

บทที่ 3 ผลของอุณหภูมิอบแห้งและการเก็บในที่อับอากาศต่อคุณภาพของข้าวเหนียวและการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1 บทนำ

ข้าวเหนียว (Waxy rice, glutinous rice, sweet rice or sticky rice) มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* เมล็ดมีสีขาวขุ่นและมีปริมาณอะมิโลเพกตินเป็นส่วนประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก (อะมิโลสต่ำ) ทำให้มีสมบัติของความนุ่มเหนียวจึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารได้หลากหลายประเภท เช่น Sweet rice cake, rice cracker, rice pudding และ puff rice นอกจากนี้ยังมีการบริโภคในรูปของเมล็ดข้าวเหนียวหุงสุก (หุงต้มโดยการใช้น้ำ) สำหรับบางประเทศในทวีปเอเชียได้รวมทั้งประเทศไทย ซึ่งบริโภคกันมากทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (Keeratipibul et al., 2008)

ข้าวเปลือกเหนียวหลังจากการเก็บเกี่ยวใหม่มีความชื้นระหว่าง 28-30% dry basis (d.b.) และต้องลดความชื้นลงเหลือประมาณ 16% (d.b.) เพื่อรักษาคุณภาพของเมล็ดข้าวและการเก็บรักษา ซึ่งวิธีการลดความชื้นโดยทั่วไปของข้าวเปลือกเหนียวหลังเก็บเกี่ยวเสร็จใหม่ๆ คือการนำมาตากแดดหรืออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ LSU โดยใช้อุณหภูมิต่ำแต่เนื่องจากวิธีการดังกล่าวใช้เวลาค่อนข้างนาน ดังนั้นเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้ง จึงได้มีการแนะนำให้ใช้การอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง (Tirawanichakul et al., 2004; Prachayawarakorn et al., 2005) แต่การใช้อุณหภูมิสูงในขั้นตอนการอบแห้งข้าวเปลือกทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความชื้นภายในและภายนอกของเมล็ดข้าวส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นภายในเมล็ด ซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถทนต่อแรงขัดสีในระหว่างการขัดสีข้าว จึงทำให้ได้ร้อยละต้นข้าวต่ำ (Cnossen et al., 2003; Tirawanichakul et al., 2004)

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกเนื่องจากมีการถ่ายโอนความร้อนและมวลระหว่างตัวกลางกับวัสดุเป็นอย่างดี จึงใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น แต่การอบแห้งด้วยวิธีนี้ทำให้ได้ร้อยละต้นข้าวต่ำเนื่องจากเกิดรอยร้าวขึ้นภายในเมล็ดข้าวเปลือก (Karbassi and Mehdizadeh, 2008) ดังนั้นเพื่อลดปัญหาการเกิดรอยร้าวภายในเมล็ดจึงได้นำข้าวเปลือกมาพักโดยการเก็บในที่อับอากาศหลังจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงซึ่งวิธีนี้ทำให้ได้ร้อยละต้นข้าวสูงขึ้น (Poomsa-ad et al., 2005; Tuyen et al., 2009)

ร้อยละต้นข้าวและความขาวเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการตัดสินคุณภาพการส่งออกของข้าวขาว (Yadav and Jindal, 2008) นอกจากนี้คุณภาพด้านอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น สมบัติด้านความหนืด สมบัติด้านเนื้อสัมผัส การทดสอบด้านประสาทสัมผัส และสมบัติด้านการย่อยและดูดซึมก็มีส่วนสำคัญเนื่องจากสมบัติต่างๆ เหล่านี้เกี่ยวข้องโดยตรงต่อคุณภาพโดยรวมของข้าวเหนียว สมบัติด้านความหนืด เช่น ความหนืดสูงสุดแสดงความสามารถในการอุ้มน้ำของของผสมในระหว่างการให้ความร้อน ส่วนค่า Setback เป็นค่าแสดงถึงการเกิดเจล หรือการคืนตัวของแป้งข้าวหลังจากเย็นตัวลง (Gelling or retrogradation) สมบัติด้านเนื้อสัมผัสและการทดสอบด้านประสาทสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง และความเหนียว ใช้เป็นดัชนีความชอบของผู้บริโภคและสมบัติด้านการย่อยและดูดซึม สามารถนำมาใช้เป็นปริมาณอธิบายผลของการบริโภคอาหารประเภทแป้ง (Starch-rich food) ต่อการดูดซึมกลูโคสเข้าสู่กระแสเลือด (Shu et al., 2009)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาผลของความร้อนต่อโครงสร้างกายภาพ สมบัติด้านความหนืด สมบัติด้านเนื้อสัมผัส และสมบัติด้านการย่อยและดูดซึมของข้าวเหนียว (Anderson and Guraya, 2006; Sung et al., 2008; Frei et al., 2003; Hu et al., 2004; Chung et al., 2006; Soponronnarit et al., 2008) Anderson and Guraya (2006) สรุปว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีผลต่อโครงสร้างทางกายภาพของสตาร์ชข้าวเหนียวเพียงเล็กน้อย แต่สมบัติด้านความหนืดเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ การใช้รังสีแกมมาที่มีโดส (Dose) อยู่ในช่วง 0.5-2 kGy ทำให้สมบัติด้านความหนืดเช่นความหนืดสูงสุดและ Setback มีค่าลดลง (Sung et al., 2008) นอกจากนี้รังสีแกมมาในช่วง 0.5-1.0 kGy ไม่มีผลต่อความแข็งของโมจิ (Mochi) ที่ผลิตจากข้าวเหนียวใหม่อย่างมีนัยสำคัญ (Sung et al., 2008) นอกจากนี้สมบัติด้านเนื้อสัมผัส ได้แก่ Firmness และความเหนียวของข้าวใหม่หลังผ่านการอบแห้งด้วยฟลูอิดไอเซชันอุณหภูมิสูงเมื่อนำมาผ่านการหุงต้มแล้วมีค่าน้อยลงซึ่งคล้ายข้าวเก่า (Soponronnarit et al., 2008)

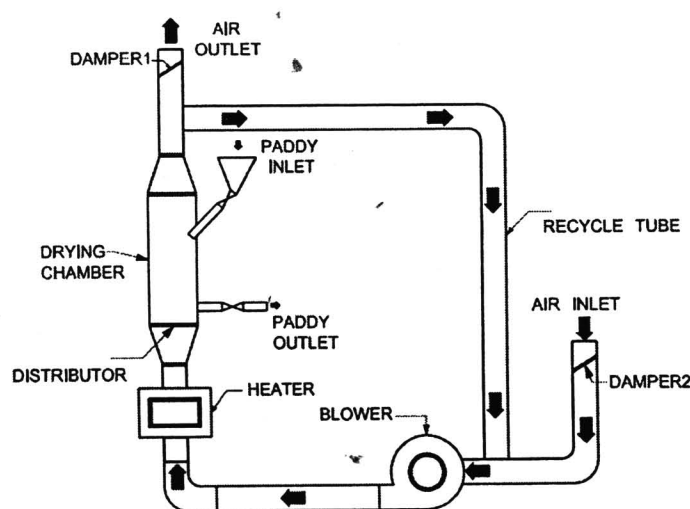
สำหรับคุณภาพด้านการย่อยและดูดซึม พบว่า ข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณอะมิโลเพกตินอยู่เป็นจำนวนมาก การคืนตัวของเจลในขั้นตอนการเกิดเจลที่ในเซชันเกิดขึ้นได้ค่อนข้างยากเมื่อเทียบกับข้าวทั่วไป (ปริมาณอะมิโลสสูง) ซึ่ง Frei et al. (2003) และ Hu et al. (2004) รายงานว่าข้าวเหนียวมีค่าดัชนีไกลซีมิกสูงกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง Anderson and Guraya (2006) พบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟไม่มีผลต่อสมบัติด้านการย่อยและดูดซึมของสตาร์ชข้าวเหนียว ส่วน Chung et al. (2006) อธิบายไว้ว่าสตาร์ชข้าวเหนียวหลังผ่านการอบแห้งถูกทำให้แตกออก มีผลให้การย่อยและดูดซึมเป็นไปอย่างรวดเร็วจึงส่งผลให้ดัชนีไกลซีมิกมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสรุปว่าการเกิดเจลที่ในเซชันบางส่วนในสตาร์ชข้าวเหนียวโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันทำให้อัตราการย่อยและดูดซึมแตกต่างกัน

ในระหว่างการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง เม็ดแป้งอาจเกิดเจลลิตีในเซชันไม่สมบูรณ์เนื่องจากปริมาณน้ำมีอยู่อย่างจำกัดจึงยังมีเม็ดแป้งหลงเหลืออยู่บ้าง การศึกษาการย่อยแป้งที่เกิดเจลลิตีในเซชันระดับต่างๆ จึงมีความน่าสนใจ และถึงแม้ว่าม้งานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งข้าวเหนียวที่ผ่านมาในอดีต แต่การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่มีต่อคุณภาพของข้าวเหนียวยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดและการเก็บในที่อับอากาศต่อคุณภาพของข้าวเหนียว ได้แก่ ร้อยละต้นข้าว สมบัติทางความร้อน สมบัติด้านความหนืด สี Translucent kernel โครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติด้านการหุงต้ม สมบัติด้านเนื้อสัมผัส สมบัติด้านการย่อย และสมบัติด้านสภาพเป็นผลึก นอกจากนี้ยังทดสอบ Chain length distributions ของอะมิโลเพกตินภายในข้าวเหนียวและการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค

3.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.2.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยอากาศร้อน

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลาง แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ ห้องอบแห้งเป็นรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สูง 140 cm อุปกรณ์ให้ความร้อนใช้ขดลวดความร้อนขนาด 12 kW โดยมี Temperature controller เป็นตัวควบคุมให้ได้อุณหภูมิอบแห้งตามที่ต้องการ พัดลมที่ใช้ในการอบแห้งเป็นพัดลมชนิดแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลังโดยใช้มอเตอร์ขนาด 1.5 kW เป็นตัวขับเคลื่อนพัดลม และมีตัวปรับความเร็วรอบของพัดลมให้ได้อัตราการไหลของอากาศตามต้องการ และมีระบบการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ 80% โดยใช้วาล์วปีกผีเสื้อ 2 ตัวเป็นตัวควบคุม



รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยอากาศร้อน

3.2.2 การเตรียมข้าวเปลือกเหนียวขึ้น

การเตรียมข้าวเปลือกเหนียวขึ้นมีวิธีการดังนี้ ข้าวเปลือกเหนียวที่ใช้คือพันธุ์ กข 6 ซื้อมาจากศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเหนียวอยู่ในช่วง 11-12% (d.b.) นำข้าวเปลือกเหนียวมาเพิ่มความชื้นโดยการเติมน้ำในสัดส่วนที่พอเหมาะ คลุกเคล้าให้ทั่วถึง จากนั้นนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4-6 °C เป็นเวลา 7 วัน ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเหนียวมีค่าประมาณ 28.8% (d.b.) ข้าวเหนียวมีปริมาณอะมิโลสระหว่าง 4-6% (Noomhorm et al., 1997; Varavinit et al., 2003) ก่อนทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกเหนียวในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด นำข้าวเปลือกเหนียวออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (ประมาณ 30 °C) จนอุณหภูมิสมดุลระหว่างข้าวเปลือกเหนียวกับอุณหภูมิแวดล้อม

3.2.3 การอบแห้งข้าวเปลือกเหนียว

นำข้าวเปลือกเหนียวขึ้น จำนวน 1.9 kg มาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง 90, 110, 130 และ 150 °C ความเร็วอากาศร้อนที่ใช้คือ 2.5 m/s ซึ่งมีค่าเป็น 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุด ($1.5U_{m0}$) (Soponronnarit and Prachayawarakorn, 1994) ความชื้นหลังผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดมีค่าประมาณ 22-24% (d.b.) จากนั้นนำไปเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา 30-120 min แล้วจึงนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมโดยเครื่องอบแห้งแบบชั้นบางเบดหนาประมาณ 3.5 cm ที่ความเร็วอากาศ 0.15 m/s (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คือ 30 °C และ 55-60% ตามลำดับ) จนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือประมาณ 16% (d.b.) (เวลาที่ใช้ในการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมประมาณ 30-40 min) (Soponronnarit, 1987) นำข้าวเปลือกเหนียวที่ผ่านการอบแห้งไปเก็บในถุงพลาสติกเข้าห้องเย็นอุณหภูมิ 4-6 °C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ก่อนทำการทดสอบคุณภาพโดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิงที่ผ่านการ Shade drying ซึ่งคุณภาพที่ทำการศึกษาได้แก่ ร้อยละต้นข้าว สมบัติทางความร้อน สมบัติด้านความหนืด สี Translucent kernel โครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติด้านการหุงต้ม สมบัติด้านเนื้อสัมผัส สมบัติด้านการย่อย และสมบัติด้านสภาพเป็นผลึก นอกจากนี้ยังทดสอบ Chain length distributions ของอะมิโลเพคตินภายในข้าวเหนียวและการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค

3.2.4 การหาความชื้นของข้าวเปลือกเหนียว

การหาความชื้นของข้าวเปลือกเหนียว โดยชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกเหนียวจำนวน 50 g ใส่ในกระป๋องความชื้น (Moisture can) นำเข้าตู้อบลมร้อน (Mettler, model no ULE500, Schwabach, Germany)

อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h จากนั้นนำมาใส่ในโถดูดความชื้นประมาณ 45 min ชั่งน้ำหนักอีกครั้ง แล้วคำนวณเป็นความชื้นมาตรฐานแห้งดังสมการที่ 3.1

$$M_d = \left(\frac{w - d}{d} \right) \tag{3.1}$$

เมื่อ M_d = ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เศษส่วน
 w = มวลของวัสดุ, g
 d = มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), g

3.2.5 การหาร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวขาว

การหาร้อยละของต้นข้าว (Head rice yield) ของข้าวเหนียวขาว มีขั้นตอนดังนี้ นำข้าวเปลือกเหนียวจำนวน 250 g มากระเทาะเปลือกด้วยเครื่องกระเทาะ (Satake, model no. THU-35, Hiroshima, Japan) นำไปขัดสี (Satake, model no. TM05, Hiroshima, Japan) จากนั้นนำไปคัดแยกเมล็ดเต็มด้วยเครื่องคัดขนาด (Satake, model no. TRG-05A, Hiroshima, Japan) ร้อยละต้นข้าวคือข้าวขาวที่มีความยาวของเมล็ดมากกว่า 75% ของความยาวทั้งหมด คำนวณจากน้ำหนักข้าวขาวที่คัดขนาดแล้วหารด้วยน้ำหนักของข้าวเปลือกเริ่มต้น ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำค่าเฉลี่ยมาแสดงผล

3.2.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวขาว

เมล็ดข้าวเหนียวขาวนำมาบดด้วยเครื่องบดเป็นแป้ง Ultra centrifugal mill (Retsch, model no. ZM 100, Hann, Germany) และนำแป้งที่บดแล้วไปร่อนผ่าน Sieve ขนาด 0.25 mm (ความชื้นของแป้งประมาณ 16% (d.b.)) เพื่อหาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของแป้งโดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter: DSC (Perkin Elmer, model no. DSC-7, Norwalk, CT) นำแป้งข้าวเหนียว 3 mg ใส่ใน Aluminium DSC pan เติมน้ำกลั่น 10 μ L ปิดฝาให้สนิททิ้งไว้เป็นเวลา 1 h ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ใช้ Indium สำหรับ Calibrate DSC empty pan เพื่อใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง รันตัวอย่างตั้งแต่อุณหภูมิ 40 จนถึง 100 °C อัตราการรันคือ 10 °C/min จะได้อุณหภูมิเริ่มต้น (Onset temperature) อุณหภูมิสูงสุด (Peak temperature) และอุณหภูมิสุดท้าย (Conclusion temperature) ของการเกิดเจลในเซชันของตัวอย่างแป้ง เอนทาลปี (Enthalpy) หาได้จากพื้นที่ของเส้นกราฟและระดับการเกิดเจลในเซชันหาได้จากสมการที่ 3.2

$$SG(\%) = \left(1 - \left[\frac{\Delta H}{\Delta H_c} \right] \right) \times 100 \tag{3.2}$$

เมื่อ	SG	=	ระดับการเกิดเจลในเซชัน (Degree of gelatinization)
	ΔH	=	เอนทาลปีของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้ง (J/g (dry matter))
	ΔH_c	=	เอนทาลปีของแป้งข้าวเหนียวอ้างอิง (J/g (dry matter))

ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำค่าเฉลี่ยมาแสดงผล

3.2.7 การทดสอบสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวขาว

แป้งข้าวเหนียวขาว (ขนาดอนุภาคของแป้งคือ 125 μm) นำไปวัดสมบัติด้านความหนืด (Pasting properties) ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer: RVA (Newport Scientific, model no. RVA-4, Warriewood, Australia) โดยใช้มาตรฐานของ AACC 61-02 (AACC, 1995) ดังนี้ แป้งข้าวเหนียวขาว จำนวน 3 g (มวลแห้ง) เติมน้ำกลั่น 25 mL ในกระบอกกวนให้เข้ากัน นำส่วนผสมแป้งมาทดสอบกับเครื่อง RVA ที่ความเร็วรอบ 960 rpm ในช่วงแรกใช้เวลา 10 s และเปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 160 rpm จนถึงเวลาสิ้นสุด สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการกวนเริ่มจาก 50 °C ใน 1.5 min แรก จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 95 °C โดยใช้อัตราการเพิ่ม 12 °C/min และรักษาระดับอุณหภูมินี้ 95 °C ประมาณ 2.5 min ต่อมาลดอุณหภูมิให้ลงมาถึง 50 °C ด้วยอัตราการลด 12 °C/min และคงอุณหภูมิที่ 50 °C ไว้ 2.1 min เวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 12.5 min กราฟที่ได้เป็นค่าความหนืดในหน่วย RVU กับเวลาที่ใช้ในการทดลอง ความหนืดสูงสุดที่ได้จากกราฟแสดงความสามารถในการอุ้มน้ำของของผสมในระหว่างการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังเป็นตัวแสดงความหนืดของเมล็ดข้าวเมื่อทำการหุงต้ม ส่วน Setback เป็นค่าที่แสดงการเกิดเจลหรือแนวโน้มการคืนตัวของแป้งข้าวเหนียวหลังจากเย็นตัวลง (Gelling or retrogradation) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าเฉลี่ยมาแสดงผล

3.2.8 การวัดสีของเมล็ดข้าวเหนียวขาว

การวัดสีของเมล็ดข้าวใช้เครื่องวัดสีแบบ HunterLab ColorFlex (Reston, VA) ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 และมุมของผู้สังเกตคือ 10° ก่อนทำการวัดสีทุกครั้ง ทำการ Calibrated เครื่องวัดสีด้วยใช้แผ่นมาตรฐานสีขาว ($X = 78.50, Y = 83.40, Z = 87.63$) ใช้ระบบ Hunter ในการแสดงค่าสีได้แก่ค่า L แสดงค่าความมืดกับสว่าง ค่า a แสดงสีแดงและสีเขียว และค่า b แสดงสีเหลืองกับน้ำเงิน นำมาคำนวณเป็นดัชนีความขาว (Whiteness Index: WI) ดังสมการที่ 3.3 (Chen et al., 1999)

$$WI = 100 - [(100-L)^2 + a^2 + b^2]^{0.5} \tag{3.3}$$

ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำค่าเฉลี่ยมาแสดงผล

3.2.9 การหาเมล็ดข้าวเหนียวขาวที่เกิดโปร่งแสง

เมล็ดข้าวเหนียวโปร่งแสง (Translucent kernel) หมายถึง เมล็ดข้าวเหนียวที่มีพื้นที่โปร่งแสงมากกว่า 50% ของพื้นที่เมล็ดทั้งหมด โดยสุ่มเมล็ดข้าวเหนียวจำนวน 1,000 เมล็ด มาคัดเลือกเมล็ดที่เกิดโปร่งแสงด้วยการสังเกตจากสายตา รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์การโปร่งแสงของเมล็ดซึ่งคำนวณจากน้ำหนักเมล็ดข้าวเหนียวโปร่งแสงหารด้วยน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำค่าเฉลี่ยมาแสดงผล

3.2.10 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดข้าวเหนียวขาว

โครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) ของเมล็ดข้าวเหนียวขาววัดด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy: SEM (JSM, JSM-5600LV, Tokyo, Japan) โดยนำเมล็ดข้าวเหนียวมาหักครึ่งเพื่อดูโครงสร้างตามแนวขวาง นำตัวอย่างเมล็ดข้าวเหนียวที่ทำการหักครึ่งแล้วไปเคลือบทอง ก่อนนำไปเข้าเครื่องทดสอบเพื่อดูโครงสร้างของเมล็ดเปรียบเทียบกับกันระหว่างข้าวเหนียวขาวที่ผ่านการอบแห้งและข้าวเหนียวขาวอ้างอิง โดยใช้ Accelerating voltage 15 kV บริเวณที่ฉายภาพคือบริเวณระหว่างผิวและใจกลางเมล็ดข้าวเหนียวขาว

3.2.11 การหาปริมาณการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวเหนียวขาว

เมล็ดข้าวเหนียวขาวจำนวน 20 g นำมาแช่ในน้ำกลั่นปริมาณ 100 mL ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 h รินน้ำออก จากนั้นนำเมล็ดข้าวเหนียวขาวที่ผ่านการแช่แล้วมาชั่งน้ำหนัก ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water uptake) ของเมล็ดข้าวเหนียวขาวคือร้อยละการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักเมล็ดข้าวเหนียวต่อน้ำหนักเมล็ดข้าวเหนียวขาวก่อนแช่ (Bean et al., 1984) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำค่าเฉลี่ยมาแสดงผล

3.2.12 การหาปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ

นำน้ำจากการแช่เมล็ดข้าวเหนียวประมาณ 80 g มาใส่ในหลอดทดลอง (Erlenmeyer flask) และทำการระเหยที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 h จากนั้นทำให้เย็นลงในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 45 min และชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ (Solid loss) หาได้จากสมการที่ 3.4

$$\text{Solid loss (\%)} = \frac{\text{Increased mass of Erlenmeyer flask}}{\text{Mass of waxy rice sample}} \times 100 \quad (3.4)$$

ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำค่าเฉลี่ยมาแสดงผล

3.2.13 การทดสอบสมบัติด้านการหุงต้ม

การทดสอบสมบัติด้านการหุงต้ม โดยการนำข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่น้ำมาวางบนซึ่งหนึ่ง ให้ความร้อนโดยใช้ไอน้ำเป็นเวลา 30 min ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 min ก่อนนำมาทำการทดสอบสมบัติด้านเนื้อสัมผัส (Juliano, 1985)

3.2.14 การทดสอบสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวขาวสุก

การทดสอบความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Stickiness) ของข้าวเหนียวสุกทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) (Stable Micro System, TA.XT.Plus, Surrey, UK) นำเมล็ดข้าวเหนียวสุกจำนวน 6 เมล็ดวางบนแผ่นอะลูมิเนียม จากนั้นกดด้วยแท่งอะลูมิเนียมทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ระยะ 90% Strain ที่อัตราทดสอบและหลังการทดสอบ 0.5 และ 1 mm/s ตามลำดับ ความแข็งของเมล็ดข้าวเหนียวสุกหาได้จากแรงสูงสุดที่ใช้กดครั้งแรก สำหรับความเหนียวคือแรงสูงสุดที่เพิ่มขึ้นหลังจากกดเมล็ดข้าวเหนียวสุกในครั้งแรก ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำค่าเฉลี่ยมาแสดงผล

3.2.15 การทดสอบสมบัติด้านการย่อยและดูดซึมแป้งข้าวเหนียวขาวสุก

การทดสอบสมบัติด้านการย่อยและดูดซึม (Starch hydrolysis) ของเมล็ดข้าวเหนียวขาวสุกตัดแปลงมาจากวิธีการของ Goni et al. (1997) โดยนำตัวอย่างข้าวเหนียวสุกจำนวน 50 mg ใส่ในหลอดทดลองขนาด 30 mL จากนั้นเติม KCl-HCl buffer pH 1.5 ประมาณ 10 mL แล้วจึงนำไปปั่นเป็นเวลา 2 min โดยใช้เครื่อง Ultra turrax homogenizer (IKA Labortechnik, T25, Staufen, Germany) และเติมสารละลาย 1 mg Pepsin (Sigma, P-7000, St. Louis, MO) ปริมาณ 0.2 mL แล้วนำไปเขย่าในอ่างน้ำร้อน (Heto-Holten A/S, SBD50, Allerød, Denmark) ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 60 min จากนั้นปรับสารละลายเป็น 25 mL โดยเติม Tris-maleate buffer (pH 6.9) ปริมาณ 15 mL ลงในขวด และเพื่อวัดอัตราการย่อยของแป้งข้าวเหนียวจะเติม Tris-maleate buffer ที่มี 2.6 IU α -amylase porcine จาก *Bacillus species* (Sigma, A-6814, St. Louis, MO) ปริมาณ 5 mL แล้วนำไปเขย่าในอ่างน้ำร้อนที่

อุณหภูมิ 37 °C โดยดูดตัวอย่างปริมาณ 0.1 mL ใส่ในหลอดทดลองทุกๆ 30 min เป็นเวลา 180 min โดยหลอดทดลองทั้งหมดจะถูกนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 min แล้วจึงเติม 0.4 M Sodium acetate buffer (pH 4.75) ปริมาณ 0.1 mL และ A myloglucosidase (เตรียมจาก *Aspergillus niger* : Sigma, A9913-10mL, St. Louis, MO) ปริมาณ 30 μ L ลงในหลอดทดลองแล้วนำไปเขย่าในอ่างน้ำร้อน อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 45 min ในขั้นตอนสุดท้ายความเข้มข้นของกลูโคสวัดโดยใช้ชุดปกรณวัด Glucose oxidase-peroxidase kit (Sigma Chemical Co., G3660-1CAP, St. Louis, MO) การคำนวณหาอัตราของการย่อยแป้งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Goni et al. (1997) คือ

$$C = C_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (3.5)$$

โดยที่ C = ร้อยละของอัตราการย่อยแป้งข้าวเหนียวที่เวลา t
 C_{∞} = ร้อยละของอัตราการย่อยแป้งข้าวเหนียวที่เวลา 180 min
 k = ค่าคงที่ของอัตราการย่อย
 t = เวลาที่ใช้ในการย่อย, min

สำหรับพื้นที่ใต้กราฟการไฮโดรไลซิส (AUC) ที่จะนำไปคำนวณหาค่า Hydrolysis index (HI) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6

$$AUC = C_{\infty}(t_f - t_0) - \left(\frac{C_{\infty}}{k}\right)(1 - \exp(-k(t_f - t_0))) \quad (3.6)$$

โดยที่ t_0 คือ เวลาเริ่มต้นที่ใช้ในการย่อย (0 min) และ t_f คือเวลาสุดท้ายที่ใช้ในการย่อย (180 min) ส่วนค่า HI คำนวณได้จากการหารพื้นที่ใต้กราฟของอัตราการย่อยตัวอย่างที่ทดสอบด้วยพื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่างอ้างอิง ซึ่งในที่นี้คือพื้นที่ใต้กราฟของอัตราการย่อยขนมปังขาว สำหรับค่า Glycemic index (GI) คำนวณได้จากสมการที่ 3.7 (Goni et al., 1997)

$$GI = 39.71 + 0.549HI \quad (3.7)$$

3.2.16 การทดสอบสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวขาว

การวัดระดับสภาพเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ของแป้งข้าวเหนียวขาว (จำนวน 0.5 g) ด้วยเครื่อง X-ray diffraction: XRD Bruker AXS D8 DISCOVER XRD (Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Germany) โดยใช้รังสี $\text{CuK}\alpha$ ขนาด 40 kV และ 40 mA ที่ความยาวคลื่น 0.1546 nm อัตราการเลี้ยวเบนรังสีที่มุม 2 θ คือ 2°/min ความเข้มสัมพัทธ์ของการเลี้ยวเบนรังสีตั้งแต่มุม 4-40° และระดับสภาพเป็นผลึก (X_c) ของตัวอย่างคำนวณได้ดังสมการที่ 3.8

$$X_c = \frac{A_c}{A_c + A_a} \times 100\%$$

(3.8)

เมื่อ X_c = ระดับสภาพเป็นผลึก, %
 A_c = พื้นที่บริเวณชั้นผลึก
 A_a = บริเวณอสัณฐาน

ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำค่าเฉลี่ยมาแสดงผล

3.2.17 การวิเคราะห์การกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพคตินในข้าวเหนียว

การวิเคราะห์การกระจายตัวของสายโซ่ (Chain length distribution) ของอะมิโลเพคติน โดยใช้ เอนไซม์อะไมเลส (Hayashibara Biochemical Laboratories, Okayama, Japan) ตามวิธีการของ Jane and Chen (1992) โดยใช้เครื่อง High-performance anion-exchange chromatography ร่วมกับ Pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD) (Dionex, DX-120, Sunnyvale, CA) ซึ่งประกอบด้วย GS50 gradient pump, AS50 automated sampler, ED50 electrochemical detector, CarboPac PA-1 analytical column (2×250 mm) และ CarboPac PA-1 guard column (2×50 mm) สารละลายเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) มี 2 ชนิด คือ 150 mM โซเดียมไฮดรอกไซด์ (สารละลาย A) และ 150 mM โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับ 500 mM โซเดียมแอสซิเตด (สารละลาย B) ใช้อัตราการไหลในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.3 mL/min ที่อุณหภูมิห้อง โดยมี Wave form ดังนี้ $E_1 = 0.05V$ ($t_1 = 0$ s), $E_2 = 0.05V$ ($t_2 = 0.20s$), $E_3 = 0.05V$ ($t_3 = 0.40s$), $E_4 = 0.75V$ ($t_4 = 0.41s$), $E_5 = 0.75V$ ($t_5 = 0.60s$), $E_6 = -0.15V$ ($t_6 = 0.61s$) และ $E_7 = -0.15V$ ($t_7 = 1.00s$) และมีค่า Gradient profile เริ่มที่ A:B = 75:25 % ($t_1 = 0$ min), A:B = 60:40 % ($t_2 = 7$ min), A:B = 10:90 % ($t_3 = 67$ min), A:B = 0:100 % ($t_4 = 67.1$ min) และ A:B = 0:100 % ($t_5 = 85$ min) และวัดการกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพคติน ตั้งแต่ช่วง DP 6 ถึง DP 49 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำค่าเฉลี่ยมาแสดงผล

3.2.18 การทดสอบด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวขาวสุก

การทดสอบด้านประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) ของข้าวเหนียวขาวสุกจำนวน 300 g ทดสอบ โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 11 คนจากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี คุณภาพที่ทดสอบได้แก่ ความขาว (Whiteness) ความเงา (Glossiness) ความเหนียว (Stickiness) ความแข็ง (Hardness) และการยอมรับโดยรวม (Overall acceptability) โดยใช้ระดับสเกลความชอบ (Hedonic scale) ตั้งแต่ 1-9 รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระดับสเกลความชอบและคุณภาพที่ทดสอบของข้าวเหนียวขาวสุก

Score	Whiteness	Glossiness	Stickiness	Hardness	Overall acceptability
9	White	Very glossy	Very sticky	Very hard	Extremely like
7	Creamy	Moderately	Moderately	Moderately hard	Moderately like
	white	glossy	sticky		
5	Slightly	Slightly	No sticky-No	Not hard-Not	Neither like nor
	brown	glossy	separated	tender	
3	Moderately	Moderately	Moderately	Moderately	Moderately
	brown	dull	separated	tender	
1	Brown	Very dull	Well separated	Very tender	Extremely dislike

3.2.19 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS® โดยใช้วิธีวิเคราะห์สถิติ ANOVA (Analysis of variance) โดยวิธี DMRT (Duncan’s multiple range tests) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

