บทที่ 5 ผลของฟลูอิไดเซชันอุณหภูมิสูงที่มีต่อคุณภาพของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว

5.1 บทนำ

ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว (Partially parboiled white waxy rice) หมายถึงข้าวเหนียวเปลือกที่ผ่านกระบวนการทำให้แป้งสุกบางส่วนโดยการแช่ในน้ำร้อน ในขั้นตอนนี้ข้าวเปลือกมีความชื้นสูงขึ้น จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเพื่อลดความชื้นลงซึ่งในขั้นตอนนี้แป้งมีการสุกเพิ่มขึ้น ในขั้นตอนสุดท้ายนำไปลดความชื้นให้เหลือประมาณ 16% (d.b.) เพื่อนำไปเก็บรักษาและรอการสีต่อไป

ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวมีคุณค่าทางโภชนาการคล้ายข้าวนึ่งเนื่องจากผ่านกระบวนการแช่ในน้ำร้อนเหมือนกันทำให้วิตามินบี และแร่ธาตุบางชนิดสามารถแพร่เข้าไปภายในเมล็ดข้าวเปลือกพร้อมกับน้ำที่แช่ ช่วยป้องกันโรคเหน็บชา และมีข้อดีอีกอย่างหนึ่งของข้าวนึ่งคือลดการแตกหักของเมล็ดข้าวในระหว่างการขัดสีทำให้ได้ร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้น (Teachapairoj, 2003) และสามารถเก็บรักษาได้นานทนต่อการเข้าทำลายของแมลง (Elbert et al., 2001) การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเจลาทิไนเซชันทำให้ได้ร้อยละต้นข้าวของข้าวนึ่งสูง (Teachapairoj, 2003) และจากงานวิจัยของ Kar et al. (1999) รายงานว่าความเป็นข้าวนึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งต่ำ ความเป็นข้าวนึ่งต่ำ

คุณภาพด้านการหุงต้มข้าวเหนียวเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวสุกวิธีการหุงต้มแตกต่างกันทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวสุกมีความแตกต่างกัน การหุงต้มข้าวเหนียวขาวในหม้อหุงข้าวทำให้ข้าวเหนียวขาวสุกเกาะติดกันเป็นก้อน และหุงไม่ขึ้นหม้อเนื่องจากมีปริมาณอะมิโลสต่ำ จึงไม่ได้รับความนิยม (งามชื่น คงเสรี, 2545) แต่เนื่องจากการหุงต้มในหม้อหุงข้าวเป็นวิธีที่สะดวกกว่าวิธีการนึ่งด้วยไอน้ำดังนั้นการผลิตข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวให้สามารถหุงต้มในหม้อหุงข้าวได้โดยลดปัญหาการเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนจึงน่าสนใจ

จากประโยชน์ของการผลิตข้าวนึ่งและงานวิจัยด้านผลิตข้าวเหนียวกึ่งนึ่งยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิสูงต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวโดยคุณภาพที่ศึกษา ได้แก่ สมบัติทางความร้อน สมบัติด้านสภาพเป็นผลึก

ร้อยละต้นข้าว สี สมบัติด้านการย่อยและดูดซึม และสมบัติด้านเนื้อสัมผัสเช่น ความแข็งและความเหนียว เป็นต้น

5.2 วัสดุและวิธีการทดลอง

5.2.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

ข้าวเหนียวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นระหว่าง 11-13% (d.b.) ซื้อมาจากศูนย์วิจัยข้าวสกลนคร จังหวัดสกลนคร นำไปแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ 80 °C ในถังกลมหุ้มฉนวนใยแก้ว อัตราส่วนระหว่างข้าวต่อน้ำคือ 1:1.3 เวลาในการแช่ข้าว 3 h เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดจึงระบายน้ำออกจนหมดและพักข้าวไว้ 1 h ความชื้นของข้าวเหนียวเปลือกหลังผ่านการแช่ในน้ำร้อนมีค่าประมาณ 50-52% (d.b.) จากนั้นนำข้าวเหนียวเปลือกจำนวน 1.9 kg ไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิไดซ์เบดลมร้อนอุณหภูมิที่ทำการอบแห้งคือ 140, 150 และ 160 °C จนความชื้นของข้าวเหนียวเปลือกลดลงเหลือประมาณ 22-23% (d.b.) นำข้าวเหนียวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วไปเก็บในที่อับอากาศ นาน 30 min และนำไปเป่าลมด้วยอากาศแวดล้อมอุณหภูมิประมาณ 30 °C ประมาณ 30-40 min จนความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือประมาณ 16% (d.b.) จากนั้นนำข้าวเหนียวเปลือกไปเก็บในห้องเย็นอุณหภูมิ 4-6 °C เพื่อรอทดสอบคุณภาพต่อไป

