



บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ความชื้นและปริมาณแอมิโลส

จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นและแอมิโลสในข้าว 9 สายพันธุ์ ซึ่งได้จากการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์โดยเครือข่ายวิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์อุบลราชธานี 52 ได้แก่ ข้าวหอมกัญญา ข้าวสินเหล็ก ข้าวหอมมะลิแดง ข้าวหอมอุบล ข้าวหอมมะลิ 105 ข้าวสังข์หยดอุบล ข้าวหอมนิล ข้าวเหนียวดำอุบล และข้าวเหนียวเจ้าแตก ผลจากการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 ปริมาณความชื้นของข้าวดังกล่าวอยู่ในช่วง 10-12 เปอร์เซ็นต์ (wet basis) ปริมาณแอมิโลสในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งของข้าวทั้ง 9 สายพันธุ์ดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 มีปริมาณแอมิโลสต่ำมาก 9-12 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ ข้าวเหนียวดำอุบล ข้าวเหนียวเจ้าแตก กลุ่มที่ 2 มีปริมาณแอมิโลส 18-19 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ เมื่อหุงสุกจะมีลักษณะเหนียวและนุ่ม ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ 105 และข้าวหอมนิล และกลุ่มที่ 3 มีปริมาณแอมิโลส 20-25 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง เมื่อหุงสุกจะมีลักษณะค่อนข้างเหนียวและนุ่ม ได้แก่ ข้าวหอมกัญญา ข้าวสินเหล็ก ข้าวหอมมะลิแดง ข้าวหอมอุบล และข้าวสังข์หยดอุบล จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าข้าวทั้ง 9 สายพันธุ์มีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณแอมิโลสเฉลี่ยในแต่ละสายพันธุ์ พบว่ามีสองสายพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) คือ ข้าวหอมกัญญา (22.07 เปอร์เซ็นต์) และข้าวสินเหล็ก (22.41 เปอร์เซ็นต์) ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำที่สุดและสูงที่สุดในกลุ่มคือ ข้าวเหนียวดำอุบล (9.75 เปอร์เซ็นต์) และ ข้าวหอมมะลิแดง (24.98 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าปริมาณแอมิโลสที่วิเคราะห์ได้นั้นใกล้เคียงกับผลจากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา เช่น ศศิธร (2547) วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสในข้าวกล้าสายพันธุ์ต่างๆ พบว่ามีปริมาณแอมิโลสอยู่ระหว่าง 6-9 เปอร์เซ็นต์ กรมการข้าว (2550) รายงานว่าข้าวสังข์หยดพัทลุงมีปริมาณแอมิโลส 16-17 เปอร์เซ็นต์ ส่วนข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณแอมิโลส 15-17 เปอร์เซ็นต์ (กรมการข้าว, 2550; อารีรัตน์, 2544 และ ศศิธร, 2547)

จากรายงานต่างๆ ที่ผ่านมา พบว่าปริมาณแอมิโลสมีความสำคัญต่อคุณภาพการหุงต้ม การรับประทาน และการแปรรูป (cooking, eating and processing qualities) ของข้าวหลังการหุงต้ม Champagne et al. (2004) ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวที่หุงสุกใหม่โดยใช้ปัจจัยในการทดสอบ 14 ด้าน พบว่า มี 11 ปัจจัยที่ใช้ทดสอบที่มีความสัมพันธ์อย่างมากทั้งในเชิงบวกและลบกับปริมาณแอมิโลส ในการเลือกสายพันธุ์ข้าวเพื่อให้มีสมบัติเชิงหน้าที่และสมบัติทางประสาทสัมผัส

ที่เหมาะสมนั้นโดยส่วนใหญ่มักใช้การเลือกโดยการพิจารณาจากปริมาณแอมิโลส เนื่องจากปริมาณแอมิโลสมักมีความสัมพันธ์กับสมบัติต่างๆ ตามต้องการ เช่น ในแถบเอเชียแปซิฟิกข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณแอมิโลสต่ำมีเนื้อสัมผัสนุ่มและเหนียวจึงมักถูกนำไปใช้ทำขนมหวาน ขนมขบเคี้ยวและผลิตภัณฑ์อาหารเข้าที่ที่ต้องการความพอง ข้าวที่มีแอมิโลสปานกลางมักถูกนำไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหารกระป๋องประเภทซूप และข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมักใช้ทำผลิตภัณฑ์ประเภทพาสต้าจากการอัดพอง (extruded pasta) ก๋วยเตี๋ยว และข้าวพร้อมบริโภคบรรจุกระป๋อง (retort boiled rice) (Juliano and Hicks, 1996)

ปริมาณแอมิโลสในข้าวมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดข้าว โดยในข้าวเหนียวมีปริมาณต่ำกว่าข้าวเจ้า ปริมาณแอมิโลสมีบทบาทสำคัญต่อลักษณะเนื้อสัมผัสหรือความเหนียว ความนุ่มของข้าว ปริมาณแอมิโลสถูกนำมาใช้ในการจำแนกกลุ่มข้าว (Juliano, 1993; อรอนงค์, 2547) คือข้าวที่มีแอมิโลส 0-5 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นข้าวเหนียวเมื่อสุกจะเหนียวมาก ข้าวที่มีแอมิโลส 5.1-12.0 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำมากเมื่อสุกจะเหนียว ข้าวที่มีแอมิโลส 12.1-20.0 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำเมื่อสุกจะนุ่มเหนียว หุงแฉะง่าย ข้าวที่มีแอมิโลส 20.1-25.0 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นข้าวเจ้าแอมิโลสปานกลางเมื่อสุกจะค่อนข้างนุ่ม-ร่วน และข้าวที่มีแอมิโลสมากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นข้าวแอมิโลสสูงเมื่อสุกจะร่วนแข็งและหุงขึ้นหม้อ

