บทที่ 6

ผลการทดลองและวิเคราะห์การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งขนาดเล็ก

6.1 การสอบเทียบอุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองอบแห้งนั้นอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชนิด ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบอุปกรณ์แต่ละชนิดก่อนนำมาใช้งานเพื่อความถูกต้องแม่นยำในการทดลองดังนี้

6.1.1 การสอบเทียบอุณหภูมิ ในที่นี้ตัววัดอุณหภูมิที่ใช้มี 2 ชนิด คือ อาร์ทีดี (RTD) ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิและเทอร์โมคัปเปิล (Type K) 5 ตัว ที่ใช้ในการวัดความชื้นกระเปาะเปียกหรือกระเปาะแห้งของอากาศก่อนอบและหลังอบ และอุณหภูมิของชิ้นทดลอง โดยทำการสอบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์ปรอท ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังนี้

สำหรับอาร์ทีดี (RTD)

$$y = 9.837543E\text{-}01x - 4.641617E\text{-}01 \qquad ,R^2 = 9.999846E\text{-}01 \qquad (6.1)$$

สำหรับเทอร์โมคัปเปิลเบอร์ 1

$$y = 1.004827E+00x + 2.045895E+00 \qquad ,R^2 = 9.999993E\text{-}01 \qquad (6.2)$$

สำหรับเทอร์โมคัปเปิลเบอร์ 2

$$y = 1.000940E+00x + 2.363640E+00 \qquad ,R^2 = 9.999896E\text{-}01 \qquad (6.3)$$

สำหรับเทอร์โมคัปเปิลเบอร์ 3

$$y = 1.004827E+00x + 2.045895E+00 \qquad ,R^2 = 9.999993E\text{-}01 \qquad (6.4)$$

สำหรับเทอร์โมคัปเปิลเบอร์ 4

$$y = 1.004827E+00x + 2.045895E+00 \qquad ,R^2 = 9.999993E\text{-}01 \qquad (6.5)$$

สำหรับเทอร์โมคัปเปิลเบอร์ 5

$$y = 9.759349E\text{-}01x - 8.525582E\text{-}02 \qquad ,R^2 = 9.999961E\text{-}01 \qquad (6.6)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย y คือ อุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ปรอท

x คือ อุณหภูมิของอาร์ทีดี และ เทอร์โมคัปเปิล

6.1.2 การสอบเทียบความเร็วลมที่ไหลผ่านชิ้นทดลอง ในงานวิจัยนี้แผ่นออริฟิสที่ใช้มี 2 ขนาดคือ เบอร์ 1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9 เซนติเมตร และเบอร์ 2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร โดยจะทำการทดลองสอบเทียบที่อุณหภูมิลม 40 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิอื่นๆ ที่ทำการทดลองจะหาโดยใช้การคำนวณจากความสมการ 6.7

ที่ระดับความสูงของน้ำเดียวกัน

$$(\upsilon A \rho)_{40} = (\upsilon A \rho)_{x} \qquad (6.7)$$

โดยที่ υ คือ ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่วัดความเร็วลมซึ่งในที่นี้มีค่าคงที่ (ตารางเมตร)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

40 คือ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

x คือ ที่อุณหภูมิใดๆ

ซึ่งความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับความเร็วลมที่อุณหภูมิต่างๆ หาได้ดังนี้

- สำหรับแผ่นออริฟิสเบอร์ 1

ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

$$y = 1.860539E+00x - 2.481996E-01 \quad , R^2 = 9.994884E-01 \qquad (6.8)$$

ใช้ในช่วงความเร็วลม 0.84 ถึง 1.76 เมตรต่อวินาที

ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

$$y = 1.831043E+00x - 2.481996E-01 \quad , R^2 = 9.994884E-01 \qquad (6.9)$$

ใช้ในช่วงความเร็วลม 0.85 ถึง 1.79 เมตรต่อวินาที

ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

$$y = 1.754961E+00x - 2.273366E-01 \quad , R^2 = 9.993840E-01 \qquad (6.10)$$

ใช้ในช่วงความเร็วลม 0.88 ถึง 1.85 เมตรต่อวินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