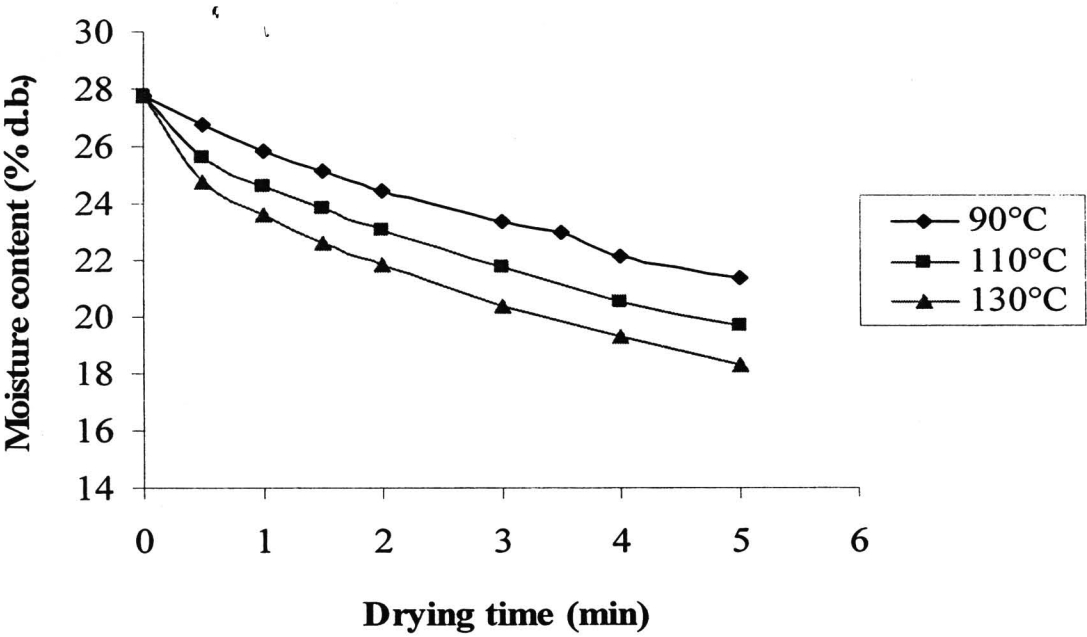
3.2.20 การพัฒนาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกเหนียว

การพัฒนาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวในระหว่างการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนกับข้าวเปลือกเหนียว โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL Multiphysics™ 3.3a (COMSOL AB, Stockholm, Sweden) ในการแก้ปัญหา สำหรับวิธีแก้ปัญหของโปรแกรมอยู่บนพื้นฐานของวิธี Finite element และใช้โมดูล Chemical Engineering (Couple Heat and Mass Transfer) แก้ปัญหาคับวิธี Direct (UMFPACK) Linear System

3.3 ผลการทดลองและวิจารณ์

3.3.1 จดณพลศาสตร์ของการอบแห้ง

รูปที่ 3.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นกับเวลาของข้าวเหนียวเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า การลดลงของความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น เวลาที่ใช้สำหรับการลดความชื้นลงเหลือประมาณ 22-24% (d.b.) อยู่ในช่วง 2-4 min แต่ความชื้นนี้ไม่เหมาะสำหรับเก็บรักษา อย่างไรก็ตามการลดลงของความชื้นหลังจากอบแห้งให้อยู่ในช่วงความชื้นนี้เป็นการรักษาคุณภาพด้านร้อยละต้นข้าว

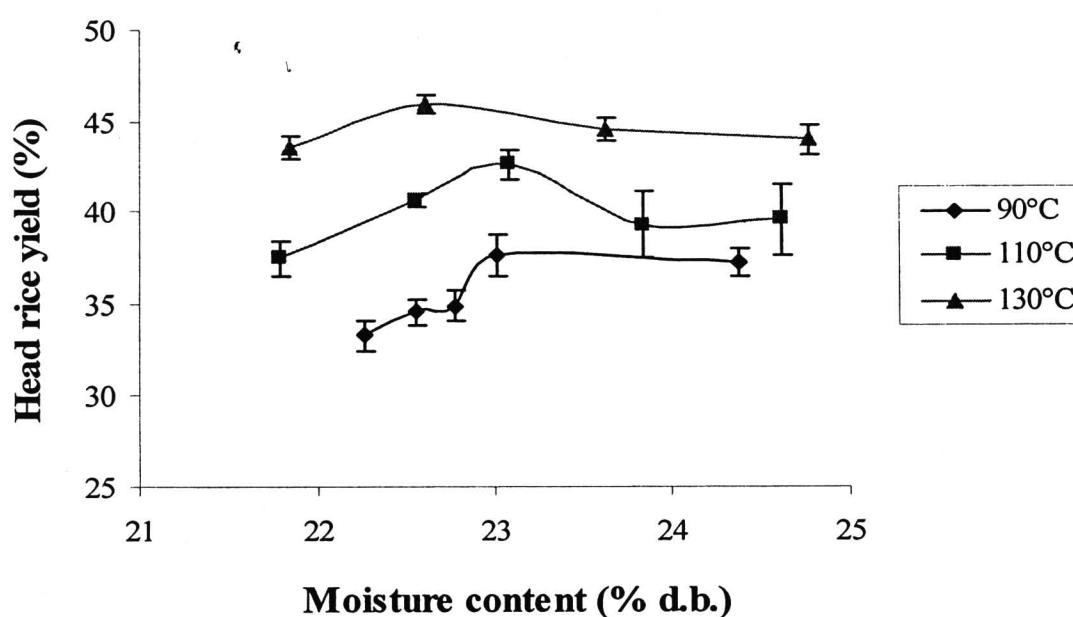


รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเหนียวกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอุณหภูมิ 90, 110 และ 130 °C

3.3.2 ผลของความชื้นและอุณหภูมิอบแห้งต่อร้อยละต้นข้าว

รูปที่ 3.3 แสดงผลของอุณหภูมิอบแห้งและความชื้นหลังจากอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่มีต่อร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวขาว จากผลการทดลอง พบว่า ร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวขาวอ้างอิงที่ได้จากการอบแห้งข้าวเปลือกเหนียวโดยวิธีตากในร่ม (Shade drying) มีค่าประมาณ 48.5% เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นทำให้ร้อยละต้นข้าวลดลงน้อยกว่าร้อยละต้นข้าวที่ได้จากอุณหภูมิ

อบแห้งที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวอ้างอิง ผลการทดลองนี้ตรงข้ามกับการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ (<60 °C) ที่อธิบายไว้ว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น เกิดความแตกต่างของความชื้นภายในเมล็ดมากขึ้น ทำให้เกิดความเครียดมากขึ้น จึงส่งผลให้สัดส่วนเมล็ดแตกร้าวมีมากขึ้น (Conssen et al., 2003) อย่างไรก็ตามสำหรับการทดลองนี้ที่ได้ผลตรงข้ามอาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของเมล็ดแป้งภายในเมล็ดข้าวเหนียวซึ่งสามารถเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเหนียวสามารถทนต่อแรงขัดในระหว่างการขัดสีได้ทำให้มีสัดส่วนรอยร้าวที่เกิดเพียงเล็กน้อยในเมล็ดข้าว และเพื่อยืนยันสมมติฐานดังกล่าวนี้ จึงมีการนำตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแล้วไปทดสอบคุณภาพเพิ่มเติมได้แก่ สมบัติทางความร้อน สมบัติด้านความหนืด และโครงสร้างทางกายภาพ ผลการทดลองจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.3 ผลของอุณหภูมิอบแห้งและความชื้นของข้าวเหนียวหลังจากอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบดต่อร้อยละต้นข้าวโดยไม่ผ่านการเก็บในที่อับอากาศ (No tempering), (ร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวอ้างอิงมีค่า 48.5%, ความชื้นเริ่มต้น = 28.8% (d.b.))

จากรูปที่ 3.3 ความชื้นของข้าวเปลือกเหนียวหลังการอบแห้งไม่ควรต่ำกว่า 22-23% (d.b.) ไม่เช่นนั้นร้อยละต้นข้าวจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อข้าวเหนียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C ข้อจำกัดของความชื้นหลังจากอบแห้งในช่วงแรกมีความคล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Srzednicki and Driscoll, 1995; Soponronnarit and Prachayawarakorn, 1994; Prachayawarakorn et al., 2005) ถึงแม้ว่าองค์ประกอบที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวมีความแตกต่างกันซึ่งในงานวิจัยก่อนหน้านี้องค์ประกอบในเมล็ดข้าวมีปริมาณอะมิโลสมากกว่าข้าวเหนียว

ร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวที่ได้หลังผ่านการอบแห้งให้ผลตรงข้ามกับกรณีอบแห้งข้าวเปลือกที่ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิมากกว่า 100 °C (Tirawanichkul et al., 2004) ซึ่งพบว่า หลังการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีปริมาณอะมิโลสประมาณ 15% มีร้อยละต้นข้าวสูงกว่าร้อยละต้นข้าวของข้าวอ้าวอ้ง แต่เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกเหนียวซึ่งมีปริมาณอะมิโลสประมาณ 4-6% ร้อยละต้นข้าวมีค่าต่ำกว่าร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวอ้าวอ้ง จากความแตกต่างนี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าปริมาณอะมิโลสมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพด้านร้อยละต้นข้าว นอกจากนี้การเกิดเจลาตินในเซชันระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง เกิดการหลอมละลายของผลึก ทำให้เพิ่มแรงต้านทานต่อเครื่องขัดสี ดังนั้นร้อยละต้นข้าวของข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจึงมีค่าสูงกว่าร้อยละต้นข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ดังนั้นสำหรับกรณีของข้าวเหนียวซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอะมิโลเพคตินการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งระหว่างการเกิดเจลาตินในเซชันเกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากโมเลกุลอยู่ห่างกันมากเพราะมีกิ่งก้านสาขาใหญ่จึงจำกัดการเคลื่อนที่เข้าหากัน (Li et al., 2008) ทำให้ความแข็งแรงต่อการขัดสีมีค่าต่ำ จึงส่งผลให้ร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวหลังการอบแห้งมีค่าต่ำกว่าร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวอ้าวอ้ง

3.3.3 ความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวระหว่างการเก็บในที่อบอากาศ

วิธีการลดความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดในขั้นตอนของการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ทำได้โดยนำตัวอย่างข้าวเหนียวซึ่งมีความชื้นประมาณ 23% (d.b.) มาเก็บไว้ในที่อบอากาศ ในโถแก้วปิดสนิท ภายในตู้อบลมร้อน โดยตั้งค่าอุณหภูมิของตู้อบเท่ากับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเหนียวหลังจากอบแห้งในเครื่องฟลูอิดไซเบค สำหรับเวลาการเก็บในที่อบอากาศอยู่ในช่วง 30-120 min



ตารางที่ 3.2 ความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดของข้าวเหนียวที่อุณหภูมิต่างๆ

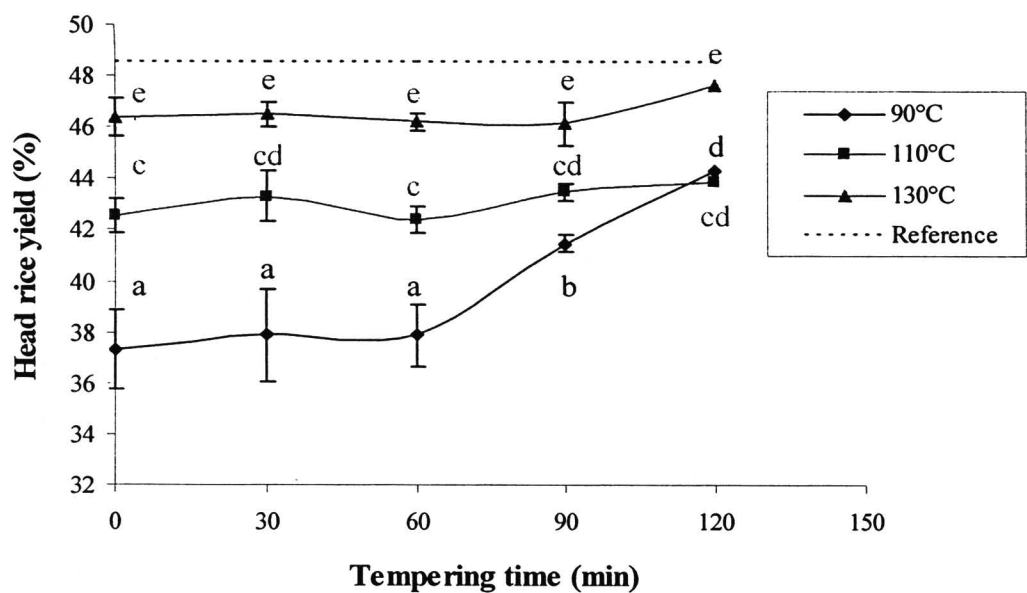
T_D (°C)	MC after FBD (% d.b.)	DT (min)	T_G (°C)	Moisture content at different tempering periods (% d.b.)			
				30	60	90	120
90	23.0	3.5	64.9	23.0	23.0	23.0	23.0
110	23.1	2.0	65.9	23.1	23.1	23.1	23.1
130	22.6	1.5	69.1	22.6	22.6	22.6	22.6

T_D = drying temperature, MC = moisture content, FBD = fluidized bed drying, DT = drying time required for fluidized bed drying, T_G = grain temperature after drying

ตารางที่ 3.2 แสดงความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดของข้าวเหนียวหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ โดยอุณหภูมิเมล็ดมีค่าระหว่าง 65-69 °C ในระหว่างขั้นตอนการเก็บในที่อับอากาศไม่มีความชื้นสูญหายออกไป และยังมีค่าเท่ากับความชื้นของข้าวเปลือกเหนียวหลังจากอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไคซ์เบด

3.3.4 ผลของระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศต่อร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวขาว

ผลของระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวขาวแสดงดังรูปที่ 3.4 พบว่า ในกรณีอบแห้งข้าวเปลือกเหนียวที่อุณหภูมิ 110 และ 130 °C ระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศไม่มีผลทำให้ร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้น แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C มีผลต่อร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวอย่างมีนัยสำคัญ



Different letters above experimental points mean that the values are significantly different ($p<0.05$)

รูปที่ 3.4 ร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวหลังจากอบแห้งและการเก็บในที่อับอากาศ

จากรูปที่ 3.4 พบว่า ร้อยละต้นข้าวเพิ่มจาก 37.5% ที่เวลาเก็บในที่อับอากาศ 60 min เป็น 44.0% ที่เวลาเก็บในที่อับอากาศ 120 min เมื่ออุณหภูมิอบแห้ง 90 °C การเพิ่มขึ้นร้อยละต้นข้าวสามารถอธิบายได้จากการเกิดเจลาทิโนเซชันระหว่างกระบวนการเก็บในที่อับอากาศดังแสดงในตารางที่ 3.3 ระดับการเกิดเจลาทิโนเซชันมีค่า 3.8% สำหรับข้าวเปลือกเหนียวที่ไม่ผ่านการเก็บในที่อับอากาศและมีค่า 10.4% สำหรับข้าวเปลือกเหนียวที่เก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา 120 min นอกจากนี้ผลของการเกิดเจลาทิโนเซชันหลังผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C อาจทำความเสียหายให้กับเมล็ดแป้งน้อย อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการเก็บในที่อับอากาศสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านร้อยละต้นข้าว จำนวนร้อยละต้นข้าวยังคงต่ำกว่าข้าวเหนียวอ้างอิง

3.3.5 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวขาว

ตารางที่ 3.3 แสดงสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง แป้งข้าวเหนียวขาวหลังการอบแห้งและการเก็บในที่อับอากาศที่เงื่อนไขต่างๆ จากผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิการเกิดเจลาทิโนเซชันของแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิงอยู่ในช่วง 61- 77 °C

หลังจากอบแห้งและเก็บในที่อับอากาศแล้ว อุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าเพิ่มขึ้น เอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมเม็ดแป้งหลังการอบแห้งมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิตอบแห้งสูงขึ้นและระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศนานขึ้น ระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชันที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบแห้งและเวลาการเก็บในที่อับอากาศ แต่อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชันมากกว่า (Tuyen et al., 2009) ระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชันในการศึกษานี้มีค่าอยู่ในช่วง 25-30% ที่อุณหภูมิอบแห้ง 130 °C และลดลงเหลือประมาณ 4-10% ที่อุณหภูมิอบแห้ง 90 °C ผลการทดสอบจากเครื่อง DSC มีความสัมพันธ์กับผลของร้อยละต้นข้าว นั่นคือระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชันสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการแตกหักในข้าวน้อยลง

ตารางที่ 3.3 ผลของอุณหภูมิอบแห้งและการเก็บในที่อับอากาศต่อสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวขาว

Condition	Transition temperature (°C)			ΔH (J/g)	Degree of gelatinization (%)
	T_{onset}	T_{peak}	$T_{conclude}$		
Reference	61.1	68.5	76.8	6.8	0
$T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, without tempering	61.5	69.2	77.9	6.6	3.8
$T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ min}$	62.0	70.0	78.4	6.5	4.8
$T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 120\text{ min}$	62.8	70.6	78.4	6.1	10.4
$T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, without tempering	61.7	69.4	78.1	5.9	14.0
$T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ min}$	62.3	69.7	78.2	5.4	20.8
$T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 120\text{ min}$	62.2	69.7	78.3	5.2	24.4
$T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, without tempering	61.8	69.5	78.2	5.1	24.6
$T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ min}$	61.9	69.5	78.4	5.0	26.4
$T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 120\text{ min}$	62.7	70.4	78.6	4.8	29.6

T = fluidized bed drying temperature (°C), t = tempering time (min), M_{in} = 28.8% (d.b.)