Ong and Blanchard (1995) ศึกษาผลของปริมาณและขนาดโมเลกุลแอมิโลสและ แอมิโลเพคตินในสตาร์ชต่อเนื้อสัมผัสของข้าวในกลุ่มของข้าวอินดิกาจำนวน 11 พันธุ์ ผลการทดลองพบว่าปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพคตินของข้าวแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน และมีความสัมพันธ์กับเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกคือ ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง จะมีเนื้อสัมผัสของข้าวแข็งกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ นอกจากนี้พบว่าโครงสร้างของแอมิโลสและแอมิโลเพคตินมีผลกับเนื้อสัมผัส เช่น โมเลกุลที่มีสายยาวที่มีความยาว DP (degree of polymerization) เท่ากับ 92-98 มีผลทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวแข็ง เนื่องจากโมเลกุลที่มีสายยาวมีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยากับ ไชมัน โปรตีน และ โพลีแซคคาไรด์อื่นๆ ได้ง่าย ข้าวที่สุกจึงมีเนื้อสัมผัสที่แข็ง

ข้าวที่มีแอมิโลสสูงจะดูดน้ำได้มากในระหว่างการหุงต้ม ดังนั้นปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มจึงมีผลต่อคุณภาพข้าวสุก เช่น ข้าวแอมิโลสต่ำต้องการน้ำน้อย หากใส่น้ำมากเกินไปจะได้ข้าวสุกแฉะและ แต่สำหรับข้าวแอมิโลสสูงหากใส่น้ำปริมาณเท่ากับการหุงต้มข้าวแอมิโลสต่ำจะได้ข้าวสวยที่แข็งกระด้างมาก เนื่องจากการหุงต้มข้าวแอมิโลสสูงต้องการน้ำมาก และเมื่อสุกแล้วจะได้ข้าวสวยร่วนฟูไม่เหนียวติดกัน จึงทำให้ข้าวสุกขยายปริมาตรมากหรือข้าวขึ้นหม้อดีกว่าข้าวแอมิโลสต่ำ ในขณะที่ข้าวแอมิโลสต่ำข้าวสวยมีลักษณะเหนียว เกาะติดกัน เป็นก้อนจึงไม่ขึ้นหม้อ (งามชื่น, 2547)

งามขึ้น (2547) รายงานเกี่ยวกับการใช้ปริมาณแอมิโลสในการทำนายปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการหุงต้ม โดยพบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักน้ำ : ข้าวที่เหมาะสม แสดงความสัมพันธ์เชิงบวก (+) กับปริมาณแอมิโลส ปริมาณข้าวชนิดอื่นปน gelatinization temperature, set back value และ consistency value หากปริมาณแอมิโลส set back value และ consistency value มีค่าสูงจะมีผลทำให้ข้าวสวยแข็งกระด้างมากขึ้น การหุงต้มจึงควรเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อลดความแข็งกระด้างลง ในการใช้ปัจจัยแอมิโลสทำนายเพียงอย่างเดียว ทำได้โดยใช้สมการ $W = 0.62 + 0.0626 A$ โดยมีค่า $R^2 = 0.73$ (เมื่อ $W =$ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำหุงต้ม : ข้าว, $A =$ ปริมาณแอมิโลสในข้าวขาว เป็นเปอร์เซ็นต์, $R^2 =$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์) จากสมการหากใช้ปริมาณแอมิโลสเพียงปัจจัยเดียวสามารถใช้ในการคาดคะเนหาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำ : ข้าวที่เหมาะสม โดยได้ค่าใกล้เคียง 73 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนน้ำหุงต้มอยู่

โดยทั่วไปในการจัดจำแนกประเภทของข้าว นั้น ส่วนใหญ่มักจะใช้ปริมาณแอมิโลสโดยจำแนกออกเป็นข้าวเหนียวและข้าวเจ้า อย่างไรก็ตามในบางกรณีข้าวบางประเภทอาจจะจัดจำแนกประเภทได้ยากหากพิจารณาจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติทางเคมีกายภาพ เช่น ข้าวประเภทที่เป็น wax-like จะต้องมีปริมาณแอมิโลสน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ (Bao, 2007) แต่วิเคราะห์พบว่าปริมาณแอมิโลสสูงกว่า จึงจำเป็นต้องตรวจสอบโดยวิธีการอื่นเพิ่มเติม วิธีการวิเคราะห์ที่นิยมคือ สมบัติด้านความหนืด ซึ่งการทดลองนี้ได้วิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดโดยเลือกใช้การวิเคราะห์ด้วย เครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA) ดังผลที่แสดงในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4.1 ความชื้นและปริมาณแอมิโลสของข้าวกล้อง 9 สายพันธุ์*

พันธุ์ข้าว	ความชื้น (% โดยน้ำหนักเปียก)	ปริมาณแอมิโลส (% โดยน้ำหนักแห้ง)
ข้าวหอมกัญญา	11.60±0.30	22.07±0.41 _f
ข้าวสินเหล็ก	10.50±0.09	22.41±0.44 _f
ข้าวหอมมะลิแดง	10.26±0.07	24.98±0.21 _g
ข้าวหอมอุบล	10.64±0.25	20.22±0.24 _d
ข้าวหอมมะลิ 105	10.57±0.06	18.44±0.89 _c
ข้าวสังข์หยด	11.33±0.21	21.37±0.43 _e
ข้าวหอมนิล	10.95±0.05	18.74±1.17 _c
ข้าวเหนียวดำ	12.11±0.09	9.75±0.13 _a
ข้าวเหนียวเจ้าแตก	11.79±0.10	11.87±0.36 _b

