำลองแบบที่หม้อผลิตไอน้ำที่มีกำลังการผลิตไอน้ำที่ต่างกัน

และถ้าหากสร้างเครื่องอบแห้งกากอ้อยที่มีความหนามากกว่าค่าที่คำนวณได้ ก๊าซไอเสียจะเกิดการอิมมิดวชันภายในห้องอบแห้งซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาเรื่องการฟุ้งกระจายของอุปกรณ์เครื่องอบแห้ง



รูปที่ 8.1 ภาพแสดงระบบการเผาไหม้เมื่อมีเครื่องอบแห้งกากอ้อยเหลือความชื้น 35 % มาตรฐานเปียก, 280 % อากาศตามทฤษฎี

บทที่ 9

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เป็นการศึกษาวิจัยเพื่อหารูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้ง กากอ้อยสำหรับใช้ในการจำลองแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

ในกระบวนการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการประเมินแบบจำลองของงานวิจัยชั้นนี้ได้แบ่งเป็น 2 ส่วน เพื่อความสะดวกในการเตรียมการทดลองและการควบคุมสภาวะต่างๆของการทดลองส่วนแรกจึงศึกษาถึงลักษณะ ของกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งกากอ้อยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่งก่อน และเมื่อสามารถสรุปผลหา รูปแบบสมการชั้นบางที่ใช้ทำนายลักษณะการกระจายตัวของตัวแปรสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบแห้งกากอ้อย ด้วยเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่งได้อย่างถูกต้องแล้ว จากนั้นจึงทำการทดลองในส่วนที่ 2 ซึ่งก็คือการทดลองอบแห้งกาก อ้อยด้วยเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง เพื่อตรวจสอบว่าสมการชั้นบางของการอบแห้ง กากอ้อยที่ สรุปผลมาจากการทดลองของเครื่องอบแห้งแบบเบตนิ่งนั้นสามารถที่จะประยุกต์ใช้กับการจำลองแบบของเครื่องอบ แห่กากอ้อยแบบไหลสวนทางได้สอดคล้องหรือไม่ อย่างไร

การจำลองแบบของกระบวนการทดลองใช้รูปแบบผลเฉลยทั่วไปของ Sherwood[39] ซึ่งวิเคราะห์ จาก The Liquid Diffusion Theory สำหรับการอบแห้งของวัสดุแผ่นบางยาว ใน 2 รูปแบบดังนี้

1. จำลองแบบโดยรูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางอย่างง่ายโดยไม่อาศัยค่าคงที่จาก การทดลอง ซึ่งอยู่ในรูป

$$\frac{(M - M_c)}{(M_i - M_c)} = a \exp(-kt) \quad (9.1)$$

เมื่อ $a = 1.0$

k - ค่าคงที่ของการอบแห้ง

2. จำลองแบบโดยรูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางเมื่อมีการประยุกต์ ค่าคงที่จากการทดลองเข้าไป ซึ่งอยู่ในรูป

$$\frac{(M - M_c)}{(M_i - M_c)} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-ckt) \quad (9.2)$$

เมื่อ $a = \frac{8}{\pi^2}$
 k - ค่าคงที่ของการอบแห้ง
 c - ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

ในการวิจัยนี้ ค่าคงที่ c ที่เหมาะสมสำหรับชุดของผลการทดลอง ถูกหามาโดยการจำลองแบบเมื่อแทนค่าคงที่ c ที่มีค่าต่างกันในช่วง 1.0 ถึง 10.5 โดยใช้ความละเอียดของค่า c เท่ากับ 0.5 ในช่วงที่สำคัญ จากนั้นจึงพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองแบบและผลที่ได้จากการทดลอง โดยพิจารณาผลการกระจายตัว ความชื้นของกากอ้อยที่ระยะต่างๆตลอดความสูงของเบด ณ เวลาสุดท้ายเป็นหลัก ผลที่ได้เมื่อหาค่ารวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของการกระจายตัวความชื้นของกากอ้อยรวมทุกการทดลอง ปรากฏว่าที่ค่าคงที่ c มีค่าเท่ากับ 10.0 จะให้ค่ารวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุด จึงสรุปใช้ค่าคงที่ c ของการทดลองมีค่าเท่ากับ 10.0

จากผลสรุปการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองแบบทั้งหมดของเครื่อง อบแห้งกากอ้อยแบบเบดนิ่งดังได้สรุปไว้ในบทที่ 7 สามารถสรุปได้ว่า ในการจำลองแบบโดยรูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางอย่างง่ายโดยไม่อาศัยค่าคงที่จากการทดลอง ซึ่งอยู่ในรูปสมการที่ (9.1) จะให้ผลการจำลองแบบที่ไม่ค่อยสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงรูปสมการที่ (9.1) โดยการใช้ร่วมกับค่าคงที่จากการทดลอง ซึ่งอาศัยวิธีการปรับปรุงรูปแบบสมการจากผลเฉลยทั่วไปของ Sherwood[39] จะได้รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางเมื่อมีการประยุกต์ค่าคงที่จากการทดลองเข้าไปอยู่ในรูปสมการที่ (9.2) ซึ่งค่าคงที่จากการทดลองที่ได้จากชุดของผลการทดลองในที่นี้มีค่าเท่ากับ 10.0 ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบโดยรูปแบบสมการที่ (9.2) มีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง ทั้งการกระจายตัวของความชื้นของกากอ้อยการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน และระยะเวลาการอบแห้ง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบของสมการผลเฉลยทั่วไปของ Sherwood ที่ได้จาก The liquid diffusion theory ดังสมการที่ (3.8) ในบทที่ 3 ในที่นี้ได้ว่าผลรวมของเทอมที่สองและเทอมถัดไปของสมการมีค่าเท่ากับ 23.4 % เมื่อเทียบกับเทอมแรก ซึ่งมีนัยสำคัญจนไม่สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้น รูปแบบของสมการชั้นบางของการอบแห้งสำหรับการอบแห้งกากอ้อยที่สรุปได้จากการวิจัยนี้จึงเป็นดังสมการที่ (9.2) โดยค่าคงที่ของการทดลองเท่ากับ 10.0

จากผลสรุปที่ได้จากบทที่ 7 เช่นเดียวกันเมื่อทำการจำลองแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางโดยใช้รูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งดังสมการที่ (9.2) ที่ค่าคงที่ของการทดลองเท่ากับ 10.0 (ซึ่งสรุปได้จากการศึกษาของเครื่องอบแห้งการอ้อยแบบเบดนิ่ง) และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองและการจำลองแบบดังได้กล่าวสรุปไว้ในบทที่ 7 สามารถสรุปได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการจำลองแบบมีความสอดคล้องกันดี ดังนั้น สมการชั้นบางของการอบแห้งดังสมการที่ (9.2) จึงสามารถใช้กับเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางได้ด้วย

จากการประเมินศักยภาพของก๊าซไอเสียของโรงงานน้ำตาลตัวอย่างที่กำลังการหีบอ้อยที่ 100 ตัน/ชม. อัตราการผลิตกากอ้อยที่ 30 ตัน/ชม. ที่ความชื้น 50 % (มาตรฐานเปียก) การคำนวณโดยใช้วิธีของ Hugot[23] และข้อมูลการตรวจสอบสภาพการทำงานของโรงงานน้ำตาลในประเทศไทยของสถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย[6] ได้ว่าลักษณะการใช้อากาศในการเผาไหม้กากอ้อยในเตาเผาจะมีค่าแตกต่างกันในช่วงตั้งแต่ 161 ถึง 620 %อากาศตามทฤษฎี ซึ่งในที่นี้ใช้ค่าเฉลี่ยของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ที่ 280 %อากาศตามทฤษฎี ส่วนประกอบของธาตุต่างๆของกากอ้อยมีดังแสดงในบทที่ 3 คุณสมบัติของก๊าซไอเสีย ปกติแล้วก๊าซไอเสียจะออกจากห้องเผาไหม้ที่ประมาณ 300 °C ซึ่งก่อนที่ก๊าซไอเสียนี้จะถูกนำไปอุ่นอากาศที่จะใช้ในการเผาไหม้ หลังจากผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศแล้วก๊าซร้อนจะมีอุณหภูมิประมาณ 200 °C เลือกอุณหภูมิต่ำสุดของก๊าซไอเสียที่สามารถดึงความร้อนมาใช้ได้มากที่สุดที่ 100 °C โดยการใช้ค่าความร้อน 1.17 kJ kg⁻¹ °C⁻¹ ค่าความร้อนมากที่สุดที่ใช้งานได้ของลมร้อนมีค่าเท่ากับ 7442.5 kJ s⁻¹ ศักยภาพของการระเหย ~ 2.452 kg s⁻¹ โดยการใช้ค่าอัตราการระเหยที่ได้นี้ ความชื้นสุดท้ายของกากอ้อยที่อบได้จะมีค่าประมาณ 19 % มาตรฐานเปียก จากการคำนวณนี้คิดว่าสามารถนำความร้อนที่ใช้งานได้ของก๊าซไอเสียมาใช้งานได้เต็มที่ แต่ในทางเป็นจริงแล้วเป็นไปได้ถ้าคิดที่ 76 % ของค่าดังกล่าว ความชื้นกากอ้อยสุดท้ายจะมีค่าที่ 35 % มาตรฐานเปียก ปริมาณกากอ้อยเหลือใช้จะมีเพิ่มมากขึ้นจาก 5 ตัน/ชม. เป็น 7 ตัน/ชม. ที่ความชื้น 50 % มาตรฐานเปียก ซึ่งคิดเป็นปริมาณการประหยัดกากอ้อยได้เพิ่มขึ้น 8 % ของปริมาณการใช้กากอ้อยเดิม ซึ่งเมื่อทำการจำลองแบบที่ความเร็วก๊าซไอเสียร้อนที่ใช้อบที่ 0.5 และ 1.0 ms⁻¹ ซึ่งต้องใช้พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งที่ 16.2 และ 8.1 m² ตามลำดับ ค่าของความหนาของห้องอบแห้งที่ต้องใช้ในการอบแห้งกากอ้อยให้เหลือความชื้นของกากอ้อยที่ต้องการที่คำนวณได้มีค่าประมาณ 4 เซนติเมตร

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

9.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากผลสรุปการศึกษารูปแบบสมการชั้นบางของการอบแห้งกากอ้อยโดยเครื่องอบแห้งแบบเบดนิ่งที่ได้ นำจะสามารถนำไปใช้ในการจำลองแบบสำหรับเครื่องอบแห้งที่มีลักษณะต่อเนื่องแบบไหลในทิศทางเดียวกันและไหลตัดได้ด้วย