$$y = 1.742479E+00x - 2.481996E-01 \quad , R^2 = 9.994884E-01 \qquad (6.11)$$

ใช้ในช่วงความเร็วลม 0.90 ถึง 1.88 เมตรต่อวินาที

ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

$$y = 1.683381E+00x - 2.481996E-01 \quad , R^2 = 9.994884E-01 \qquad (6.12)$$

ใช้ในช่วงความเร็วลม 0.93 ถึง 1.95 เมตรต่อวินาที

- สำหรับแผ่นออริฟิสเบอร์ 2

ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

$$y = 4.495665E+00x + 4.581122E-01 \quad , R^2 = 9.901191E-01 \qquad (6.13)$$

ใช้ในช่วงความเร็วลม 0.22 ถึง 0.58 เมตรต่อวินาที

ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

$$y = 4.424393E+00x + 4.581122E-01 \quad , R^2 = 9.901191E-01 \qquad (6.14)$$

ใช้ในช่วงความเร็วลม 0.22 ถึง 0.59 เมตรต่อวินาที

ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

$$y = 4.273241E+00x + 4.581122E-01 \quad , R^2 = 9.901191E-01 \qquad (6.15)$$

ใช้ในช่วงความเร็วลม 0.23 ถึง 0.61 เมตรต่อวินาที

ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

$$y = 4.210393E+00x + 4.581122E-01 \quad , R^2 = 9.901191E-01 \qquad (6.16)$$

ใช้ในช่วงความเร็วลม 0.23 ถึง 0.62 เมตรต่อวินาที

ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

$$y = 4.067594E+00x + 4.581122E-01 \quad , R^2 = 9.901191E-01 \qquad (6.17)$$

ใช้ในช่วงความเร็วลม 0.23 ถึง 0.64 เมตรต่อวินาที

โดยที่ x คือ ความเร็วลม

y คือ รากที่สองของระดับน้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ

ขั้นแรกจะทำการทดลองเพื่อศึกษาเส้นลักษณะเฉพาะที่นำไปสู่การหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและสัดส่วนความชื้นในวัสดุของผลิตภัณฑ์ทั้ง 5 ชนิดที่ได้เลือกมา ได้แก่

- ชิ้นขบเคี้ยว (Munchy) : วัฟเฟิล(Waffle), 9-10 มิลลิเมตร, 28-30 มิลลิเมตร
- กระดูกอัด (Rawhide) : ขนาด 4 นิ้ว และ ขนาด 12 นิ้ว

จากข้อมูลที่ได้จากทางโรงงานพบว่าชิ้นขบเคี้ยวแบบวัฟเฟิลขนาด 9-10 มิลลิเมตรอุณหภูมิที่ใช้อบปกติจะอยู่ที่ 70 องศาเซลเซียส ส่วนขนาด 28-30 มิลลิเมตรจะใช้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับกระดูกอัดขนาด 4 นิ้ว ส่วนกระดูกอัดขนาด 12 นิ้วจะใช้อุณหภูมิอบที่ 50 องศาเซลเซียส

ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาวัสดุหรือชิ้นงานที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบเครื่องอบแห้ง โดยเกณฑ์ที่ใช้พิจารณา คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ช้าที่สุด และในการอบแห้งนั้นคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณานั้นจะต้องไม่มีการเสื่อมสภาพ เช่น ไหม้, กลายสภาพเป็นเจลลาติน เป็นต้น และอัตราส่วนความชื้นในผลิตภัณฑ์ได้ตามมาตราฐานที่ลูกค้าต้องการคือร้อยละ 17.65 น้ำหนักแห้งสำหรับกระดูกอัด และร้อยละ 15 น้ำหนักแห้งสำหรับชิ้นขบเคี้ยว

6.2.1 อิทธิพลของชนิดของวัสดุ

ในการศึกษาอิทธิพลของชนิดวัสดุนั้นเป็นการศึกษาเพื่อคัดเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบเครื่องอบแห้ง โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเกณฑ์ที่นำมาใช้เพื่อคัดเลือกวัสดุที่จะใช้เป็นเกณฑ์ คือ เวลาซึ่งวัสดุชนิดใดใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุดเพื่อให้ได้อัตราส่วนความชื้นตามมาตราฐานและปริมาณการผลิตได้ตามที่กำหนดในวัตถุประสงค์ คือ วัสดุที่จะนำมาพิจารณาเป็นเกณฑ์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องต่อไป เนื่องจากเมื่อทำการอบแห้งตัวที่ช้าสุดได้เครื่องจะสามารถอบแห้งตัวอื่นๆ ที่เหลือได้ที่กำลังการผลิตที่กำหนดไว้ได้เช่นเดียวกัน และเกณฑ์อีกเกณฑ์หนึ่งที่นำมาพิจารณาประกอบ คือ คุณภาพของวัสดุที่เมื่อทำการอบแห้งแล้วจะไม่มีการเสียสภาพไป การทดลองที่ได้ทำจะแบ่งพิจารณาวัสดุเป็นสองประเภทคือชิ้นขบเคี้ยวและกระดูกอัด ชิ้นขบเคี้ยวต้องผลิตให้ได้ 100 ตันต่อเดือน และกระดูกอัดต้องผลิตให้ได้ 79.2 ตันต่อเดือน