*ค่าที่แสดงในตารางเป็น ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทำการทดลอง 3 ซ้ำ และอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

4.2 ปริมาณแอมิโลสและสมบัติด้านความหนืด

ในเรื่องการวิเคราะห์คุณภาพข้าวนั้น ปริมาณแอมิโลสเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่สุดในการใช้ตรวจสอบคุณภาพการรับประทานและการหุงต้ม (Bao and Bergman, 2004; Juliano, 1985 and Varavinit et al., 2003) อย่างไรก็ตามสมบัติด้านความหนืดก็เป็นอีกปัจจัยเช่นกันที่มีความสำคัญในการตรวจสอบคุณภาพข้าว จากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีพบว่าสมบัติด้านความหนืด (pasting viscosity properties) สามารถใช้ทำนายคุณภาพหลังการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวได้ (Shu et al., 1998; Limpisut and Jindal, 2002 and Bhattacharya, 1999) ในการทดลองนี้เลือกใช้เครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA) ซึ่งใช้ทดสอบความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เวลาและอัตราเร็วในการกวน การทดสอบทำโดยนำข้าวมาบดแล้วผสมน้ำจากนั้นให้ความร้อน ในขณะที่เม็ดแป้งแขวนลอยอยู่ในน้ำ เม็ดแป้งจะค่อยๆ ดูดซับน้ำไว้และพองตัวใหญ่ขึ้นพร้อมๆ กับที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ปริมาตรของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นนี้จะเข้าแทนที่น้ำที่อยู่เป็นอิสระ (free water) ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดแป้งลดน้อยลง และทำให้ความหนืดของน้ำแป้งเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และหากต้มหรือเคี่ยวน้ำแป้งต่อไปเม็ดแป้งจะยิ่งพองมากขึ้น จนผนังเซลล์ไม่สามารถทนทานได้ก็จะแตกตัว (rupture) สารต่างๆ ที่อยู่ภายในจะกระจายออกมา ทำให้

ความหนืดลดลง ในช่วงแรกอัตราการพองตัวของเม็ดแป้งจะสูงกว่าการแตกตัว ทำให้ความหนืดของน้ำแป้งยังคงเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่อัตราการพองตัวสมดุลกับอัตราการแตกตัว หลังจากนั้น อัตราการแตกตัวจะสูงกว่าการพองตัว ทำให้ความหนืดของน้ำแป้งลดลง ณ จุดที่อัตราการพองตัวสมดุลกับอัตราการแตกตัว คือ ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) แป้งสุกหรือแป้งเปียกนี้ประกอบด้วยเม็ดแป้ง ชั้นส่วนของเม็ดแป้ง แป้งที่มีลักษณะเป็น Colloid และโมเลกุลของแป้งที่ละลายผสมกันอยู่ เมื่อแป้งเปียกเย็นลง ส่วนผสมเหล่านี้จะเกิดการรวมตัวขึ้นใหม่หรือการคืนตัว (retrogradation) ทำให้ความหนืดของน้ำแป้งสูงขึ้น ปัจจัยที่มีผลทำให้น้ำแป้งเปียกมีอัตราการคืนตัวต่างกันได้แก่ ความเข้มข้นของแอมิโลสและสภาพการละลายของน้ำแป้ง (งามชื่น, 2547) ในการวัดค่าความหนืดของน้ำแป้งจะบันทึกข้อมูลเป็นเส้นกราฟ ค่าที่นำมาพิจารณา คือ ค่า peak viscosity, trough, final viscosity, breakdown, setback 1, setback 2, peak time และ pasting temperature

จากการวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดของข้าวทั้ง 9 สายพันธุ์โดยใช้เครื่อง RVA พบว่าค่าที่วิเคราะห์ได้จาก pasting profiles นั้นมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยจากตารางได้แสดงค่าดังกล่าวเปรียบเทียบกับปริมาณแอมิโลส จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าที่วิเคราะห์ได้จาก RVA profiles นั้นโดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามปริมาณแอมิโลส โดยมีค่ามากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณแอมิโลส (trough, final viscosity, setback 1, setback 2, peak time และ pasting temperature) ยกเว้นค่า peak viscosity และค่า breakdown จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ข้าวหอมอุบลซึ่งมีปริมาณแอมิโลส 20.22 เปอร์เซ็นต์ นั้นให้ค่า peak viscosity, trough, final viscosity, setback 1 สูงที่สุด ในขณะที่ข้าวเหนียวดำมีค่า trough, final viscosity, setback 1, setback 2, peak time และ pasting temperature ต่ำที่สุด โดยค่า setback 2, peak time และ pasting temperature มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) กับข้าวเหนียวเจ้าแตก ส่วนข้าวหอมมะลิซึ่งมีปริมาณแอมิโลส 18.74 เปอร์เซ็นต์ มีค่า setback 2, peak time และ pasting temperature สูงที่สุด โดยค่า setback 2 มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) กับข้าวหอมมะลิแดง

สำหรับค่า breakdown นั้นพบว่าข้าวหอมมะลิมีค่าต่ำที่สุดในขณะที่ข้าวเหนียวเจ้าแตกมีค่าสูงที่สุด โดยทั่วไปค่า breakdown อธิบายถึงความทนทานของเม็ดแป้งต่อการเคี้ยว ในขณะที่ค่า setback 2 อธิบายถึงการแข็งตัวของแป้งสุกที่เย็นลงโดยเปรียบเทียบกับค่า peak viscosity และ setback 1 อธิบายถึงการแข็งตัวของแป้งสุกที่เย็นลงเช่นกัน แต่เปรียบเทียบกับแป้งสุกร้อน