3.3.6 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวขาว

การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวจากเงื่อนไขต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.4 พบว่า ความหนืดสูงสุดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 110 และ 130 °C และเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา 0, 30 และ 120 min เมื่อเทียบกับความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวเหนียวอ้างอิง

ผลการทดลองสอดคล้องกับผลจากการวัดด้วย DSC นั่นคือระดับการเกิดเจลาติโนเซชันของอุณหภูมิ 110 และ 130 °C มีค่าระหว่าง 14-30%

อย่างไรก็ตาม ความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวเหนียวขาวในกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 90 °C ที่ระยะเก็บในที่ อับอากาศนาน 0 และ 30 min ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับตัวอย่างแป้งข้าวเหนียวอ้างอิง ยกเว้นในกรณีเก็บอากาศเป็นเวลา 120 min ความหนืดสูงสุดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ ความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวเหนียวอ้างอิง ผลของเจลาติโนเซชันที่มีต่อความหนืดสูงสุดได้มีการ รายงานโดย Taechapairoj et al. (2004) และ Jaisut et al. (2008) สรุปไว้ว่าการลดลงของความหนืด สูงสุดมีความเกี่ยวข้องกับระดับการเกิดเจลาติโนเซชันที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลการทดลองยัง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Anderson and Guraya (2006) รายงานว่าการทำลายโครงสร้างของ อะมิโลเพกตินและอะมิโลสในเม็ดแป้งด้วยความร้อนทำให้ความหนืดสูงสุดมีค่าลดลง

ตารางที่ 3.4 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งและระยะเวลาการ เก็บในที่อับอากาศต่างๆ

Condition	Peak viscosity (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting temperature (°C)
Reference	248.0 ± 0.3 ^b	131.4 ± 0.5 ^a	-116.6 ± 0.6 ^a	65.2 ± 0.5 ^a
T = 90 °C, without tempering	246.9 ± 1.5 ^b	137.5 ± 6.3 ^{bc}	-109.5 ± 7.8 ^b	65.6 ± 0.7 ^a
T = 90 °C, t = 30 min	245.7 ± 1.0 ^{fb}	142.9 ± 1.2 ^d	-102.8 ± 2.0 ^c	65.3 ± 0.4 ^a
T = 90 °C, t = 120 min	242.5 ± 4.5 ^{cf}	143.8 ± 1.3 ^d	-98.7 ± 3.3 ^c	65.3 ± 0.6 ^a
T = 110 °C, without tempering	244.0 ± 1.6 ^{cfg}	143.2 ± 0.9 ^d	-100.8 ± 2.6 ^c	66.7 ± 0.2 ^{bc}
T = 110 °C, t = 30 min	241.2 ± 1.2 ^{dc}	140.2 ± 1.3 ^{cd}	-101.0 ± 2.5 ^c	66.6 ± 0.4 ^b
T = 110 °C, t = 120 min	235.4 ± 1.7 ^{bc}	135.5 ± 0.8 ^{ab}	-99.9 ± 0.8 ^c	67.6 ± 0.6 ^d
T = 130 °C, without tempering	237.4 ± 1.1 ^{cd}	140.4 ± 3.3 ^{cd}	-97.0 ± 2.2 ^c	66.8 ± 0.2 ^{bc}
T = 130 °C, t = 30 min	233.0 ± 2.8 ^{ab}	135.6 ± 1.6 ^{ab}	-97.4 ± 1.5 ^c	67.5 ± 0.4 ^{cd}
T = 130 °C, t = 120 min	230.2 ± 4.3 ^a	140.5 ± 2.2 ^{cd}	-89.8 ± 2.1 ^d	68.1 ± 0.2 ^d

T = fluidized bed drying temperature (°C), t = tempering time (min), M_{in} = 28.8% (d.b.)
Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different (p≤0.05)

สำหรับค่า Setback ของแป้งข้าวเหนียวขาวหลังการอบแห้งมีค่าต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศและอุณหภูมิอบแห้งที่เปลี่ยนไปทำให้ค่า Setback เปลี่ยนแปลง โดย อุณหภูมิอบแห้งและระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศเพิ่มขึ้นทำให้ค่า Setback ลดลง การลดลงของค่า Setback ทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวแน่นขึ้น

3.3.7 สีของข้าวเหนียวขาว

ค่าดัชนีความขาว (Whiteness index: WI) เป็นค่าแสดงลักษณะสีของเมล็ดข้าวเหนียวขาวซึ่งคำนวณจากสมการที่ 3.3 ค่า WI, *L*, *a* และ *b* ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.5 ข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C มีค่า WI สูงกว่าข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ค่าความขาวที่สูงขึ้นนี้เป็นผลมาจากค่า *L* ที่มีค่าสูงสุด (ค่า *L* อยู่ระหว่าง 84.6-85.0) ค่า *L* ที่สูงขึ้นอาจเกิดจากระยะเวลาการอบแห้งสั้นและการเกิดเจลลิตินในเซชัน นั่นคือในระหว่างเกิดเจลลิตินในเซชันเม็ดแป้งยุบลงทำให้เกิดเป็นชั้น โปร่งใสจึงส่งผลเมล็ดข้าวเหนียวมีความเลื่อมมันมากขึ้น (Iyota et al., 2001; Jamradloedluk et al., 2007) ส่วนระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศที่อุณหภูมิอบแห้ง 90 °C ไม่ส่งผลต่อค่า WI, *L* และค่า *a* แต่ส่งผลต่อค่า *b* โดยค่า *b* มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บในที่อับอากาศนาน 120 min

ตารางที่ 3.5 สีของข้าวเหนียวที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งและระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศต่างๆ

Condition	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	WI
Reference	83.3 ± 0.8 ^{ab}	-0.1 ± 0.0 ^{abc}	12.2 ± 0.2 ^a	79.4 ± 0.7 ^{abcd}
<i>T</i> = 90 °C, without tempering	84.6 ± 0.4 ^{cdef}	-0.1 ± 0.0 ^{abc}	12.1 ± 0.2 ^a	80.4 ± 0.4 ^{ef}
<i>T</i> = 90 °C, <i>t</i> = 30 min	85.0 ± 0.5 ^{ef}	-0.1 ± 0.0 ^{abc}	12.4 ± 0.2 ^{ab}	80.4 ± 0.3 ^{ef}
<i>T</i> = 90 °C, <i>t</i> = 120 min	84.7 ± 0.2 ^{cdef}	-0.0 ± 0.0 ^{cde}	13.3 ± 0.1 ^{gh}	80.6 ± 0.4 ^{ef}
<i>T</i> = 110 °C, without tempering	84.6 ± 0.3 ^{cdef}	-0.1 ± 0.0 ^{abc}	12.1 ± 0.2 ^a	79.8 ± 0.4 ^{cde}
<i>T</i> = 110 °C, <i>t</i> = 30 min	84.3 ± 0.6 ^{cde}	-0.1 ± 0.0 ^{abc}	12.5 ± 0.1 ^{abcd}	79.7 ± 0.1 ^{bcde}
<i>T</i> = 110 °C, <i>t</i> = 120 min	84.7 ± 0.3 ^{cdef}	-0.2 ± 0.1 ^a	12.4 ± 0.2 ^{abc}	80.2 ± 0.1 ^{ef}
<i>T</i> = 130 °C, without tempering	83.4 ± 0.3 ^{ab}	-0.0 ± 0.0 ^{cd}	12.9 ± 0.0 ^{def}	80.3 ± 0.4 ^{ef}
<i>T</i> = 130 °C, <i>t</i> = 30 min	83.1 ± 0.5 ^a	0.1 ± 0.1 ^{de}	13.1 ± 0.4 ^{efgh}	78.6 ± 0.6 ^a
<i>T</i> = 130 °C, <i>t</i> = 120 min	83.9 ± 0.8 ^{abc}	0.0 ± 0.1 ^{bcd}	13.4 ± 0.3 ^h	79.0 ± 0.8 ^{abc}

T = fluidized bed drying temperature (°C), *t* = tempering time (min), *M*_m = 28.8% (d.b.)

Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different (*p*≤0.05)

เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น (110-130 °C) ข้าวเหนียวมีสีคล้ำขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C (สังเกตจากการลดลงของค่า L) ซึ่งเกิดจากสารสีเหลืองที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องเมื่ออุณหภูมิอบแห้งและระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศเพิ่มขึ้น ค่า a และ b จึงมีค่าเพิ่มขึ้น และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์สีทำให้ค่า WI ลดลงจาก 80.4 ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็น 79 ที่อุณหภูมิ 130 °C ซึ่งค่านี้มีความใกล้เคียงกับความขาวของข้าวเหนียวขาวอ้างอิง แต่เนื่องจากไม่มีมาตรฐานหรือข้อมูลที่ใช้เป็นแนวทางในการทดสอบสีของข้าวเหนียวขาว จึงได้มีการสอบถามจากผู้ประกอบการโรงสีซึ่งมีประสบการณ์เรื่องข้าวเหนียวเป็นเวลาหลายปี โดยนำตัวอย่างที่ใช้ทดลองไปให้วิเคราะห์หาสีที่ยอมรับได้ พบว่า ตัวอย่างที่สามารถยอมรับได้ต้องมีค่า L มากกว่า 84.4 ± 0.5 ค่า a น้อยกว่า 0.54 ± 0.1 และค่า b ต้องต่ำกว่า 15.1 ± 0.1

เมื่อดูจากเกณฑ์ค่าสีที่สามารถยอมรับได้ เมื่อนำมาคำนวณเป็น WI มีค่าเท่ากับ 78.3 ± 0.4 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับค่า WI ของตัวอย่างข้าวเหนียวในตารางที่ 3.5 ในขณะที่ค่า a และ b ของข้าวเหนียวที่สามารถยอมรับได้และข้าวเหนียวในตารางที่ 3.5 มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้น ค่า WI อาจไม่เหมาะสมในการใช้เป็นมาตรฐานสี เมื่อค่า a และ b ส่งผลต่อการคำนวณค่า WI น้อยกว่าค่า L

3.3.8 เมล็ดโปร่งแสงของข้าวเหนียวขาว

เมล็ดโปร่งแสง (Translucent kernel) หมายถึง เมล็ดข้าวเหนียวที่ผิดปกติหรือมีตำหนิและไม่ใช่ที่ต้องการของโรงสี (Patindol and Wang, 2003) ซึ่งข้าวเหนียวที่ผิดปกตินี้มีส่วนสำคัญที่ทำให้คุณภาพของข้าวเหนียวลดลงจากข้าวเหนียวคุณภาพชั้นเยี่ยม (Premium grade) ตารางที่ 3.6 แสดงร้อยละการเกิดเมล็ดโปร่งแสงหลังการอบแห้งข้าวเหนียวที่เงื่อนไขต่างๆ เมล็ดข้าวเหนียวเริ่มมีเมล็ดโปร่งแสงที่อุณหภูมิอบแห้ง 130 °C ณ อุณหภูมินี้ ร้อยละเมล็ดโปร่งแสงมีค่าประมาณ 3% และเพิ่มขึ้นเป็น 10% เมื่อระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศ 120 min การเกิดขึ้นของเมล็ดโปร่งแสงอาจเกิดจากการแตกออกของเม็ดแป้งดังแสดงในรูปที่ 3.5f นำไปสู่ลักษณะที่เหมือนกันทั้งเมล็ด (Homogeneous phase) ซึ่งแสดงว่าระดับการเกิดเจลาทิโนเซชันในเมล็ดโปร่งแสงมีมากกว่าเมล็ดขาวขุ่น เพื่อเป็นการยืนยันสมมติฐานดังกล่าว จึงนำข้าวเหนียวที่เกิดเมล็ดโปร่งแสงไปทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่าข้าวเหนียวเกิดเจลาทิโนเซชันสมบูรณ์ (ระดับการเกิดเจลาทิโนเซชันเป็น 100%)

ตารางที่ 3.6 ร้อยละของข้าวเหนียวที่มีเมล็ดโปร่งแสงที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งและระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศต่างๆ

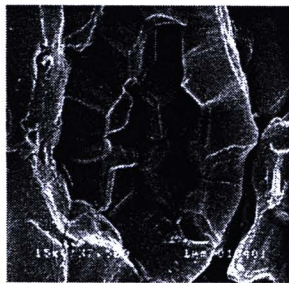
Condition	Translucent kernel (%)
Reference	0
$T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$, without tempering	0
$T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$, tempering time of 30 min	0
$T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$, tempering time of 120 min	0
$T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$, without tempering	0
$T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$, tempering time of 30 min	0
$T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$, tempering time of 120 min	0
$T=130\text{ }^{\circ}\text{C}$, without tempering	2.9 ± 0.2
$T=130\text{ }^{\circ}\text{C}$, tempering time of 30 min	7.8 ± 0.0
$T=130\text{ }^{\circ}\text{C}$, tempering time of 120 min	10.4 ± 0.3

T = fluidized bed drying temperature ($^{\circ}\text{C}$), $M_{in} = 28.8\%$ (d.b.)

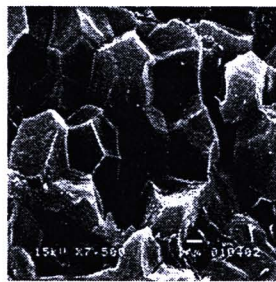
3.3.9 โครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดข้าวเหนียวขาว

รูปที่ 3.5a-f แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างข้าวเหนียวทดสอบโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) โดยรูปที่ 3.5a-e แสดงโครงสร้างเม็ดแป้งภายในเมล็ดข้าวเหนียวขาวขุนโดยใช้เงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิและระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศต่างๆ รวมทั้งเมล็ดข้าวเหนียวอ้างอิง เม็ดแป้งของข้าวเหนียวอ้างอิงมีลักษณะรูปร่าง 5 เหลี่ยมและมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง $2\text{-}9\text{ }\mu\text{m}$ (ดูรูปที่ 3.5a)

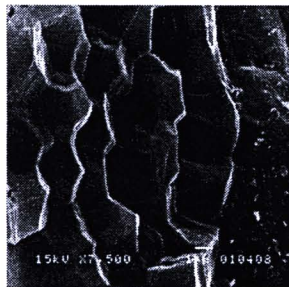
รูปที่ 3.5b และ 3.5c แสดงโครงสร้างเม็ดแป้งของข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าโครงสร้างของเม็ดแป้งมีลักษณะคล้ายกับเม็ดแป้งของข้าวเหนียวอ้างอิง แม้ว่ามีเม็ดแป้งบางส่วนเกิดเจลาทิไนเซชัน (3.8-10.4%) ที่ทำให้รูปร่างเดิมเสียไปและเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่ออบแห้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิ 110 และ $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ดูรูปที่ 3.5d และ 3.5e) สังเกตพบว่ามีเม็ดแป้งบางส่วนหลอมละลายเข้าด้วยกันซึ่งช่วยต้านทานการแตกหักของเมล็ดข้าวในระหว่างการขัดสี ในรูปที่ 3.5f แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดที่เกิดการโปร่งแสงได้จากเงื่อนไขการอบแห้ง $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าไม่เหลือโครงสร้างของเม็ดแป้งดั้งเดิม



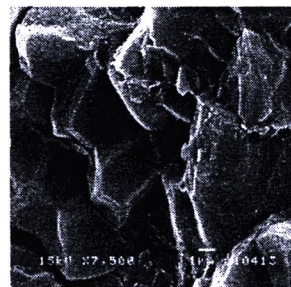
(a) Rewetted waxy rice
(Opaque white kernel)



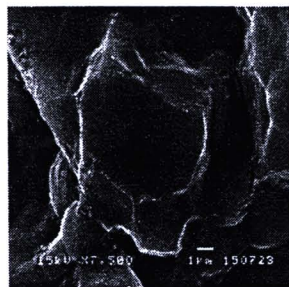
(b) Waxy rice dried at 90 °C with no tempering
(Opaque white kernel)



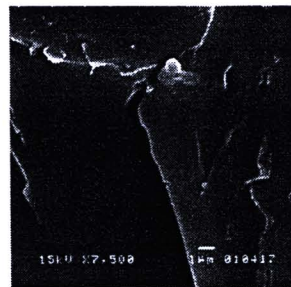
(c) Waxy rice dried at 90 °C
and tempered for 120 min
(Opaque white kernel)



(d) Waxy rice dried at 110 °C
and tempered for 120 min
(Opaque white kernel)



(e) Waxy rice dried at 130 °C
and tempered for 120 min
(Opaque white kernel)