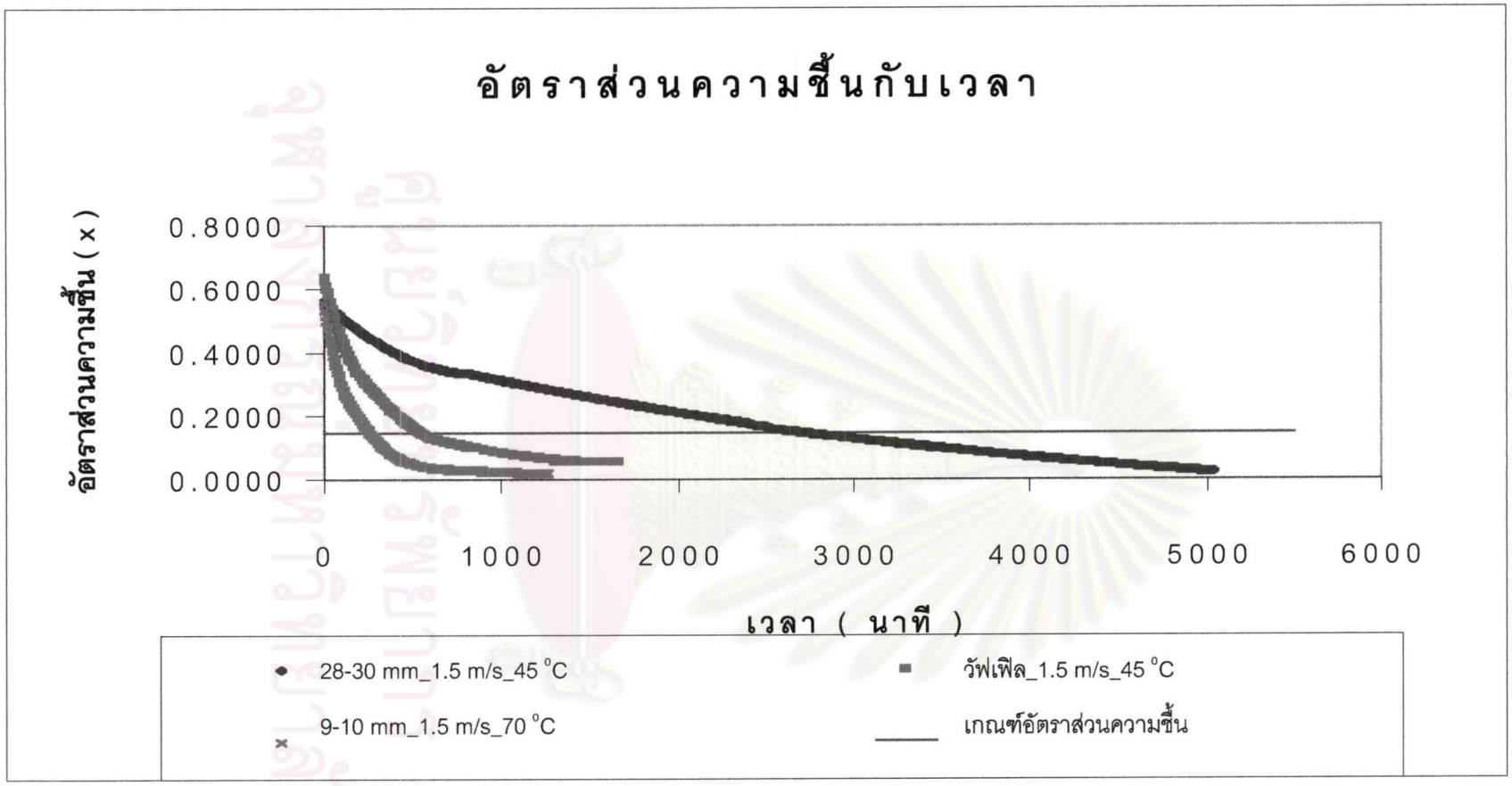
ผลจากการทดลองชิ้นขบเคี้ยวที่อบแห้งช้าสุด (รูปที่ 6.1) คือขนาด 28-30 มิลลิเมตร ซึ่งทำการอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาในการอบแห้งเพื่อให้ได้อัตราส่วนความชื้นร้อยละ 15 ใช้เวลา 2,715 นาที เนื่องจากชิ้นขบเคี้ยว 28-30 มิลลิเมตรมีพื้นที่ผิวเมื่อเทียบกับน้ำหนักแล้วมีค่าน้อยสุดมีผลทำให้อัตราการระเหยของน้ำออกจากวัสดุมีค่าน้อยกว่าชิ้นขบเคี้ยวแบบ 9-10 มิลลิเมตรและแบบวัฟเฟิล ได้ผลิตภัณฑ์ 1,449.8 กรัม ส่วนกระดูกอัด (รูปที่ 6.2) ชนิดที่ใช้เวลานานสุดเพื่อให้ได้อัตราส่วนความชื้นร้อยละ 17.65 ได้แก่ กระดูกอัดขนาด 12 นิ้ว ซึ่งทำการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที ได้ผลิตภัณฑ์น้ำหนัก 1,024.3 กรัม ใช้เวลาในการอบ 4,230 นาที