2. ผลจากการศึกษาการจำลองแบบสำหรับเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทางจะเห็นได้ว่าความหนาของเครื่องอบที่ต้องการมีค่าน้อยคืออยู่ในช่วง 4 เซนติเมตร สำหรับรูปแบบของเครื่องอบแห้งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง เช่นนี้ที่น่าจะมีความเหมาะสมในการทำงานมากกว่าเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางและไหลในทิศทางเดียวกันคือเครื่องอบแห้งแบบไหลตัด

3. จากผลการสังเกตที่ได้ระหว่างการทดลองของลักษณะการไหลของกากอ้อยจะมีการติดขัดหากมีการไหลผ่านช่องเล็กๆ ดังนั้น รูปแบบของเครื่องอบแห้งแบบไหลตัดที่ควรดำเนินการควรจะทำในลักษณะที่ใช้เครื่องลำเลียงประเภทสายพานที่มีรูปทรงแบบตะแกรงตาถี่ลำเลียงกากอ้อยเข้าเตาเผาอย่างต่อเนื่อง และทำการอบแห้งโดยการเป่าลมร้อนผ่านตะแกรงซึ่งลมร้อนจะแทรกผ่านชั้นกากอ้อย ซึ่งจะเป็นรูปแบบเดียวกับที่เคยประสบความสำเร็จเป็นอย่างมากในการใช้งานสำหรับโรงงานน้ำตาลในจาเมกา โดย Holgate[30]

4. จากที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาทางทฤษฎีหรือการจำลองแบบ สำหรับเครื่องอบแห้งที่มีความสะดวกในการใช้งานอย่างเครื่องอบแห้งแบบไหลตัด ซึ่งควรจะมีการศึกษาถึงขีดจำกัดการใช้งานและลักษณะการอบแห้งในเชิงทฤษฎีด้วยเนื่องจากว่ามันสามารถจะประยุกต์เพื่อการใช้งานกับโรงงานที่มีอยู่แล้วได้อย่างสะดวก

5. เนื่องจากในกองกากอ้อยจะประกอบด้วยขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันมากในเรื่องของรูปร่าง ขนาด และน้ำหนัก ดังนั้นเครื่องอบแห้งที่เป็นแบบ Fluidize-bed Dryer จึงน่าจะไม่มี ความเหมาะสมในการใช้งาน

6. จากการศึกษาเรื่องขนาดของอนุภาคกากอ้อยและปัญหาเรื่องการลำเลียงกากอ้อยที่สังเกตได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่ามีความหลากหลายของช่วงขนาดอนุภาคผสมกันอยู่ในกองกากอ้อยที่ได้จากการผลิตของโรงงานน้ำตาล ซึ่งจะมีขนาดทั้งที่เป็นฝุ่นและเป็นแท่ง ซึ่งส่วนที่เป็นฝุ่นและขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะมีอัตราส่วนโดยมวลเป็นอัตราส่วนที่มากประมาณ 80 % ของมวลกากอ้อยทั้งหมด ซึ่งขนาดอนุภาคขนาดเล็กสามารถจะทำการลำเลียงได้

สะดวกโดยการใช้การพาโดยกระแสของก๊าซไอเสีย(pneumatic conveying) และจากการประมาณปริมาณของก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้จะเห็นได้ว่ามีจำนวนมากพอ และที่ผ่านมายังไม่เคยมีงานวิจัยที่ศึกษาเชิงทฤษฎีของเครื่องอบแห้งแบบ Pneumatic dryer จึงควรทำการศึกษาถึงขีดจำกัดการใช้งานและการวิจัยในเชิงทฤษฎีของเครื่องอบแห้งแบบนี้

7. เนื่องจากปัญหาเรื่องอนุภาคของกากอ้อยเช่นเดียวกัน เครื่องอบแห้งแบบ Pneumatic dryer อาจจะมีปัญหาในเรื่องของการลำเลียงขนาดอนุภาคกากอ้อยที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจมีผลให้ต้องใช้ความเร็วของลมร้อนที่ใช้ต้องมีค่ามาก ซึ่งจะส่งผลให้ต้องใช้ความยาวของห้องอบแห้งสูงขึ้นด้วย ซึ่ง Arrascaeta และ Friedman [34] ได้เสนอรูปแบบที่น่าสนใจอย่างยิ่งไว้ของเครื่องอบแห้งแบบ Fluidised-Pneumatic transport dryer โดยการใช้ก๊าซร้อนจากปล่องไอเสียในการ อบแห้งและแยกกากอ้อย โดยจะมีการป้อนกากอ้อยเข้าสู่ท่อในแนวตั้ง กากอ้อยที่มีขนาดเล็กจะถูกเป่าให้ลอยขึ้นซึ่งจะเป็น Pneumatic dryer และแยกอนุภาคโดยใช้ไซโคลน อนุภาคกากอ้อยที่มีขนาดใหญ่จะตกลงมาตามท่อซึ่งจะเคลื่อนที่สวนกับลมร้อนที่กำลังเคลื่อนที่ขึ้น จึงน่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งในแบบนี้ด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสารอ้างอิง

- 1.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล . อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม . กรุงเทพฯ :สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น),2525.
- 2.Morgan, R.P. and Leerman, L.J. Renewable Resource Utilization. , New York Pergamon Press ., 1981 : 107-160.
- 3.Perry,R.H. Chemical Engineers' Handbook .McGraw-Hill Book Col.,5 th ed,1984.
- 4.Maranhao, L.E.C. Individual Bagasse Drying System. Proc. of the 7 th Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists. 17(3) , 1980 : 2000-2011.
- 5.Roy, P.N. , Yadav, D. and Kachara, N.L. Optimum Design of Evaporation Drying Plant for Bagasse in a Sugar Mill. Proc. of the 7 th Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists. 17(3) , 1980 : 2012-2028.
- 6.สถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย . รายงานการศึกษาเรื่องการใช้และการประหยัดพลังงานในโรงงานน้ำตาล . 2540.
7. Shama, K.N. and Kochhar, R.K. Drying of Bagasse. Proc. of Annual Conference of Sugar Cane Technologists Association of India. 44 , 1980 : G127-G132.
- 8.สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ . โครงการการศึกษาวิจัยผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล . 2540 : 132.
- 9.A.C.Pilgrim and D.R. McGaw.Bagasse drying with flue gas.In B. Napompeth(Ed). Proceeding XXI congress.International society of sugar cane technologist.,March 5-14,Bangkok,Thailand,Kasetsat University press,Bangkok .1992 : 766-777.
- 10.Bose, S.C. , Rohatagi, V.K. and Kumar, G. et al. Continuous Mill Wet Bagasse Drier. Proc. Annual Convention of Sugar Cane Technologists Association of India,48 1984. : 51-63.
- 11.Pilgrim A.C.Bagasse drying for Caribbean cane sugar factories.Doctoral Thesis. University of the the West Indise.Trinidad.1989.
- 12.Marahoo, L.E.C. Bagasse drying . Paper for presentation at the ISSCT combined factory/ energy workshop on efficient production & utilization of steam in sugar factory . 28 November-2 December.1994.Pune.India. 1994. : 1/105-1/117.
- 13.Deerr, N. Cane Sugar. Altrincham. Manchester : Norman Rodger. 1911. : 404-426.
- 14.Meade, G.P. and Chen, J.C.P. Cane Sugar Handbook. 10 th Ed. New York : Wiley. 1977. : 95-96.

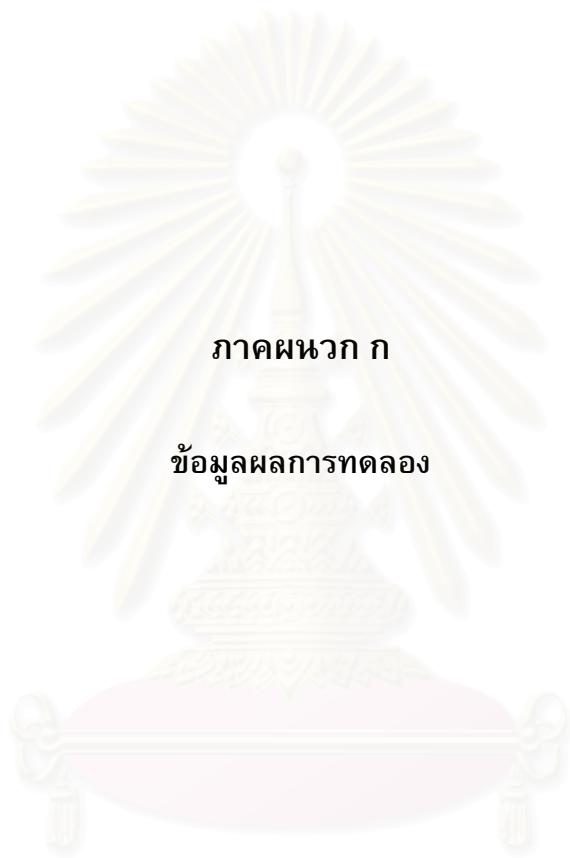
15. Davies, J. Heat Losses Due to Moisture and Excess Air. Internal Sugar Journal. 49
1947. : 100-103.
16. Kelly, F.H.C. The Ultimate Analysis of Bagasse. Queensland Bureau of Sugar Experiment
Station – Technical Communications No. 10. 1937. : 261-278.
17. Chen, C.H. and Tso, H.C. Bagasse drying system for CE 65 t/h boiler. Proceedings XX
Congress. International Society of Sugar Cane Technologists. 1989. : 187-193.
18. Gregory, H.C. Sugar. 39(12) 1944. : 26.
19. Robert, A.P. 1993 ASHRAE HANDBOOK Fundamentals (SI Edition) : 6.1-6.17.
20. เกศสุชา พูลคำ . การกำจัดโลหะหนักโดยการใส่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขาน้อยและ
ผักตบชวา . วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2534.
21. Lamb, B.W. and Bilger, R.W. Combustion of Bagasse : Literature Review . Proc. of
American Society of Sugar Cane Technologists Conference. 1976. : 89-127.
22. Bouvet, P.E. and Suzor, N.L.C. Pelletizing Bagasse for Fuel. Sugar y Azucar. 75(8)
1980. : 22-27.
23. Hugot, E. Handbook of Cane Sugar Engineering. 3rd ed. Amsterdam, The Netherlands :
Elsevier. 1986. : 906-1046.
24. Behne, E.R. The Analysis of Final Bagasse. International Sugar Journal . 39 . 1937.
: 304-306.
25. Hessey, R.W.G. The Combustion Value of Bagasse. Queensland Bureau of Sugar
Experiment Stations – Technical Communications No. 11. 1937. : 279-291.
26. Adams, T.N. , Whitehouse, G.D. and Maple, D. Properties and Operating Experience
with Bagasse as a Boiler Fuel. Proc. of National Waste Processing Conference.
1978. : 101-106.
27. Henry, O. Studies on Bagasse Combustion. Final Year Student Research Project
Report. Department of Chemical Engineering. University of the West Indies.
Trinidad. 1980.
28. Freeland, E.C. Bagasse as a Source of Fuel. International Sugar Journal. 20. 1918.
: 16-18.
29. Kerr, E.W. and Nadler, H.A. Bagasse Drying. International Sugar Journal. 13. 1911.
: 603-608.