5.2.2 การวิเคราะห์คุณภาพ

คุณภาพที่ทำการศึกษาในรูปของเมล็ดขัดขาว ได้แก่ ร้อยละต้นข้าว สี สมบัติด้านเนื้อสัมผัส สมบัติด้านการย่อยและดูดซึม ส่วนคุณภาพที่ทำการศึกษาในรูปของแป้ง ได้แก่ สมบัติทางความร้อน และสมบัติด้านความเป็นผลึก สำหรับรายละเอียดวิธีการวัดคุณภาพที่ทำการศึกษาทั้งหมดได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

5.2.3 การทดสอบสมบัติด้านการหุงต้ม

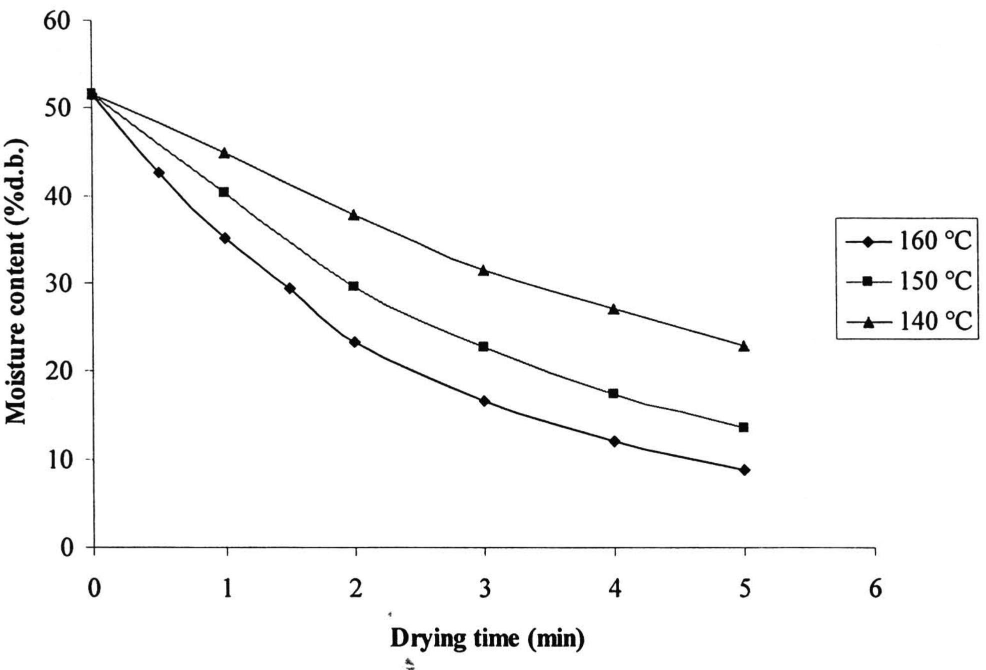
การทดสอบสมบัติด้านการหุงต้มมีวิธีการดังนี้ นำตัวอย่างข้าวเหนียวประมาณ 200 g มาล้างน้ำเพื่อชำระสิ่งสกปรกออก 1 ครั้ง จากนั้นเติมน้ำโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อข้าวเหนียวแตกต่างกัน 3 ค่าได้แก่

0.9:1, 1:1 และ 1.2:1 นำไปหุงต้มในหม้อหุงข้าวจนหุงสุก ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 min และสุ่มตัวอย่างข้าวเหนียวหุงสุกเฉพาะพื้นที่ตรงกลางของหม้อหุงข้าว ก่อนนำไปทดสอบสมบัติด้านเนื้อสัมผัสต่อไป

5.3 ผลการทดลองและวิจารณ์

5.3.1 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

รูปที่ 5.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ จากกราฟการลดลงของความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งจนถึงความชื้นระหว่าง 22-23% (d.b.) ของอุณหภูมิอบแห้งที่ 140, 150 และ 160 °C คือ 5, 3 และ 2 min ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอุณหภูมิ 140-160 °C

5.3.2 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว

ตารางที่ 5.1 แสดงผลของอุณหภูมิอบแห้งแป้งข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 h (ความชื้นเริ่มต้น 51.6% (d.b.)) เทียบกับแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิงที่ไม่ผ่านการแช่ (ความชื้น