เมื่อนำน้ำหนักที่อบได้มาเทียบกับกำลังการผลิตที่ต้องออกแบบแล้วพบว่า กระดูกอัดขนาด 12 นิ้วจะเป็นตัวที่ใช้เวลานานที่สุด เนื่องจากว่านั้นกรรมวิธีในการทำกระดูกอัดนั้นแตกต่างจากชิ้นขบเคี้ยว มีผลทำให้รูพรุนในเนื้อวัสดุมีน้อยกว่าแบบชิ้นขบเคี้ยว นอกจากนี้กระดูกอัดยังใช้วิธีการอัดด้วยแท่นไฮดรอลิก ส่งผลทำให้เนื้อของกระดูกอัดมีความแน่นมากกว่าชิ้นขบเคี้ยว จึงนำไปสู่การแพร่ของน้ำที่จะออกจากกระดูกอัดเกิดขึ้นได้ช้ากว่าชิ้นขบเคี้ยว

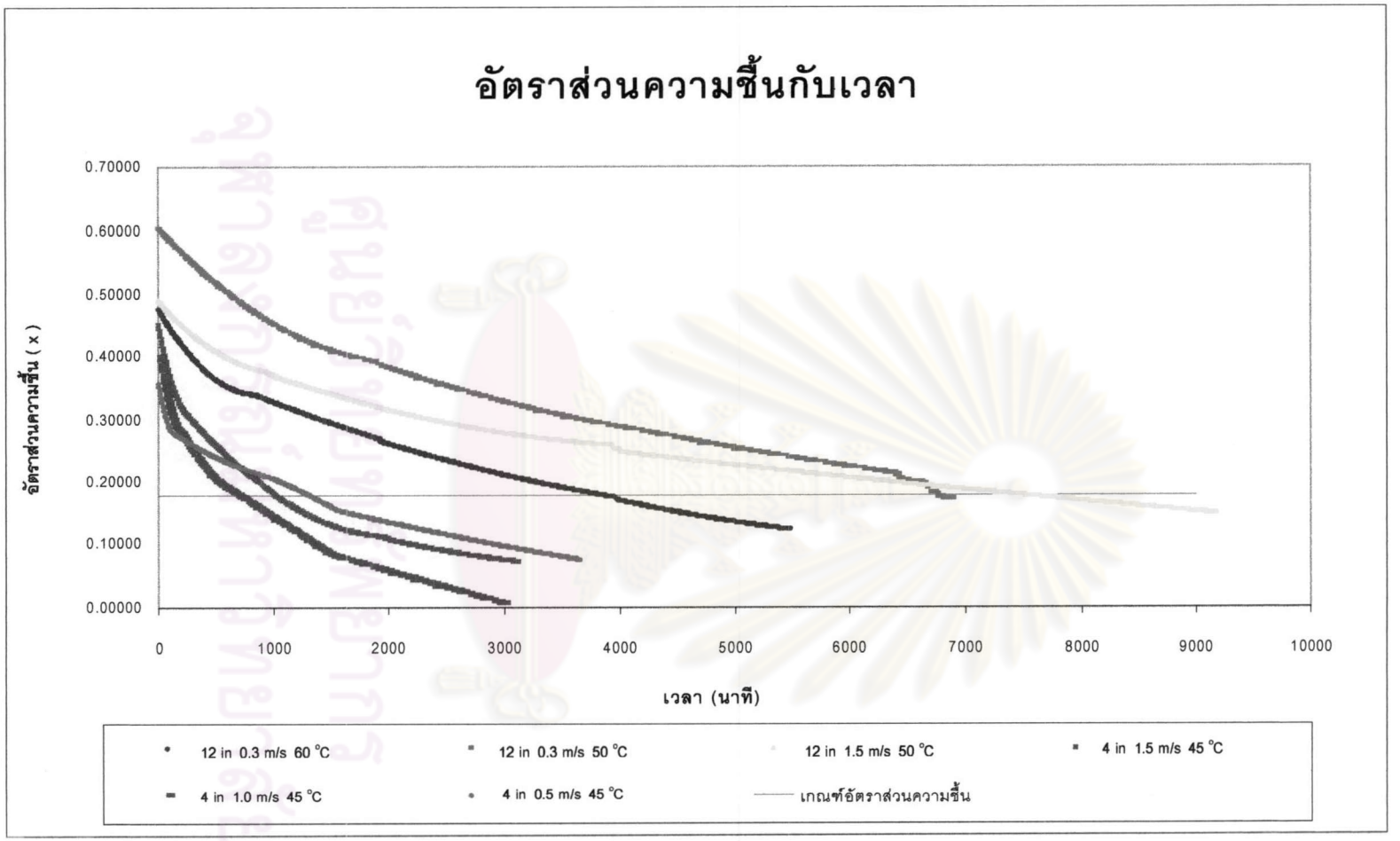
นอกจากนี้แม้จะนำกระดูกอัดขนาด 12 นิ้ว มาทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.3 เมตรต่อวินาที ได้น้ำหนักผลิตภัณฑ์ 1,048.5 กรัม ใช้เวลาในการอบ 3,925 นาทีก็ยังใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าชิ้นขบเคี้ยว 28-30 มิลลิเมตร แต่ที่ไม่นำกรณีนี้มาพิจารณาเนื่องจากในการทดลองที่สภาวะการอบแห้งดังกล่าว เป็นเวลานานๆ (2-3 วัน) จะพบว่าวัสดุที่ทำการอบได้เกิดการเสื่อมสภาพไปแล้ว โดยกลายสภาพเป็นเจลลาติน