30. Holgate, M.W. Apparatus for the Drying of Bagasse. International Sugar Journal. 32. 1930. : 32.
31. Chen, J.C. Dehydration of Bagasse. : Utilization of Waste Heat in Flue Gas. Taiwan Sugar. 7. 1960. : 17-23.
32. Furines, J.H. Pre-Drying Bagasse Using Flue Gases. The Sugar Journal. Aug. 1976. : 39-40.
33. Matinez, D. Bagasse Burning at Raceland. The Sugar Bulletin. 58(ii). 1980. : 16-18.
34. Arrascaeta, A. and Friedman, P. Bagasse Drying : Past, Present and Future. International Sugar Journal. 86(1021). 1984. : 3-6.
35. Arrascaeta, A. and Friedman, P. Bagasse Drying. International Sugar Journal. 89(1060): 1987. : 68-71.
36. Edwards, B.P. Bagasse Drying. Proc. of Australian Society of Sugar Cane Technologists. 1981. : 203-206.
37. Neto, J.C. Experimental Results with a Bagasse Drier. Bol. Tec. Copersucar. 27. July. 1984. : 21-24.
38. Kisakurek, B. Mathematical Models for Drying of Porous Materials. Proc. of the Third International Drying Symposium. Ed. J.C. Ahsworth. Vol. 1. Wolverhampton, England : Drying Research. 1982. : 22-29.
39. Sherwood, T.K. Drying of Solids. Industrial and Engineering Chemistry. 21(1) : 1929. : 12-16.
40. Perry, R.H. and Chilton, C.H. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 5 th ed. New York. McGraw-Hill. 1984. : 20.11-20.12.
41. Page, G. Factors Influencing the Maximum Rate of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers. Master's Thesis. Purdue University. 1949.
42. Overhults, G.D. , White, G.M. , Hamilton, M.E. and Ross, I.J. Drying Soybeans with Heated Air. Trans. of American Society of Agricultural Engineers. 16(1) 1973. : 112-113.
43. Thompson, T.L. , Peart, R.M. and Foster, C.H. Mathematical Simulation of Corn Drying- A New Model. . Trans. of American Society of Agricultural Engineers. 11(4) : 1968. : 582-586.
44. Wang, C.Y. Drying Simulation of Rough Rice. Doctoral Thesis. University of California. Davis. 1978.

- 45.Thromp, L.A. The Standard Heat Balance in the Cane Sugar Factory. International Sugar Journal. 40. 1938. : 175-179.
- 46.Ashworth and Carter. Use of Simulation Techniques to Evaluate Strategies for Improvement of Industrial Multizone Through Circulation Trolley Dryer. International Drying Symposium. 1980. : 508-522.
- 47.Lof, G.O.F. and Hawley, R.W. Unsteady State Heat Transfer Between Air and Loose Solids. Industrial and Engineering Chemistry. 40(6). 1984. : 1061-1072.
- 48.จิระวัฒน์ ชูมาลัยวงศ์ . การจำลองแบบและการทดลองเครื่องอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกแบบไหลในทิศทางเดียวกัน.วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตภาควิชา,วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.2531



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Result of Experiment#1

อุณหภูมิลมร้อน 190.4 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.787 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017432 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 117.7 % dry basis

ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	118.5	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	24.5
30	145.5	44.7	43.3	42.1	41.5	42.1	41.5
60	172.5	58.8	45.6	45.0	44.8	44.8	44.8
90	189.6	102.6	46.9	46.4	46.3	46.2	46.1
120	195.5	147.7	47.4	47.2	47.2	46.8	46.9
150	183.8	165.7	46.5	46.4	46.4	46.6	46.5
180	185.3	176.8	46.4	46.1	45.9	46.2	46.1
210	192.5	189.3	50.3	46.7	46.6	46.2	46.1
240	189.9	190.4	76.8	46.7	46.5	46.5	46.7
270	190.2	193.1	128.9	47.0	46.7	46.9	46.9
300	193.9	194.5	168.3	46.8	46.8	47.0	46.9
330	191.1	193.5	184.3	47.1	47.0	47.0	47.0
360	192.1	195.7	190.5	47.3	47.1	46.9	46.9

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 360 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	0.8
5	1.2
10	1.5
15	5.1
20	45.6
25	106.5
30	117.7
35	122.5
40	117.2

Result of Experiment#2

อุณหภูมิลมร้อน 189 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.790 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017171 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 120.1 % dry basis
 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	120.2	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	24.1
30	144.6	46.4	42.6	41.7	41.0	41.0	40.8
60	169.0	69.4	45.0	44.4	44.2	44.2	44.1
90	187.1	124.6	46.4	46.0	45.9	45.7	45.8
120	195.7	166.2	47.4	47.0	47.0	45.8	45.8
150	184.9	178.3	46.6	46.3	46.4	46.8	46.6
180	183.2	181.3	46.3	45.9	45.9	46.5	46.4
210	190.7	189.3	57.8	46.5	46.4	46.4	46.5
240	187.6	188.8	81.2	46.5	46.4	46.5	46.5
270	188.5	191.3	119.6	46.7	46.5	46.8	46.6
300	192.8	192.5	157.4	46.6	46.4	46.7	46.6
330	189.8	192.0	171.4	46.8	46.6	46.5	46.7
360	193.0	194.6	188.2	46.8	46.6	46.6	46.6

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 360 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	0
5	0.6
10	0.6
15	8.2
20	51.8
25	115.6
30	122.3
35	123.6
40	120.1

Result of Experiment#3

อุณหภูมิลมร้อน 190.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.736 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017975 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 121.1 % dry basis
 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	123.7	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	24.6
30	147.0	45.3	43.2	42.3	42.0	41.9	41.8
60	170.3	58.2	45.5	44.9	45.0	44.9	44.8
90	187.3	112.6	46.9	46.5	46.4	46.4	46.4
120	196.3	158.7	47.8	47.6	47.4	47.1	47.0
150	184.9	170.7	47.4	47.4	47.3	47.3	47.3
180	184.6	177.8	46.8	46.3	46.4	46.5	46.6
210	192.0	187.6	49.5	46.9	46.9	46.8	46.7
240	187.9	188.2	60.4	46.7	46.9	46.9	47.0
270	190.4	192.3	94.7	46.9	47.1	47.0	47.0
300	192.3	192.5	145.7	46.8	47.0	47.0	47.0
330	189.6	193.2	168.2	46.9	47.0	47.1	47.1
360	194.6	195.7	185.3	47.0	46.8	47.0	47.0

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 360 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	1.3
5	1.5
10	2
15	16.9
20	66.7
25	112.4
30	122.3
35	125.4
40	121.3

Result of Experiment#4

อุณหภูมิลมร้อน 203.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.619 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.018859 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 106.6 % dry basis
 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	124.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	24.7
30	140.3	45.1	43.1	42.2	42.1	38.2	35.1
60	155.9	50.9	44.4	43.9	43.8	41.3	40.6
90	166.9	78.9	45.3	44.9	44.8	43.4	43.2
120	176.2	129.4	46.1	45.6	45.5	44.8	44.5
150	183.9	163.9	46.8	46.3	46.3	45.6	45.4
180	191.2	179.1	47.3	46.8	46.9	46.3	46.1
210	197.3	190.2	47.9	47.2	47.3	46.6	46.6
240	202.4	198.3	48.2	47.6	47.8	47.3	47.2
270	202.0	202.6	69.5	47.8	48.0	47.4	47.5
300	202.4	203.4	111.8	47.6	47.9	47.7	47.6
330	203.5	203.5	158.4	47.9	48.0	47.6	47.6
360	203.8	205.2	189.2	48.1	48.1	47.8	47.7
390	203.3	206.1	198.1	48.3	48.3	47.8	47.8
420	203.3	206.5	203.7	48.7	48.4	48.0	47.9
450	202.8	205.2	206.3	73.7	48.3	47.8	47.9
480	203.2	205.2	205.4	117.3	48.4	47.8	47.8

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 480 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	1.1
5	1.1
10	1.3
15	1.4
20	3
25	48.9
30	100.9
35	110.5
40	107.4

Result of Experiment#5

อุณหภูมิลมร้อน 180.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.688 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.019059 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 112.6 % dry basis
 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	110.5	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	26.3
30	126.2	42.3	41.1	39.9	39.6	39.5	39.5
60	141.9	48.3	42.8	42.0	41.9	41.9	41.8
90	153.4	64.7	43.8	43.2	43.1	43.0	43.0
120	162.3	102.9	44.5	44.0	44.0	43.9	43.9
150	172.4	135.3	45.0	45.0	45.1	45.1	45.2
180	178.2	154.3	45.8	45.5	45.6	45.4	45.5
210	182.2	170.1	46.1	45.8	46.0	46.0	45.8
240	181.6	180.0	46.5	45.9	46.1	45.8	45.7
270	180.6	181.7	62.5	45.7	45.8	45.6	45.7
300	178.1	181.3	95.4	45.5	45.5	45.4	45.5
330	182.4	183.3	126.7	45.6	45.5	45.6	45.5
360	181.0	183.3	157.9	45.8	45.6	45.6	45.5

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 360 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	1.7
5	2.1
10	2.7
15	22.4
20	93
25	107.6
30	110.4
35	115.9
40	112.8

Result of Experiment#6

อุณหภูมิลมร้อน 169.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.707 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017942 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 93.7 % dry basis
 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	104.6	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	25.5
30	120.9	41.7	40.8	39.9	39.6	33.2	31.8
60	137.2	53.4	41.7	41.0	41.0	38.4	37.8
90	149.1	95.8	42.6	42.0	42.0	41.5	40.0
120	158.6	127.5	43.5	42.9	42.9	41.6	41.3
150	166.6	153.2	44.0	43.6	43.6	42.5	42.3
180	171.8	170.7	47.2	44.0	44.2	43.4	43.2
210	169.2	170.7	52.4	43.9	44.3	43.7	43.8
240	167.7	169.6	80.3	43.7	44.0	44.0	43.9
270	167.0	169.3	120.5	43.7	44.0	43.8	43.8
300	169.8	171.1	151.1	44.0	44.2	43.6	43.4
330	171.1	171.3	160.0	44.0	44.1	43.9	43.8
360	169.0	171.1	165.9	44.3	44.2	43.9	43.9
390	171.0	172.8	170.5	53.2	44.2	44.0	43.9
420	169.6	172.0	170.8	88.9	44.3	44.1	43.9
450	170.5	172.8	172.0	124.0	44.3	44.0	43.9