เริ่มต้น 12.2% (d.b.)) ที่มีต่อ อุณหภูมิเริ่มต้น (T_{onset}) อุณหภูมิสูงสุด (T_{peak}) อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาทิไนเซชัน ($T_{conclude}$) เอนทัลปี (ΔH) และระดับการเกิดเจลาทิไนเซชัน (DG) ผลการทดลอง พบว่า แป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง มีอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาทิไนเซชันคือ 61.9, 69.4 และ 78.3 °C ตามลำดับ แป้งข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ มีอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาทิไนเซชันสูงกว่าแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง เนื่องจากการเพิ่มความชื้นของข้าวเหนียวเปลือกโดยการแช่น้ำและให้ความร้อนไปพร้อมๆ กัน ส่งผลให้เมล็ดข้าวเหนียวเกิดเจลาทิไนเซชันหรือแป้งหุงสุกบางส่วน อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายที่สูงขึ้นนี้ส่งผลให้ข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ใช้ระยะเวลาในการหุงต้มนานขึ้น ส่วนเอนทัลปีของข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่มีค่าน้อยกว่าเอนทัลปีของข้าวเหนียวอ้างอิงและเมื่อคำนวณระดับการเกิดเจลาทิไนเซชัน พบว่า มีค่า 23.1% ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miah et al. (2002) ที่ทำการทดลองนำข้าวเปลือกพันธุ์ BR4 (ปริมาณอะมิโลส 25%) มาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 80 °C ระยะเวลาการแช่ 0-120 min และอบแห้งโดยวิธีการตากแดด ผลของการแช่ทำให้ข้าวเกิดเจลาทิไนเซชัน 86% นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ เฉลิมพร เอี่ยมมิ (2546) ที่ทดลองแช่ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในน้ำอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 0.5-3 h พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการแช่มีระดับเจลาทิไนเซชันเพิ่มขึ้น โดยมีค่าระหว่าง 1.5-21.1% นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ สมคิด โฆษิตพันธวงศ์ (2549) พบว่า การแช่ข้าวสุพรรณบุรี 1 อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 h ทำให้ข้าวสุพรรณบุรี 1 เกิดเจลาทิไนเซชัน 21.34%

เมื่อนำข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิสุดท้ายของแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเทียบกับแป้งข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ (อุณหภูมิเมล็ดของข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140, 150 และ 160 °C มีค่า 72.4, 72.5 และ 73.4 °C ตามลำดับ) ในขณะที่เอนทัลปีของแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งดังกล่าวมีค่าลดลงและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับเอนทัลปีของแป้งข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ สำหรับระดับการเกิดเจลาทิไนเซชัน ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่อบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีระดับการเกิดเจลาทิไนเซชันสูงขึ้น โดยพบว่าแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งที่ผ่านการอบแห้งทุกอุณหภูมิมีระดับการเกิดเจลาทิไนเซชันมากกว่า 50% และมีค่าสูงสุดคือ 65.1% เมื่ออบแห้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิ 160 °C

ตารางที่ 5.1 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง แป้งข้าวเหนียวขาวหลังการแช่และแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 140-160 °C

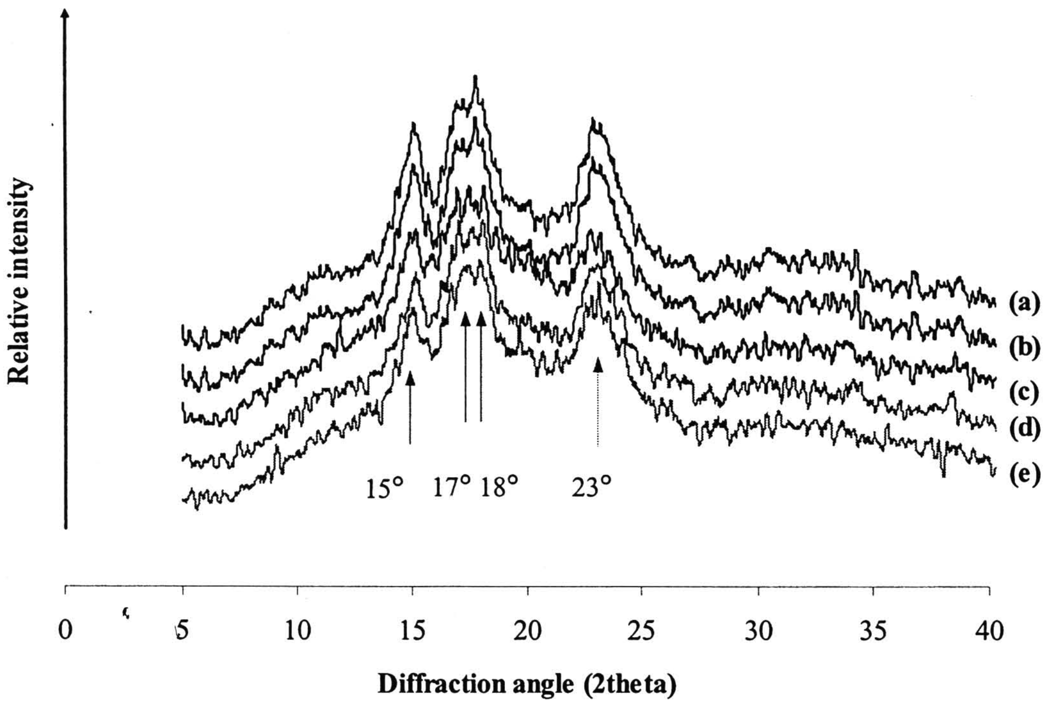
Processing condition	Transition temperature (°C)			ΔH (J/g)	DG (%)
	T_{onset}	T_{peak}	$T_{conclude}$		
Reference white waxy rice (no soaked), M_{in} = 12.2% (d.b.)	61.9 ± 0.1^{a}	69.4 ± 0.4^{a}	78.3 ± 0.4^{a}	9.2 ± 0.1^{a}	0
Soaked white waxy rice, M_{in} = 51.6% (d.b.)	69.6 ± 0.0^{b}	76.9 ± 0.1^{b}	83.2 ± 0.1^{b}	7.0 ± 0.1^{b}	23.1
140 °C	70.0 ± 0.2^{b}	77.1 ± 0.2^{b}	83.3 ± 0.3^{b}	4.5 ± 0.4^{c}	51.4
150 °C	70.1 ± 0.2^{b}	77.2 ± 0.1^{b}	83.4 ± 0.2^{b}	4.0 ± 0.2^{d}	56.4
160 °C	70.3 ± 0.8^{b}	77.2 ± 0.2^{b}	83.4 ± 0.4^{b}	3.2 ± 0.3^{e}	65.1