เพื่อป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุสำหรับการอบแห้งกระดูกอัดขนาด 12 นิ้ว คือไม่ควรจะทำการอบแห้งที่จะทำให้กระดูกอัดมีอุณหภูมิถึง 60 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาของชิ้นขบเคี้ยว



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาของกระดูกอัด

6.2.2 อิทธิพลของอุณหภูมิของลมร้อน

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้น ในกรณีที่อัตราการไหลของลมร้อนเท่ากับ 0.3 เมตรต่อวินาที วัสดุที่ใช้อบเป็นกระดูกอัดขนาด 12 นิ้ว ที่อุณหภูมิของลมร้อน 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการอบแห้งของวัสดุในช่วงแรกมีค่าสูง เนื่องมาจากประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนที่มีค่าสูงกว่าสามารถถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุได้ดีกว่า ทำให้สามารถระเหยน้ำออกมาในช่วงแรกได้ดี จากนั้นเมื่ออุณหภูมิวัสดุสูงขึ้นปัจจัยที่จะมีผลต่อการระเหยน้ำออกจากวัสดุคือการแพร่ของน้ำในเนื้อวัสดุซึ่งเป็นปัจจัยภายในของวัสดุ ซึ่งจะสังเกตจากรูปที่ 6.3 จะเห็นได้ว่าในการอบแห้งช่วงหลังๆ นั้นแม้อุณหภูมิลมร้อนต่างกันแต่อัตราการระเหยต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

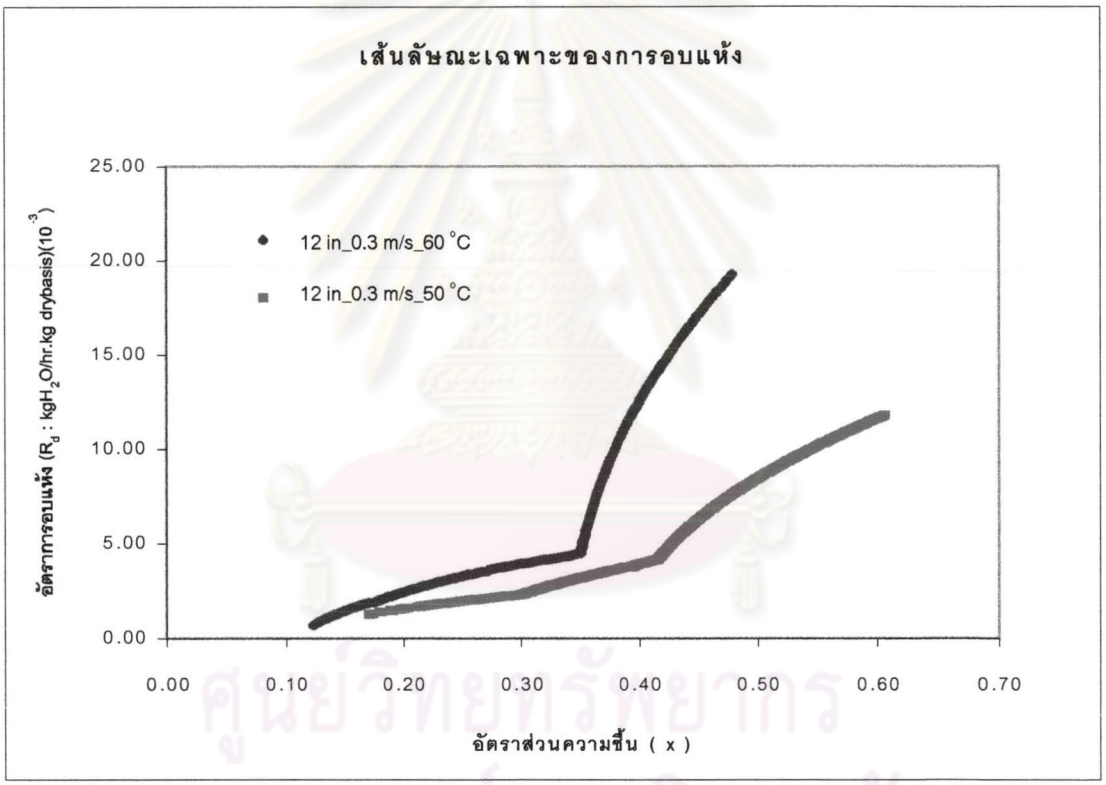
เมื่อคำนึงถึงผลของอัตราความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (รายละเอียดในหัวข้อ 6.2.4) ในรูปที่ 6.3 โดยทำการเลื่อนเส้นกราฟเส้นใดเส้นหนึ่งให้มีความอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นเท่ากัน จะพบว่ายังได้ผลลัพธ์เนื่องจากอุณหภูมิเหมือนเดิมคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราในการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