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 450 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	1.1
5	1.2
10	1.3
15	1.4
20	2.5
25	28.4
30	84.7
35	94.5
40	97.3

Result of Experiment#7

อุณหภูมิลมร้อน 189.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.804 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.018424 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 125.3 % dry basis
 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	118.1	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	24.9
30	143.6	46.7	42.9	42.2	41.5	41.5	41.5
60	169.1	66.1	45.5	45.0	44.8	44.5	44.4
90	188.6	121.6	47.1	46.8	46.7	46.5	46.6
120	195.0	163.7	47.9	47.7	47.7	47.6	47.5
150	182.8	179.5	47.0	46.9	47.0	47.0	46.9
180	182.9	180.7	46.6	46.4	46.4	46.4	46.5
210	191.8	189.9	47.6	47.2	47.1	46.8	46.5
240	188.6	189.4	67.3	47.1	47.1	47.0	46.8
270	188.6	192.0	108.7	47.4	47.4	46.9	46.9
300	192.9	193.5	154.7	47.3	47.3	46.9	47.0
330	190.2	193.1	168.5	47.2	47.3	47.0	47.1
360	191.5	194.7	182.8	48.6	47.4	47.3	47.3

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 360 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	0.8
5	1.3
10	2.3
15	10.3
20	58.7
25	118.8
30	128.7
35	128.4
40	125.6

Result of Experiment#8

อุณหภูมิลมร้อน 178.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.734 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017186 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 114.8 % dry basis
 อัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น 18.2 kg hr⁻¹
 ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	55.6
5	111.3
10	117.2
15	118.2
20	117.6
25	116.7
30	116.8

Result of Experiment#9

อุณหภูมิลมร้อน 177.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.722 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.016875 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 69.4 % dry basis
 อัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น 14.3 kg hr⁻¹
 ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m.

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	13.7
5	31.2
10	56.9
15	72.3
20	75.1
25	74.1
30	73.2

Result of Experiment#10

อุณหภูมิลมร้อน 180.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.685 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.016186 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 85.8 % dry basis
 อัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น 15.7 kg hr⁻¹
 ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m.

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	30.3
5	66.3
10	86
15	88.3
20	87.5
25	88.1
30	87.1

Result of Experiment#11

อุณหภูมิลมร้อน 182.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.707 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.016603 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 86.6 % dry basis
 อัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น 15.8 kg hr⁻¹
 ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m.

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	27.9
5	64.3
10	86.5
15	89.4
20	88.3
25	88.5
30	88.7

Result of Experiment#12

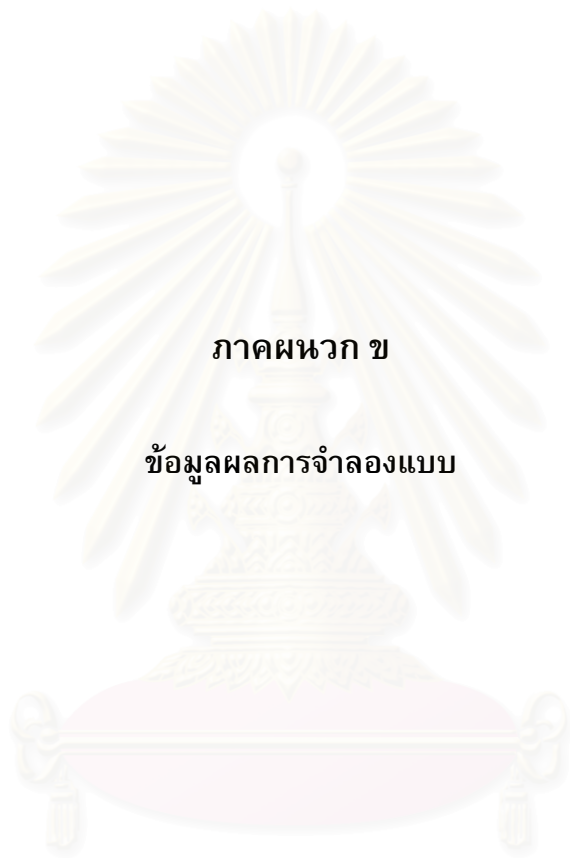
อุณหภูมิลมร้อน 182.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.689 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017905 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 84.8 % dry basis
 อัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น 15.6 kg hr⁻¹
 ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m.

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	28.6
5	63.9
10	83.9
15	87.4
20	87.3
25	87.4
30	87.6

Result of Experiment#13

อุณหภูมิลมร้อน 176.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.641 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017805 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 88.0 % dry basis
 อัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น 15.9 kg hr⁻¹
 ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m.

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	36.6
5	72.5
10	89.2
15	91.3
20	90.1
25	89.8
30	89.6



ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการจำลองแบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Simulation Result of Experiment#1

อุณหภูมิลมร้อน 190.4 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.787 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017432 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 117.7 % dry basis

ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	118.5	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	24.5
30	145.5	41.4	41.0	40.7	40.3	40.2	40.2
60	172.5	73.4	43.4	43.1	42.8	45.5	45.5
90	189.6	117.5	44.5	47.1	46.7	46.5	46.5
120	195.5	152.6	45.5	45.2	47.8	47.6	47.6
150	183.8	163.4	44.7	44.5	44.3	44.2	44.2
180	185.3	175.7	45.2	45.0	44.7	44.6	44.6
210	192.5	188.1	66.5	45.6	45.3	45.2	45.2
240	189.9	188.0	100.3	45.8	45.6	45.4	45.4
270	190.2	189.3	133.7	46.8	46.5	46.4	46.4
300	193.9	193.4	162.5	46.5	46.2	46.1	46.1
330	191.1	190.8	176.3	46.8	46.5	46.4	46.4
360	192.1	191.8	185.2	55.0	45.1	45.0	45.0

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 360 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	0
5	0
10	0.4
15	4.4
20	34.3
25	108.2
30	117.7
35	117.7
40	117.7

Simulation Result of Experiment#2

อุณหภูมิลมร้อน 189 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.790 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017171 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 120.1 % dry basis
 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	120.2	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	24.1
30	144.6	40.0	42.8	42.4	42.1	41.9	41.9
60	169.0	69.6	43.1	42.7	42.4	45.3	45.3
90	187.1	113.8	46.6	46.3	45.9	45.7	45.7
120	195.7	151.1	45.2	44.9	47.5	47.3	47.3
150	184.9	163.5	44.6	44.4	44.2	44.1	44.1
180	183.2	173.3	46.4	46.2	45.9	45.8	45.8
210	190.7	186.1	60.3	46.2	45.9	45.7	45.7
240	187.6	185.7	93.3	45.5	45.2	45.1	45.1
270	188.5	187.6	127.4	46.0	45.8	45.6	45.6
300	192.8	192.2	157.9	45.4	45.1	45.0	45.0
330	189.8	189.5	173.0	45.1	44.8	44.7	44.7
360	193.0	192.7	185.1	47.0	46.7	46.6	46.6

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 360 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	0
5	0
10	0.4
15	5.1
20	40
25	117.8
30	120.1
35	120.1
40	120.1

Simulation Result of Experiment#3

อุณหภูมิลมร้อน 190.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.736 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017975 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 121.1 % dry basis
 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	123.7	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	24.6
30	147.0	43.2	42.8	42.5	42.1	42.0	42.0
60	170.3	63.4	43.4	43.1	42.8	42.6	42.6
90	187.3	106.5	44.2	47.0	46.7	46.5	46.5
120	196.3	145.2	46.6	46.3	45.9	45.8	45.8
150	184.9	159.5	43.9	46.9	46.7	46.5	46.5
180	184.6	172.5	44.3	44.1	43.9	46.9	46.9
210	192.0	186.4	45.3	45.1	44.8	44.6	44.6
240	187.9	185.5	71.8	45.0	44.8	44.7	44.7
270	190.4	189.2	107.9	47.4	47.1	46.9	46.9
300	192.3	191.7	141.3	46.6	46.3	46.2	46.2
330	189.6	189.2	162.8	47.3	47.0	46.9	46.9
360	194.6	194.3	181.4	44.7	47.5	47.4	47.4

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 360 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	0
5	0
10	0.6
15	8.9
20	62.2
25	121.1
30	121.1
35	121.1
40	121.1

Simulation Result of Experiment#4

อุณหภูมิลมร้อน 203.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.619 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.018859 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 106.6 % dry basis

ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	124.7	26.7	26.7	26.7	26.7	24.7	24.7
30	140.3	42.6	42.3	42.0	41.7	41.6	41.6
60	155.9	46.5	42.4	42.1	41.9	41.7	41.7
90	166.9	80.9	42.5	45.6	45.3	45.1	45.1
120	176.2	116.5	46.5	46.2	45.9	45.7	45.7
150	183.9	147.9	44.3	44.1	47.1	46.9	46.9
180	191.2	172.2	46.4	46.1	45.8	45.7	45.7
210	197.3	188.4	45.8	45.5	45.3	45.2	45.2
240	202.4	198.4	48.9	48.6	48.3	48.1	48.1
270	202.0	200.2	83.1	46.7	46.5	46.3	46.3
300	202.4	201.5	120.6	48.3	48.1	47.9	47.9
330	203.5	202.9	154.8	47.1	46.8	46.7	46.7
360	203.8	203.4	178.8	45.7	48.6	48.5	48.5
390	203.3	202.9	191.7	47.1	46.8	46.7	46.7
420	203.3	202.9	198.0	52.3	48.4	48.2	48.2
450	202.8	202.4	200.1	87.1	46.5	46.4	46.4
480	203.2	202.8	201.5	124.6	48.1	48.0	48.0

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 480 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	0
5	0
10	0
15	0.4
20	6
25	48.9
30	106.6
35	106.6
40	106.6

Simulation Result of Experiment#5

อุณหภูมิลมร้อน 180.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.688 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.019059 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 112.6 % dry basis

ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	110.5	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	26.3
30	126.2	40.0	40.0	40.0	40.0	41.3	41.3
60	141.9	42.7	42.4	42.1	41.8	41.7	41.7
90	153.4	75.1	42.9	42.6	42.4	42.2	42.2
120	162.3	107.7	43.8	43.5	43.2	43.1	43.1
150	172.4	138.5	43.5	43.2	46.1	45.9	45.9
180	178.2	159.9	45.6	45.4	45.1	45.0	45.0
210	182.2	173.3	44.8	44.5	44.3	44.1	44.1
240	181.6	174.9	41.2	41.1	40.9	40.8	40.8
270	180.6	178.5	66.7	44.6	44.4	44.3	44.3
300	178.1	177.1	97.3	44.0	43.8	43.7	43.7
330	182.4	181.8	130.1	46.1	45.8	45.7	45.7
360	181.0	180.7	152.0	46.3	46.0	45.9	45.9