DG = Degree of gelatinization (%)

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

5.3.3 สมบัติด้านสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว

ผลของการทดสอบสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง แป้งข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ แป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้ง ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer: XRD แสดงดังรูปที่ 5.2 แป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง มีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่มุม 2θ คือ 15°, 17°, 18° และ 23° แสดงถึงรูปร่างผลึกของเม็ดแป้งข้าวเหนียว เป็นชนิด A (A-type) ส่วนการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในแป้งข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ และแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งไม่แตกต่างจากข้าวเหนียวอ้างอิง นั่นคือ แป้งข้าวเหนียวทั้งหมดมีรูปร่างผลึกเป็นชนิด A (รูปที่ 5.2) และไม่พบรูปร่างผลึกชนิด V (V-type) ในกรณีของข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งเหมือนกับกรณีของแป้งข้าวเจ้า ซึ่งผลึกชนิด V นี้เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 13° และ 20° ซึ่งบ่งบอกถึงการคืนตัวของรูปร่างผลึก (Recrystalline) โดยการจับพันธะกันระหว่างอะมิโลสหลังจากเกิดเจลาทิไนเซชัน ส่งผลให้ข้าวเจ้าเมื่อผ่านการหุงต้มมีความแข็งขึ้น



รูปที่ 5.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแป้งข้าวเหนียว (a) ข้าวเหนียวขาวอ้างอิง; (b) ข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่; (c) ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิ 140 °C; (d) ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิ 150 °C; (e) ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิ 160 °C

ตารางที่ 5.2 แสดงระดับสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวอ้างอิง แป้งข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่และแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C พบว่า แป้งข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่มีระดับสภาพเป็นผลึกลดลงและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ซึ่งระดับสภาพเป็นผลึกนี้มีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนในทางตรงกันข้ามโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's test) ($r = -0.99$, $p<0.01$) นั่นคือ แป้งข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่เกิดเจลาทิไนเซชันเพิ่มขึ้นทำให้ระดับสภาพเป็นผลึกของเม็ดแป้งลดลงโดยมีค่าลดลง 9% เมื่อเทียบกับระดับสภาพเป็นผลึกแป้งข้าวเหนียวอ้างอิง

ตารางที่ 5.2 ระดับสภาพเป็นผลึกของข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวขาวหลังผ่านการแช่ และข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C

Processing condition	Degree of crystallinity (%)
Reference white waxy rice, M_{in} = 12.2% (d.b.)	20.0 ± 0.1^{a}
Soaked white waxy rice, M_{in} = 51.6% (d.b.)	18.3 ± 0.2^{b}
140 °C	15.8 ± 0.1^{c}
150 °C	15.0 ± 0.4^{d}
160 °C	14.5 ± 0.2^{e}

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

สำหรับระดับสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C พบว่า ระดับสภาพเป็นผลึกดังกล่าวมีค่าลดลงและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเทียบกับแป้งข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ โดยระดับสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวอบแห้งที่อุณหภูมิ 160 °C มีค่าลดลงจากแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิงและแป้งข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ 32 และ 23% ตามลำดับ เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นระดับสภาพเป็นผลึกมีค่าลดลงและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญโดยระดับสภาพเป็นผลึกที่อุณหภูมิ 160 °C มีค่าลดลงจากระดับสภาพเป็นผลึกที่อุณหภูมิ 140 °C ประมาณ 9% (ตารางที่ 5.2)