ข้าวสายพันธุ์ที่มีอุณหภูมิในการหุงสุกต่ำ ได้แก่ ข้าวเหนียวดำ ข้าวเหนียวเจ้าแตก เนื่องจากมี pasting temperature ต่ำกว่าข้าวสายพันธุ์อื่นๆ ในด้านการพองตัว พบว่าข้าวหอมมะลิแดงและข้าวหอมมะลิจัดอยู่ในประเภทที่เม็ดแป้งมีการพองตัวปานกลาง (moderate-swelling starch) เนื่องจากเม็ดแป้งจะไม่พองตัวมากถึงกับแตกออก ลักษณะกราฟจึงไม่สูงชัน และเกิดการสลายตัว

ระหว่างการหุงต้มสุกน้อยกว่า ส่วนข้าวพันธุ์ ข้าวหอมกัญญา ข้าวสินเหล็ก ข้าวหอมอุบล ข้าวหอมมะลิ 105 ข้าวสังข์หยด ข้าวเหนียวดำ และข้าวเหนียวเฒ่าแตกจะจัดเป็นประเภทที่มีเม็ดแป้งที่มีการพองตัวสูง (high swelling starch) เมื่อให้ความร้อนเม็ดแป้งจะพองตัวมาก ทำให้แรงที่ยึดกันภายในโมเลกุลอ่อนตัวลงและแตกออกเมื่อได้รับแรงเฉือน ดังนั้นกราฟจึงมีลักษณะสูงชันและลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างการต้มสุก

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนืดสูงสุดได้แก่ ปริมาณแอมิโลส โปรตีนและการเก็บรักษาข้าว (aging) ค่า trough, final viscosity, setback 2 และ setback 1 มักมีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลสในแป้งข้าว แป้งข้าวที่มีแอมิโลสต่ำที่มีคุณภาพข้าวสุกเป็นประเภทข้าวนุ่มเหนียว มีค่า final viscosity ต่ำกว่าแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (งามชื่น, 2547) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองนี้

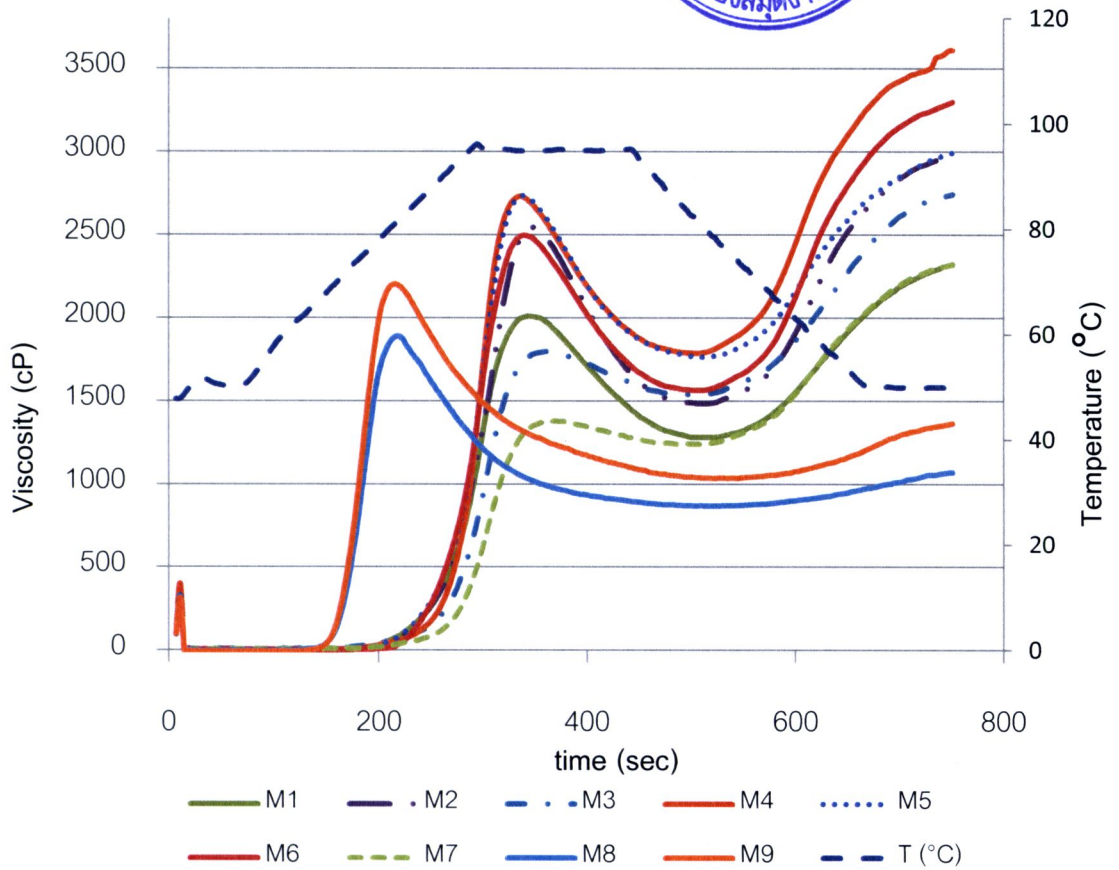
จากรูปที่ 4.1 แสดง RVA profiles จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ในข้าวทั้ง 9 สายพันธุ์ หากพิจารณาลักษณะของ RVA profiles แล้วสามารถแบ่งกลุ่มตามลักษณะของ RVA profiles ได้ 3 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า RVA profiles ของข้าวเหนียวดำและข้าวเหนียวเฒ่าแตกจะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยมีค่า peak time และ pasting temperature ต่ำ แสดงให้เห็นว่าใช้เวลาในการทำให้แป้งสุกทั้งหมดน้อยประมาณ 3.62-3.67 นาที และอุณหภูมิที่ข้าวดังกล่าวเริ่มสุกจะต่ำกว่าข้าวสายพันธุ์อื่นๆ ที่ทำการวิเคราะห์ โดยใช้อุณหภูมิที่ประมาณ 68.25-68.32 องศาเซลเซียส สำหรับค่า peak viscosity ซึ่งเป็นความหนืดสูงสุดและเป็นจุดที่เกิดเจลลิตในเซชันสมบูรณ์ซึ่งจะทำให้แป้งสุกทั้งหมดนั้น พบว่า ข้าวเหนียวดำซึ่งมีปริมาณแอมิโลส 9.75เปอร์เซ็นต์ มีค่า 1882 cP ในขณะที่ข้าวเหนียวเฒ่าแตกซึ่งมีปริมาณแอมิโลส 11.87เปอร์เซ็นต์ มีค่า 2184 cP เมื่อทำให้น้ำแป้งเย็นลงหลังการให้ความร้อนแล้วพบว่าค่า trough และ final viscosity ของข้าวเหนียวทั้งสองนั้นมีค่าต่ำ เมื่อดำเนินการเป็นค่า setback 1 และ setback 2 จะมีค่าต่ำกว่าสายพันธุ์ที่เหลือซึ่งจัดเป็นข้าวเจ้า โดยค่า setback 2 มีค่าติดลบแสดงว่าเป็นข้าวอ่อน หลังการทำให้เย็นลงจะไม่สามารถเกิดเจลแข็งได้