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 360 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	0
5	0.1
10	1.8
15	21.2
20	93.2
25	112.6
30	112.6
35	112.6
40	112.6

Simulation Result of Experiment#6

อุณหภูมิลมร้อน 169.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.707 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017942 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 93.7 % dry basis
 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	104.6	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	25.5
30	120.9	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
60	137.2	58.5	40.0	42.1	41.8	41.6	41.6
90	149.1	90.9	42.6	42.4	42.1	42.0	42.0
120	158.6	120.9	43.4	43.1	42.9	42.8	42.8
150	166.6	144.9	44.8	44.5	44.3	44.1	44.1
180	171.8	166.4	44.2	46.2	45.9	45.8	45.8
210	169.2	164.2	59.3	44.9	44.7	44.6	44.6
240	167.7	165.3	87.8	45.4	45.1	45.0	45.0
270	167.0	165.9	115.0	43.6	43.4	43.3	43.3
300	169.8	169.1	139.1	43.5	45.6	45.5	45.5
330	171.1	170.7	154.9	45.5	45.2	45.1	45.1
360	169.0	168.7	161.1	51.6	43.4	43.3	43.3
390	171.0	170.8	167.0	82.1	45.5	45.4	45.4
420	169.6	169.4	167.5	110.2	44.0	43.9	43.9
450	170.5	170.3	169.3	134.8	45.6	45.5	45.5

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 450 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	0
5	0
10	0.1
15	0.4
20	3.7
25	23.8
30	77.5
35	93.7
40	93.7

Simulation Result of Experiment#7

อุณหภูมิลมร้อน 189.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.804 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.018424 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 125.3 % dry basis
 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิลมร้อน ระยะห้องอบ-เวลา

Time(s)	ตำแหน่งวัด						
	Tin	x5	x15	x25	x35	x40 db	x40 wb
0	118.1	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	24.9
30	143.6	41.1	40.7	40.4	40.1	40.0	40.0
60	169.1	67.1	43.8	43.5	43.1	43.0	43.0
90	188.6	111.9	47.3	46.9	46.5	46.4	46.4
120	195.0	148.0	47.2	46.8	46.5	46.4	46.4
150	182.8	159.9	45.2	44.9	44.7	44.6	44.6
180	182.9	171.9	46.9	46.6	46.3	46.2	46.2
210	191.8	186.6	53.5	46.4	46.1	46.0	46.0
240	188.6	186.4	86.0	45.2	45.0	44.8	44.8
270	188.6	187.6	120.2	44.8	44.5	44.4	44.4
300	192.9	192.3	152.4	46.4	46.1	45.9	45.9
330	190.2	189.9	170.0	45.5	45.2	45.1	45.1
360	191.5	191.2	181.9	45.9	45.6	45.5	45.5

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 360 s

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	0
5	0
10	0.5
15	6.7
20	49.3
25	125.3
30	125.3
35	125.3
40	125.3

Simulation Result of Experiment#8

อุณหภูมิลมร้อน	178.0 °C
ความเร็วลมร้อน	0.734 ms ⁻¹
ความชื้นลมร้อน	0.017186 kg water kg dry air ⁻¹
ความชื้นกากอ้อย	114.8 % dry basis
อัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น	18.2 kg hr ⁻¹

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	50.9
5	110.4
10	114.8
15	114.8
20	114.8
25	114.8
30	114.8

Simulation Result of Experiment#9

อุณหภูมิลมร้อน	177.0 °C
ความเร็วลมร้อน	0.722 ms ⁻¹
ความชื้นลมร้อน	0.016875 kg water kg dry air ⁻¹
ความชื้นกากอ้อย	69.4 % dry basis
อัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น	14.3 kg hr ⁻¹

ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m.

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	9.4
5	28.5
10	56.3
15	69.4
20	69.4
25	69.4
30	69.4

Simulation Result of Experiment#10

อุณหภูมิลมร้อน 180.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.685 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.016186 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 85.8 % dry basis
 อัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น 15.7 kg hr⁻¹
 ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m.

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	25
5	64.1
10	85.8
15	85.8
20	85.8
25	85.8
30	85.8

Simulation Result of Experiment#11

อุณหภูมิลมร้อน 182.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.707 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.016603 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 86.6 % dry basis
 อัตราการไหลของกากอ้อยขึ้น 15.8 kg hr⁻¹
 ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m.

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	23.4
5	62.1
10	86.6
15	86.6
20	86.6
25	86.6
30	86.6

Simulation Result of Experiment#12

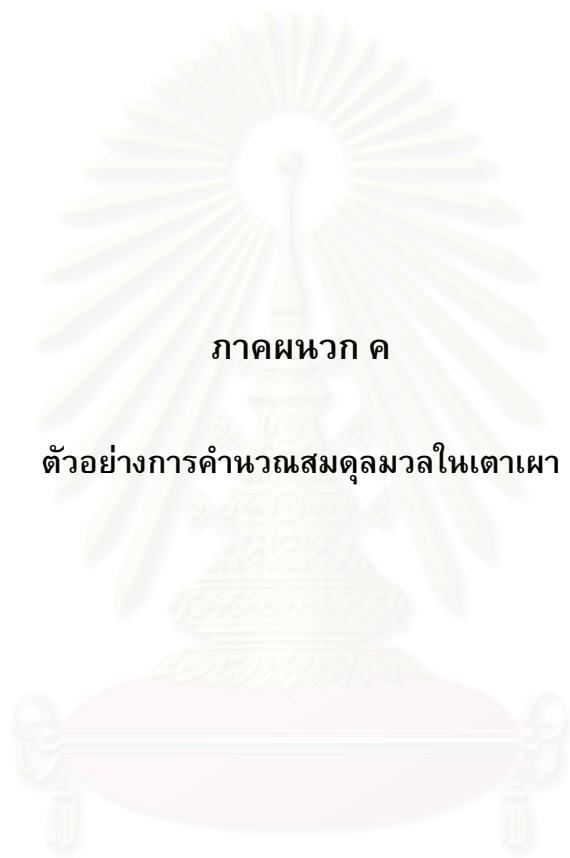
อุณหภูมิลมร้อน 182.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.689 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017905 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 84.8 % dry basis
 อัตราการไหลของกากอ้อยชื้น 15.6 kg hr⁻¹
 ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m.

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	23.2
5	61.1
10	84.8
15	84.8
20	84.8
25	84.8
30	84.8

Simulation Result of Experiment#13

อุณหภูมิลมร้อน 176.0 °C
 ความเร็วลมร้อน 0.641 ms⁻¹
 ความชื้นลมร้อน 0.017805 kg water kg dry air⁻¹
 ความชื้นกากอ้อย 88.0 % dry basis
 อัตราการไหลของกากอ้อยชื้น 15.9 kg hr⁻¹
 ผลการกระจายความชื้นของกากอ้อยระยะห้องอบที่เวลา 15 m.

X (cm)	Bagassa moisture,%dry
0	32.3
5	75.9
10	88
15	88
20	88
25	88
30	88



ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณสมดุลงบในเตาเผา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลในเตาเผา

สำหรับการเผาไหม้กากอ้อยที่ความชื้น 50 % มาตรฐานเปียก, 280 % อากาศตามทฤษฎี

มาตรฐาน : 1 กก.กากอ้อยชื้น
ประกอบด้วย : 50 % ความชื้น
50 % ไฟเบอร์

ส่วนประกอบ

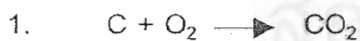
	ไฟเบอร์มาตรฐานแห้ง		มาตรฐานเปียก
C	47.0	C	23.5
H	6.5	H	3.25
O	44.0	O	22.0
Ash	2.5	Ash	1.25
		H ₂ O	50.0

ส่วนประกอบของอากาศแห้ง

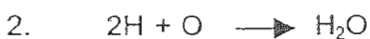
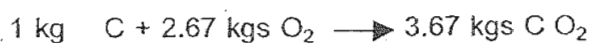
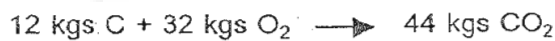
O₂ 23.15
N₂ 76.85

กำหนดความชื้น 0.016 kg H₂O kg dry air⁻¹

สารตั้งต้นของการเผาไหม้



โดยน้ำหนัก





การเผาไหม้ของกากอ้อยแห้ง(กับอากาศแห้ง)

ออกซิเจน

สำหรับ C	0.47×2.67	=	1.25 kgs
สำหรับ H	0.065×8	=	0.52 kgs
รวม		=	1.77 kgs
กากอ้อยมี O อยู่		=	0.44 kgs
ดังนั้นต้องใช้ O จากอากาศ		=	1.33 kgs

ดังนั้นจะมีไนโตรเจนเข้ามากับอากาศ

=	$1.33 \times (76.85/23.15)$	=	4.42 kgs
นน.รวมของอากาศแห้ง	$(1.33+4.42)$	=	5.75 kgs
ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้น	0.065×9	=	0.585 kgs

การเผาไหม้ของกากอ้อยชื้นกับอากาศส่วนเกิน

ความชื้นกากอ้อย	ω	=	0.50
อัตราส่วนของอากาศที่ใช้	m	=	2.80
นน.ของอากาศแห้งต่อกก.ของกากอ้อย(WA)			

$$\begin{aligned} WA &= 5.75 (1-\omega)m \\ &= 5.75(1-0.5)2.8 \\ &= 8.05 \text{ kgs} \end{aligned}$$

ดังนั้นในอากาศ O₂ = $0.2315 \times 8.05 = 1.864 \text{ kgs}$

N₂ = $0.7685 \times 8.05 = 6.186 \text{ kgs}$

H₂O ที่เข้ามากับอากาศ = 0.1288 kgs

รวมอากาศเข้าทั้งหมด. $(8.05 + 0.1288) = 8.1788 \text{ kgs}$

นน.ของก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้(WG)

$$WG = 5.75(1-\omega)m + 0.1288 + 0.9875$$

เนื่องจาก ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ประกอบด้วย

- 1.อากาศสำหรับการเผาไหม้
- 2.น้ำที่เข้ามากับอากาศ
- 3.น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้และกลายเป็นก๊าซ

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{WG} &= 5.75 \times 0.5 \times 2.8 + 0.1288 + 0.9875 \\ &= 9.166 \text{ kgs} \end{aligned}$$

ส่วนประกอบของก๊าซไอเสีย

ไนโตรเจน

$$\text{N}_2 = 6.186 \text{ kgs}$$

ออกซิเจน

$$\begin{aligned} \text{O}_2 &= 1.33(1-\omega)(m-1) \\ &= 1.33 \times 0.5 \times 1.8 \\ &= 1.197 \text{ kgs} \end{aligned}$$