5.3.4 ร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว

ตารางที่ 5.3 แสดงร้อยละต้นข้าวหรือร้อยละข้าวเต็มเมล็ดซึ่งมีความยาวอย่างน้อย 3 ใน 4 ส่วนของความยาวทั้งหมดของเมล็ด ตัวอย่างข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ และข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า ร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวขาวหลังผ่านการแช่มีค่าประมาณ 45 และ 62% ตามลำดับ ร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวขาวหลังการแช่มีค่าสูงขึ้น 29% เมื่อเทียบกับข้าวเหนียวขาวอ้างอิง เนื่องจากการเกิดเจลาทิไนเซชันของข้าวเหนียวเปลือกในระหว่างการแช่ข้าวเหนียวโดยเฉพาะบริเวณผิวของเมล็ดข้าวเหนียวทำให้เอนโดสเปิร์มมีความแข็งแรงต้านทานการขัดสี ทำให้ชั้นรำถูกขัดออกไปน้อยลง จากตารางที่ 5.3 พบว่า ข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่รำถูกขัดออกไป 8% ซึ่งน้อยกว่ากรณีข้าวเหนียวขาวอ้างอิงซึ่งรำถูกขัดสีออกไป 12% ร้อยละรำที่ถูกขัดออกไปสำหรับข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ลดลง 35% เมื่อเทียบกับข้าวเหนียวขาวอ้างอิง

ตารางที่ 5.3 ร้อยละต้นข้าว ร้อยละรำที่ขจัดออก และร้อยละเมล็ดที่มีสีผิดปกติของข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวขาวหลังผ่านการแช่ ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C

Drying temperature (°C)	Head rice yield (%)	Rice bran remove (%)	Discolor kernel (%)
Reference white waxy rice (no soaked), M_{in} = 12.2% (d.b.)	44.8 ± 0.6[a]	12.0	0
Soaked white waxy rice, M_{in} = 51.6% (d.b.)	61.7 ± 1.2[d]	8.4	0
140 °C	58.7 ± 0.3[c]	8.2	9.0
150 °C	58.4 ± 0.0[bc]	8.9	9.5
160 °C	57.2 ± 0.7[b]	9.2	11.5

เมื่อนำข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ไปอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบดอุณหภูมิ 140-160 °C พบว่าร้อยละต้นข้าวมีค่าระหว่าง 57-59% โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างข้าวเหนียวขาวอ้างอิง 25% เนื่องจากข้าวเหนียวเกิดเจลาทิไนเซชัน โดยอธิบายได้ดังนี้เมื่อข้าวเหนียวเปลือกที่มีความชื้นสูงนั้นได้รับความร้อนสูงแป้งที่ถูกน้ำเกิดการพองตัวและถูกทำให้หุงสุก นอกจากนี้ยังทำให้โปรตีนแตกตัวและแทรกเข้าไปภายในโครงสร้างภายในช่องว่างของเม็ดแป้งทำให้เกิดการยึดตัวเข้าด้วยกันและเกาะกันแข็งแรงขึ้นและทำให้รอยร้าวภายในเมล็ดข้าวสามารถผสานกันอย่างสนิท เมล็ดข้าวมีลักษณะแข็งใสเหนียวและทนต่อการขัดสี เมื่อนำไปขัดสีจึงได้ร้อยละต้นข้าวสูง อย่างไรก็ตามร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C มีค่าน้อยกว่าร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ประมาณ 5-8% ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในเมล็ดในส่วนของเม็ดแป้งที่ไม่เกิดเจลาทิไนเซชันทำให้เกิดรอยร้าวขึ้นภายในเมื่อนำไปขัดสีจึงแตกหักได้ง่ายส่งผลให้ร้อยละต้นข้าวที่ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ นอกจากนี้การใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงยังนำให้เมล็ดข้าวบางส่วนเกิดสีที่ไม่ต้องการ (Discolor kernel) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น โดยข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวมี Discolor kernel เกิดขึ้น 11.5% เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้ง 160 °C (ตารางที่ 5.3)

5.3.5 สีของเมล็ดข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าสี *L*, *a* และ *b* ของข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่และข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิอากาศร้อน 140-160 °C (คัดเฉพาะเมล็ดข้าวเหนียวปกติ ไม่รวมเมล็ดที่เกิด Discolor)จากผลการทดลอง พบว่าค่า *L* หรือค่าความสว่าง ค่า *a* หรือค่าความเป็นสีแดง (+) และค่า *b* หรือค่าความเป็นสีเหลือง (+) ของข้าวเหนียวขาวอ้างอิงมีประมาณ 83, 0.1 และ 13.8 ตามลำดับ ข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่มีค่า *L* ลดลง ส่วนค่า *a* และ *b* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เทียบกับข้าวเหนียวขาวอ้างอิง เมื่อนำตัวอย่างข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ไปผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ทำให้ค่า *L* ลดลง แต่ค่า *a* และ *b* เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าสีทั้ง 3 ค่า (*L*, *a*, *b*) ของข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งระหว่างอุณหภูมิ 140-160 °C พบว่าค่าสีทั้ง 3 ค่าของข้าวเหนียวที่อบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสีของข้าวเหนียวที่อบแห้งอุณหภูมิต่ำกว่า

ตารางที่ 5.4 สีของข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวขาวหลังผ่านการแช่ ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C

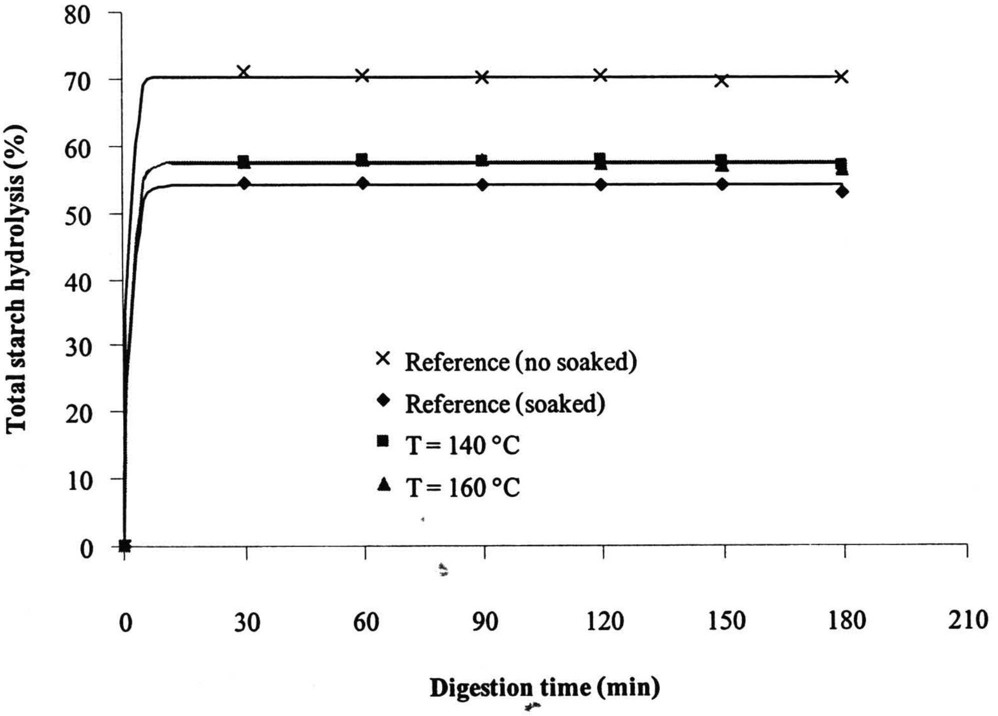
Processing condition	*L*-value	*a*-value	*b*-value
Reference white waxy rice, M_{in} = 12.2% (d.b.)	83.6 ± 0.6^a	0.1 ± 0.1^a	13.5 ± 0.2^a
Soaked white waxy rice, M_{in} = 51.6% (d.b.)	77.2 ± 0.7^b	1.4 ± 0.0^b	18.0 ± 0.1^b
140 °C	67.6 ± 1.1^c	3.2 ± 0.3^c	20.7 ± 0.3^c
150 °C	66.4 ± 0.3^c	3.0 ± 0.1^c	20.8 ± 0.3^c
160 °C	66.4 ± 0.3^c	2.5 ± 0.2^c	20.2 ± 0.3^c

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

สำหรับเหตุผลที่ทำให้ข้าวเหนียวอ้างอิงเมื่อนำไปผ่านการแช่ในน้ำร้อนและนำไปอบแห้งทำให้ความขาวลดลง แต่มีสีแดงและเหลืองเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบภายในเมล็ดข้าว ซึ่งเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบเมลลาร์ด โดยสภาพที่เหมาะสมของน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิ-โนซึ่งมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสีน้ำตาล จึงส่งผลให้ข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่และข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งมีความสว่างลดลงแต่มีสีแดงและเหลืองเพิ่มขึ้น ในกรณีค่า *L*, *a* และ *b* ของข้าวเหนียวหลังผ่านอุณหภูมิอบแห้งมีค่าไม่แตกต่างกัน อาจเนื่องจากอุณหภูมิอบแห้งมีค่าแตกต่างกันน้อยประกอบกับระยะเวลาที่ข้าวเหนียวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้งใช้เวลาสั้น (2-5 min) จึงทำให้สีของข้าวเหนียวหลังการอบแห้งดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกัน

5.3.6 สมบัติด้านการย่อยและดูดซึมของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุก

รูปที่ 5.3 แ สดงสมบัติการย่อยและดูดซึมของข้าวเหนียวขาวหุงสุกอ้างอิง ข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่หุงสุกและข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งหุงสุก จากผลการทดลอง พบว่าเส้นกราฟไฮโดรไล-ซีส (Hydrolysis) ทุกเส้นมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุด ณ เวลา 30 min จากนั้นค่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนถึงเวลาสิ้นสุด (180 min) ซึ่งข้าวเหนียวขาวหุงสุกอ้างอิง ข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่หุงสุกมีอัตราการย่อยและดูดซึมที่ 30 min ประมาณ 70 และ 54% ตามลำดับ ส่วนข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C มีค่าประมาณ 57-58% ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งหุงสุกมีอัตราการย่อยและดูดซึมน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือดสูงกว่าข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่หุงสุกและเมื่อเปรียบเทียบอัตราการย่อยและดูดซึมข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุกระหว่างอุณหภูมิอบแห้ง พบว่า อัตราการย่อยและดูดซึมข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น มีค่าการไฮโดรไลซีสสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 5.3)