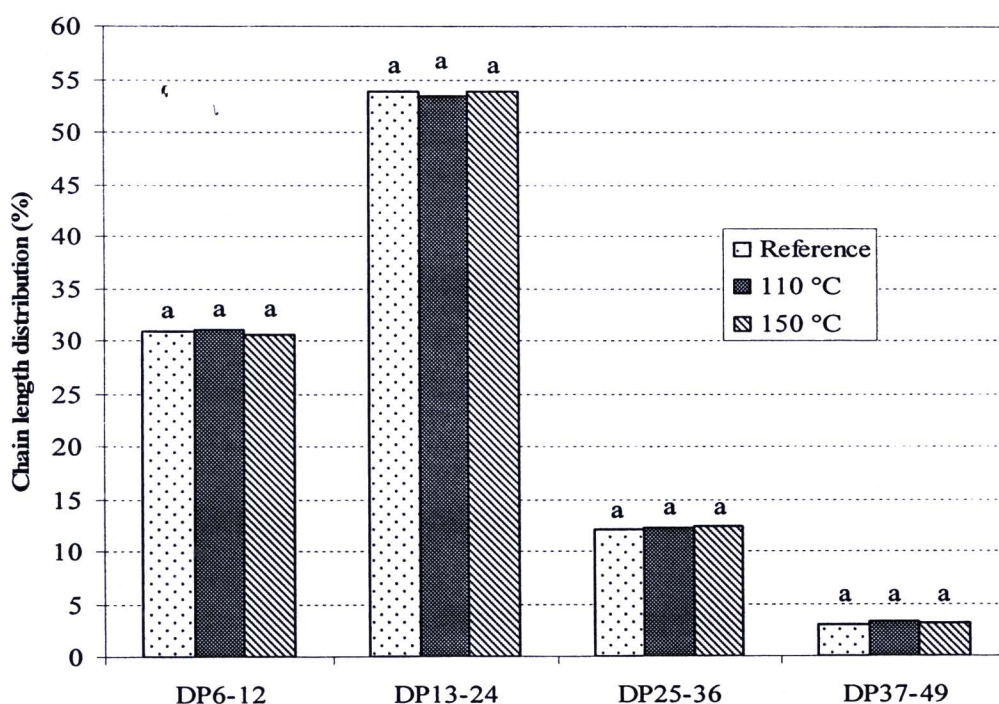
(f) Waxy rice dried at 130 °C
and tempered for 120 min
(Translucent kernel)

รูปที่ 3.5 โครงสร้างเม็ดแป้งของข้าวเหนียวอ้างอิง ข้าวเหนียวเมล็ดขาวขุ่นและเมล็ดโปร่งแสงจากเงื่อนไขการอบแห้งและระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศต่างๆ

3.3.10 การกระจายสายโซ่อะมิโลเพคตินภายในสตาร์ชข้าวเหนียว

รูปที่ 3.6 แสดงการกระจายสายโซ่อะมิโลเพคตินภายในสตาร์ชข้าวเหนียวอ้างอิงและข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 และ 150 °C พบว่า การกระจายสายโซ่แบ่งเป็นสายโซ่สั้น (Short chains)

ได้แก่ DP6-12 กับ DP13-24 และสายโซ่ยาว (Long chains) ได้แก่ DP25-36 กับ DP37-49 (Bertoft, 2004) สัดส่วนของสายโซ่อะมิโลเพคตินภายในสตาร์ชข้าวเหนียวที่มีค่ามากที่สุดคือ DP13-24 ซึ่งมีค่าประมาณ 53.5-53.9% ในขณะที่สัดส่วนสายโซ่อะมิโลเพคตินที่มีค่าน้อยที่สุดคือ DP37-49 (3.0-3.2%) สัดส่วนของสายโซ่สั้นของโมเลกุลอะมิโลเพคตินที่มีมากกว่าสายโซ่ยาว จึงส่งผลให้ข้าวเหนียวมีเนื้อสัมผัสนุ่มหลังจากการหุงต้ม (Ong and Blanshard, 1995; Nakamura et al., 2006) การกระจายสายโซ่อะมิโลเพคตินทั้งสายโซ่สั้นและสายโซ่ยาวในตัวอย่างข้าวเหนียวหลังจากการอบแห้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวเหนียวอ้างอิง ซึ่งแสดงว่าเจลาติไนเซชันที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งไม่ทำให้สัดส่วนของสายโซ่ของอะมิโลเพคตินเปลี่ยนแปลง



Similar superscripts in the same group mean that the values are not significantly different ($p < 0.05$)

รูปที่ 3.6 การกระจายสายโซ่อะมิโลเพคตินภายในสตาร์ชข้าวเหนียว

3.3.11 ปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งละลายในน้ำของเมล็ดข้าวเหนียวขาว

ตารางที่ 3.7 แสดงปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งละลายในน้ำของข้าวเหนียวที่เมล็ดขาวนุ่นและเมล็ดโปร่งแสง พบว่าข้าวเหนียวขาวอ้างอิงมีปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งละลายในน้ำคือ 33.7 และ 2.4% ตามลำดับ ปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งละลายในน้ำของข้าวเหนียวขาวนุ่นหลังจากอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งละลายในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศ

ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งละลายในน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งที่ 90 °C อาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของระดับเจลาทิโนเซชันที่ระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศทั้ง 30 และ 120 min มีค่าน้อยเกินไป สำหรับเมล็ดโปร่งแสงไม่สามารถหาปริมาณการดูดซับน้ำได้เนื่องจากเมล็ดข้าวเหนียวแตกออกทำให้เม็ดแบ่งละลายไปกับน้ำที่แช่ ประกอบกับมีสัดส่วนสายโซ่สั้นของอะมิโลเพกตินอยู่มาก (รูปที่ 3.6) จึงส่งผลให้ อะมิโลเพกตินละลายออกมาได้มาก

ตารางที่ 3.7 สมบัติด้านการหุงต้มและสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวสุกที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ

Processing condition	Cooking properties of milled		Textural properties of cooked	
	waxy rice		waxy rice	
	Water uptake (%)	Solid loss (%)	Hardness (N)	Stickiness (N)
Reference (opaque)	33.7 ± 0.6 ^a	2.4 ± 0.0 ^a	52.1 ± 4.2 ^a	0.9 ± 0.6 ^a
T = 90 °C, t = 30 min (opaque)	37.8 ± 0.6 ^b	2.9 ± 0.2 ^b	49.4 ± 3.6 ^{ab}	1.1 ± 0.5 ^a
T = 90 °C, t = 120 min (opaque)	39.3 ± 0.2 ^b	3.1 ± 0.0 ^b	45.0 ± 6.2 ^{abc}	1.3 ± 0.5 ^{ab}
T = 110 °C, t = 30 min (opaque)	43.6 ± 1.4 ^c	3.6 ± 0.2 ^c	43.4 ± 1.2 ^{bc}	1.6 ± 0.6 ^{ab}
T = 130 °C, t = 30 min (opaque)	49.5 ± 1.5 ^c	5.4 ± 0.1 ^d	37.7 ± 2.3 ^c	2.0 ± 0.1 ^b
T = 150 °C, t = 30 min (opaque)	55.7 ± 1.9 ^d	6.6 ± 0.2 ^c	30.6 ± 3.2 ^d	2.0 ± 0.1 ^b
T = 150 °C, t = 30 min (translucent)	N/A	100	N/A	N/A

T = fluidized bed drying temperature (°C), t = tempering time (min), M_{in} = 28.8% (d.b.), N/A= not available

Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different ($p<0.05$)

ปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งละลายในน้ำของข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับการเกิดเจลาทิโนเซชันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในระหว่างการเกิดเจลาทิโนเซชัน เม็ดแบ่งแตกตัวและมีเม็ดแบ่งบางส่วนหลอมละลายเข้าด้วยกัน (รูปที่ 3.5b-e) ประกอบกับมีสัดส่วนสายโซ่สั้นอยู่มาก ดังนั้นเมื่อนำเมล็ดข้าวเหนียวไปแช่น้ำ เมล็ดข้าวเหนียวสามารถดูดซับน้ำ เนื่องจากโครงร่างผลึกถูกทำลาย โมเลกุลอะมิโลเพกตินไหลออกมาละลายในน้ำมากขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำมีค่ามากขึ้น จากผลการทดลองนี้ พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งละลายน้ำสำหรับข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งไม่เหมือนกับกรณีข้าวเจ้า (ปริมาณอะมิโลสประมาณ 15% หรือมากกว่า)

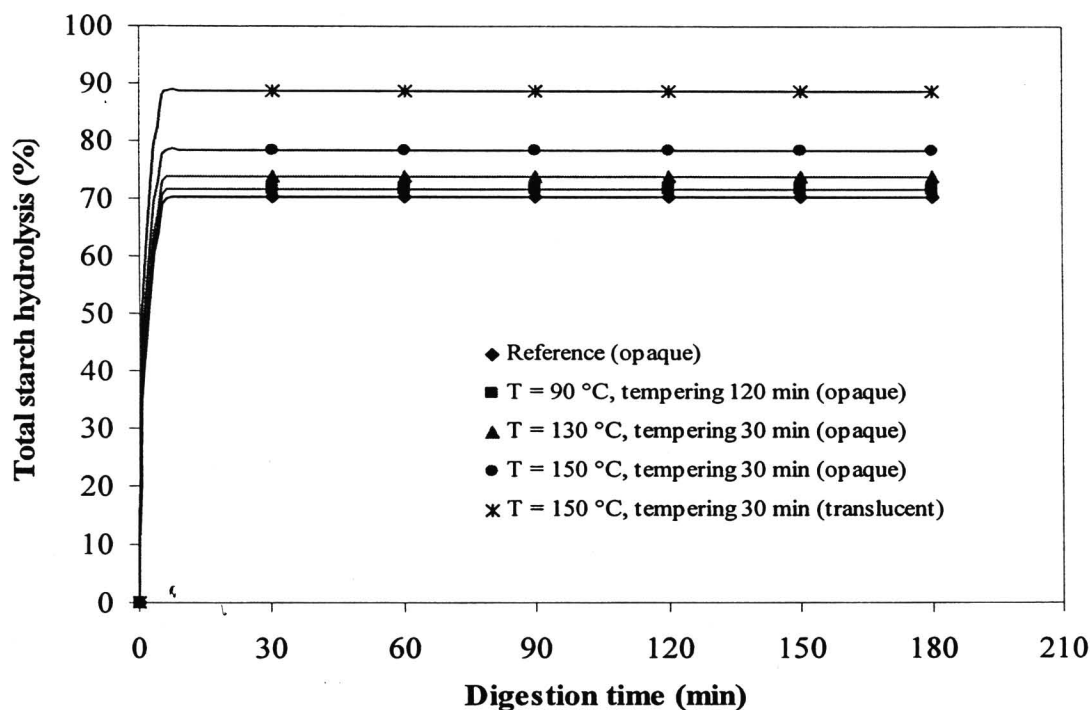
(Soponronnarit et al., 2008; Gujral and Kumar, 2003) ซึ่งในข้าวเจ้าปริมาณของแข็งละลายน้ำลดลงเมื่อระดับเจลาทีโนเซชันเกิดขึ้นบางส่วนหรือเกิดอย่างสมบูรณ์ในเมล็ดข้าว

3.3.12 สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวเหนียวสุก

ความแข็งและความเหนียวของข้าวเหนียวสุกแสดงดังตารางที่ 3.7 ความแข็งและความเหนียวของข้าวเหนียวสุกอ้างอิงมีค่า 52.1 N และ 0.9 N ตามลำดับ โดยความแข็งของข้าวเหนียวสุกมีค่าต่ำกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (Singh et al., 2005) และแสดงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวสุกนุ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าข้าวเหนียวมีจำนวนสายโซ่อะมิโลเพคตินสั้น ซึ่งได้อธิบายไปก่อนหน้านี้แล้ว อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อความแข็งและความเหนียวมาก นั่นคืออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นเป็นเหตุให้ความแข็งลดลงและความเหนียวเพิ่มขึ้นและได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 3.3.11 อย่างไรก็ตามเนื้อสัมผัสของเมล็ดโปร้งแสงไม่สามารถวัดได้เนื่องจากปริมาณของแข็งละลายไปกับน้ำแช่เกือบหมด

3.3.13 สมบัติด้านการย่อยและดูดซึมของแป้งข้าวเหนียวสุก

อัตราการย่อยและดูดซึมของตัวอย่างข้าวเหนียวสุกที่เงื่อนไขต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.7 จากผลการทดลองพบว่าอัตราการย่อยและดูดซึมของตัวอย่างข้าวเหนียวมีค่าสูงสุดที่เวลาของการย่อยประมาณ 30 min ข้าวเหนียวอ้างอิงแสดงการย่อยและดูดซึมต่ำที่สุดมีค่าประมาณ 70.2% การย่อยและดูดซึมมีค่าสูงขึ้นเมื่อตัวอย่างข้าวเหนียวผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น จากรูปที่ 3.7 ข้าวเหนียวเมล็ดโปร้งแสงซึ่งเกิดเจลาทีโนเซชันสมบูรณ์แสดงการย่อยและดูดซึมสูงสุด



รูปที่ 3.7 *In vitro* starch hydrolysis ของข้าวเหนียวอ้างอิงและข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งเงื่อนไขต่างๆ

ตารางที่ 3.8 แสดงพารามิเตอร์ C_{∞} และ k ค่า Hydrolysis Index (HI) และ Glycemic Index (GI) ของตัวอย่างข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดของข้าวเหนียวที่อบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไรเซชันมีค่าสูงกว่าข้าวเหนียวอ้างอิง โดยค่า GI ของข้าวเหนียวอ้างอิงมีค่า 108 แสดงถึงการย่อยและดูดซึมแป้งข้าวเหนียวมีค่ามากกว่าการย่อยและดูดซึมขนมปังขาว (GI = 100) ค่า GI ของข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 มีค่าใกล้เคียงการย่อยและดูดซึมของข้าวเหนียวพันธุ์ Karaya (GI = 109.2) และข้าวเหนียวพันธุ์ Yunuo No. 1 (GI = 106.3) ซึ่งรายงานโดย Frei et al. (2003) และ Hu et al. (2004) ค่า GI เพิ่มขึ้น 1% สำหรับข้าวเหนียวที่อบแห้งอุณหภูมิ 90 °C และ 8% ที่อุณหภูมิ 150 °C ในกรณีของเมล็ดโปร่งแสงมีค่า GI เพิ่มขึ้น 16% สำหรับเหตุผลที่ค่า GI ของข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งมีค่าสูงเกิดจากเมล็ดแป้งเกิดเจลลาทีนเซชัน (Chung et al., 2006) เมื่อเมล็ดแป้งข้าวเหนียวถูกอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ชันผลึกเกิดการแตกตัวหรือทำลายโครงสร้างทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยแป้งได้ง่ายขึ้น

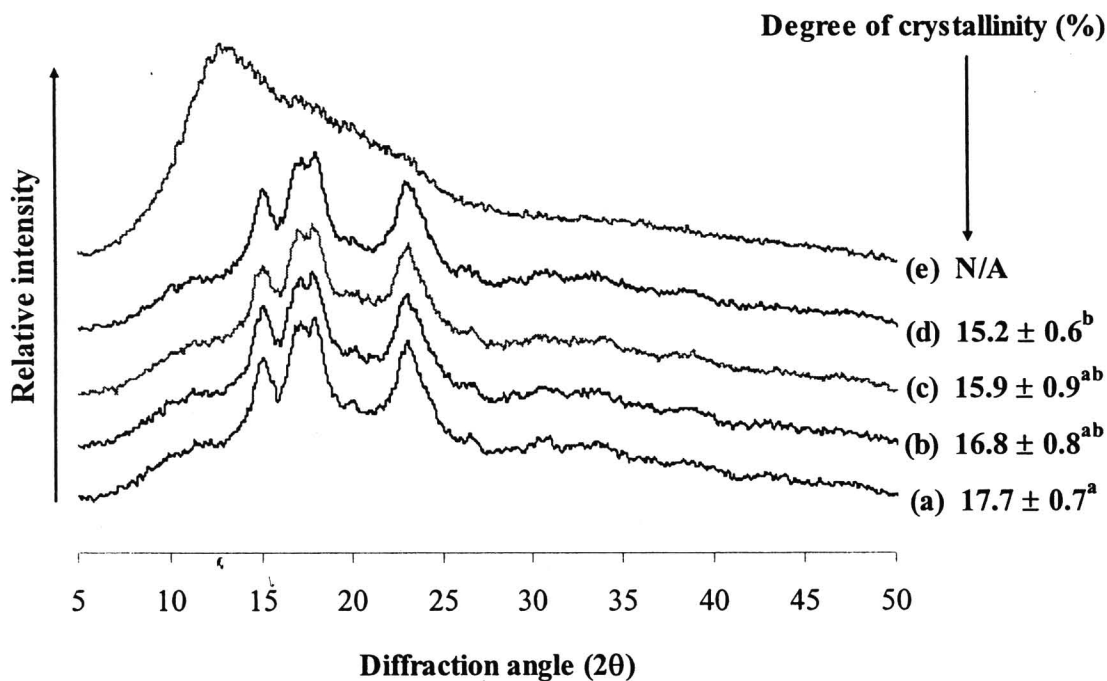
ตารางที่ 3.8 อัตราการย่อยและดูดซึมของแป้งข้าวเหนียวขาวที่เงื่อนไขต่างๆ