คาร์บอนไดออกไซด์

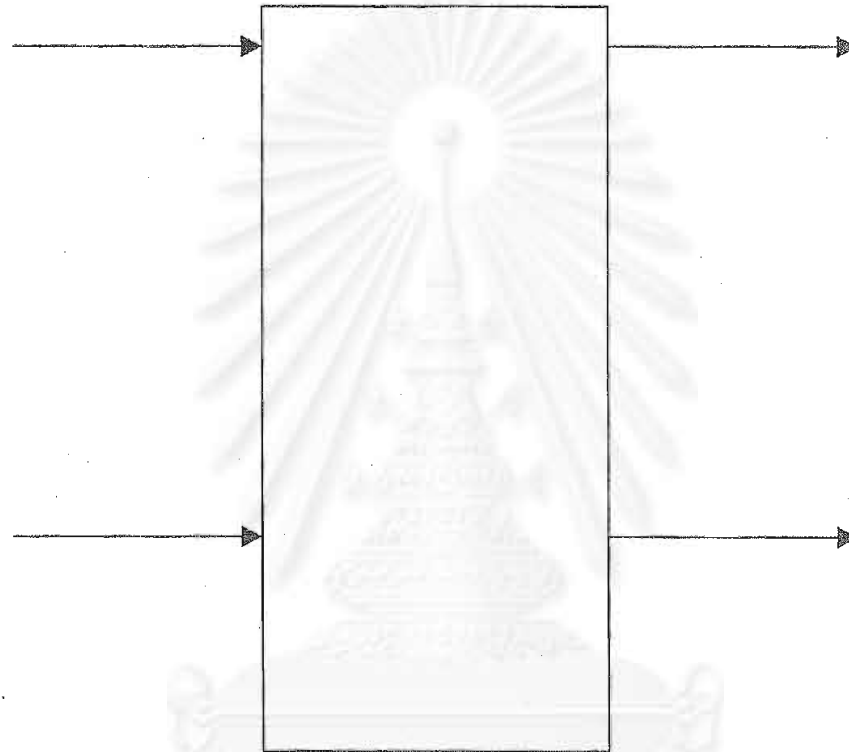
$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 0.47 \times 3.67(1-\omega) \\ &= 0.47 \times 3.67 \times 0.5 \\ &= 0.8625 \text{ kgs} \end{aligned}$$

น้ำ

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O} &= 0.585(1-\omega) + \omega + 0.1288 \\ &= 0.585 \times 0.5 + 0.5 + 0.1288 \\ &= 0.9213 \text{ kgs} \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Bagasse 1 kg
 50 % Wet Basis
 C 0.235 kg
 H 0.0325 kg
 O 0.22 kg
 Ash 0.0125 kg
 H₂O 0.5 kg



Ash 0.0125 kg

Air 8.1788 kg
 O 1.863 kg
 N 6.186 kg
 H₂O 0.129 kg

Flue Gas 9.166 kg
 O 1.197 kg
 N 6.168 kg
 CO₂ 0.8625 kg
 H₂O 0.9213 kg

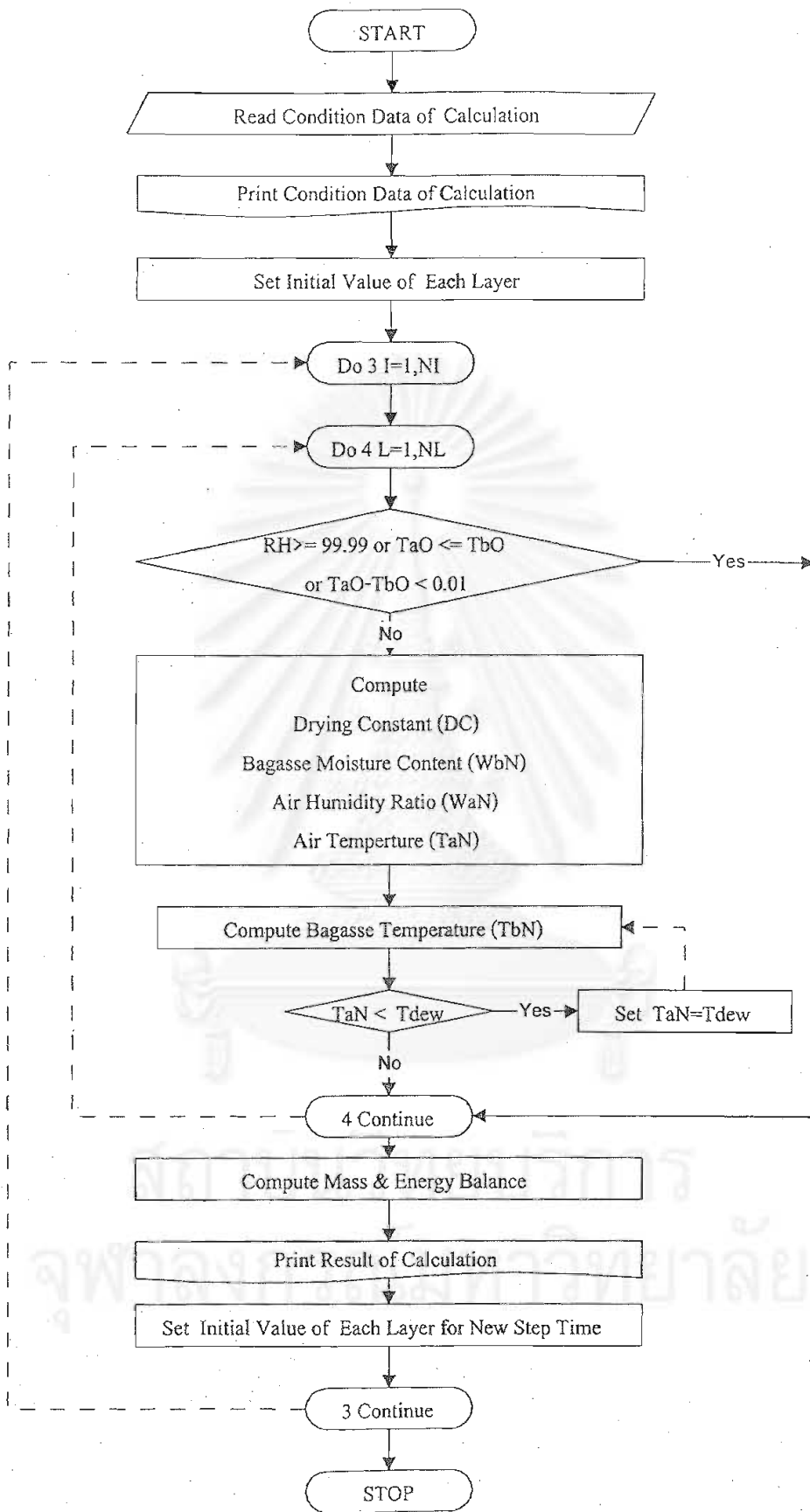
รูปที่ ค.1 ภาพแสดงการทำสมดุลมวลของเตาเผาสำหรับกากอ้อยชื้น 50 % มาตรฐานเปียก, 280 % อากาศตามทฤษฎี



ภาคผนวก ง

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง

สถาบันวิทยบริการ
ภาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ง.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

```

C *****
C **          SIMULATION PROGRAM          **
C **          COUNTER FLOW BAGASSE DRYER  **
C **          BY                          **
C ** MR.THEERAYUT LEEVIJIT : CODE.4070306721 **
C **          CHULALONGKORN UNIVERSITY    **
C *****

```

```

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

```

```

COMMON /LEE1/Gb1,Ga1

```

```

COMMON /LEE2/hfSa2,Gb2,Cb2,Cw2,Ga2,hfg2,Cv2

```

```

COMMON /LEE3/hfSa3,Ga3,Ca3,Cv3

```

```

DIMENSION TaO(500),TbO(500),WaO(500),WbO(500)

```

```

DIMENSION TaN(500),TbN(500),WaN(500),WbN(500)

```

```

OPEN(UNIT=10,FILE='LEE2CF2.OUT',STATUS='OLD')

```

```

CALL CLSSCR

```

```

hfg=2501.

```

```

Ca=1.005

```

```

Cv=1.805

```

```

Cb=1.680

```

```

Cw=4.186

```

```

Rb=65.2

```

```

C Size of Bagasse Particle

```

```

Ab1=0.005101

```

```

Ab2=0.003600

```

```

Ab3=0.002841

```

```

Ab4=0.001486

```

```

C Mass Fraction of Bagasse Particle

```

```

F1=0.0179

```

```

F2=0.0562

```

```

F3=0.1974

```

```

F4=0.7285

```

```

CALL CLSSCR

```

```

WRITE(*,*)' Number of layers = ?'

```

```

READ(*,*)NL

```

```

WRITE(*,*)' Initial of layer to printed = ?'

```

```

READ(*,*)ILTP

```

```

WRITE(*,*)' Interval of layers to printed = ?'

```

```

READ(*,*)NLTP

```

```

WRITE(*,*)' Number of step time = ?'

```


READ(*,*)NI

WRITE(*,*) 'Initial of step time to printed = ?'

READ(*,*)IPRINT

WRITE(*,*) 'Interval of step time to printed = ?'

READ(*,*)JSTP

WRITE(*,*) 'Input moisture content of bagasse = ? (%dry)'

READ(*,*)WbIN

38 WRITE(*,*) 'Input temperature of bagasse = ? (C)'

READ(*,*) TbIN

36 WRITE(*,*) 'Input temperature of hot air = ? (C)'

READ(*,*) TaIN

C.<IF A6>

IF(TaIN.LE.TbIN) THEN

WRITE(*,*)

WRITE(*,*) 'Mistake input temperature condition. Try again.'

WRITE(*,*)

GO TO 38

END IF

C.<END IF A6>

WRITE(*,*) 'Input humidity of hot air = ? (kg/kg dry air)'

READ(*,*) WaIN

RH=RHAIR(TaIN,WaIN)

C.<IF A6>

IF(RH.GE.100.) THEN

WRITE(*,*)

WRITE(*,*) 'Hot air condition missing RH>=100. Try again.'