รูปที่ 5.3 การไฮโดรไลซีสโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวขาวหลังผ่านการแช่และข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าไกลซีมิค (GI) ของข้าวเหนียวขาวอ้างอิงหุงสุก ข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่หุงสุกและข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งหุงสุก พบว่า ค่า GI ของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุกมีค่าลดลงเมื่อข้าวเหนียวผ่านกระบวนการแช่และการอบแห้ง เนื่องจากบางส่วนของชั้นรำ สี ไขมันและ

โปรตีนแทรกซึมเข้าไปในชั้นเอนโดสเปิร์มของเมล็ดข้าวทำให้เอนไซม์ย่อยแป้งได้ยากขึ้น (ตารางที่ 5.3) จึงส่งผลให้ค่า GI ลดลงแต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่หุงสุก กับข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งหุงสุกที่อุณหภูมิ 140 °C และ 160 °C พบว่าข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่หุงสุก มีค่า GI น้อยกว่าข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งหุงสุก โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่า GI ในข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งหุงสุกนั้น เนื่องจากการเกิดเจลาทิไนเซชันทำให้มีการแตกตัวของชั้นผลึกมีค่ามากขึ้น (ตารางที่ 5.2) ส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยโมเลกุลแป้งในเมล็ดข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุกในกรณีนี้ได้ง่ายขึ้น

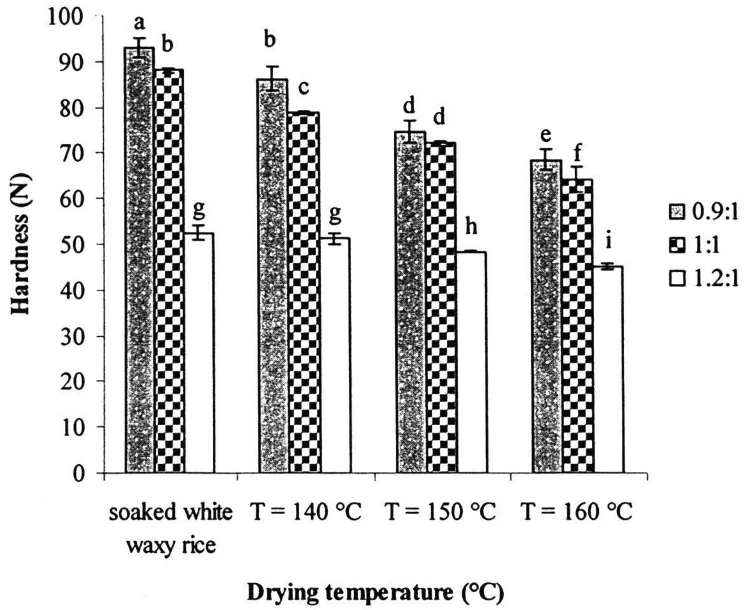
ตารางที่ 5.5 ค่าดัชนีไกลซีมิค (GI) ของตัวอย่างข้าวเหนียวขาวอ้างอิงหุงสุก ข้าวเหนียวขาวหลังผ่านการแช่และข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C

Processing condition	C_∞ (%)	k (min-1)	HI	GI
Reference white waxy rice, M_{in} = 12.2% (d.b.)	70.2	0.83	125.5 ± 2.8	108.6 ± 1.6^a
Soaked white waxy rice, M_{in} = 51.6% (d.b.)	54.1	0.61	96.7 ± 1.0	92.8 ± 0.6^c
140 °C	57.6	0.64	102.9 ± 4.2	96.2 ± 2.3^b
160 °C	57.4	0.65	102.5 ± 0.1	96.0 ± 0.1^b

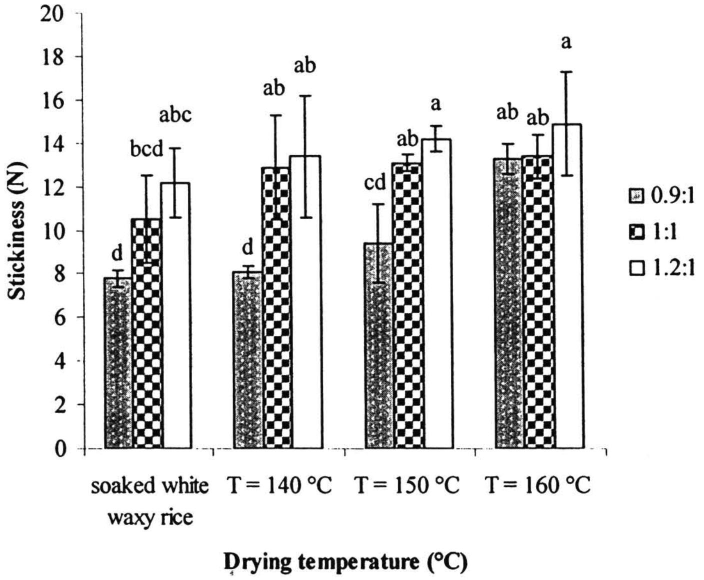
Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different ($p<0.05$)

5.3.7 สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุก

รูปที่ 5.4 (a) และ (b) แสดงลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวเหนียวขาวอ้างอิงหุงสุก ข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่หุงสุก และข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C โดยหุงต้มข้าวเหนียวในหม้อหุงข้าวและใช้อัตราส่วนน้ำต่อข้าวเหนียวแตกต่างกัน 3 ค่าได้แก่ 0.9:1, 1:1 และ 1.2:1 เปรียบเทียบกับสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ที่หุงต้มด้วยวิธีให้ความร้อนด้วยไอน้ำ (Steaming) เป็นเวลา 30 min ผลการทดลอง พบว่าความแข็งและความเหนียวของข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่ที่ทำให้สุกโดยการ Steaming มีค่า 110.1 ± 7.0 N และ 12.4 ± 1.5 N ตามลำดับ



(a) Hardness



(b) Stickiness

T = fluidized bed drying temperature (°C)

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

รูปที่ 5.4 (a) ความแข็ง และ (b) ความเหนียวของข้าวเหนียวขาวอ้างอิงหุงสุก ข้าวเหนียวขาวหลังผ่านการแช่หุงสุก และข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิ 140-160 °C หุงสุก

ค่าความแข็งของข้าวเหนียวหุงสุกที่อัตราส่วนน้ำต่อข้าวเหนียวทั้ง 3 ค่ามีค่าน้อยกว่าความแข็งของข้าวเหนียวขาวหลังการแช่ที่หุงต้มด้วยการ Steaming ทุกเงื่อนไขการทดลอง สำหรับความเหนียวมีค่าแตกต่างกันออกไปดังนี้ ที่อัตราส่วนน้ำต่อข้าวเหนียว 0.9:1 พบว่า ข้าวเหนียวหุงสุกเฉพาะที่อุณหภูมิอบแห้ง 160 °C มีค่าความเหนียวมากกว่าข้าวเหนียวหุงสุกด้วยการ Steaming ส่วนเงื่อนไขการทดลองอื่น ความเหนียวของข้าวเหนียวหุงสุกมีค่าน้อยกว่า สำหรับที่อัตราส่วนน้ำต่อข้าวเหนียว 1:1 ข้าวเหนียวหุงสุกมีความเหนียวมากกว่าข้าวเหนียวสุกด้วยการ Steaming ที่อุณหภูมิอบแห้งสูงกว่า 140 °C ขึ้นไป ข้าวเหนียวหุงสุกที่ได้จากการเตรียมที่อัตราส่วนน้ำต่อข้าวเหนียว 1.2:1 มีค่าความเหนียวมากกว่าความเหนียวของข้าวเหนียวสุกด้วยการ Steaming ทุกเงื่อนไขการทดลอง และจากการสังเกตพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อข้าวเหนียว 1.2:1 เมล็ดข้าวเหนียวหุงสุกส่วนใหญ่แตกบานออกไม่คงรูปร่างของเมล็ดแม้ว่าเนื้อสัมผัสมีความนุ่มเหนียวมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำอีก 2 กรณี

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อความแข็งและความเหนียวของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุกที่อัตราส่วนน้ำต่อข้าวเหนียวเดียวกัน พบว่า ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งมีค่าความแข็งลดลงและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ยกเว้นกรณีอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเหนียว 1.2:1 ความแข็งของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุกอุณหภูมิ 140 °C ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับความแข็งของข้าวเหนียวหลังผ่านการแช่หุงสุก สำหรับกรณีความเหนียวของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุก พบว่า ความเหนียวของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุกที่อัตราส่วนน้ำต่อข้าวเหนียว 1:1 และ 1.2:1 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ในกรณีอัตราส่วนน้ำ 0.9:1 เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงกว่า 150 °C ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวมีความเหนียวเพิ่มขึ้น การลดลงของความแข็งและการเพิ่มขึ้นของความเหนียวของตัวอย่างข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหลังผ่านการอบแห้งเกิดจากการเกิดเจลาทิไนเซชันทำให้เกิดการสูญเสียลำดับของอะมิโลเพคตินในส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึก เมื่อโครงสร้างผลึกเกิดการคลายตัว ความแข็งแรงก็ลดลงจึงส่งผลให้ข้าวเหนียวที่เกิดเจลาทิไนเซชันมีเนื้อสัมผัสนุ่มเหนียวเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบสมบัติการเกิดเจลาทิไนเซชันและสมบัติด้านสภาพเป็นผลึกดูจากตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 ตามลำดับ