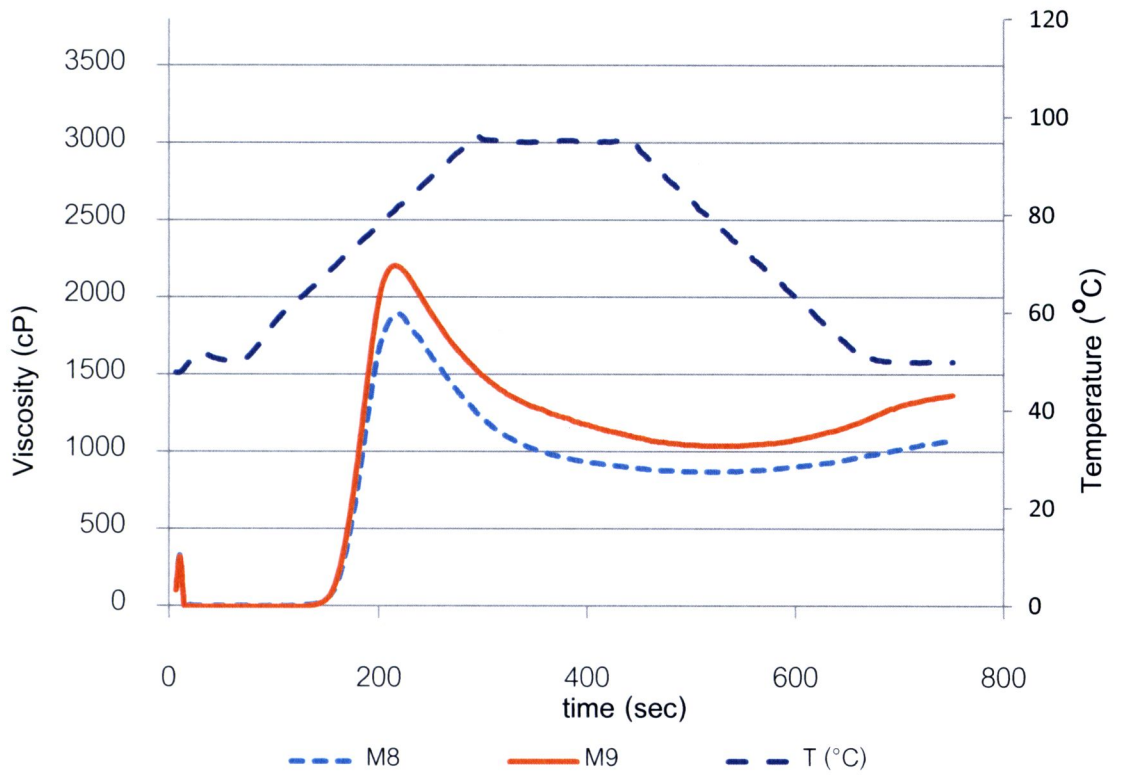
ตารางที่ 4.2 ปริมาณแอมิโลสและสมบัติทางด้านความหนืดของข้าว 9 สายพันธุ์*