Processing condition	C_{∞} (%)	k (min^{-1})	HI	GI
Reference (opaque)	70.2	0.83	125.5 ± 2.8^a	108.6 ± 1.6^a
$T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 120\text{ min}$ (opaque)	71.8	0.83	127.5 ± 1.4^{ab}	109.7 ± 0.8^{ab}
$T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ min}$ (opaque)	73.8	0.92	132.1 ± 1.8^b	112.2 ± 1.0^b
$T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ min}$ (opaque)	78.4	0.95	140.3 ± 0.2^c	116.7 ± 0.1^c
$T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ min}$ (translucent)	88.6	0.98	158.6 ± 6.0^d	126.6 ± 3.3^d

T = Fluidized bed drying temperature ($^{\circ}\text{C}$), t = Tempering time (min), M_{in} = 28.8% (d.b.)
Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different ($p<0.05$)

3.3.14 สมบัติด้านสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียว

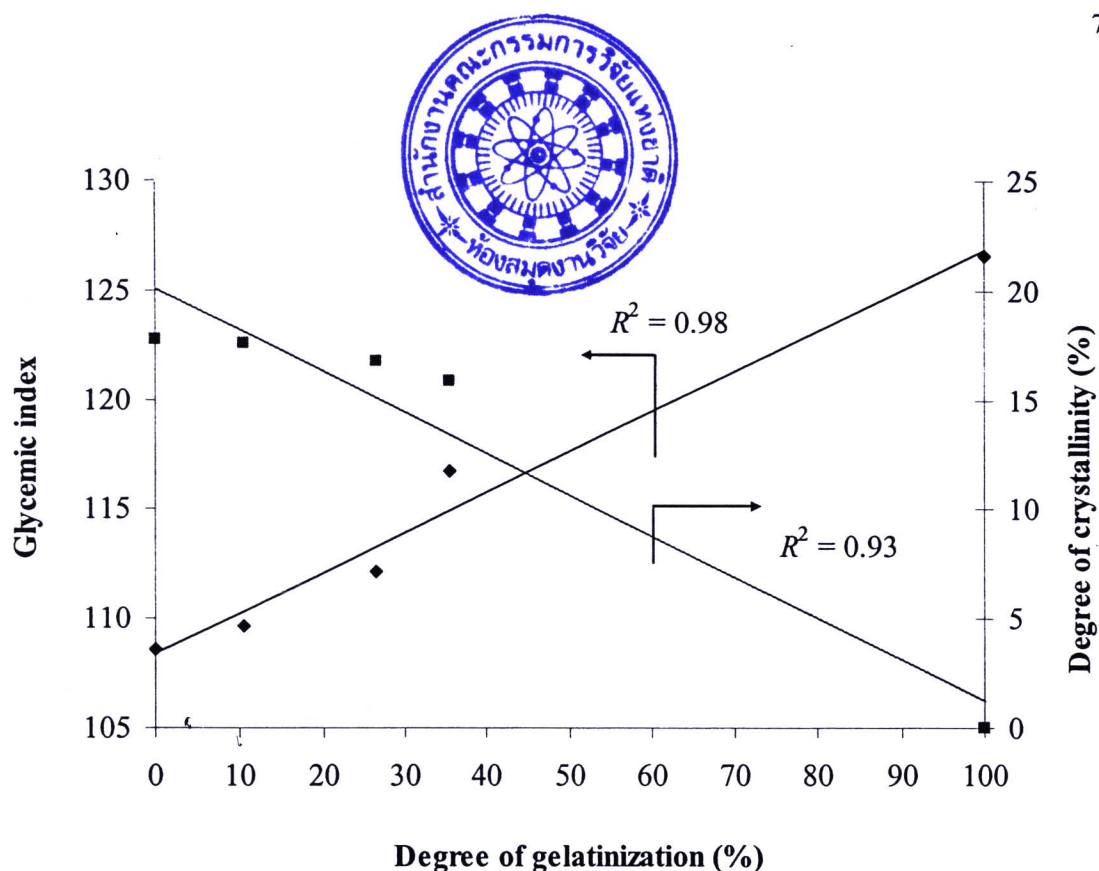
รูปที่ 3.8 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และระดับสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวก่อนและหลังการอบแห้ง แป้งข้าวเหนียวอ้างอิงมีรูปร่างผลึกเป็นแบบ A-type ด้วยการเลี้ยวเบนมุมคู่ $2\theta = 17^{\circ}$ กับ 18° และมุมเดี่ยวที่ $2\theta = 15^{\circ}$ และ 23° ซึ่งผลการทดลองนี้ใกล้เคียงกับผลึกของข้าวทั่วไป รายงานโดย Ong and Blanshard (1995) ระดับสภาพเป็นผลึกของข้าวเหนียวอ้างอิงมีค่า 17.7% และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อข้าวเหนียวผ่านการอบแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นสามารถทำลายโครงสร้างผลึกของเมล็ดแป้ง จากรูปที่ 3.8 ระดับการสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวขาวรุ่นคือ 16.8, 15.9 และ 15.2% เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 90, 130 และ 150 $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ อุณหภูมิอบแห้งอยู่ในช่วง 90-130 $^{\circ}\text{C}$ ทำให้ระดับสภาพเป็นผลึกไม่มีความแตกต่างจากสภาพเป็นผลึกของข้าวเหนียวอ้างอิง ในทางกลับกันอุณหภูมิอบแห้ง 150 $^{\circ}\text{C}$ มีค่าลดลงและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับเมล็ดโปร่งแสงระดับสภาพเป็นผลึกไม่สามารถตรวจสอบหาการเลี้ยวเบนที่มุมต่างๆ ได้



รูปที่ 3.8 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และระดับสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียว; (a) ข้าวเหนียวอ้างอิง (Opaque); (b) $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 120\text{ min}$ (Opaque); (c) $T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ min}$ (Opaque); (d) $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ min}$ (Opaque); (e) $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ min}$ (Translucent) (T = Fluidized bed drying temperature ($^{\circ}\text{C}$), t = Tempering time (min), $M_{in} = 28.8\%$ (d.b.))

3.3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน GI และระดับสภาพเป็นผลึกของข้าวเหนียวขาว

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน GI และ ระดับสภาพเป็นผลึกแสดงดังรูปที่ 3.9 ค่า GI และระดับสภาพเป็นผลึก มีความสัมพันธ์กับระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน R^2 -values คือ 0.98 และ 0.93 ตามลำดับ จากความสัมพันธ์สามารถสรุปได้ว่า การที่โครงสร้างผลึกของแป้งข้าวเหนียวถูกทำลายเนื่องจากความร้อน ผลึกหลอมละลายมากขึ้นทำให้เอนไซม์ย่อยง่ายขึ้น ส่งผลให้ค่า GI สูงขึ้น และค่า GI สัมพันธ์ในด้านบวกกับระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน แต่ตรงข้ามกับระดับสภาพเป็นผลึกลดลงของแป้งข้าวเหนียวขาว



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดเจลาตินในเซชัน ค่า GI และระดับสภาพเป็นผลึกของข้าวเหนียวขาว

3.3.16 การทดสอบด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวขาวสุก

ตารางที่ 3.9 แสดงผลการทดสอบด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวขาวสุกที่เงื่อนไขต่างๆ ในด้านความขาว ความเลื่อมมัน ความเหนียว ความแข็ง และการยอมรับโดยรวม ตัวอย่างข้าวเหนียวขาวสุกที่ใช้ในการทดสอบคัดเลือกเฉพาะเมล็ดขาวนุ่น ผลการทดสอบ พบว่า ความขาว ความเลื่อมมัน และความเหนียวของข้าวเหนียวขาวสุกหลังผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดอุณหภูมิต่างๆ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากตัวอย่างข้าวเหนียวขาวอ้างอิงสุก เมล็ดข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งภายหลังการหุงต้มสุกมีลักษณะสีขาวนวล (Creamy white) ค่อนข้างเลื่อมมันและเหนียว แต่อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อความแข็งของข้าวเหนียวขาวสุกอย่างมีนัยสำคัญ โดยข้าวเหนียวขาวสุกมีความนุ่มขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่า 110 °C ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการวัดด้วยเครื่องมือวัดเนื้อสัมผัส โดยผู้ทดสอบมีความชอบโดยรวมต่อข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งไม่แตกต่างจากข้าวเหนียวอ้างอิง สเกลยอมรับโดยรวมอยู่ระหว่าง 6.6-7.2 แสดงว่าผู้ทดสอบค่อนข้างชอบข้าวเหนียวขาวสุก

ตารางที่ 3.9 การทดสอบด้านประสาทสัมผัสต่อความชอบของข้าวเหนียวภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ

Processing condition	Whiteness	Glossiness	Stickiness	Hardness	Overall acceptability
Reference	7.4 ± 0.5 ^a	8.0 ± 0.9 ^a	8.4 ± 0.7 ^a	7.6 ± 0.7 ^a	7.2 ± 0.6 ^a
T = 90 °C, t = 30 min	7.4 ± 0.5 ^a	8.0 ± 0.9 ^a	8.4 ± 0.7 ^a	7.6 ± 0.7 ^{ab}	7.1 ± 0.7 ^a
T = 90 °C, t = 120 min	7.3 ± 0.5 ^a	7.9 ± 0.8 ^a	8.4 ± 0.7 ^a	7.0 ± 0.4 ^{bc}	7.0 ± 0.8 ^a
T = 110 °C, t = 30 min	7.3 ± 0.5 ^a	8.2 ± 0.8 ^a	8.6 ± 0.5 ^a	7.3 ± 0.6 ^{abc}	6.8 ± 0.6 ^a
T = 130 °C, t = 30 min	7.3 ± 0.5 ^a	8.2 ± 0.8 ^a	8.6 ± 0.5 ^a	7.0 ± 0.4 ^{bc}	7.0 ± 0.9 ^a
T = 150 °C, t = 30 min	7.3 ± 0.5 ^a	8.1 ± 0.8 ^a	8.6 ± 0.5 ^a	6.7 ± 0.6 ^c	6.6 ± 0.8 ^a

T = Fluidized bed drying temperature (°C), t = Tempering time (min), M_{in} = 28.8% (d.b.)
Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different (p<0.05)

3.3.17 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.3.17.1 สมมติฐานและสมการที่ใช้สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายความชื้นและอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกเหนียว 1 เมล็ด มีสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

- 1. ลักษณะทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นทรงรี
- 2. ค่าการแพร่ความร้อน (α) มีค่าคงที่
- 3. การถ่ายโอนความร้อนภายในเมล็ดข้าวเกิดขึ้นตามแนวรัศมี
- 4. ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในเมล็ด
- 5. ไม่มีการหดตัวของปริมาตรระหว่างการอบแห้ง

สมการที่ใช้ในการทำนายการถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อนภายในเมล็ดข้าวเปลือกเหนียว มีดังนี้

$$\rho_g c_{pg} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

(3.9)

สำหรับการถ่ายโอนมวลภายในเมล็ดข้าวเปลือกเหนียว มาจากกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's second law) ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \tag{3.10}$$

เงื่อนไขเริ่มต้น ดังนี้

$$\text{ที่ } t = 0, \qquad T = T_i = 30 \text{ }^{\circ}\text{C} \tag{3.11}$$

$$M = M_i = 0.28 \text{ decimal (d.b.)} \tag{3.12}$$

เงื่อนไขขอบเขตที่ผิวของข้าวเปลือกเหนียว มีดังนี้

- กรณีการถ่ายโอนความร้อน

$$-k_g \frac{\partial T}{\partial x} = h_c (T_s - T_{\infty}) - h_{fg} \frac{dM}{dt} \tag{3.13}$$

เมื่อ เทอมด้านซ้ายมือ หมายถึง การนำความร้อนจากผิวข้าวเปลือกด้านนอกเข้ามาภายในเมล็ดข้าวเหนียว เทอมแรกของการสมการทางขวามือ หมายถึง การพาความร้อนจากอากาศร้อนมายังผิวข้าวเปลือก และเทอมที่ 2 ของสมการทางขวามือ หมายถึง ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

- กรณีการถ่ายโอนมวล

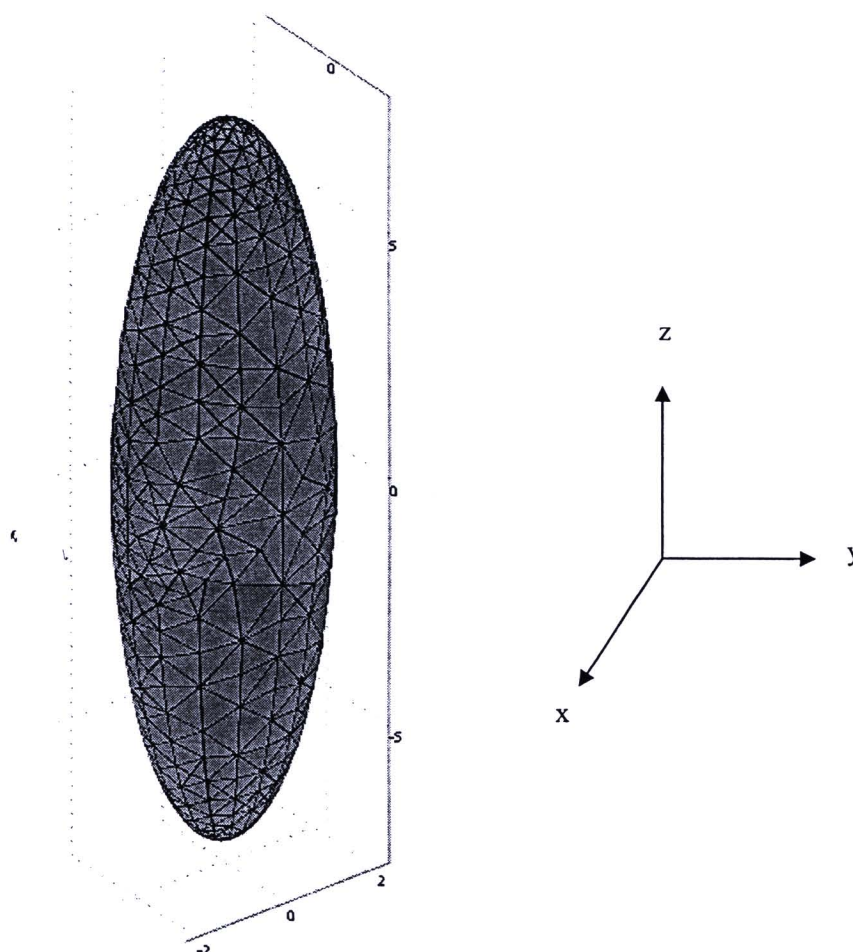
$$-D_{\text{eff}} \nabla M = h_m (M_s - M_e) \tag{3.14}$$

เทอมด้านซ้ายมือ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของความชื้นโดยการแพร่ภายในเมล็ดข้าวเหนียว ส่วนเทอมทางขวามือหมายถึงการถ่ายโอนมวลออกจากผิวเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวจนถึงความชื้นสมดุล (M_e) ในกรณีที่ศึกษานี้ สมมติให้ $M_e = 0$ สำหรับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 110-150 °C เนื่องจากอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีค่ามากกว่าอุณหภูมิน้ำเดือด ส่วนอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 °C ใช้ $M_e = 0.0001$ (d.b.)

สำหรับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.2.2

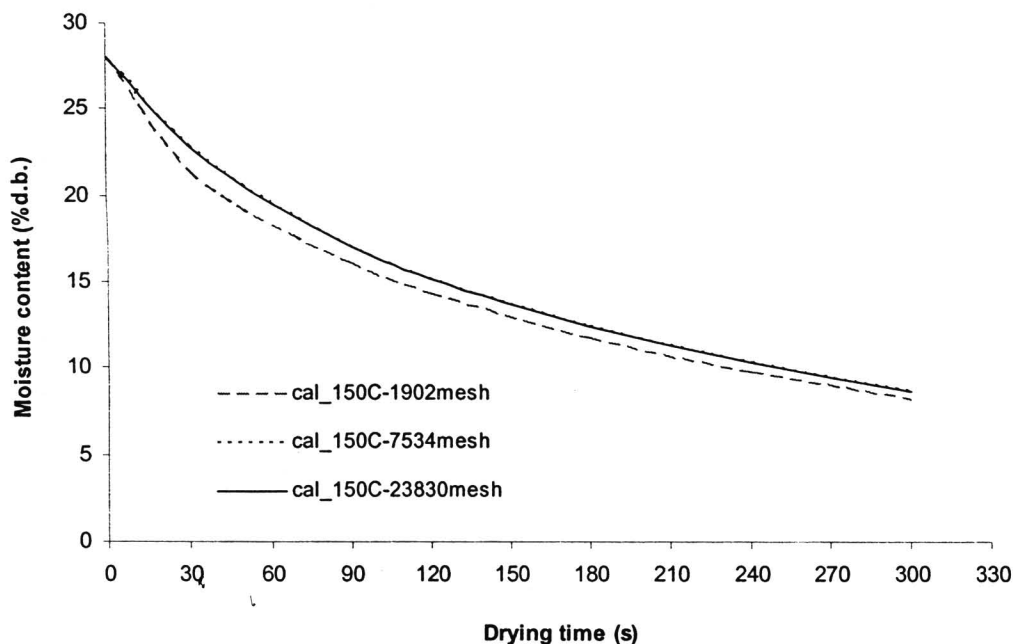
3.3.17.2 รูปทรงของเมล็ดข้าว

รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวที่ใช้สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 3.10 จำนวน Element ที่ทำการ Plot เท่ากับ 7534 Element



รูปที่ 3.10 การแบ่ง Mesh ของเมล็ดข้าวเหนียวตามแนวแกน x, y, z

สำหรับการทำนายผลของความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวในการทดลองนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL *Multiphysics*™ 3.3a (COMSOL AB, Stockholm, Sweden) โดยใช้วิธี Finite element ในการคำนวณ ขั้นตอนการรันโปรแกรมเริ่มจากกำหนดจำนวน Element ที่เหมาะสมต่อการทำนายผลความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียว 3 ระดับได้แก่จำนวน Element เท่ากับ 1902, 7534 และ 23830 โดยใช้ผลการทดลองการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกเหนียวที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150 °C และกำหนด $D_0 = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $E_a = 37099$, $h_c = 126 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ผลการรันโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ผลการทดสอบจำนวน Element ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150 °C

จากรูปที่ 3.11 พบว่า เส้นกราฟผลการทำนายการลดลงของความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวในกรณีที่ใช้จำนวน Element เท่ากับ 1902 มีความแตกต่างจากเส้นกราฟผลการทำนายการลดลงของความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวในกรณีที่ใช้จำนวน Element เท่ากับ 7534 และ จำนวน Element เท่ากับ 23830 ซึ่งเส้นกราฟของจำนวน Element เท่ากับ 7534 และจำนวน Element เท่ากับ 23830 ทับกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าจำนวน Element เท่ากับ 7534 เพียงพอสำหรับการรันโปรแกรมเนื่องจากใช้เวลาเร็วกว่าการรันโปรแกรมที่ใช้จำนวน Element เท่ากับ 23830 โดยเวลาที่ใช้รันโปรแกรมสำหรับจำนวน Element 7534 และ 23830 คือ 7.8 min และ 1.5 h ตามลำดับ

3.3.17.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

สำหรับการทำนายผลการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ นั้นยังไม่พิจารณาสมการของการถ่ายเทความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องเนื่องจากมีงานวิจัยที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่หลากหลาย ทำให้ผลที่ได้จากการทำนายไม่แน่ชัด ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการทำนายค่า D_0 และ E_a จึงใช้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวที่ได้จากการทดลองมาใช้ในการหาค่า D_0 และ E_a ซึ่งสมการการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมล็ดนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$T = A \exp(-k_1 t) + B \exp(-k_2 t) \quad (3.15)$$

เมื่อ T = อุณหภูมิเมล็ดข้าวเหนียว, °C
 t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, min
 A, B, k_1 และ k_2 = ค่าคงที่

ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยได้ค่าคงที่ต่างๆ ดังตารางที่ 3.10

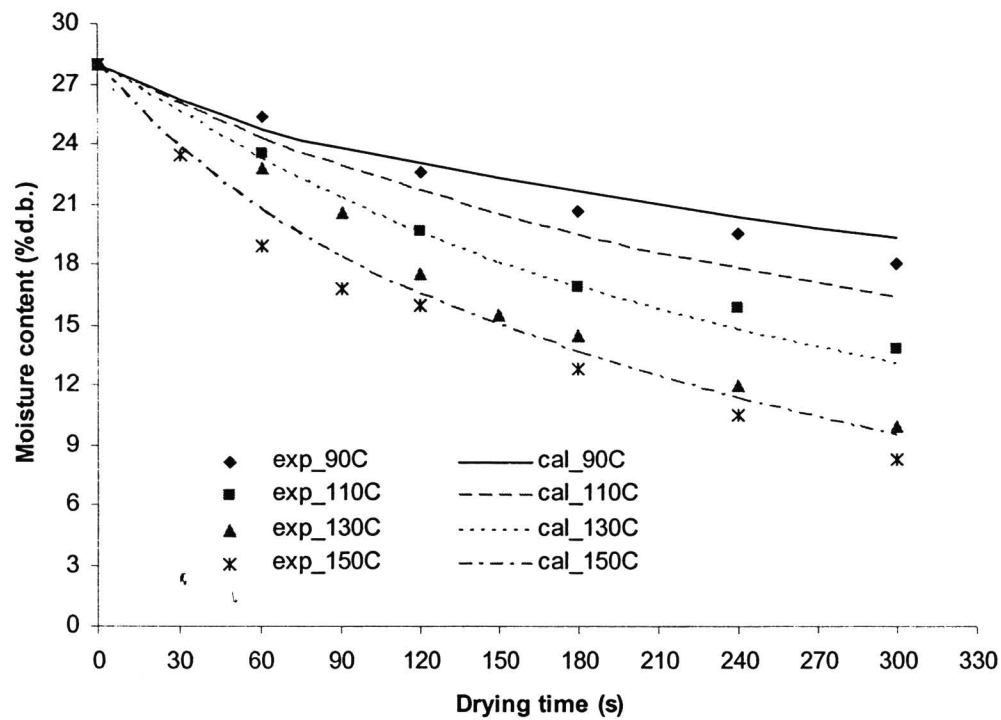
ตารางที่ 3.10 ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่างๆ

Drying temperature (°C)	Parameters				R ²
	A	k_1	B	k_2	
90	77.28	-0.0005	-47.27	0.0416	0.99
110	-74.69	0.0266	104.70	-0.0001	0.99
130	-94.44	0.0310	124.43	-0.0001	0.99
150	135.97	-0.0004	-105.95	0.0714	0.99

นำข้อมูลของตัวแปรต่างๆ จากตารางที่ 3.10 ไปทำนายหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL *Multiphysics*TM 3.3a (COMSOL AB, Stockholm, Sweden) โมเดล Diffusion เพื่อหาค่า D_0 และ E_a ที่เหมาะสมที่สุด โดยเริ่มทำการหาค่า D_0 และ E_a จากเอกสารอ้างอิงของงานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องฟลูอิดซ์เบดของ ฌัฐพล ภูมิสะอาด (2540) จากนั้นปรับค่า D_0 และ E_a โดยปรับทีละค่า กำหนดให้ค่าใดค่าหนึ่งคงที่ ทำการหาค่า D_0 ไปจนกระทั่งผลการทำนายการลดลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวกับผลการทดลองทุกอุณหภูมิอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยดูจากค่า R^2 รวมที่สูงสุด ผลการทำนายค่า D_0 และ E_a ที่ได้ค่า R^2 รวมสูงสุด ($R^2 = 0.93$) แสดงดังสมการที่ 3.16 และรูปที่ 3.12

$$D_{\text{eff}} = 5 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{-37000}{RT_p}\right)$$

(3.16)



รูปที่ 3.12 ผลการทำนายเทียบกับผลการทดลองการลดลงความชื้นของเมล็ดข้าวเหนียวที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ

จากนั้นนำค่า D_{eff} จากสมการที่ 3.16 ไปแทนค่าในโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL *Multiphysics*™ 3.3a โมเดล Heat and Mass Transfer เพื่อทำนายผลการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเหนียวในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่างๆ โดยใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนต่างๆ ดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 สมการของการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งอ้างอิงต่างๆ

No.	Equation	Process	Reference
1	$Nu = 2 + 0.6Re^{0.5}Pr^{0.33}$	Gas heat transfer through single sphere	Ranz and Marshall (1952)
2	$Nu = 2 + (0.4Re^{0.5} + 0.06Re^{2/3})Pr^{0.4}(\mu_a/\mu_g)^{1/4}$	Single sphere and forced convection heat transfer	Whitaker (1972)
3	$Nu = 1.01Re^{0.48}Pr^{0.33}$	Gas heat transfer in dense bubbling fluidized bed for $Pr = 0.7$ and $50 < Re \leq 10^4$	Chen (2003)
4	$Nu = 0.4Re_s^{0.779}(H_s/D_p)^{-0.81}$	Heat transfer in spout region of spouted bed dryer and air temperature in the range of 130-150 °C	Prachyawarakorn et al. (2006)
5	$h_c = 0.1Re^{-0.354}\rho_a v_a c_a / Pr^{2/3}$	Heat transfer in food processing for drying in a fluidized bed	Saravacos and Maroulis (2001)
6	$h_c = 1.31Re^{0.76}$	Heat transfer in a drying fluidized bed (silica gel) for diameter of particle of 0.3-1.2 mm	Heertjes and Mckibbins (1956)
7	$Nu = 0.46Re^{0.5} + 0.00128Re$	Single-phase gas convective coefficient for case of horizontal tubes in fluidized bed and $Re \geq 50$	Douglas and Churchill (1956)

สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Mass transfer coefficient, h_m) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$h_m = \frac{h_c}{\rho_a c_{pa} Le^{2/3}}$$

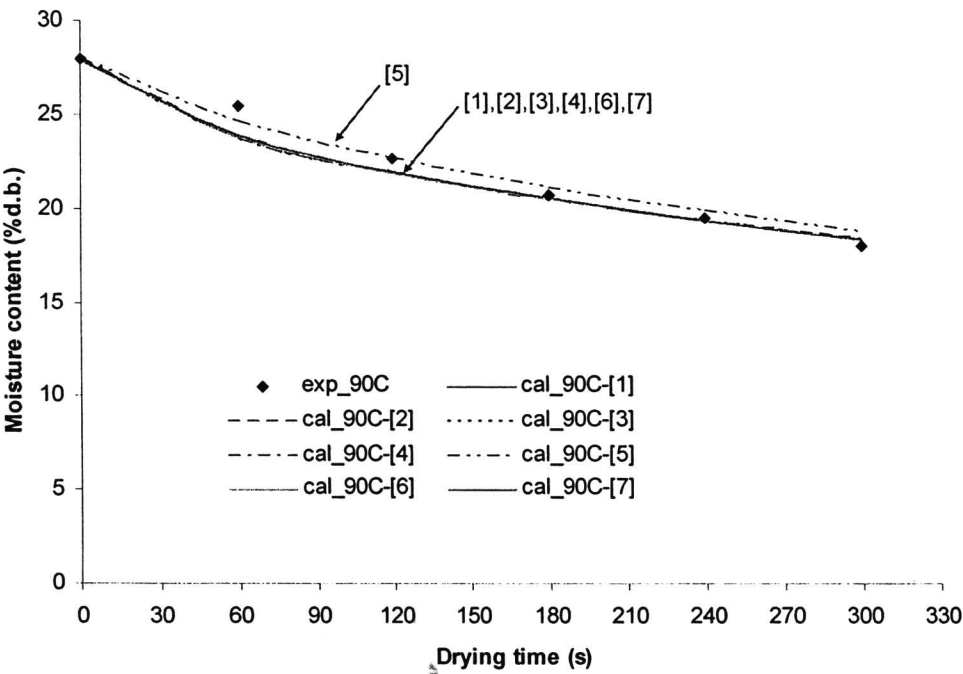
(3.17)

$$Le = \frac{\alpha_a}{D_w}$$

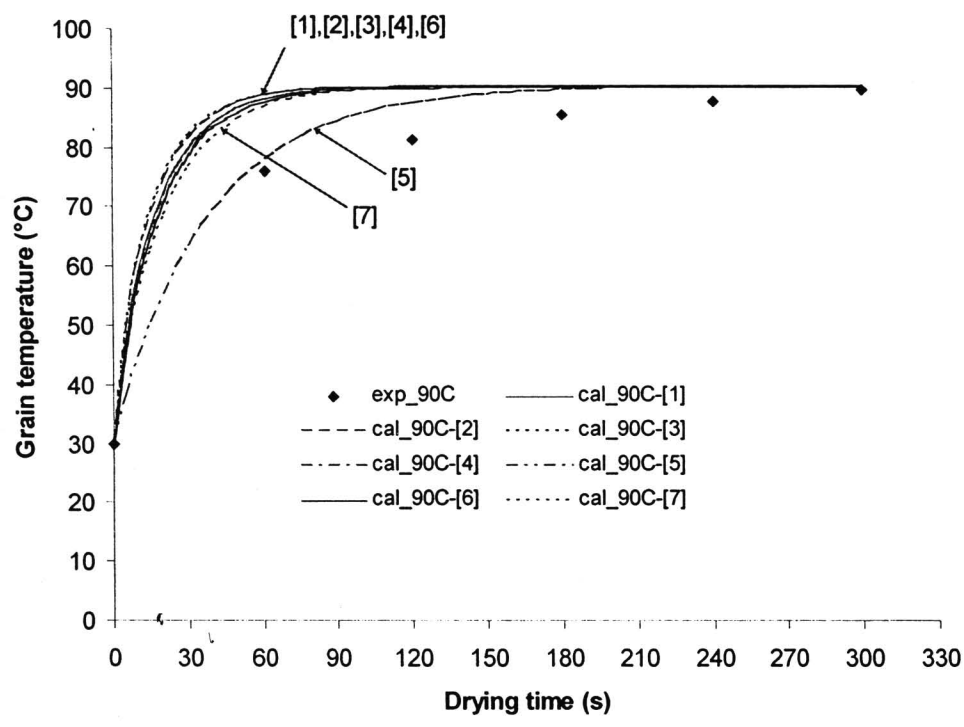
(3.18)

- เมื่อ h_m = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล, m/s
 h_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน, W/m² K
 ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศอบแห้ง, kg/m³
 c_{pa} = ความร้อนจำเพาะของอากาศอบแห้ง, J/kg K
 Le = ตัวเลขลิวอิส (Lewis number), ไร้นิยาม
 α_a = การแพร่กระจายความร้อน, m²/s
 D_w = Binary diffusion coefficient, m²/s

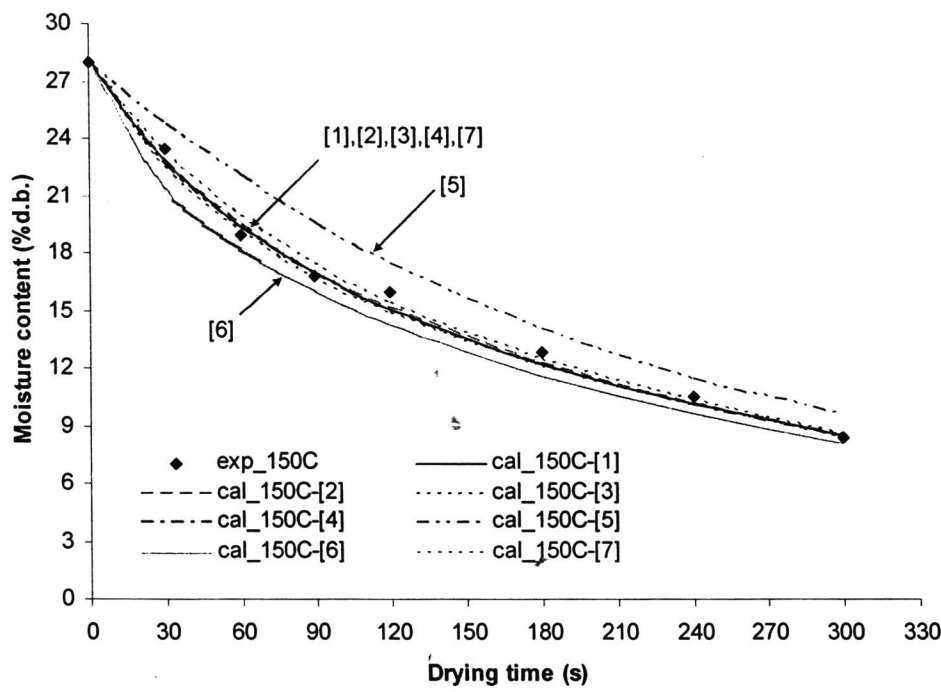
ผลการทำนายการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 และ 150 °C เทียบกับผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.13-3.16 และ ค่า R² ของแต่ละสมการแสดงดังตารางที่ 3.12



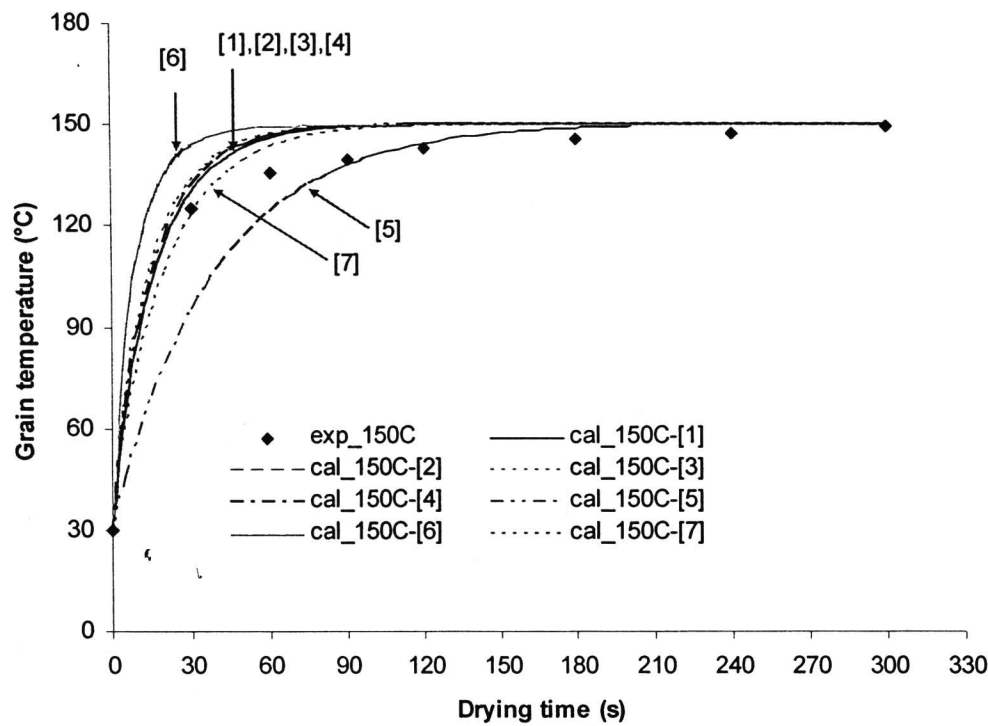
รูปที่ 3.13 ผลการทำนายการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 °C โดยใช้สมการตามตารางที่ 3.11



รูปที่ 3.14 ผลการทำนายอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 °C โดยใช้สมการตามตารางที่ 3.11



รูปที่ 3.15 ผลการทำนายการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150 °C โดยใช้สมการตามตารางที่ 3.11



รูปที่ 3.16 ผลการทำนายอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150 °C โดยใช้สมการตามตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.12 ค่า R² ของการทำนายผลการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 และ 150 °C

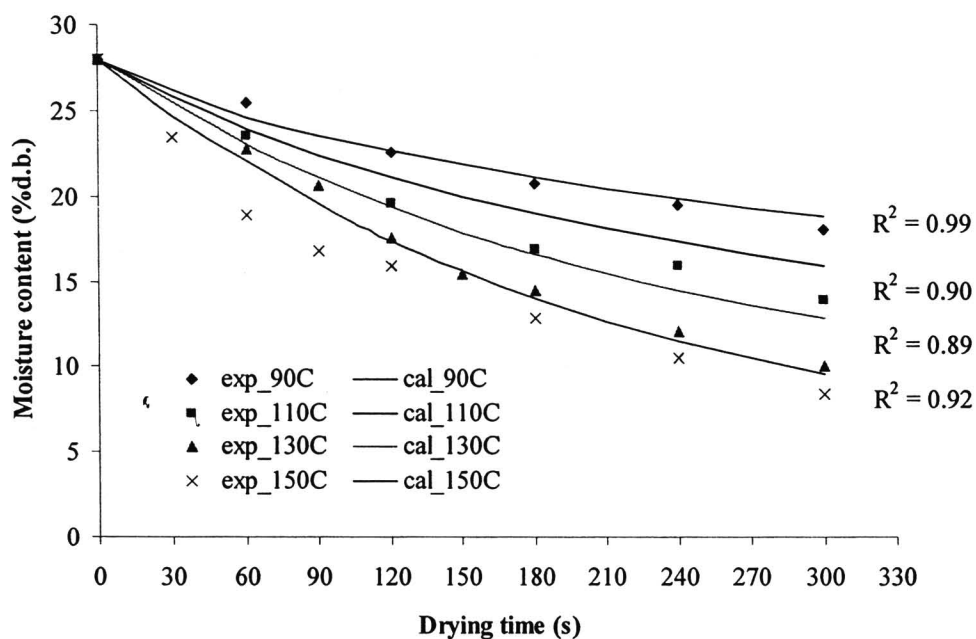
No.	Equation	R ² of moisture content		R ² of grain temperature	
		90 °C	150 °C	90 °C	150 °C
1	$Nu = 2 + 0.6Re^{0.5}Pr^{0.33}$	0.95	0.99	0.92	0.97
2	$Nu = 2 + (0.4Re^{0.5} + 0.06Re^{2/3})Pr^{0.4}(\mu_a/\mu_g)^{1/4}$	0.95	0.99	0.92	0.97
3	$Nu = 1.01Re^{0.48}Pr^{0.33}$	0.95	0.99	0.92	0.97
4	$Nu = 0.4Re^{0.779}(H_s/D_p)^{-0.81}$	0.95	0.99	0.92	0.97
5	$h_c = 0.1Re^{-0.354}\rho_a v_a c_a / Pr^{2/3}$	0.99	0.92	0.98	0.90
6	$h_c = 1.31Re^{0.76}$	0.96	0.96	0.93	0.93
7	$Nu = 0.46Re^{0.5} + 0.00128Re$	0.96	0.99	0.93	0.98

จากรูปที่ 3.13-3.16 และตารางที่ 3.12 พบว่า สมการที่สามารถทำนายผลการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวในระหว่างการอบแห้งในเครื่องฟลูอิดซ์เบดได้ดีที่สุดในกรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 °C คือสมการของ Saravacos and Maroulis (2001) (สมการที่ 5 ในตารางที่ 3.12) โดยมีค่า $R^2 = 0.99$ สำหรับผลการทดลองของความชื้นและ 0.98 สำหรับผลการทดลองอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียว สำหรับสมการที่ทำนายผลการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวที่อุณหภูมิ 150 °C นั้น พบว่า สมการที่ 1,2,3,4 และ 7 สามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองแต่สมการที่ทำนายได้ใกล้เคียงมากที่สุดโดยดูจากค่า R^2 สูงสุดคือสมการของ Douglas and Churchill (1956) (สมการที่ 7 ในตารางที่ 3.12) โดยมีค่า $R^2 = 0.99$ และ 0.98 เมื่อเทียบกับผลการทดลองของความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวตามลำดับ ดังนั้นจึงนำสมการของ Saravacos and Maroulis (2001) และ Douglas and Churchill (1956) ไปทำนายผลการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดของอุณหภูมิอบแห้ง 90-150 °C ได้ดังรูปที่ 3.17-3.20

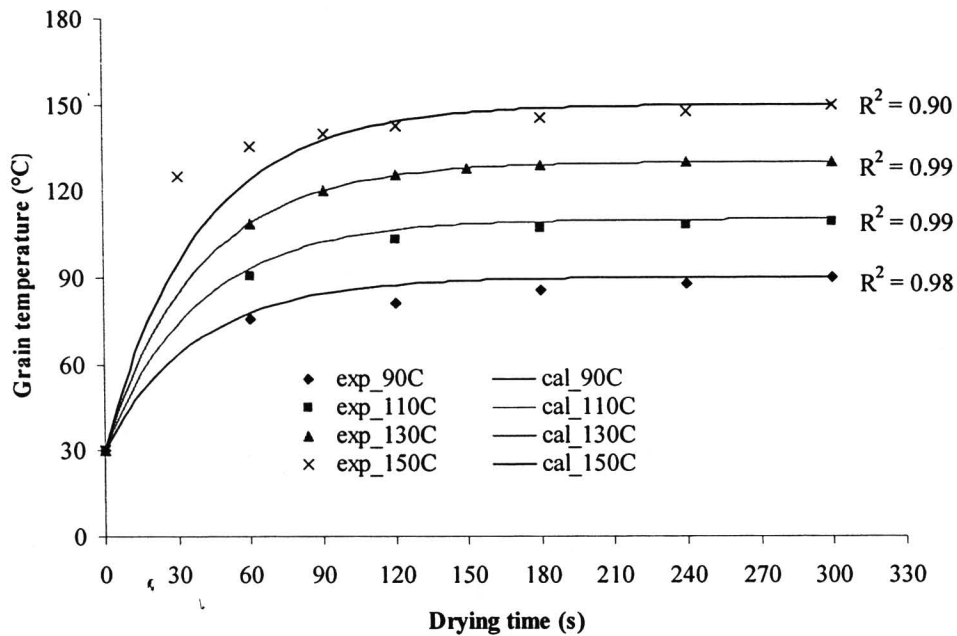
รูปที่ 3.17 และ 3.18 แสดงการทำนายการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองโดยใช้สมการของ Saravacos and Maroulis (2001) พบว่า สมการของ Saravacos and Maroulis (2001) สามารถทำนายผลการลดลงของความชื้นได้ดีเฉพาะในกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 90 °C ($R^2 = 0.99$) ส่วนอุณหภูมิอบแห้งมากกว่า 100 °C สมการของ Saravacos and Maroulis (2001) ทำนายผลการลดลงของความชื้นได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับผลการทดลองโดยค่า R^2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.89-0.92 แต่ในกรณีอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวสมการของ Saravacos and Maroulis (2001) สามารถทำนายผลของอุณหภูมิเมล็ดได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองในกรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90-130 °C ($R^2 > 0.98$) ยกเว้นกรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150 °C สมการของ Saravacos and Maroulis (2001) ทำนายผลได้ไม่ค่อยแม่นยำนักเมื่อเทียบกับผลการทดลองโดยค่า $R^2 = 0.90$ สำหรับสมการของ Douglas and Churchill (1956) แสดงในรูปที่ 3.19-3.20 พบว่า ในกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 90-150 °C ผลการทำนายการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกเหนียวตามสมการของ Douglas and Churchill (1956) มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยมีค่า $R^2 > 0.95$ สำหรับการทำนายอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90-150 °C สมการของ Douglas and Churchill (1956) สามารถทำนายผลอุณหภูมิเมล็ดได้ค่อนข้างดีเมื่อเทียบกับผลการทดลองโดยมีค่า $R^2 > 0.93$

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สมการของ Douglas and Churchill (1956) สามารถทำนายผลการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวที่อุณหภูมิอบแห้ง 90-150 °C ได้ดีกว่า สมการของ Saravacos and Maroulis (2001) ซึ่งมีข้อจำกัดคือสามารถทำนายผลการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวได้ดีเฉพาะในกรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ำ (90 °C) เท่านั้น เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 °C การทำนายผลการลดลงของความชื้นได้ไม่ดีนัก ดังนั้นเพื่อความสะดวกใน

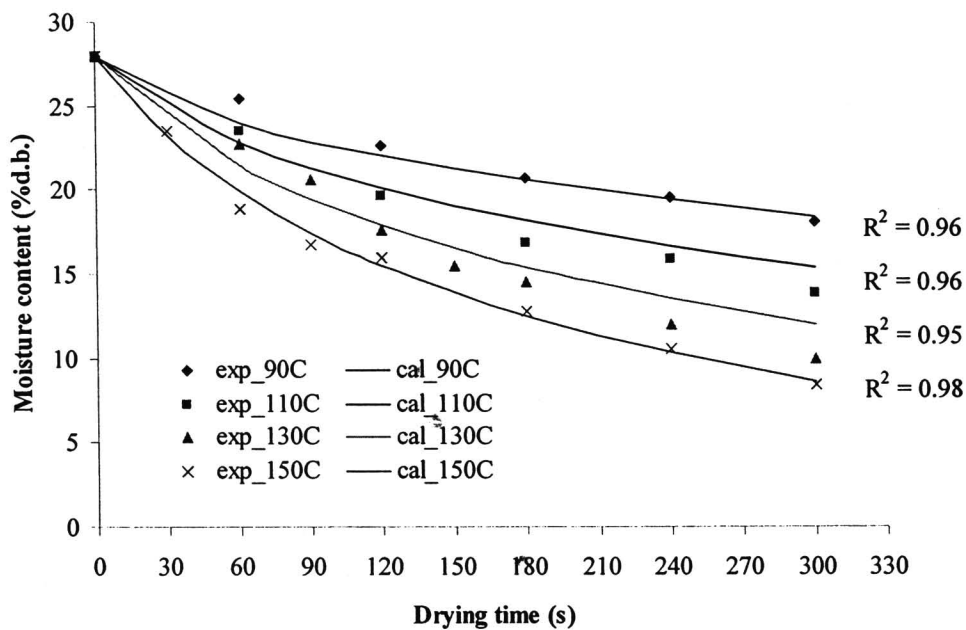
การใช้งานสมการของ Douglas and Churchill (1956) จึงมีความเหมาะสมสำหรับทำนายผลการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเหนียวในกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 90-150 °C มากกว่าสมการของ Saravacos and Maroulis (2001)



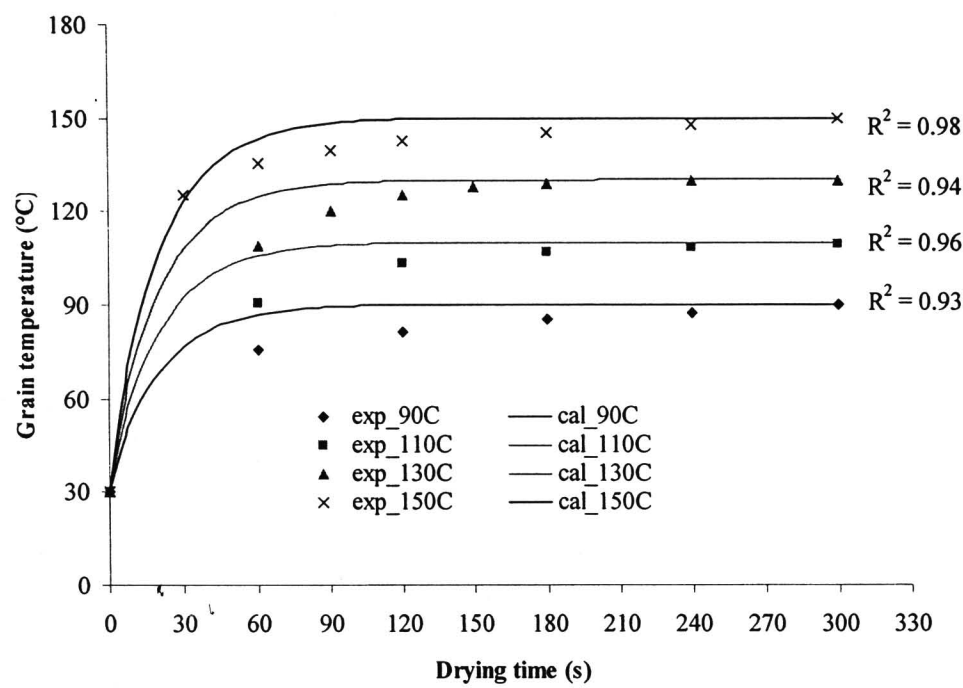
รูปที่ 3.17 ผลการทำนายการลดลงของความชื้นเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90-150 °C ตามสมการของ Saravacos and Maroulis (2001)



รูปที่ 3.18 ผลการทำนายอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90-150 °C ตามสมการของ Saravacos and Maroulis (2001)



รูปที่ 3.19 ผลการทำนายการลดลงของความชื้นเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90-150 °C ตามสมการของ Douglas and Churchill (1956)



รูปที่ 3.20 ผลการทำนายอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศ
อบแห้ง 90-150 °C ตามสมการของ Douglas and Churchill (1956)