WRITE(*,*)

GO TO 36

END IF

C.<END IF A6>

WRITE(*,*) 'Velocity of hot air = ? (m/s)'

READ(*,*) VaIN

WRITE(*,*) 'Mass flowrate of moist. bagasse = ? (kg/hr)'

READ(*,*) Fb

WRITE(*,*) 'Thickness of thin layer (DX) = ? (m)'

READ(*,*)DX

WRITE(*,*) 'Dryer width = ? (m)'

READ(*,*)DD

WRITE(*,*) 'Cont. Factor = ?'

```

READ(*,*)C
DA=DD**2.
ROIN=ROAIR(TaIN,WaIN)
Ga=ROIN*VaIN/(1.+WaIN)
Fa=ROIN*VaIN*DA*3600.
WRITE(10,*) ' COMPUTED BY PROGRAM LEECF2.FOR'
WRITE(10,*) ' *****'
WRITE(10,*) ' * DATA FOR SIMULATION IN THIS PROGRAM *'
WRITE(10,*) ' *****'
WRITE(10,100) WbIN
100 FORMAT(3X,'Input moisture content of bagasse',4X,F10.3,'%dry')
WRITE(10,101)TbIN
101 FORMAT(3X,'Input temperature of bagasse',4x,F10.3,' C')
WRITE(10,102) TaIN
102 FORMAT(3X,'Input temperature of hot air',4X,F10.3,' C')
WRITE(10,103) WaIN
103 FORMAT(3X,'Input humidity of hot air',4X,F10.7,'kg/kg dry')
WRITE(10,104) Fb
104 FORMAT(3X,'Mass flowrate of moist. bagasse',4X,F10.4,'kg/hr')
WRITE(10,105) Fa
105 FORMAT(3X,'Mass flowrate of hot air',4X,F10.4,' kg/hr')
WRITE(10,106) DD
106 FORMAT(3X,'Dryer width',4X,F10.7,' m')
WRITE(10,107) DX
107 FORMAT(3X,'Thickness of thin layer (DX) =' ,E10.3,' m')
NLL=NL-1
C   Convers Wb Unit from (%dry) to (kg/kg dry)
WbIN=WbIN/100.
Gb=Fb/(3600.*DA*(WbIN+1.))
Vb=Gb/Rb
DT=DX/Vb
WRITE(10,120)DT
120 FORMAT(3X,'Step time = ',F10.3,' sec.')
WRITE(10,110)VaIN
110 FORMAT(3X,'VaIN=' ,E14.7,'m/s')
WRITE(10,*)

```

C -----
C INITIAL VALUE OF EACH LAYER
C -----

TaO(1)=TaIN
WaO(1)=WaIN
TbO(NL)=TbIN
WbO(NL)=WbIN



C.<IF A2>

IF(NL.GT.1) THEN
DO 1 L=2,NL
TaO(L)=TbIN
WaO(L)=WaIN
1 CONTINUE
DO 2 L=1,NLL
TbO(L)=TbIN
WbO(L)=WbIN
2 CONTINUE
END IF

C.<END IF A2>

TMI=0.
TEI=0.
TMAOUT=0.
TEAOUT=0.
TMBOUT=0.
TEBOUT=0.
DO 11 L=2,NL
TMI=TMI+Ga*(1.+WaO(L))*DT*DA
TEI=TEI+Ga*(Ca*TaO(L)+(hfg+Cv*TaO(L))*WaO(L))*DT*DA
11 CONTINUE
DO 12 L=1,NLL
TMI=TMI+Gb*(1.+WbO(L))*DT*DA
TEI=TEI+Gb*(Cb+Cw*WbO(L))*TbO(L)*DT*DA
12 CONTINUE
GTMI=TMI
GTEI=TEI

C *****MAIN PROGRAM START*****

DO 3 I=1,NI
DO 4 L=1,NL

C IN CASE OF HAVE NO HEAT & MASS TRANSFER

RH=RHAIR(TaO(L),WaO(L))

IF(RH.GE.99.99) THEN

TaN(L)=TaO(L)

TbN(L)=TbO(L)

WaN(L)=WaO(L)

WbN(L)=WbO(L)

GO TO 4

END IF

Diff=(TaO(L)-TbO(L))**2.

IF((TaO(L).LE.TbO(L)).OR.(Diff.LT.0.01)) THEN

TaN(L)=TaO(L)

TbN(L)=TbO(L)

WaN(L)=WaO(L)

WbN(L)=WbO(L)

GO TO 4

END IF

RO=ROAIR(TaO(L),WaO(L))

Va=Ga*(1.+WaO(L))/RO

C COMPUTE DRYING CONSTANT

C For Bagasse Particle Size No.1

A=0.0019*EXP(0.0073*TaO(L))+0.0292*EXP(-0.89*Ab1)+0.00078*Va

B=0.00057*WaO(L)**(-0.57)-0.00088*Va*EXP(-0.895)-0.03135

DC1=A+B

C For Bagasse Particle Size No.2

A=0.0019*EXP(0.0073*TaO(L))+0.0292*EXP(-0.89*Ab2)+0.00078*Va

B=0.00057*WaO(L)**(-0.57)-0.00088*Va*EXP(-0.895)-0.03135

DC2=A+B

C For Bagasse Particle Size No.3

A=0.0019*EXP(0.0073*TaO(L))+0.0292*EXP(-0.89*Ab3)+0.00078*Va

B=0.00057*WaO(L)**(-0.57)-0.00088*Va*EXP(-0.895)-0.03135

DC3=A+B

C For Bagasse Particle Size No.4

A=0.0019*EXP(0.0073*TaO(L))+0.0292*EXP(-0.89*Ab4)+0.00078*Va

B=0.00057*WaO(L)**(-0.57)-0.00088*Va*EXP(-0.895)-0.03135

DC4=A+B

C Total Drying Constant

DC=F1*DC1+F2*DC2+F3*DC3+F4*DC4

C Compute WbN(L),WaN(L) by Euler's method.

RH=RHAIR(TaO(L),WaO(L))

CALL EQUOMOI(TaO(L),RH,EM)

IF(EM.LE.0.0) THEN

EM=0.0

END IF

DW1=-0.810569*DT*DC*(WbO(L)-EM)*EXP(-DC*DT)

DW2=-0.189431*DT*C*DC*(WbO(L)-EM)*EXP(-C*DC*DT)

DW=DW1+DW2

WbN(L)=WbO(L)+DW

WaN(L)=WaO(L)-Gb*DW/Ga

C Compute TaN(L),TbN(L)

Ff=Gb/Ga

G=Ga*(1.+WaO(L))

C Heat Transfer Coefficient

C For Bagasse Particle Size No.1

hf1=6.50951D-04*(G/Ab1)**0.7

C For Bagasse Particle Size No.1

hf2=6.50951D-04*(G/Ab2)**0.7

C For Bagasse Particle Size No.1

hf3=6.50951D-04*(G/Ab3)**0.7

C For Bagasse Particle Size No.1

hf4=6.50951D-04*(G/Ab4)**0.7

C Total Heat Transfer Coefficient

hf=F1*hf1+F2*hf2+F3*hf3+F4*hf4

Df=hf*DX/Ga

hi=Ca*TaO(L)+WaO(L)*(Cv*TaO(L)+hfg)

TaN(L)=(hi-Df*(TaO(L)-TbO(L))-WaN(L)*hfg)/(Ca+WaN(L)*Cv)

203 ho=Ca*TaN(L)+WaN(L)*(Cv*TaN(L)+hfg)

TbN(L)=(hi-ho+Ff*(Cb+WbO(L)*Cw)*TbO(L))/(Ff*(Cb+WbN(L)*Cw))

C CHECK Dew-point temperature

DEW=TDEW(WaN(L))

IF(TaN(L).LT.DEW) THEN

TaN(L)=DEW

GO TO 203

END IF

4 CONTINUE

C ++++++

C MASS AND ENERGY BALANCE

C ++++++

GTMI=GTMI+Ga*(1.+WaO(1))*DT*DA

```

GTMI=GTMI+Gb*(1.+WbO(NL))*DT*DA
GTEI=GTEI+Ga*(Ca*TaO(1)+(hfg+Cv*TaO(1))*WaO(1))*DT*DA
GTEI=GTEI+Gb*(Cb+Cw*WbO(NL))*TbO(NL)*DT*DA
TMAOUT=TMAOUT+Ga*(1.+WaN(NL))*DT*DA
TMBOUT=TMBOUT+Gb*(1.+WbN(1))*DT*DA
TEAOUT=TEAOUT+Ga*(Ca*TaN(NL)+(hfg+Cv*TaO(NL))*WaN(NL))*DT*DA
TEBOUT=TEBOUT+Gb*(Cb+Cw*WbN(1))*TbN(1)*DT*DA

```

```
RMB=0.
```

```
REB=0.
```

```
DO 9 L=1,NLL
```

```
RMB=RMB+Ga*(1.+WaN(L))*DT*DA
```

```
REB=REB+Ga*(Ca*TaO(L)+(hfg+Cv*TaO(L))*WaN(L))*DT*DA
```

```
9 CONTINUE
```

```
DO 10 L=2,NL
```

```
RMB=RMB+Gb*(1.+WbN(L))*DT*DA
```

```
REB=REB+Gb*(Cb+Cw*WbN(L))*TbN(L)*DT*DA
```

```
10 CONTINUE
```

```
GTMO=RMB+TMAOUT+TMBOUT
```

```
GTEO=REB+TEAOUT+TEBOUT
```

```
C
```

```
-----  

ERROR OF MASS & ENERGY BALANCE
```

```
C
```

```
-----  

ERM=(GTMO-GTMI)*100./GTMI
```

```
ERE=(GTEO-GTEI)*100./GTEI
```

```
C
```

```
+++++
```

```
C
```

```
STEP TIME OF PRINTING
```

```
C
```

```
+++++
```

```
C.<IF 27>
```

```
IF(I.EQ.IPRINT) THEN
```

```
TIME=DT*(I)
```

```
WRITE(10,111),TIME
```

```
111 FORMAT(3X,'Step time =',I6,'Time =',F10.2,'Seconds')
```

```
WRITE(10,112)
```

```
112 FORMAT(1X,'Layer',3X,'X(m)',6X,'Wb(%dry)',6X,'Tb(C)',4X,
```

```
* 'Wa(kg/kg dry)',2X,'RHa(%)',6X,'Ta(C)')
```

```
RH=RHAIR(TaO(1),WaO(1))
```

```
WRITE(10,122)WaO(1),RH,TaO(1)
```

```
122 FORMAT(' Input hot air condition',13X,F10.4,2X,F10.3,2X,F10.3)
```

```
ILTP=NLTP
```

DO 17 L=1,NL,1

C<IF *2>

IF((L.EQ.1).OR.(L.EQ.ILTP)) THEN

X=DX*(L)

RH=RHAIR(TaN(L),WaN(L))

WbN(L)=WbN(L)*100.

WRITE(10,113)L,X,WbN(L),TbN(L),WaN(L),RH,TaN(L)

113 FORMAT(14,F10.4,2X,F10.1,2X,F10.1,2X,F10.5,2X,F10.1,2X,F10.1)

WbN(L)=WbN(L)/100.

C<IF*1>

IF(L.GT.1) THEN

ILTP=ILTP+NLTP

END IF

C<END IF *1>

END IF

C<END IF *2>

17 CONTINUE

WbO(NL)=WbO(NL)*100.