พันธุ์ข้าว	ปริมาณแอมิโลส (% โดยน้ำหนักแห้ง)	Peak viscosity (cP)	Trough (cP)	Breakdown (cP)	Final viscosity (cP)	Setback 1 (cP)	Setback 2 (cP)	Peak time (min)	Pasting temperature (°C)
ข้าวหอมกัญญา	22.07±0.41 _i	2009.00±24.51 _d	1254.67±26.54 _c	754.33±26.01 _c	2292.33±27.79 _c	1037.67±8.39 _c	283.33±33.25 _b	5.59±0.03 _b	84.90±0.48 _{bc}
ข้าวสินเหล็ก	22.41±0.44 _i	2541.00±6.24 _f	1482.67±1.15 _d	1058.33±5.51 _i	2986.00±20.42 _e	1503.33±21.22 _e	445.00±26.66 _c	5.82±0.04 _{cd}	85.58±0.44 _{cd}
ข้าวหอมมะลิแดง	24.98±0.21 _g	1768.67±27.32 _d	1521.00±15.72 _d	247.67±14.36 _b	2715.67±32.33 _d	1194.67±16.62 _d	947.00±12.53 _e	6.11±0.03 _d	88.58±0.78 _d
ข้าวหอมอุบล	20.22±0.24 _d	2712.33±17.04 _g	1791.00±4.36 _e	921.33±19.29 _d	3581.33±30.09 _g	1790.33±33.86 _f	869.00±18.25 _d	5.65±0.04 _{bc}	87.07±0.03 _d
ข้าวหอมมะลิ 105	18.44±0.89 _c	2702.67±34.70 _g	1742.67±29.5 _e	960.00±9.85 _{de}	2993.33±19.55 _e	1250.67±17.39 _d	290.67±26.58 _b	5.65±0.08 _{bc}	83.13±0.88 _{bc}
ข้าวสังข์หยด	21.37±0.43 _e	2480.33±21.55 _f	1558.33±17.95 _d	922.00±34.12 _{de}	3312.33±13.65 _f	1754.00±18.52 _f	832.00±35.08 _{de}	5.65±0.04 _{bc}	82.82±0.49 _b
ข้าวหอมนิล	18.74±1.17 _c	1391.00±10.82 _a	1248.67±7.77 _c	142.33±5.77 _a	2317.67±26.03 _c	1069.00±29.31 _c	926.67±25.74 _{de}	6.16±0.10 _d	91.07±0.03 _e
ข้าวเหนียวดำ	9.75±0.13 _a	1882.33±14.15 _c	863.33±5.69 _a	1019.00±8.89 _e	1061.33±11.59 _a	198.00±6.00 _a	-821.00±6.08 _a	3.67±0.07 _a	68.25±0.52 _a
ข้าวเหนียวเจ้าแตก	11.87±0.36 _b	2184.00±18.52 _e	1045.00±13.86 _b	1139.00±22.61 _g	1366.67±30.01 _b	321.67±19.09 _b	-817.33±25.72 _a	3.62±0.04 _a	68.32±0.51 _a

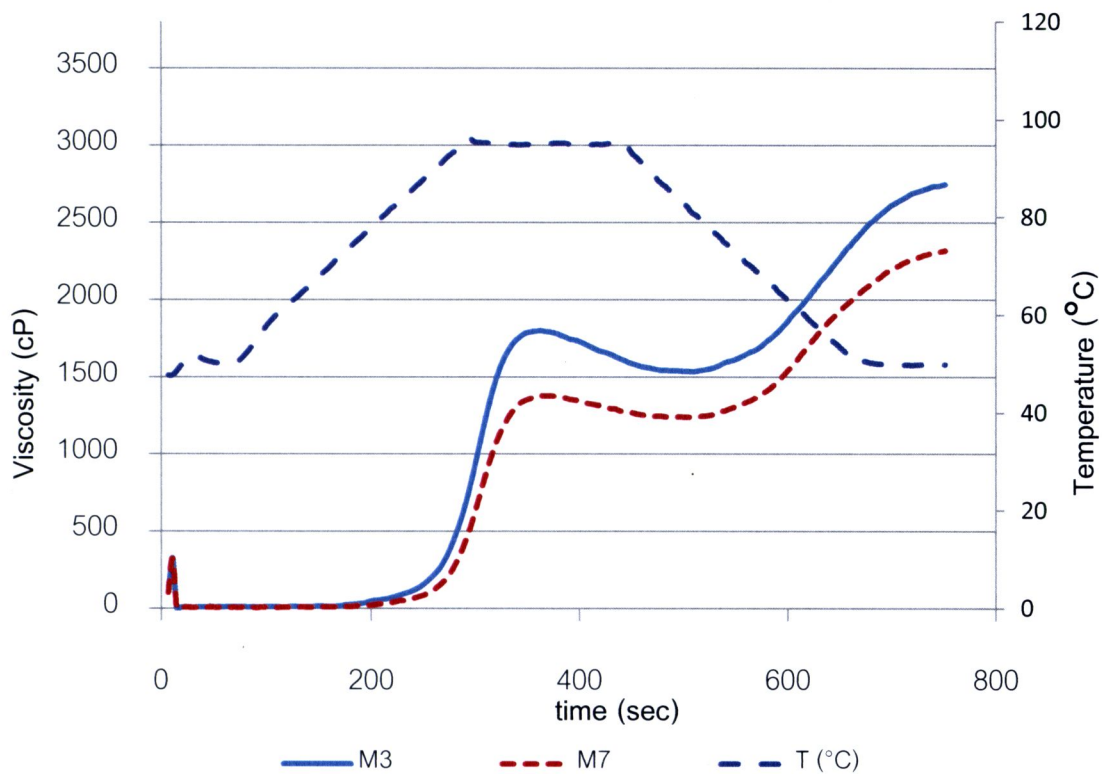
*ค่าที่แสดงในตารางเป็น ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทำการทดลอง 3 ซ้ำ ถ้าอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)