6.2.3 อิทธิพลของความเร็วลมของลมร้อน

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้น ในกรณีที่วัสดุที่ใช้อบเป็นกระดูกอัดขนาด 12 นิ้ว ที่อุณหภูมิของลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.3, 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที (อัตราการไหลเชิงมวล 24.58, 81.94 และ 122.92 กิโลกรัมต่อชั่วโมงตามลำดับ) พบว่าเมื่อความเร็วของลมร้อนเพิ่มขึ้น (0.3 เมตรต่อวินาทีเปรียบเทียบกับ 1.0 เมตรต่อวินาที และความเร็ว 0.3 เมตรต่อวินาทีเปรียบเทียบกับความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที)- มีผลทำให้อัตราการอบแห้งของวัสดุมีค่าสูงอย่างชัดเจน เนื่องมาจากประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนที่มีค่าสูงกว่าสามารถถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุได้ดีกว่า แต่ถ้าเปรียบเทียบระหว่างความเร็วลม 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที จะพบว่าค่าอัตราการอบแห้งมีค่าลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับการอบแห้งกระดูกอัดขนาด 4 นิ้วที่ทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม (รูปที่ 6.5 ทำการอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ความเร็วลมร้อน 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที (อัตราการไหลเชิงมวล 6.61, 13.21 และ 19.82 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ) พบว่าอัตราการอบแห้งสูงสุดจะพบที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าความเร็วลมที่ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงสุดคือที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาทีสำหรับกระดูกขนาด 12 นิ้ว เนื่องจากในช่วงความเร็วลมต่ำ

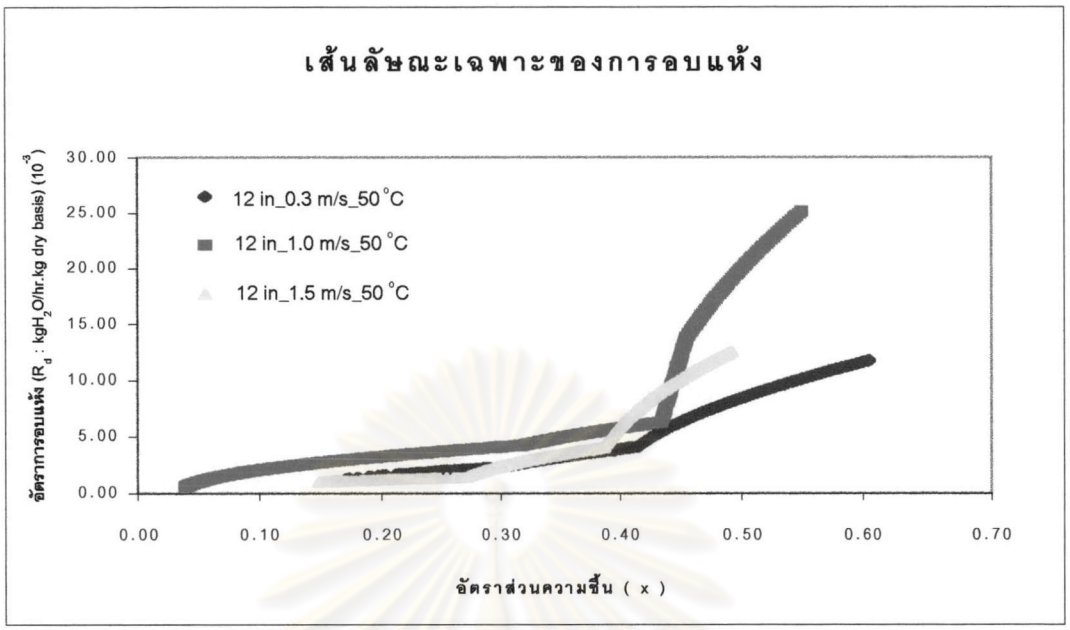
อัตราการระเหยน้ำจากผิวของวัสดุยังมีค่าน้อยกว่าอัตราการแพร่ของน้ำจากภายในมาที่ผิว เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอัตราการระเหยของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการระเหยมีค่ามากว่าอัตราการแพร่ของน้ำจากภายในผิวของวัสดุจะเกิดการหดตัวและแข็งกระด้างของผิววัสดุขึ้นมีผลทำให้อัตราการระเหยจะลดต่ำลง

เมื่อคำนึงถึงผลของอัตราความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (รายละเอียดในหัวข้อ 6.2.4) ในรูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5 โดยทำการเลื่อนเส้นกราฟเส้นใดเส้นหนึ่งให้มีความอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นเท่ากัน จะพบว่ายังได้ผลลัพธ์เนื่องจากความเร็วลมที่มีแนวโน้มเช่นเดิมคือ เมื่อเพิ่มความเร็วลมขึ้นอัตราในการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับที่ได้อธิบายไปแล้วนั้นเอง

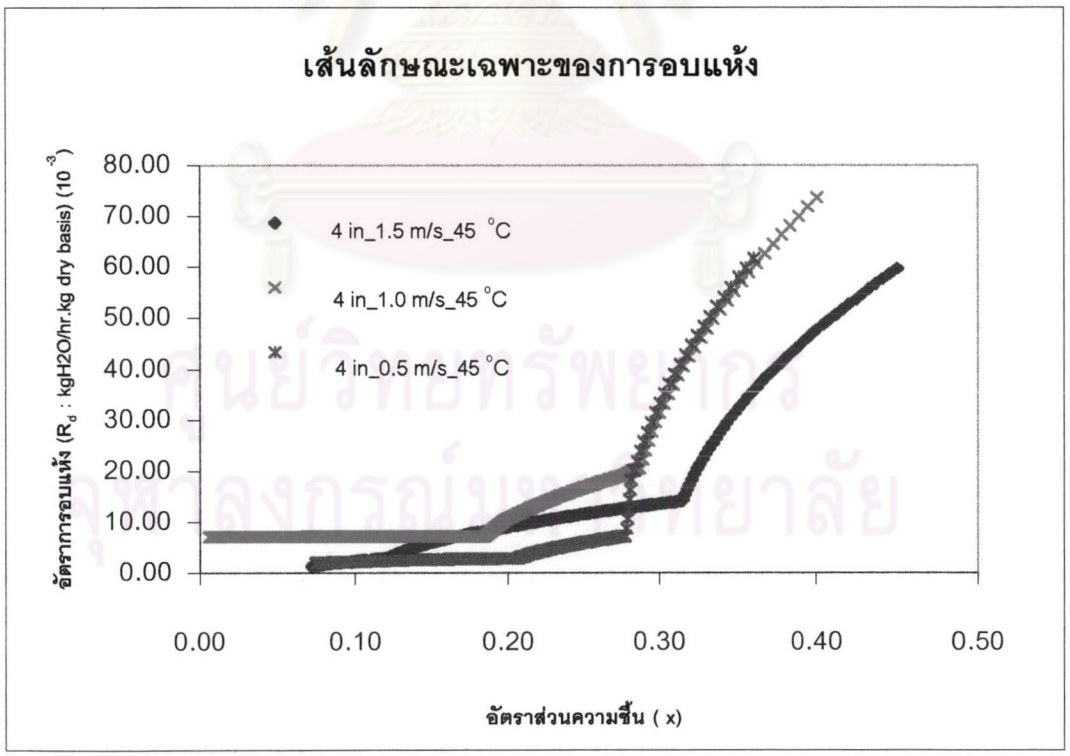


รูปที่ 6.3 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งของกระดูกอัดขนาด 12 นิ้ว
ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.4 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งกระดูกอัดขนาด 12 นิ้ว ที่ความเร็วลม 0.3, 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที

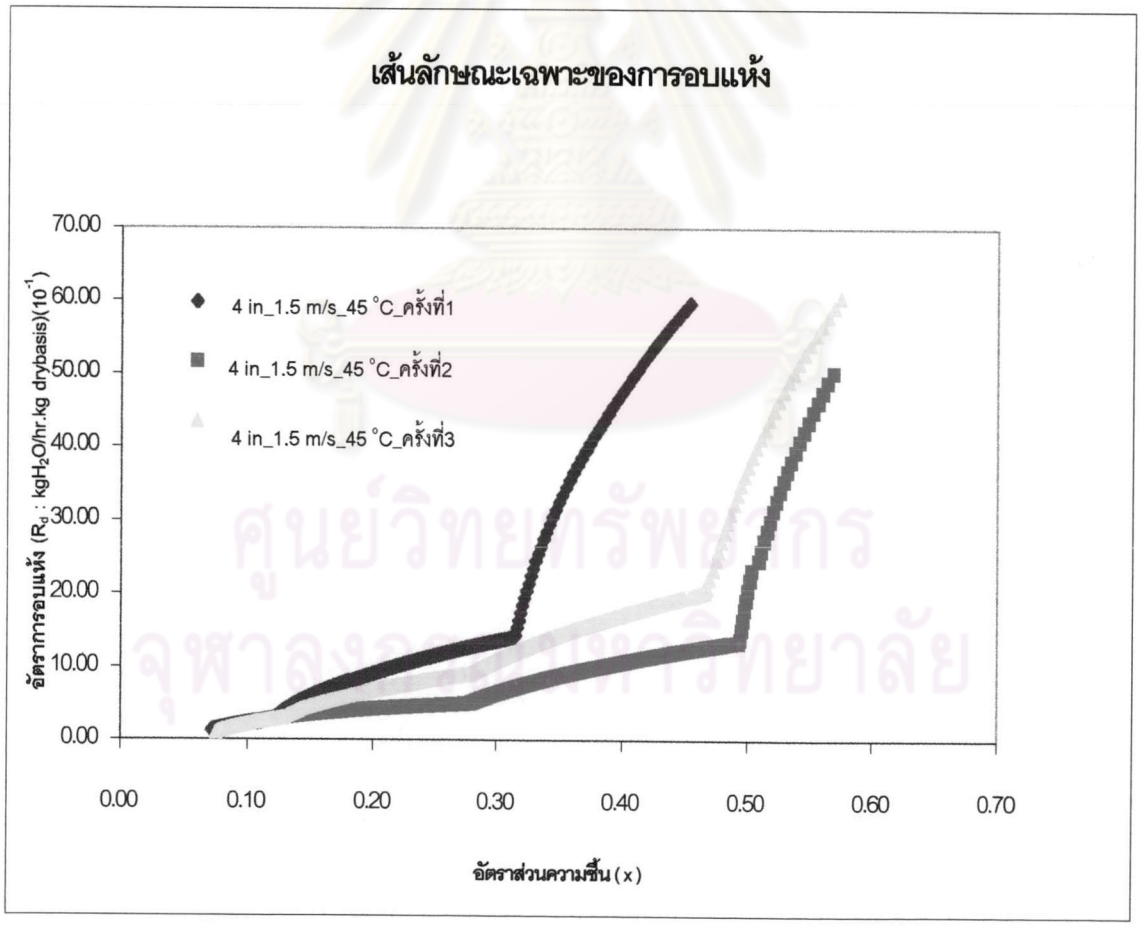


รูปที่ 6.5 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งกระดูกอัดขนาด 4 นิ้ว ที่ความเร็วลม 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที

6.2.4 อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้นในกรณีที่วัสดุที่ใช้ในการอบเป็นกระดูกขนาด 4 นิ้ว ทำการอบที่อุณหภูมิลมร้อน 45 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ทำการอบทั้งหมด 3 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งวัสดุที่ทดลองจะมีความชื้นเริ่มต้นต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างของแหล่งวัตถุดิบและเงื่อนไขการผลิต (ดังรูปที่ 6.6) พบว่า แม้ความชื้นเริ่มต้นจะเริ่มต้นต่างกันลักษณะรูปร่างของเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งจะคล้ายคลึงกัน

เมื่อพิจารณาที่อัตราการอบแห้งในตอนเริ่มต้นของแต่ละครั้งจะพบว่าจะให้อัตราการอบแห้งที่ใกล้เคียงกันแม้ว่าอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นจะต่างกันก็ตาม ดังนั้นในกรณีที่จะทำการคำนวณออกแบบ อาจใช้ข้อมูลการทดลองของกรณีความชื้นแรกเริ่มสูงสุดหรือใช้เส้นอบแห้งที่ได้จากการเฉลี่ยของเส้นที่นอร์มัลไรซ์ (Normalize) ค่าแล้วก็ได้



รูปที่ 6.6 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งกระดูกอัดขนาด 4 นิ้ว ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิลมร้อน 45 องศาเซลเซียส