WRITE(10,123)WbO(NL),TbO(NL)

123 FORMAT(16X,F10.3,2X,F10.3,5X,' Input bagasse condition')

WbO(NL)=WbO(NL)/100.

WRITE(10,*)

C.<IF 26>

C IF(I.GT.1) THEN

WRITE(10,132)Va

132 FORMAT('Va OUT = ',F10.4,'m/s')

WRITE(10,114)GTMI

114 FORMAT('GRAND TOTAL INPUT MASS =',E10.3,'kgs')

WRITE(10,115)GTMO

115 FORMAT('GRAND TOTAL OUTPUT MASS =',E10.3,'kgs')

WRITE(10,116)ERM

116 FORMAT('PERCENT ERROR OF MASS BALANCE =',F6.2,'%')

WRITE(10,*)

WRITE(10,117)GTEI

117 FORMAT('GRAND TOTAL INPUT ENERGY =',E10.3,'kJ')

WRITE(10,118)GTEO

118 FORMAT('GRAND TOTAL OUTPUT ENERGY =',E10.3,'kJ')

WRITE(10,119)ERE

119 FORMAT('PERCENT ERROR OF ENERGY BALANCE =',F6.2,'%')

```

WRITE(10,*)
WRITE(10,*)
C   END IF
C.<END IF 26>
    IPRINT=IPRINT+ISTP
    END IF
C.<END IF 27>
C   ++++++
C   SET VARIABLE FOR NEW STEP TIME
C   ++++++
    DO 25 L=2,NL
    TaO(L)=TaN(L-1)
    WaO(L)=WaN(L-1)
        25 CONTINUE
DO 26 L=1,NLL
    TbO(L)=TbN(L+1)
    WbO(L)=WbN(L+1)
    26 CONTINUE
    WRITE(*,502)I
    502 FORMAT(35X,' STEP TIME',I10,' FINISHED')
    3 CONTINUE
C   ***** MAIN PROGRAM END *****
    33 STOP
    END
C   *****
C   SUBPROGRAM
C   *****
C   1.AIR RELATIVE HUMIDITY
C   2.ABSOLUTE HUMIDITY RATIO
C   3.DENSITY OF MOIST. AIR
C   4.EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT OF WOOD
C   5.CLEAR SCREEN
C   6.DEW-POINT TEMPERATURE
C   *****
C   1.CALCULATE AIR RELATIVE HUMIDITY
C   *****
    FUNCTION RHAIR(TCC,WC)
C   RHAIR=Air relative humidity (%)
C   TCC=Air temperature (C)

```



```

C      WC=Air absolute humidity(kg water/kg dry air)
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DATA R1,R2/-5.8002206D+03,-5.5162560D0/
      DATA R3,R4/-4.8640239D-02,4.1764768D-05/
      DATA R5,R6/-1.4452093D-08,6.5459673/
      DATA P/101.325/
      TS=TCC+273.15
      PWS=DEXP(R1/TS+R2+R3*TS+R4*TS**2.+R5*TS**3.+R6*ALOG(TS))
      PW=WC*P/(0.62198+WC)
      RHAIR=PW/PWS*100.
      RETURN
      END

```

```

C      *****
C      2.CALCULATE ABSOLUTE HUMIDITY RATIO
C      *****
      FUNCTION W(TC,RHA)
C      W=Air absolute humidity (kg water/kg dry air)
C      TC=Air temperature (C)
C      RHA=Air relative humidity (%)
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DATA R1,R2/-5800.2206D0,1.3914993D0/
      DATA R3,R4/-0.04860239D0,0.41764768D-04/
      DATA R5,R6/-0.14452093D-07,6.5459673D0/
      DATA P/101325.D0/
      TK=TC+273.15
      PWS=DEXP(R1/TK+R2+R3*TK+R4*TK**2+R5*TK**3+R6*DLOG(TK))
      W=(0.62198D0*RHA*PWS)/(100.*P-RHA*PWS)
      RETURN
      END

```

```

C      *****
C      3.CALCULATE DENSITY OF MOIST. AIR
C      *****
      FUNCTION ROAIR(TC,WO)
C      ROAIR=Moist. air density (kg moist.air/m^3)
C      TC=Air temperature (C)
C      WC=Air absolute humidity (kg water/kg dry air)
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DATA RA,P/287.05518,101325./

```

TK=TC+273.15

ROAIR=(P/(RA*TK*(1.+1.6078*WO)))*(1.+WO)

RETURN

END

C *****

C 9.CALCULATE EQUILIBRIUM MOITURE CONTENT OF WOOD

C *****

SUBROUTINE EQUOMO(WQ,QW,B2)

C WQ=Air temperature (C)

C QW=Air relative humidity (%)

C B2=Equilibrium Moisture Content of Wood(kg water/kg dry wood)

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

IF((WQ.GE.15.56D0).AND.(WQ.LT.21.11D0))THEN

H1=-.3961653761

H2=.375715782

H3=-.0100271479

H4=2.28439464D-04

H5=-2.62455959D-06

H6=1.25745549D-08

U1=-.380494279

U2=.371318624

U3=-.0100190641

U4=2.31454053D-04

U5=-2.6913036D-06

U6=1.29583142D-08

GO TO 331

ELSE IF((WQ.GE.21.11D0).AND.(WQ.LT.26.67D0))THEN

H1=-.380494279

H2=.371318624

H3=-0.100190641

H4=2.31451053D-04

H5=-2.6913036D-06

H6=1.29583142D-08

U1=-.329704402

U2=.354772812

U3=-9.16568008D-03

U4=2.09659599D-04

U5=-2.4521887D-06

U6=1.20189096D-08

GO TO 331

ELSE IF((WQ.GE.26.67D0).AND.(WQ.LT.32.22D0))THEN

H1=-.329704402

H2=.354772812

H3=-9.16568008D-03

H4=2.09659599D-04

H5=-2.4521887D-06

H6=1.20189096D-08

U1=-.46530888

U2=.366249727

U3=-0.101609537

U4=2.37941302D-04

U5=-2.79630772D-06

U6=1.35024414D-08

GO TO 331

ELSE IF((WQ.GE.32.22D0).AND.(WQ.LT.37.78D0))THEN

H1=-.46530888

H2=.366249727

H3=-.0101609537

H4=2.37941302D-04

H5=-2.79630772D-06

H6=1.35024414D-08

U1=-.381775423

U2=.349342626

U3=-9.532134732D-03

U4=2.23488029D-04

U5=-2.63916738D-06

U6=1.28650899D-08

GO TO 331

ELSE IF((WQ.GE.37.78D0).AND.(WQ.LT.43.33D0))THEN

H1=-.381775423

H2=.349342626

H3=-9.532134732D-03

H4=2.23488029D-04

H5=-2.63916738D-06

H6=1.28650899D-08

U1=-.516806188

U2=.359668

U3=-.0104160528

U4

U5=-2.8993861D-06

U6=1.39148773D-08

GO TO 331

ELSE IF((WQ.GE.43.33D0).AND.(WQ.LT.48.89D0))THEN

H1=-.516806188

H2=.359668

H3=-.0104160528

H4=2.46538614D-04

H5=-2.8993861D-06

H6=1.39148773D-08

U1=-.368391711

U2=.320082515

U3=-8.56912886D-03

U4=2.05720286D-04

U5=-2.49200486D-06

U6=1.24035908D-08

GO TO 331

ELSE IF((WQ.GE.48.89D0).AND.(WQ.LT.54.44D0))THEN

H1=-.368391711

H2=.320082515

H3=-8.56912886D-03

H4=2.05720286D-04

H5=-2.49200486D-06

H6=1.24035908D-08

U1=-.406344333

U2=.309661123

U3=-8.25507046D-03

U4=1.99334302D-04

U5=-2.43217635D-06

U6=1.21864712D-08

GO TO 331

ELSE IF(WQ.GE.54.44D0)THEN

H1=-.406344333

H2=.309661123

H3=-8.25507046D-03

H4=1.99334302D-04

H5=-2.43217635D-06

H6=1.21864712D-08

```
U1=.577311775
U2=.330488135
U3=-9.89168586D-03
U4=2.42731266D-04
U5=-2.92399292D-06
U6=1.41639888D-08
```

```
END IF
```

```
331 V1=H1+(H2*QW)+(H3*QW**2)+(H4*QW**3)+(H5*QW**4)+(H6*QW**5)
```

```
V2=U1+(U2*QW)+(U3*QW**2)+(U4*QW**3)+(U5*QW**4)+(U6*QW**5)
```

```
V3=V1-V2
```

```
V4=5.56
```

```
IF((WQ.GE.15.56).AND.(WQ.LT.21.11))B2=V1-V3*(WQ-15.56)/V4
```

```
IF((WQ.GE.21.11).AND.(WQ.LT.26.67))B2=V1-V3*(WQ-21.11)/V4
```

```
IF((WQ.GE.26.67).AND.(WQ.LT.32.22))B2=V1-V3*(WQ-26.67)/V4
```

```
IF((WQ.GE.32.22).AND.(WQ.LT.37.78))B2=V1-V3*(WQ-32.22)/V4
```

```
IF((WQ.GE.37.78).AND.(WQ.LT.43.33))B2=V1-V3*(WQ-37.78)/V4
```

```
IF((WQ.GE.43.33).AND.(WQ.LT.48.89))B2=V1-V3*(WQ-43.33)/V4
```

```
IF((WQ.GE.48.89).AND.(WQ.LT.54.44))B2=V1-V3*(WQ-48.89)/V4
```

```
IF(WQ.GE.54.44)B2=V1-V3*(WQ-54.44)/V4
```

```
B2=B2/100.0
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
C *****
```

```
C 5.CLEAR SCREEN
```

```
C *****
```

```
SUBROUTINE CLSSCR
```

```
DO 456 M=1,12
```

```
WRITE(*,*)
```

```
456 CONTINUE
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
C *****
```

```
C 6.CALCULATE DEW-POINT TEMPERATURE
```

```
C *****
```

```
FUNCTION TDEW(WC)
```

```
C TDEW=Dew-point temerature(C)
```

```
C WC=Air absolute humidity(kg water/kg dry air)
```

```
C For calculate 0<=Tdew<=93 (C)
```

```
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
```

DATA R1,R2/6.54,14.526/

DATA R3,R4/0.7389,0.09486/

DATA R5/0.4569/

DATA P/101.325/

Pw=P*WC/(0.62198+WC)

L=ALOG(Pw)

TDEW=R1+R2*L+R3*L**2.+R4*L**3.+R5*(Pw)**0.1984

RETURN

END

C

*****THE END



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายธีระยุทธ หลีวิจิตร เกิดเมื่อวันที่ 12 ธันวาคม 2516 จ.พัทลุง สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปี
การศึกษา 2537 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย