

## การอบแห้งเมล็ดพืชที่อุณหภูมิสูงโดยเทคนิคสเปาต์เตดเบดที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ได้

### High Temperature Spouted Bed Grain Drying with Various Downcomer – Airflow

ฐานิตย์ เมธิยานนท์<sup>1</sup> สมชาติ โสภณธนฤทธิ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ถนนจอก กรุงเทพฯ 10530

<sup>2</sup>คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถ. ประชาอุทิศ ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร: 0-29883655 ต่อ 224 แฟกซ์: 0-29883655 ต่อ 241 E-mail: thanid\_m@yahoo.com, thanid@mut.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ต่อคิเนติกส์ของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิสูงและคุณภาพการขัดสี โดยได้ทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกแบบเป็นงวดในเครื่องอบแห้งสเปาต์เตดแบบสองมิติ โดยใช้อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 110 130 และ 150 °C ตามลำดับ และในแต่ละระดับอุณหภูมิอบแห้งเปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์จะปรับเปลี่ยนระหว่าง 0-30% จากผลการทดลองพบว่ามีการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นในดาวน์คัมเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่สะสมอยู่ในเมล็ดข้าวเปลือกในขณะที่อยู่ในช่วงการให้ความร้อนและการอบแห้งในบริเวณสเปาต์ทำให้เกิดปรากฏการณ์ evaporative cooling ในบริเวณดาวน์คัมเมอร์และมีส่วนทำให้ลักษณะของกราฟอบแห้งค่อนข้างอยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการอบแห้งจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอากาศที่ไหลเข้าดาวน์คัมเมอร์ การรักษาคุณภาพข้าวเปลือกในด้านของปริมาณข้าวต้นให้อยู่ในเกณฑ์ดี ความชื้นที่ลดลงไม่ควรเกิน 5 และ 8 %d.b. สำหรับความชื้นเริ่มต้น 27 และ 35 %d.b. ตามลำดับ สำหรับความขาวของข้าวหลังการอบแห้ง พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การใช้พลังงานความร้อนจำเพาะในการอบแห้งค่อนข้างคงที่ในทุกช่วงของความชื้นที่ลดลง โดยมีค่าประมาณ 5.5 MJ/kg water evap. และสุดท้ายเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไซ์เบด พบว่าอัตราการอบแห้งต่อหน่วยปริมาตรห้องอบโดยเทคนิคสเปาต์เตดสูงกว่าการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไซ์เบด ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน และคุณภาพการขัดสีจะให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน

#### Abstract

This research is an experimental study to investigate the effects of downcomer – air flowrate on the kinetics of high temperature paddy drying and milling quality. All experiments

were conducted in two – dimensional spouted bed batch dryer under high drying temperatures of 110, 130 and 150 °C. The percentage of downcomer – airflow of 0, 10, 20, and 30 % were varied for each of drying temperatures. It was found that the existence of moisture transfer was also taken place in the downcomer which was resulted from heat accumulated in paddy during intensive heating and drying period in the spout and resulted in the presence of evaporative cooling phenomenon in the downcomer. Moisture transfer in both regions attributed to almost linearity of drying curves which drying rate directly related to the amount of downcomer – airflow. The experimental results indicated that the high temperature can be used to dry paddy without any affecting on milling quality as long as moisture reduction not more than 5 and 8 %d.b. for approximate initial moisture content of 27 and 35 %d.b. respectively. The thermal energy consumption was almost the same for any level of moisture decrease and was around 5.5 MJ/kg water evap. Finally in comparing with fluidized bed drying it was found that spouted bed drying offers more benefit than the former in drying rate per unit volume of dryer whilst thermal energy consumption and milling quality were comparable with fluidized bed drying.

#### 1. บทนำ

การรวมสองคุณลักษณะทางไฮโดรไดนามิกส์ได้แก่ การขนถ่ายแบบพาหะลม (pneumatic transport) ในบริเวณสเปาต์ ซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนและมวลสูงกับการเคลื่อนที่ในลักษณะของเบด (moving bed) ในบริเวณดาวน์คัมเมอร์ซึ่งช่วยให้เมล็ดพืชมีโอกาสพักตัว (tempering) จากการอบแห้งเป็นลักษณะเด่นของการอบแห้งแบบสเปาต์เตดเบด เครื่องอบแห้งสเปาต์เตดแบบสองมิติได้ถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรก

<sup>1</sup> Corresponding author

โดย Mujumdar [1] ซึ่งต่อมา Kalwar และคณะ [2] และ Karwar & Raghavan [3, 4] ได้ศึกษาการอบแห้งถั่วเหลือง ข้าวสาลี และข้าวโพด ในเครื่องอบแห้งสเปาเต็ตเบตแบบสองมิติชนิดมีแผ่นกัน (draft plates) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสมการการอบแห้งเป็นไปตามรูปแบบสมการของ Page ซึ่งไม่พบว่ามีช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ในระหว่างการทดลอง อย่างไรก็ตามในการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบวงโคจรโดย Wetchakama และคณะ [5] Ngugen [6] และ Ngugen และคณะ [7] พบผลลัพธ์ที่แตกต่างไป กล่าวคือความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบกับเวลาค่อนข้างจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น และในภายหลัง Madhiyanon และคณะ [8] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเมล็ดพืชแบบวงโคจรในเครื่องอบแห้งสเปาเต็ตเบตโดยได้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนและมวลในบริเวณสเปาเต็ตและดาวนั้คัมเมอร์แยกจากกันแต่ส่งผลถึงกันและได้พบว่าการอบแห้งเมล็ดพืชโดยเทคนิคสเปาเต็ตเบตจะให้อัตราการอบแห้งค่อนข้างคงที่และมีการถ่ายเทมวล (ความชื้น) เกิดขึ้นทั้งบริเวณสเปาเต็ตและดาวนั้คัมเมอร์ นอกจากนี้ในด้านอัตราการอบแห้ง Tulasidas และคณะ [9] พบว่าขึ้นอยู่กับความสูงเบตในดาวนั้คัมเมอร์โดยทั้งอัตราการอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงเบตลดลงซึ่งเป็นผลมาจากเวลาในหนึ่งวัฏจักรการเคลื่อนที่ของเมล็ดพืชน้อยลงทำให้เวลาที่จะได้รับความร้อนในบริเวณสเปาเต็ตซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนสูงมากขึ้น สำหรับคุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสีในด้านของปริมาณข้าวตัน (head rice yield) Ngugen และคณะ [7] พบว่าสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกลงมาได้อย่างต่อเนื่องโดยปริมาณข้าวตันยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ดีทราบเท่าที่ความชื้นของข้าวเปลือกโดยประมาณไม่ต่ำกว่า 18 %d.b. และสามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งได้สูงถึง 160 °C ในการพัฒนาเครื่องอบแห้งสเปาเต็ตเบตไปสู่ภาคอุตสาหกรรม Madhiyanon และคณะ [10] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งสเปาเต็ตเบตต้นแบบในระดับอุตสาหกรรมโดยสามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้อย่างต่อเนื่องด้วยกำลังผลิตสูงสุด 3,500 kg/h ซึ่งพบว่าการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะประมาณ 4 – 7 MJ/kg water evap. โดยใช้เปอร์เซ็นต์อากาศเวียนกลับ 60 – 70 % ซึ่งต่อมา Madhiyanon และคณะ [11] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งแบบต่อเนื่องโดยทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองของเครื่องอบแห้งสเปาเต็ตเบตต้นแบบในระดับอุตสาหกรรมพบว่าสามารถทำนายคิเนติกส์ของการอบแห้งได้ดี

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของการจ่ายอากาศเข้าบริเวณดาวนั้คัมเมอร์ที่ปริมาณอากาศค่าต่างๆกับคิเนติกส์ของการอบแห้งและคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง นอกจากนี้ยังจะได้เข้าใจถึงกลไกการถ่ายเทมวล (ความชื้น) ที่เกิดขึ้นในดาวนั้คัมเมอร์ว่าส่งผลอย่างไรต่อการลดความชื้นโดยรวมของข้าวเปลือก

## 2. วิธีการทดลอง

ในการทดลองใช้ข้าวเปลือกเป็นวัสดุอบแห้ง เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ตเบตแบบสองมิติซึ่งใช้การอบแห้งแบบวงโคจรพร้อมอุปกรณ์อื่นๆ แสดงในรูปที่ 1 ส่วนบนของเครื่องอบแห้งประกอบด้วยผนังในแนวดิ่งและส่วนล่างจะประกอบด้วยผนังในแนวลาดเอียง โดยด้านหน้าของ

ห้องอบจะเป็นกระจกใสทนความร้อนเพื่อให้มองเห็นลักษณะการเคลื่อนตัวของเมล็ดพืชได้ ผนังเอียงทำมุม 60° กับแนวราบ ช่องอากาศเข้าด้านล่างของเครื่องอบมีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 30 mm x 84 mm ทางด้านล่างของเครื่องอบแห้งจะมีทางเข้าของอากาศอยู่สามช่องคือ 1) ช่องเข้าอากาศตรงกลางสำหรับจ่ายอากาศเข้าสเปาเต็ต 2) และ 3) เป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1" สำหรับจ่ายอากาศให้ดาวนั้คัมเมอร์ทั้งสองด้าน การทำความร้อนให้อากาศใช้ชุดหลอดไฟฟ้าจำนวน 6 ชุด โดยมีกำลังไฟฟ้าชุดละ 1.5 kW (รวมเท่ากับ 9 kW) การควบคุมอุณหภูมิใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบ P.I.D. สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง  $\pm 1$  °C จากค่าที่ตั้งไว้ การบันทึกอุณหภูมิใช้ data logger และ temperature indicator มีพิสัยความถูกต้อง  $\pm 1$  °C สำหรับการควบคุมอัตราการไหลของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งซึ่งมีอุณหภูมิสูงใช้ orifice meter ร่วมกับวาล์ว และสำหรับอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 90 °C จะวัดความเร็วอากาศด้วย hot wire anemometer มีความละเอียด  $\pm 0.3$  m/s ถ้าสูงกว่า 90 °C ใช้ Pitot – static tube ร่วมกับ U – tube manometer ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลมใช้เครื่องปรับความเร็วรอบ (frequency inverter) การหาความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกใช้วิธีซึ่งนำหนักรวมกับการให้ความร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h สำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักที่ใช้เป็นเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียด  $\pm 0.0001$  g ซึ่งน้ำหนักได้สูงสุด 200 g สำหรับการหาปริมาณข้าวตันเป็นไปตามมาตรฐานของสถาบันวิจัยข้าวและความขาวของข้าวใช้ kettmeter โดยในทุกเงื่อนไขการทดลองจะใช้ข้าวเปลือกจำนวน 6 kg โดยเมื่อใส่ลงในห้องอบแห้งแล้วจะได้ความสูงเบตประมาณ 0.72 m

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้งและสัดส่วนปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ต่อคิเนติกส์การอบแห้ง ในการทดลองจึงได้ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิอบแห้งที่ 3 ระดับ คือ 110°C 130°C และ 150°C ตามลำดับ โดยที่ในแต่ละระดับอุณหภูมิจะเปลี่ยนค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ต่อปริมาณอากาศทั้งหมดที่เข้าห้องอบดังนี้คือ 0% 10% 20% และ 30% ตามลำดับ ในแต่ละการทดลองความเร็วในการเคลื่อนตัวของเมล็ดข้าวเปลือกในดาวนั้คัมเมอร์อยู่ในช่วง 1.25 – 1.5 cm/s และเปอร์เซ็นต์ส่วนของอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่อยู่ในช่วง 67 – 74% ปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้เท่ากับ 6 kg

### 3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศ และเมล็ดข้าวเปลือกในระบบอบแห้ง

ตำแหน่งต่างๆ ที่ได้นำบันทึกอุณหภูมิแสดงไว้ในรูปที่ 1 จากผลการทดลองพบว่าที่ระดับอุณหภูมิอบแห้งต่างๆกันโดยมีสัดส่วนอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์เดียวกัน แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบอบแห้งมีความคล้ายคลึงกัน จากรูปที่ 2 (a - d) พบว่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและออกจากห้องอบแห้ง (เส้นกราฟ (1) กับ (3)) จะมากในช่วง 6 นาทีแรกของการอบแห้ง จากนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง

มากนักในช่วงที่เหลือของการอบแห้ง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในกระบวนการอบแห้งถ้าไม่คิดความร้อนสูญเสีย ความร้อนที่ได้จากอากาศส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยความชื้นในวัสดุโดยความร้อนส่วนที่เหลือจะถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุ แต่ในการทดลองพบว่าการลดลงของความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกค่อนข้างจะคงที่เมื่อเทียบกับเวลา ดังนั้นหลังจากประมาณ 6 นาทีไปแล้วความแตกต่างของอุณหภูมิขาเข้าและออกจากห้องอบแห้งจึงไม่มากนัก แต่ที่ต่างกันอยู่บ้างก็เนื่องจากอุณหภูมิเมล็ดพืช (ตำแหน่ง 4, 5 และ 6) สูงขึ้นตามเวลาทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง นอกจากนี้จากรูปที่ 2 ยังสังเกตเห็นว่าความแตกต่างของอุณหภูมิขาเข้าและออกจากห้องอบแห้งจะน้อยที่สุดในกรณีเปอร์เซ็นต์ปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์เท่ากับ 0% และจะมากที่สุดในการณ์ 30% ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในด้านการลดลงของความชื้นที่พบว่าอัตราการอบแห้งจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ ดังนั้นปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์น้อยอัตราการอบแห้งจะต่ำ ความร้อนที่ถูกดึงออกมาจากอากาศอบแห้งจึงน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งสูงเนื่องจากใช้ปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์สูง

อีกประการที่สำคัญที่สังเกตได้จากการทดลองในรูปที่ 2 คือจากการเปรียบเทียบอุณหภูมิในบริเวณดาวนั้คัมเมอร์ทั้งสามตำแหน่งคือ ตำแหน่งบน (4) กลาง (5) และล่าง (6) ของดาวนั้คัมเมอร์ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (จากงานวิจัยของ Madhiyanon และคณะ [8] ที่ทำนายคณิตศาสตร์ของการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าที่เปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ประมาณ 25% อากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์จะเข้าสู่ภาวะสมดุลทางความร้อนกับเมล็ดพืชที่ระยะประมาณเพียง 2 – 3 cm นับจากทางเข้าอากาศ) พบว่าเมื่อเมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนตัวจากด้านบน (4) ลงสู่ด้านล่าง (5) ของดาวนั้คัมเมอร์อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกจะลดลงทุกเงื่อนไขของปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ ซึ่งสาเหตุน่าจะมาจากปรากฏการณ์ evaporative cooling ที่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเย็นตัวลงเมื่อมีการระเหยความชื้นออกไปโดยใช้ความร้อนที่สะสมอยู่ภายในเมล็ดข้าวเปลือกเอง โดยสามารถยืนยันได้จากผลการทดลองที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดาวนั้คัมเมอร์ (หัวข้อ 3.3) ซึ่งพบว่าเมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นลดลง นอกจากนี้การพิจารณาจากเส้นกราฟอุณหภูมิตำแหน่งกลาง (5) และล่าง (6) ยังพบว่ายิ่งปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์มาก อุณหภูมิที่ตำแหน่งกลาง (5) และล่าง (6) จะเข้าใกล้กันมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณความร้อนที่ได้รับมากขึ้นจากปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์สูงขึ้นทำให้ตำแหน่งล่าง (6) มีอุณหภูมิขยับสูงขึ้นอย่างไรก็ตามทั้งตำแหน่งกลาง (5) และล่าง (6) ก็ยังคงต่ำกว่าตำแหน่งบน (4)

### 3.2 ลักษณะของกราฟอบแห้ง

ในรูปที่ 3 เป็นผลมาจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิอบแห้งและปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ต่างๆ กัน จากลักษณะของเส้นกราฟอบแห้งในทุกเงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้งและปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ต่างกันพบว่าความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาค่อนข้างจะอยู่ใน

รูปความสัมพันธ์เชิงเส้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าอัตราการอบแห้งค่อนข้างคงที่ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ Madhiyanon และคณะ [11] Ngugen [6,7] และ Wetchacama และคณะ [5] ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นดังกล่าวแตกต่างอย่างเด่นชัดกับกรณีการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดซึ่งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในตอนต้นของการอบแห้งและจะค่อยๆ ชะลอตัวลงในช่วงกลางและท้ายของการอบแห้งโดยกราฟการอบแห้งมีลักษณะเป็นกราฟเอ็กซโพเนนเชียล จากรูปที่ 3 พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงที่เปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์เท่ากับ 0% และ 10% จะได้อัตราการอบแห้งมาก แต่ที่เปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์เท่ากับ 20% และ 30% อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 130°C และ 150°C ใกล้เคียงกัน (รูปที่ 3c และ 3d) แต่ก็ยังคงสูงกว่าอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 110°C

### 3.3 การลดลงของความชื้นในบริเวณดาวนั้คัมเมอร์

จากผลการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นโดย Madhiyanon และคณะ [8] พบว่าขณะที่เมล็ดพืชในดาวนั้คัมเมอร์เคลื่อนตัวจากด้านบนลงสู่ด้านล่างความชื้นของเมล็ดพืชจะลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4 โดยการลดลงของความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกในแต่ละรอบที่เมล็ดข้าวเปลือกวนกลับเข้าไปในดาวนั้คัมเมอร์อยู่ในช่วงประมาณ 0.2 – 0.6 %d.b. โดยที่แต่ละปริมาณอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์การลดลงของความชื้นในดาวนั้คัมเมอร์ไม่ค่อยแตกต่างกัน การลดลงของความชื้นในดาวนั้คัมเมอร์เป็นผลมาจาก evaporative cooling มากกว่าการเกิดจากกลไกการอบแห้ง (ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1) โดยอาศัยอากาศในดาวนั้คัมเมอร์เป็นตัวกลางพาความชื้นออกไปจากห้องอบแห้ง สำหรับการทดลองที่ไม่ได้จงใจจ่ายอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ (รูปที่ 4 (a)) แต่ความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกในดาวนั้คัมเมอร์มีค่าลดลงได้สาเหตุเนื่องมาจากในความเป็นจริงจะมีอากาศส่วนหนึ่งจากบริเวณทางเข้าห้องอบไหลแทรกซึมเข้าไปได้ในบริเวณดาวนั้คัมเมอร์ ดังนั้นการที่อัตราการอบแห้งโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดค่อนข้างคงที่ น่าจะมาจากการที่เมล็ดพืชเคลื่อนตัวเป็นวัฏจักร (เคลื่อนตัวสลับไปมาระหว่างบริเวณดาวนั้คัมเมอร์และสเปาเต็ด) และขณะที่เมล็ดพืชเคลื่อนตัวในดาวนั้คัมเมอร์เมล็ดพืชจะมีระยะเวลาพักตัวพอที่ความชื้นจากภายในเมล็ดจะเคลื่อนตัวมาที่ผิวและเมื่อเมล็ดพืชวนกลับเข้าไปในบริเวณสเปาเต็ดซึ่งมีอุณหภูมิและความเร็วของอากาศสูง จึงทำให้ความชื้นระเหยออกจากผิวของเมล็ดพืชโดยง่าย ส่งผลให้ความชื้นของเมล็ดพืชลดลงด้วยอัตราค่อนข้างคงที่

### 3.4 ความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในดาวนั้คัมเมอร์

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองพยายามปรับให้มีค่าใกล้เคียงกันโดยอยู่ในช่วง 0.055 – 0.060 kg/s และจากการบันทึกความเร็วพบว่าที่เปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์เท่ากับ 0% เมล็ดข้าวเปลือกจะเคลื่อนตัวช้าที่สุดโดยมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 1.25 cm/s ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์เท่ากับ 10% 20% และ 30% เมล็ดข้าวเปลือกจะมีความเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ประมาณ 1.50 cm/s จากการสังเกตพบว่าในกรณีที่มีการไหลของอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ เมล็ดข้าวเปลือกจะมีความเร็ว

มากกว่ากรณีไม่มีอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ซึ่งเป็นเพราะว่าอากาศที่ไหลเข้าดาวน์คัมเมอร์จะช่วยให้เมล็ดข้าวเปลือกบริเวณด้านล่างของดาวน์คัมเมอร์มีการยับยตัวได้ง่ายขึ้นทำให้เมล็ดข้าวเปลือกจากด้านบนเคลื่อนตัวลงมาแทนที่ได้สะดวก

**3.5 อิทธิพลของปริมาณอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ต่ออัตราการอบแห้ง**

รูปที่ 5 แสดงผลของปริมาณอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ต่ออัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆกันซึ่งแนวโน้มผลการทดลองจะเป็นไปในทางเดียวกันหมด กล่าวคืออัตราการอบแห้งจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศที่เข้าดาวน์คัมเมอร์ (อัตราการไหลของอากาศทั้งหมดเท่าเดิม) โดยอัตราการอบแห้งที่ปริมาณอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์เท่ากับ 30% จะดีที่สุด รองลงมาคือที่ 20, 10 และ 0% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3 ซึ่งพบว่าการลดลงของความชื้นในดาวน์คัมเมอร์ที่แต่ละปริมาณอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ไม่ค่อยต่างกัน ดังนั้นส่วนที่ต่างกันก็มาจากการอบแห้งในสเปคซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากที่ปริมาณอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์มีค่ามาก เช่นที่ 30% อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่ออกจากดาวน์คัมเมอร์จะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ค่าปริมาณอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์อื่นๆ (ดูได้จากเส้นกราฟ (6) ในรูปที่ 2) ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Diffusion coefficient) สูง ดังนั้นเมื่อเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณสเปคจึงเกิดการระเหยน้ำได้ง่ายขึ้น สำหรับกรณีของเปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ 0% อาจมีอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราการอบแห้งต่ำนั้นคือเมล็ดข้าวเปลือกในดาวน์คัมเมอร์เคลื่อนที่ช้ากว่าที่ค่าเปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์อื่นๆ ทำให้จำนวนรอบของวัฏจักรที่เมล็ดข้าวเปลือกได้รับความร้อนจึงน้อยกว่า

**3.6 อิทธิพลของปริมาณอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ต่อคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง**

รูปที่ 6 แสดงคุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสีซึ่งพิจารณาในด้านเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์และความขาว จากกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์จะเห็นได้ว่าในช่วงต้นของการอบแห้งเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นจากนั้นก็จะมีการลดลงไปตามค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในตอนเริ่มต้นการอบแห้งเมื่อเมล็ดข้าวเปลือกที่ยังมีความชื้นสูงอยู่มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิด partial gelatinization ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีความแข็งขึ้นส่งผลให้ปริมาณข้าวต้นสูงขึ้น และเมื่ออบแห้งต่อไปเกรเดียนท์ของความชื้นระหว่างความชื้นที่บริเวณผิวเมล็ดและภายในเมล็ดมีค่ามากขึ้นจนทำให้ความเค้น (stresses) ที่เกิดจากแรงดึงที่ผิวและแรงกดดันภายในเมล็ดมีค่าสูงขึ้นทำให้เมล็ดข้าวแตกหักมากหลังการขัดสี

จากข้อมูลในรูปที่ 6 พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่องที่ปริมาณอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์สูงจะส่งผลให้ปริมาณข้าวต้นลดลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่ปริมาณอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ต่ำกว่า โดยที่เปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ 0% จะให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นดีที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะที่ปริมาณอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์สูงจะ

เป็นการเร่งอัตราการอบแห้งทำให้เกิดความเค้นภายในเมล็ดเพิ่มมากขึ้นข้าวจึงแตกหักมาก การอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 35.0 %d.b. โดยใช้เปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ 0% สามารถอบแห้งข้าวเปลือกลงมาได้ถึงความชื้น 27.0 %d.b. โดยที่ยังให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์สูงกว่าหรือใกล้เคียงกับ 100% และสำหรับที่เปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ 20 และ 30% จะสามารถอบแห้งข้าวเปลือกลงมาได้ถึงประมาณ 28 %d.b. และ 27%d.b. ตามลำดับ ก่อนที่ข้าวจะเสียหาย และที่ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 27 %d.b. โดยใช้เปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ 0, 20 และ 30% จะสามารถอบแห้งข้าวเปลือกลงมาได้ถึง 22.0 %d.b. 22.7 %d.b. และ 24.6 %d.b. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการอบแห้งที่ใช้ปริมาณอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ 0% ลิ้มิตของความชื้นข้าวเปลือกที่สามารถอบแห้งลงมาได้ก่อนข้าวเปลือกจะเสียหายจะอยู่ในเกณฑ์เดียวกับกรณีของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เซชัน (Poomsa-ad และคณะ [12]) สำหรับความขาวพบว่าความขาวหลังการอบแห้งไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก

**3.7 พลังงานความร้อนจำเพาะในการอบแห้ง**

พลังงานจำเพาะในการอบแห้งพบว่าแปรผันโดยตรงกับเปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ และเปอร์เซ็นต์อากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานความร้อนจำเพาะในการอบแห้ง

| Drying temp. (°C) | Downcomer - air (%) | Thermal energy consumption (MJ/kg water evap.) |                       |
|-------------------|---------------------|------------------------------------------------|-----------------------|
|                   |                     | Recirculated air                               |                       |
|                   |                     | 67 (%) <sup>(a)</sup>                          | 75 (%) <sup>(b)</sup> |
| 110               | 0                   | 12.2 (7.9) <sup>(c)</sup>                      | 7.5 (4.9)             |
|                   | 10                  | 11.7 (7.6)                                     | -                     |
|                   | 20                  | 11.0 (7.2)                                     | 8.8 (5.7)             |
|                   | 30                  | 10.3 (6.7)                                     | 7.2 (4.7)             |
| 130               | 0                   | 12.7 (8.3)                                     | 6.9 (4.5)             |
|                   | 10                  | 12.0 (7.8)                                     | -                     |
|                   | 20                  | 11.1 (7.2)                                     | 7.9 (5.1)             |
|                   | 30                  | 10.7 (7.0)                                     | 10.0 (6.5)            |
| 150               | 0                   | 13.9 (9.0)                                     | 6.9 (4.5)             |
|                   | 10                  | 13.3 (8.6)                                     | -                     |
|                   | 20                  | 13.1 (8.5)                                     | 7.9 (5.1)             |
|                   | 30                  | 12.2 (7.9)                                     | 10.5 (6.8)            |

- (a) ความชื้นเริ่มต้น 33 – 34 %d.b. ความชื้นสุดท้าย 12 – 19 %d.b.
- (b) ความชื้นเริ่มต้น 26 – 27 %d.b. ความชื้นสุดท้าย 15 – 17 %d.b.
- (c) ตัวเลขในวงเล็บเป็นค่าพลังงานที่บันทึกได้ลบด้วยค่าความร้อนสูญเสียซึ่งมีค่าประมาณ 35% ของค่าพลังงานที่บันทึกได้

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 ที่อากาศเวียนกลับ 75% พบว่าในการลดความชื้นอย่างต่อเนื่องให้ลงมาอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บ

รักษา (ประมาณ 15 – 16 %d.b.) จะใช้พลังงานความร้อนจำเพาะประมาณ 8 MJ/kg water evap. อย่างไรก็ตามเนื่องจากเป็นเครื่องอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการดังนั้นเพื่อให้การออกแบบเป็นไปตามหลักพลศาสตร์ของไหลที่ถูกต้อง ความยาวโดยรวมของระบบท่อลมทั้งหมดจึงค่อนข้างมากจึงทำให้มีพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนมาก ประกอบกับความหนาของฉนวนใยแก้วที่ใช้มีความหนาเพียง 2 นิ้วจึงทำให้มีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อบาน และจากการคำนวณพบว่าความร้อนสูญเสียมีค่าประมาณ 35-45% ของค่าความร้อนที่ได้จากขดลวดให้ความร้อน และเมื่อคิดเป็นพลังงานจำเพาะจะมีค่าประมาณ 2.8-3.6 MJ/kg water evap. ดังนั้นตัวเลขที่สะท้อนค่าพลังงานจำเพาะจำเพาะน่าจะอยู่ที่ประมาณ 5.5 MJ/kg water evap. (ตัวเลขในวงเล็บในตารางที่ 1) ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี อีกประการหนึ่งจากการอัตราการอบแห้งค่อนข้างจะคงที่ทุกช่วงเวลาของการอบแห้ง ดังนั้นการใช้พลังงานก็จะใกล้เคียงกันทุกช่วงเวลาด้วย ซึ่งหากพิจารณาเฉพาะการอบแห้งในช่วงแรกก่อนที่เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์จะต่ำกว่า 100% การใช้พลังงานในระดับนี้ (5.5 MJ/kg water evap.) จัดว่าปกติ

### 3.8 เปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งสเปาเต็ดเบดกับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไธเบด

เปรียบเทียบสมรรถนะในด้านความสามารถในการลดความชื้น จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าเครื่องอบแห้งสเปาเต็ดเบดสามารถลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 34 %d.b. ลงเหลือความชื้น 21 %d.b. ใช้เวลาประมาณ 16 นาที และจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 27 %d.b. ลงเหลือความชื้น 22 %d.b. ใช้เวลาประมาณ 8 นาทีที่อุณหภูมิอบแห้ง 130 °C ในขณะที่เครื่องอบแห้งฟลูอิดไธเบดใช้เวลาประมาณ 1.5 นาที [13] แต่เมื่อพิจารณาในเทอมของอัตราการอบแห้งต่อหน่วยปริมาตรของห้องอบแห้งพบว่าเครื่องอบแห้งสเปาเต็ดเบดและฟลูอิดไธเบดมีค่าอัตราการอบแห้งต่อหน่วยปริมาตรห้องอบแห้งเท่ากับ 98 kg water evap./h.m<sup>2</sup> และ 68 kg water evap./h.m<sup>2</sup> ตามลำดับ โดยสำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไธเบดคำนวณจากข้อมูลการทดลองของงานวิจัย[13] โดยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไธเบดที่ใช้เป็นเครื่องอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการ มีลักษณะทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 m สูง 1.40 m ใช้อบแห้งข้าวเปลือกได้ครั้งละ 1.9 kg ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอัตราการอบแห้งต่อหน่วยปริมาตรของห้องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดจะมีค่าสูงกว่าของแบบฟลูอิดไธเบดประมาณ 1.4 เท่า

ในด้านของการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะ เนื่องจากไม่มีข้อมูลการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไธเบดในระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจะเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไธเบดในระดับอุตสาหกรรม โดยหากพิจารณาตลอดช่วงการอบแห้งที่ลดความชื้นมาอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา (ประมาณ 15 – 16 %d.b.) พบว่าการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะของเครื่องอบแห้งสเปาเต็ดเบด (ประมาณ 5.5 MJ/kg water evap.) ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไธเบดในระดับอุตสาหกรรมที่แบ่งการอบแห้งออกเป็นสองช่วงโดยมีกระบวนการพักตัว (Tempering) และเป่าลมเย็นคั่นกลาง (ประมาณ

4-6 MJ/kg water evap. ในการอบแห้งช่วงแรก และประมาณ 7-9 MJ/kg water evap. ในการอบแห้งช่วงที่สอง) และหากพิจารณาเฉพาะช่วงการอบแห้งช่วงแรกที่ลดความชื้นลงมาถึงขีดของความชื้นที่ยังคงให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์สูงกว่าหรือใกล้เคียง 100% พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดที่ใช้พลังงานประมาณ 5.5 MJ/kg water evap. จะใกล้เคียงของการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไธเบดในระดับอุตสาหกรรมซึ่งใช้พลังงานความร้อนจำเพาะในช่วงแรกของการอบแห้งประมาณ 4 – 6 MJ/kg water evap.

ในด้านปริมาณข้าวต้นพบว่าการอบแห้งด้วยทั้งสองเทคนิคสามารถให้ปริมาณข้าวต้นในระดับใกล้เคียงกันโดยสามารถลดความชื้นได้อย่างต่อเนื่องประมาณ 5 – 8 %d.b. ก่อนที่ข้าวจะเริ่มเสียหายมาก (เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 100%) สำหรับในด้านความขาวพบว่าทั้งสองเทคนิคไม่ส่งผลกระทบต่อความขาวของข้าวหลังการอบแห้ง

### 4. สรุป

1) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกกับเวลาในการอบแห้งประมาณได้ว่าอยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น สำหรับทุกเงื่อนไขการทดลองนั้นคือปริมาณอากาศที่เข้าดาวนคัมเมอร์ไม่มีอิทธิพลต่อ drying curve characteristic

2) มีการถ่ายเทมวล (ความชื้น) เกิดขึ้นภายในดาวนคัมเมอร์ทุกเงื่อนไขของปริมาณอากาศที่เข้าดาวนคัมเมอร์ แต่การถ่ายเทมวลเกิดจากปรากฏการณ์ evaporative cooling ไม่ใช่การอบแห้ง

3) ปริมาณอากาศไหลเข้าดาวนคัมเมอร์จะส่งผลโดยตรงกับอัตราการอบแห้ง (ซึ่งเป็นผลรวมของการลดความชื้นในบริเวณสเปาเต็ดและดาวนคัมเมอร์) แต่การลดลงของความชื้นในดาวนคัมเมอร์ที่แต่ละปริมาณอากาศไหลเข้าดาวนคัมเมอร์ไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก โดยอัตราการอบแห้งที่เปอร์เซ็นต์อากาศเข้าดาวนคัมเมอร์เท่ากับ 30% จะดีที่สุด รองลงมาคือที่ 20, 10 และ 0% ตามลำดับ

4) คุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสีในด้านของปริมาณข้าวต้นพบว่าการอบแห้งอย่างต่อเนื่องที่ปริมาณอากาศเข้าดาวนคัมเมอร์สูงจะได้ปริมาณข้าวต้นลดลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่ปริมาณอากาศเข้าดาวนคัมเมอร์ต่ำกว่า และพบว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 130 °C ถ้าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเท่ากับ 35%d.b. สามารถอบแห้งข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่องลงมาได้ถึงความชื้นประมาณ 27% ก่อนที่ข้าวจะเสียหายและถ้าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 27% จะสามารถอบแห้งลงมาได้ถึงความชื้นประมาณ 22 %d.b. สำหรับความขาวของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งพบว่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกอ้างอิงที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง

5) พลังงานความร้อนจำเพาะที่บันทึกได้จะมีค่าใกล้เคียงกันทุกช่วงของการอบแห้งโดยมีค่าประมาณ 8 MJ/kg water evap. ที่เปอร์เซ็นต์อากาศเวียนกลับเท่ากับ 75% แต่เมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสียของระบบซึ่งมีค่าประมาณ 35-45% ของค่าความร้อนทั้งหมด ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนจำเพาะน่าจะอยู่ที่ประมาณ 5.5 MJ/kg water evap.

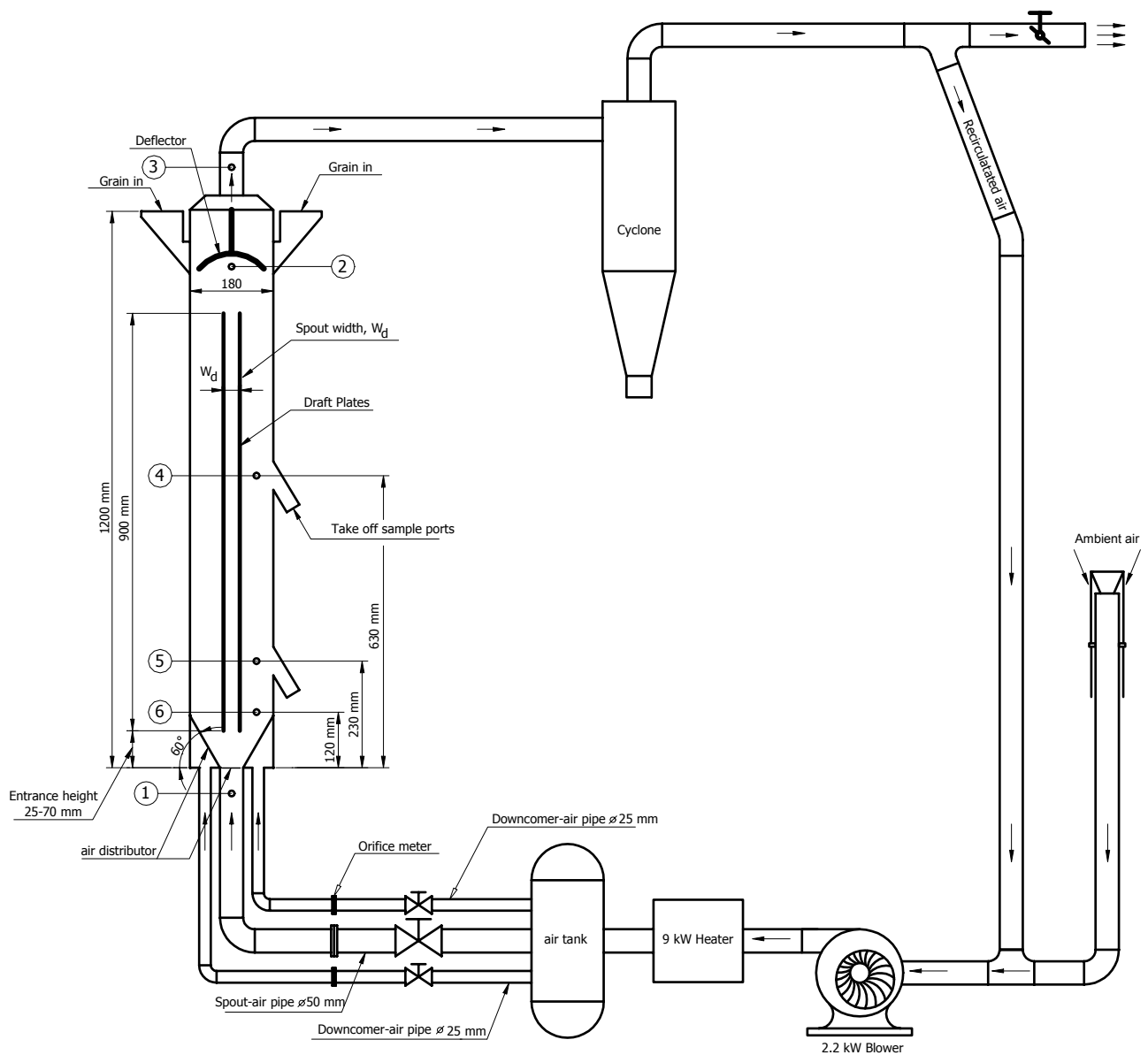
6) เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดในระดับห้องปฏิบัติการด้วยกันพบว่าในด้านของอัตราการอบแห้ง เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดจะอบแห้งได้รวดเร็วกว่าเพราะมีขนาดที่ใหญ่กว่า แต่หากพิจารณาในเทอมของอัตราการอบแห้งต่อหน่วยปริมาตรของห้องอบแห้งพบว่าเครื่องอบแห้งสเปาเต็ดเบดจะมีค่ามากกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดประมาณ 1.4 เท่า และสำหรับคุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสีทั้งในด้านปริมาณข้าวต้นและความขาว พบว่าทั้งสองเทคนิคให้ผลไม่ต่างกัน และสุดท้ายในด้านของการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะในการอบแห้ง พบว่าถ้าพิจารณาการอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงช่วงสุดท้ายที่เมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา พบว่าการอบแห้งโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดจะใช้พลังงานจำเพาะ (ประมาณ 5.5 MJ/kg water evap.) ต่ำกว่าของฟลูอิดไรซ์เบด และหากพิจารณาเฉพาะช่วงแรกของการอบแห้งที่ลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่องจนมาถึงระดับความชื้นที่ไม่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกแตกหัก (ประมาณ 22% d.b.) พบว่าการอบแห้งโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดจะใช้พลังงานความร้อนจำเพาะใกล้เคียงกับการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบด

## 5. กิตติกรรมประกาศ

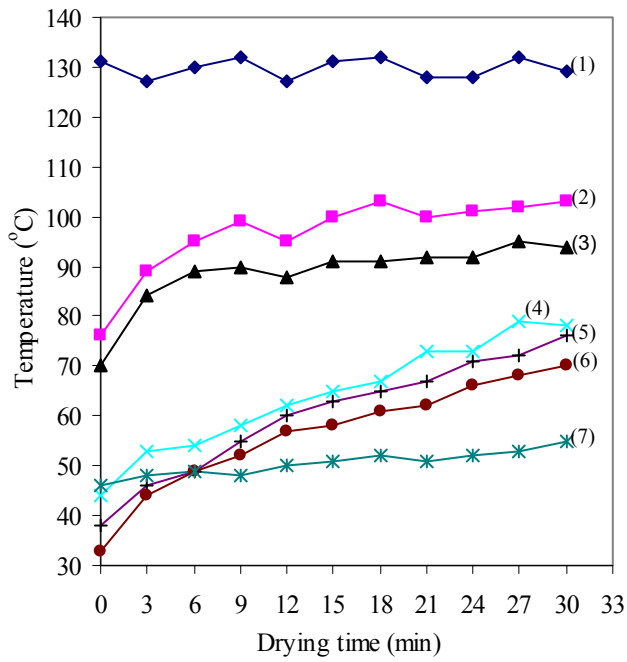
ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และ สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพข้าวเปลือก

## เอกสารอ้างอิง

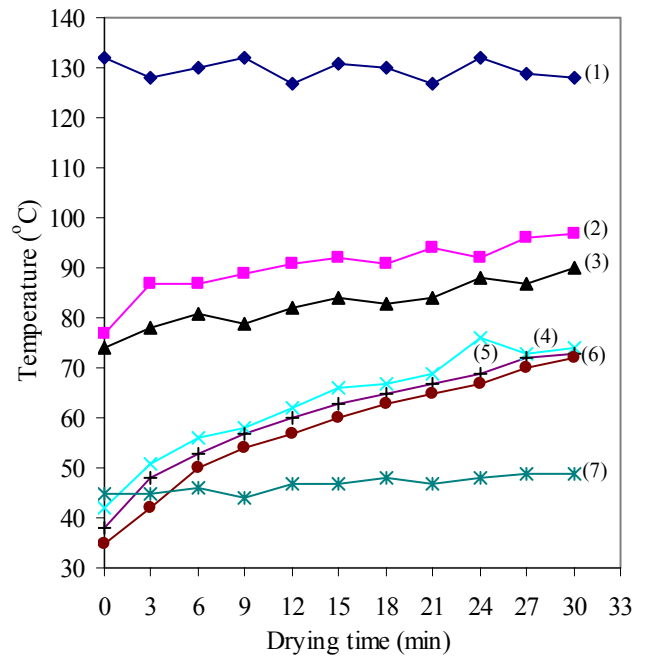
- [1] A.S. Mujumdar, In *Spouted Bed Technology: A brief review*, Drying'84; Hemisphere: Washington, 1984, pp. 151-157
- [2] M.I. Kalwar, Kudra T., Raghavan G.S.V. and Mujumdar A.S. "Drying of Grains in Drafted Two Dimensional Spouted Bed", *Journal of Food Process Engineering*, 1991, Vol. 13, pp. 321-332
- [3] M.I. Kalwar and Raghavan G.S.V. "Batch Drying of Shelled Corn in Two-Dimensional Spouted Beds with Draft Plates", *Drying Technology*, 1993, Vol. 11, No. 2, pp. 339-354
- [4] M.I. Kalwar and Raghavan G.S.V. "Circulation of Particles in Two-Dimensional Spouted Beds with Draft Plates", *Powder Technology*, 1993, Vol. 77, pp. 233-242
- [5] S. Wetchacama, Soponronnarit S., Swasdisevi T., Panich-ing-orn J. and Suthicharoenpanich S. "Drying of High Moisture Paddy by Two-Dimensional Spouted Bed Technique", *Proceedings of the First Asian-Australian Drying Conference (ADC '99)*, Bali, Indonesia, Oct. 24-27, 1999; 300-307.
- [6] L.H. Nguyen, "Evaluation of a Modified Spouted Bed Dryer for High Moisture Grain Drying", Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Australia, 2000.
- [7] L.H. Nguyen, Driscoll R.H. and Srzednicki G. "Drying of High Moisture Content Paddy in a Pilot Scale Triangular Spouted Bed Dryer", *Drying Technology*, 2001, Vol. 19, No. 2, pp. 375-387
- [8] T. Madhiyanon, Soponronnarit S. and Tia W. "A Two-Region Mathematical Model for Batch Drying of Grains in a Two-Dimensional Spouted Bed", *Drying Technology*, 2001, Vol. 19, No. 5, pp. 1045-1064
- [9] T.N. Tulasidas, Kudra T. and Raghavan G.S.V. "Effect of Bed Height on Simultaneous Heat and Mass Transfer in a Two-Dimensional Spouted Bed Dryer", 1993, *Heat Mass Transfer*, Vol. 20, 79-88
- [10] T. Madhiyanon, Soponronnarit S. and Tia W. "Industrial-Scale Prototype of Continuous Spouted Bed Paddy Dryer", *Drying Technology*, 2001, Vol. 19, No. 1, pp. 207-216
- [11] T. Madhiyanon, Soponronnarit S. and Tia W. "A Mathematical Model for Continuous Drying of Grains in a Spouted Bed Dryer", *Drying Technology*, 2002, Vol. 20, No. 3, pp. 587-614
- [12] N. Poomsa-ad, Soponronnarit S., Prachayawarakorn S. and Terdyothin A. "Head Rice Yield After Drying by Fluidization Technique and Tempering", *Proceedings of 2<sup>nd</sup> Asian-Oceania Drying Conference (ADC)*, 2001, pp. 717-726
- [13] N. Poomsa-ad "Optimum Design of Paddy Drying System in Rice Mill", Ph.D. Thesis, King Mongkut 's University of Technology Thonburi, 2001, pp. 79-100



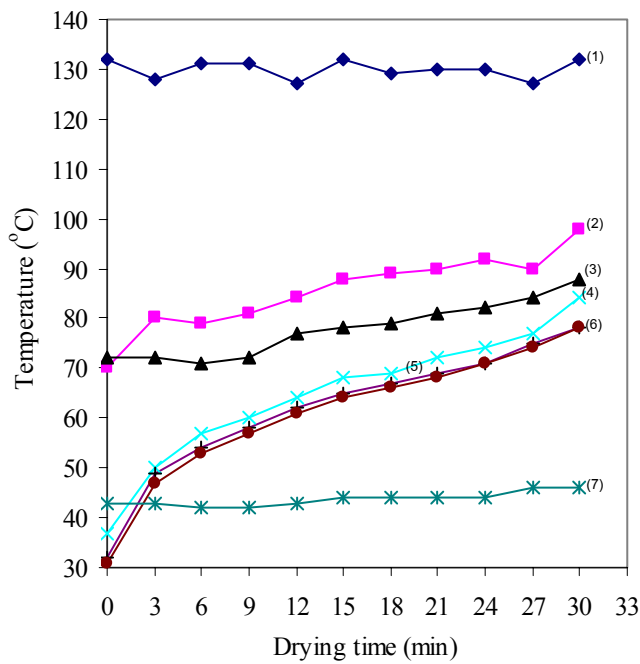
รูปที่ 1 Schematic diagram of two-dimensional spouted bed dryer with various downcomer airflow and temperature measurement positions.



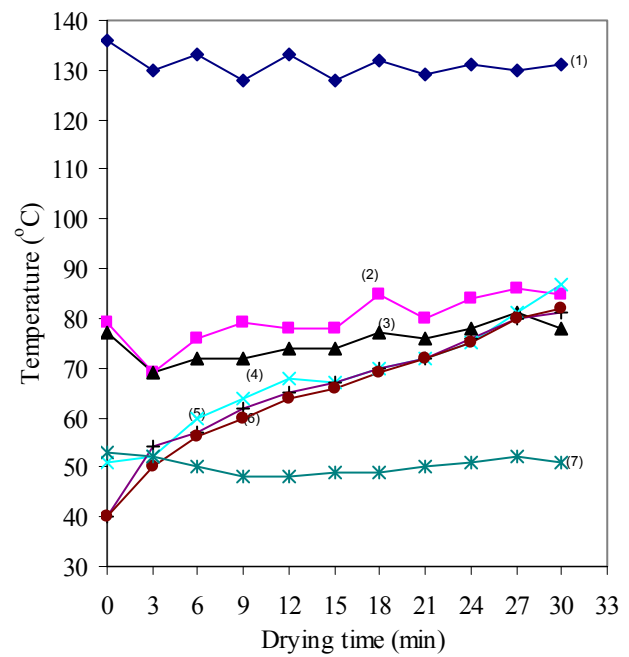
(a) 0% of downcomer - air



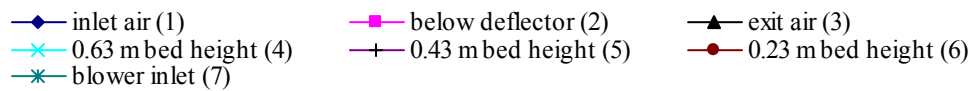
(b) 10% of downcomer - air



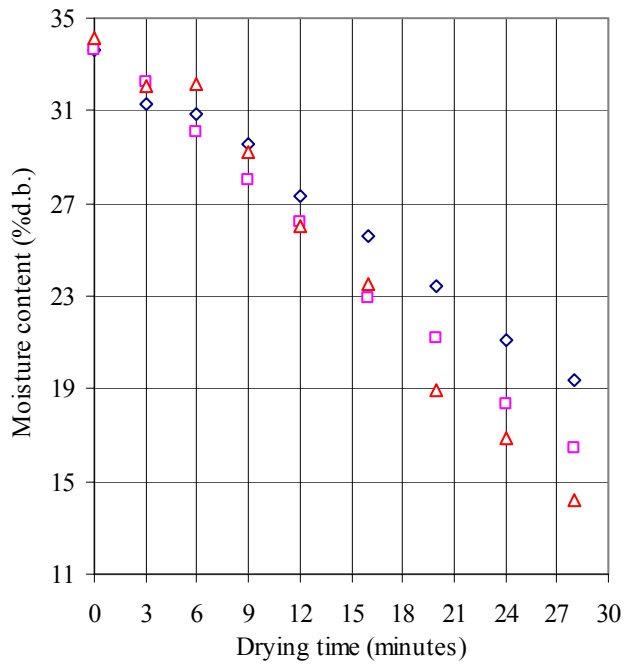
(c) 20% of downcomer - air



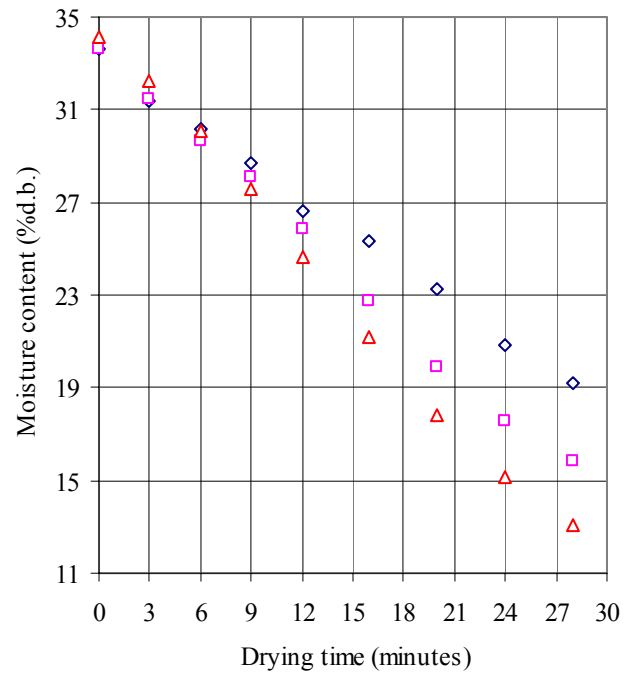
(d) 30% of downcomer - air



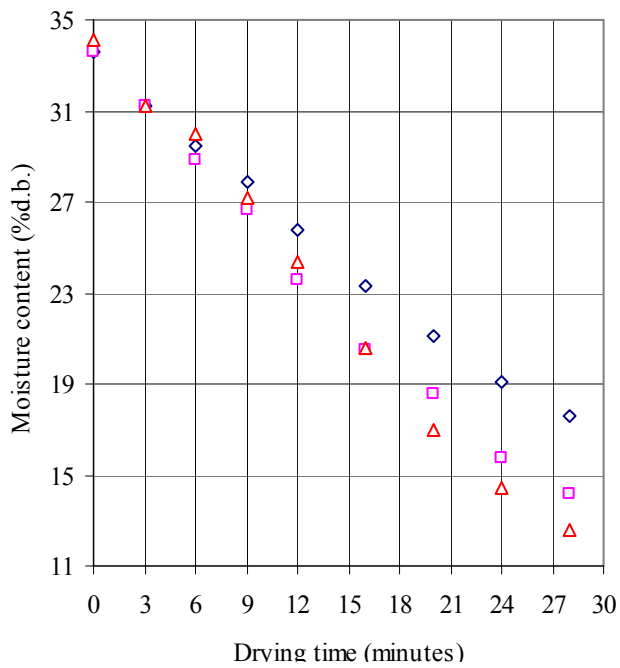
รูปที่ 2 Variation of air and grain temperatures within drying system at various percentage of downcomer-airflow (inlet air temp. 130 °C)



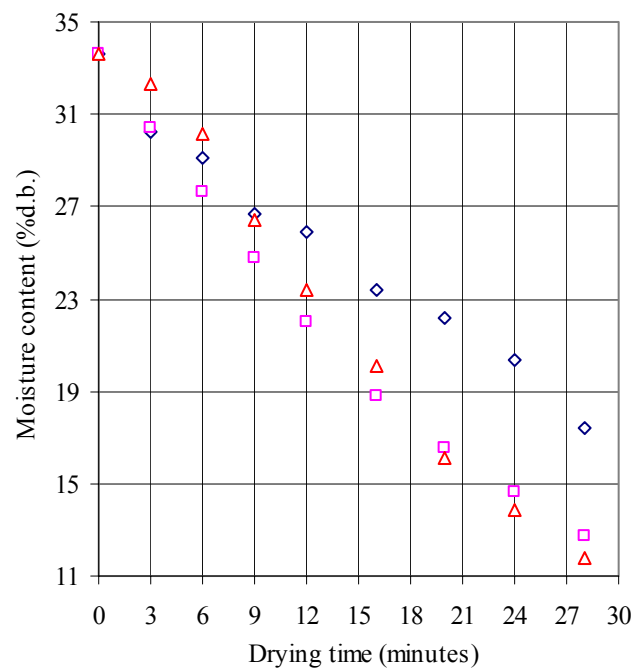
(a) 0% of downcomer - airflow



(b) 10% of downcomer - airflow



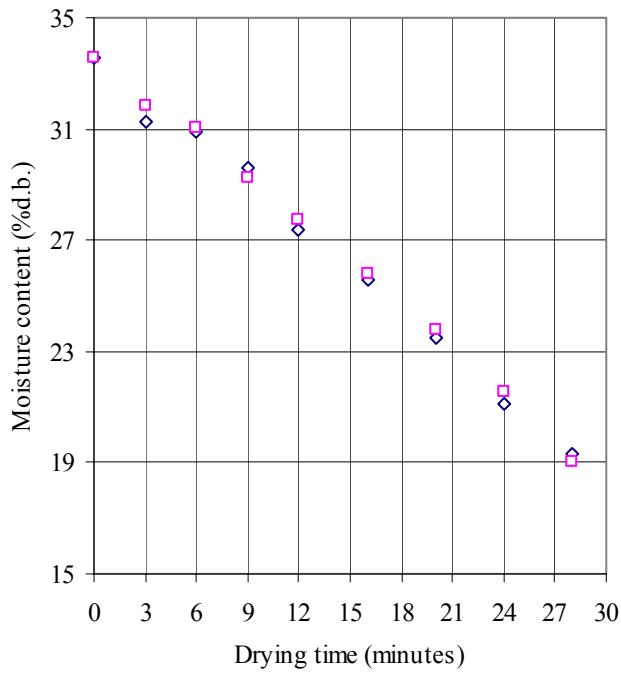
(c) 20% of downcomer - airflow



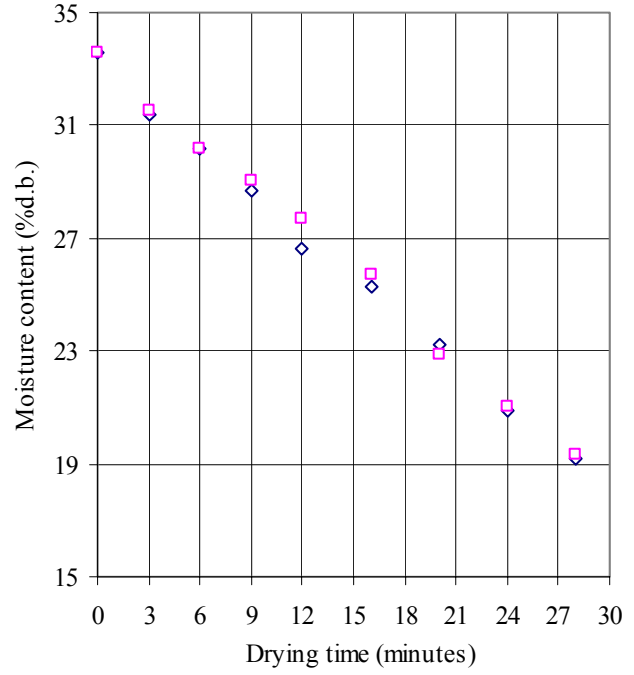
(d) 30% of downcomer - airflow

◇ 110°C     
 □ 130°C     
 △ 150°C

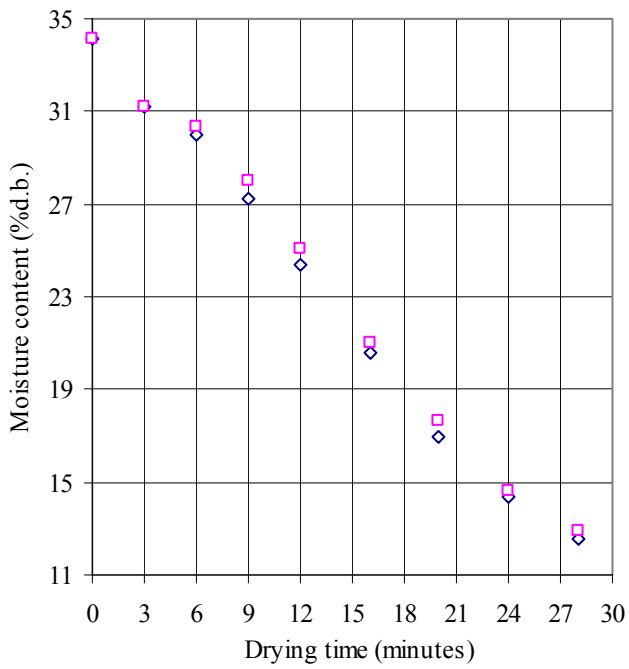
รูปที่ 3 Drying characteristic with various drying temperatures and percentage of downcomer – airflow.



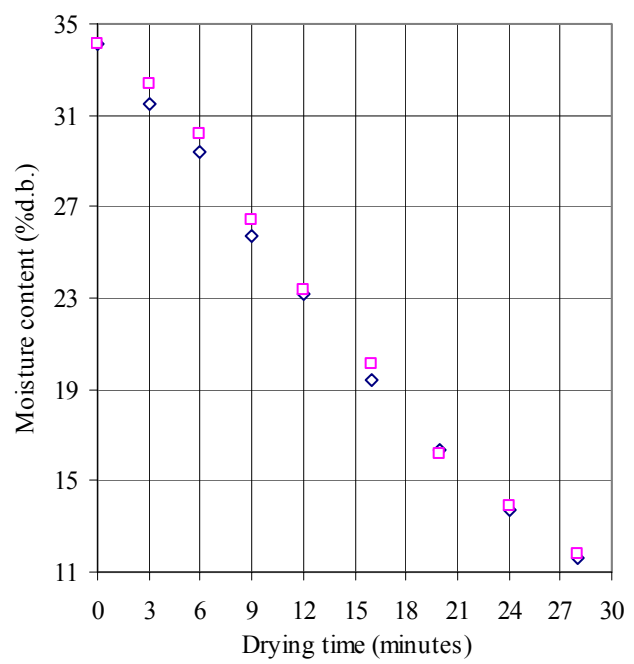
(a) inlet air temp. 110 °C, 0% of downcomer - airflow



(b) inlet air temp. 110 °C, 10% of downcomer - airflow



(c) inlet air temp. 150 °C, 20% of downcomer - airflow

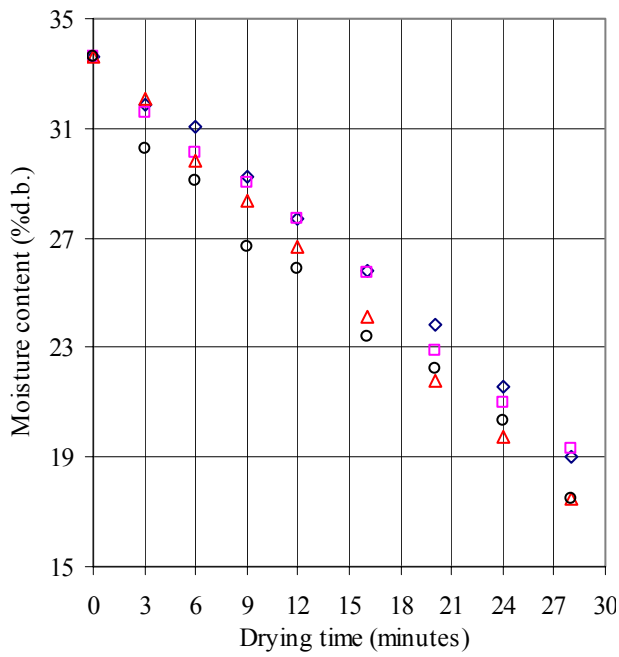


(d) inlet air temp. 150 °C, 30% of downcomer - airflow

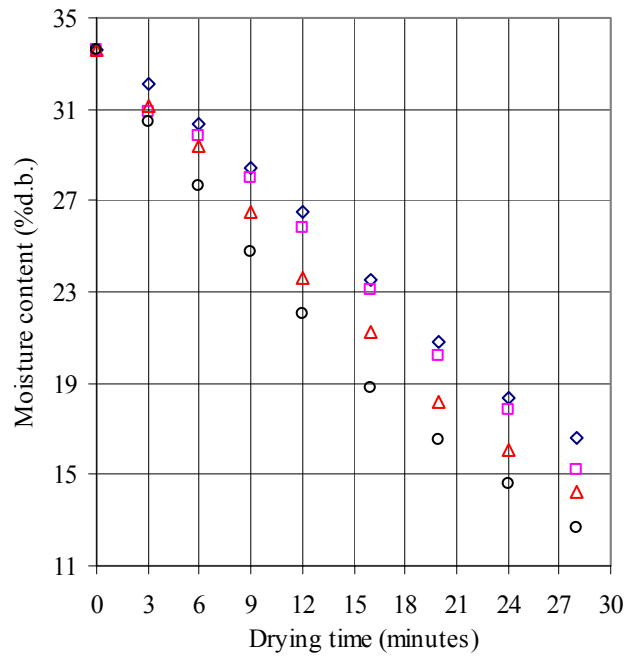
◇ 0.23 m bed height

□ 0.63 m bed height

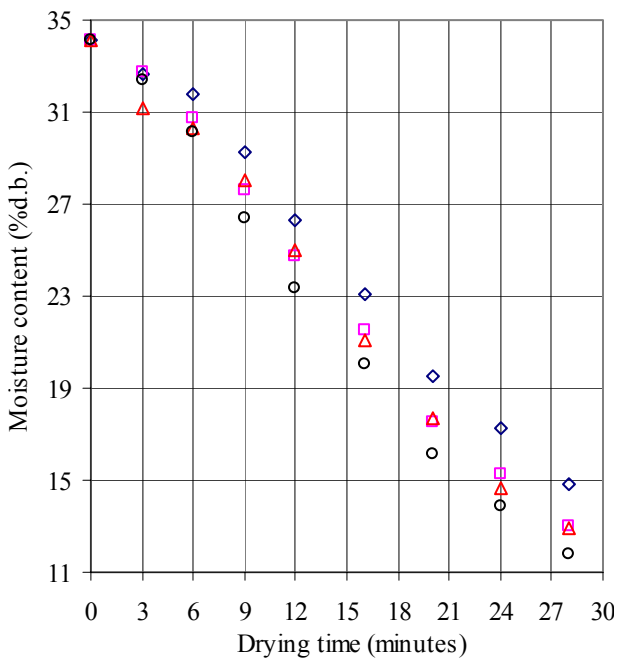
Figure 4 The variation of moisture content with bed height in the downcomer region.



(a) inlet air temp. 110 °C



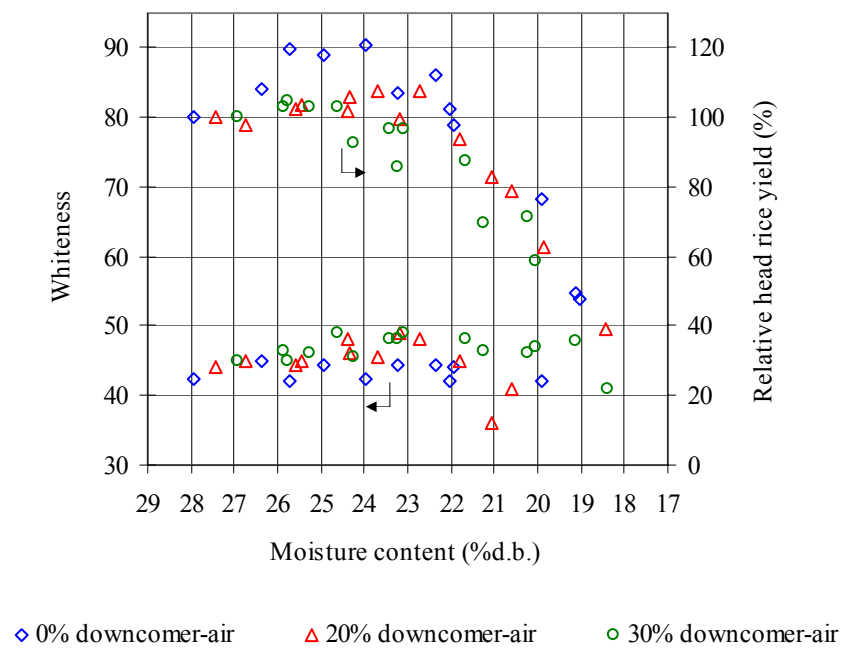
(b) inlet air temp. 130 °C



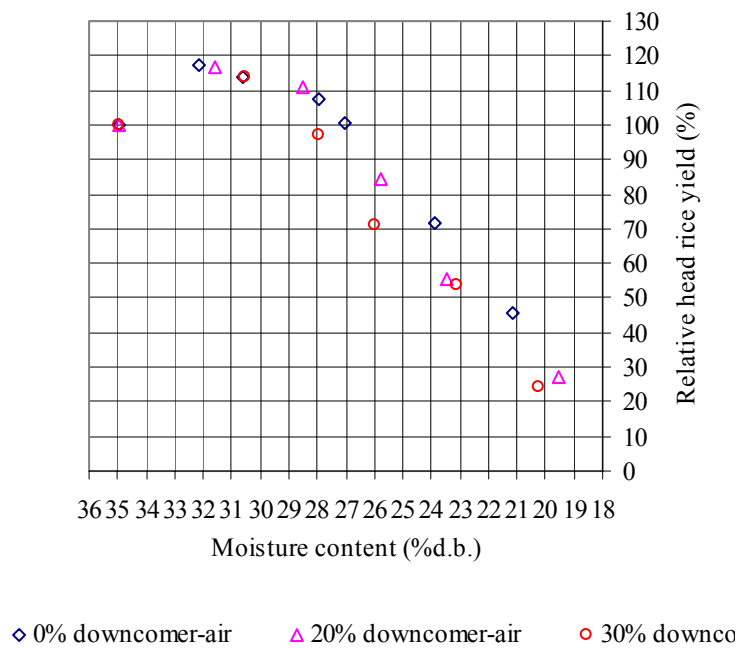
(c) inlet air temp. 150 °C

- ◆ 0% downcomer - air
- ◻ 10% downcomer - air
- ◻ 20% downcomer - air
- 30% downcomer - air

รูปที่ 5 The influence of downcomer – airflow (0, 10, 20, and 30%) on total moisture reduction (summation of moisture reduction in spout and downcomer regions).



(a) 27% d.b. initial moisture content



(b) 35% d.b. initial moisture content

รูปที่ 6 The effects of moisture content on relative head rice yield and whiteness. (drying temperature 130°C)