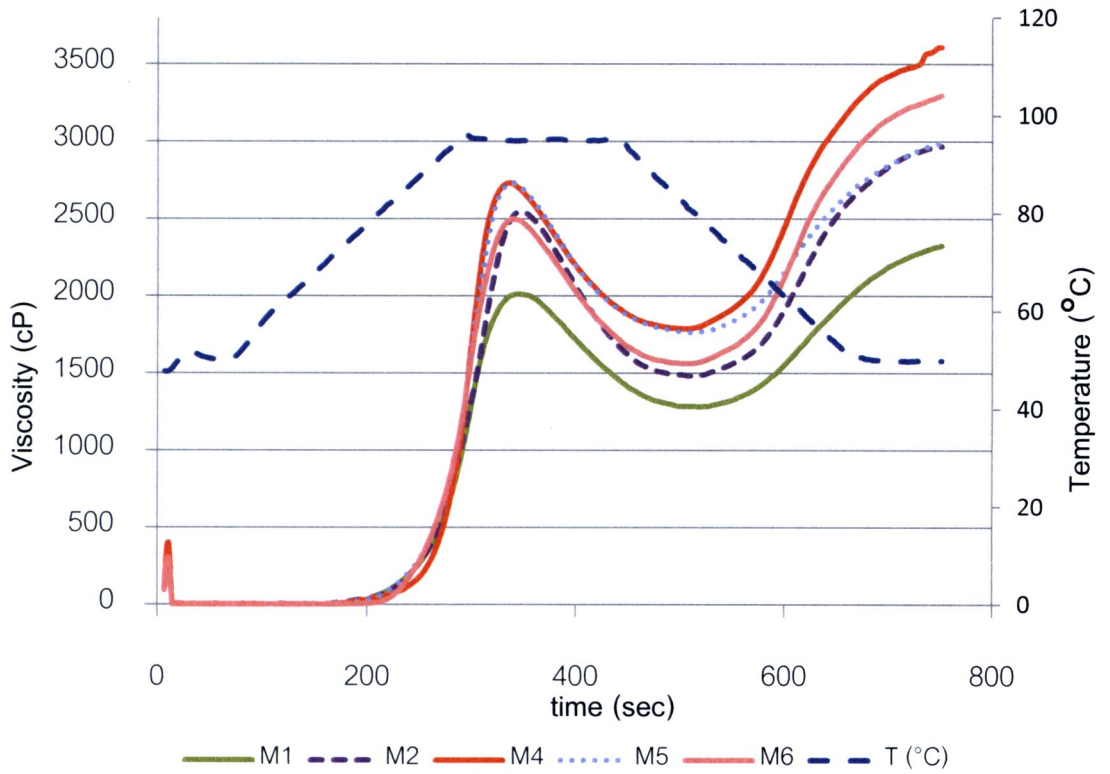
รูปที่ 4.1 RVA profiles ของข้าวหอมกัญญา (M1) ข้าวสินเหล็ก (M2) ข้าวหอมมะลิแดง (M3) ข้าวหอมอุบล (M4) ข้าวหอมมะลิ 105 (M5) และข้าวสังข์หยดอุบล (M6) ข้าวหอมนิล (M7) ข้าวเหนียวดำอุบล (M8) และข้าวเหนียวเจ้าแตก (M9)



รูปที่ 4.2 RVA profiles ของข้าวเหนียวดำอุบล (M8) และข้าวเหนียวเจ้าแตก (M9)



รูปที่ 4.3 RVA profiles ของข้าวหอมมะลิแดง (M3) และข้าวหอมนิล (M7)



รูปที่ 4.4 RVA profiles ของข้าวหอมกัญญา (M1) ข้าวสินเหล็ก (M2) ข้าวหอมอุบล (M4) ข้าวหอมมะลิ 105 (M5) และข้าวสังข์หยดอุบล (M6)

เมื่อเปรียบเทียบค่าจากการวิเคราะห์ RVA profile กับปริมาณแอมิโลสจะเห็นได้ว่าค่าต่างๆ จาก RVA profiles มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงมากขึ้นตามปริมาณแอมิโลส ยกเว้นค่า setback 2, peak time และ pasting temperature ที่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) Pitiphunpong et al. (2011) รายงานว่า peak viscosity จากข้าวหอมมะลิ 105 จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อนำไปผสมกับข้าวอื่นที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (พันธุ์ CNT 1) เมื่อเปรียบเทียบกับการผสมกับข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (พันธุ์ PTT 1) Han and Hamaker (2001) พบว่าปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์เชิงลบกับการพองตัวของเม็ดสตาร์ชของแป้ง เม็ดสตาร์ชของแป้งข้าวที่มีแอมิโลสต่ำจะมีอัตราการพองตัวสูงกว่าของแป้งข้าวที่มีแอมิโลสปานกลางและสูง ในทางกลับกัน Pitiphunpong et al. (2011) พบว่าค่า setback 2 และ final viscosity ของข้าวหอมมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวที่มีแอมิโลสสูง (พันธุ์ CNT 1) จะมีค่าสูงกว่าที่ผสมกับข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (พันธุ์ PTT 1) ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิด retrogradation ในข้าวที่มีแอมิโลสสูง

จากค่า pasting temperature ที่วิเคราะห์จากการทดลองพบว่าค่า pasting temperature มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อข้าวมีปริมาณแอมิโลสสูงขึ้น ยกเว้นข้าวหอมนิลซึ่งมีปริมาณแอมิโลส 18.74 เปอร์เซ็นต์ แต่ให้ pasting temperature สูงที่สุดในข้าวทั้ง 9 สายพันธุ์ที่ทำการศึกษา อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองโดยส่วนใหญ่สอดคล้องกับการวิจัยของรุ่งนภา และคณะ (2546) ซึ่งศึกษาการเกิดเจลาทีไนเซชันของสตาร์ชข้าวไทยจำนวน 16 พันธุ์ คือ ข้าวดอกมะลิ 105 ปทุมธานี 1 ชัยนาท 1 สุพรรณบุรี 90 เหลืองประทิว 123 กข 23 กข 6 เหนียวสันป่าตอง พิชณุโลก 1 สุพรรณบุรี 1 พิชณุโลก 2 เจียงพัทลุง สังข์หยด ข้าวห้าวร้อย กข 15 และ แจ็กเซย ด้วยเครื่อง DSC ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีไนเซชันของสตาร์ชข้าวให้ผลสอดคล้องกับอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง Rapid visco analyzer (RVA) โดยอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาทีไนเซชันของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะสูงกว่าในสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ เพราะโครงสร้างของอะไมโลสในสตาร์ชที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมัน ทำให้โมเลกุลของอะไมโลสมีลักษณะเกลียวม้วน ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดเจลาทีไนเซชันที่อุณหภูมิสูงกว่า ดังนั้นสตาร์ชข้าวแต่ละชนิดจึงมีเจลาทีไนเซชันต่างกัน และอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีไนเซชันมีความสำคัญต่อการแปรรูปข้าว



จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า RVA profiles ของข้าวหอมมะลิแดงซึ่งมีปริมาณแอมิโลส 24.98 เปอร์เซ็นต์ และข้าวหอมนิลซึ่งมีปริมาณแอมิโลส 18.74 เปอร์เซ็นต์ จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันและมีลักษณะเด่นคือ ทั้งสองสายพันธุ์มีค่า setback 2, peak time และ pasting temperature สูงกว่าสายพันธุ์อื่นที่ทำการวิเคราะห์ และขณะเดียวกันก็มีค่า peak viscosity และ breakdown ต่ำกว่าสายพันธุ์อื่นที่ทำการวิเคราะห์เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าจากการวิเคราะห์ RVA profile กับปริมาณแอมิโลสจะเห็นได้ว่าค่าต่างๆ จาก RVA profiles มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงมากขึ้นตามปริมาณแอมิโลส ยกเว้นค่า setback 2 และ peak time ที่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) ในขณะที่ข้าวหอมนิลมีค่า pasting temperature สูงกว่า ($P<0.05$)

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า RVA profiles ของข้าวหอมกัญญา ข้าวสินเหล็ก ข้าวหอมอุบล ข้าวหอมมะลิ 105 และข้าวสังข์หยดอุบล จะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ ทั้งห้าสายพันธุ์มีค่า peak time ใกล้เคียงกัน ส่วนค่า peak viscosity, trough, final viscosity และ setback 1 มีแนวโน้มสูงกว่าสายพันธุ์อื่นที่ทำการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามค่าที่วิเคราะห์จาก RVA profiles นั้น บางส่วนมีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลส แต่บางส่วนก็ไม่มีความสัมพันธ์กัน

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าในข้าวกลุ่มนี้ ข้าวหอมกัญญา นั้นมีค่าทุกค่าที่วิเคราะห์ได้จาก RVA profiles ต่ำกว่าข้าวสินเหล็ก ข้าวหอมอุบล ข้าวหอมมะลิ 105 และข้าวสังข์หยดอุบล ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณแอมิโลสสูงถึง 22 เปอร์เซ็นต์

สมบัติด้านความเหนียวของแป้งนั้นมีความเกี่ยวข้องกับการพองของเม็ดแป้ง การซึมออกมาของสารประกอบภายในและการแตกของเม็ดแป้งระหว่างการให้ความร้อนกับน้ำแป้ง (Atwell *et al.*, 1988) ค่า peak viscosity จะมีความสัมพันธ์กับอัตราการพองของเม็ดแป้งระหว่างการให้ความร้อน หากแป้งมีความสามารถในการพองตัวสูงจะทำให้ค่า peak viscosity (Ragae and Abdel-Aal, 2006) ส่วนค่า breakdown จะเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับความเสถียรของเม็ด (stability of starch granule) เมื่ออยู่ในสภาพที่มีแรงเฉือนสูง (Ragae and Abdel-Aal, 2006)

เมื่อทำให้สารละลายน้ำแป้งเย็นลงหลังการให้ความร้อน จะเป็นการทำให้เกิดการลดลงของพลังงานจลน์ทำให้โมเลกุลแป้งเกิดการกลับมาเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแห (re-association) หากเป็นระยะเวลาสั้นๆ จะทำให้เนื้อสัมผัสของน้ำแป้งสุกเปลี่ยนแปลง หากเกิดในระยะเวลาอันยาวนานจะเหนียวนำไปเกิดการระบวนการ reversible re-crystallization ของแอมิโลเพคตินที่อยู่ภายในโครงสร้างที่เกิดจากการเรียงตัวอย่างต่อเนื่องของแอมิโลส (continuous amylose network) ซึ่งจะทำให้เม็ดแป้งมีความต้านทานต่อการพองตัวเพิ่มขึ้น (Miles *et al.*, 1985; Ring *et al.*, 1987) ภาวะการระบวนการ reassociation process นี้จะทำให้ค่า final viscosity เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดค่า setback 2 มากขึ้น

การพองตัวของเม็ดแป้งมีความสำคัญต่อสมบัติทางรีโอโลยีของเจลที่เกิดจากสารละลายแป้ง (Eliasson and Gudmundsson, 1996) โดยแอมิโลเพคตินเป็นองค์ประกอบที่มีความสัมพันธ์กับการพองตัวของเม็ดแป้ง ในแป้งที่มีแอมิโลสสูงจะมีการลดลงของส่วนของแป้งที่จะเกิดการพองตัวได้ทำให้ค่าความหนืดลดลง (Tester and Morrison, 1990)

4.3 Correlation analysis ระหว่างปริมาณแอมิโลสและสมบัติด้านความหนืด

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสและค่าที่วิเคราะห์จาก RVA profiles มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์โดยการทำ Pearson correlation analysis ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าปริมาณแอมิโลสจะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่า trough, final viscosity, setback 1, setback 2, peak time และ pasting temperature โดยมีค่า Pearson correlation coefficients เท่ากับ 0.694, 0.779, 0.794, 0.864, 0.898 และ 0.866 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับค่า breakdown โดยมีค่า Pearson correlation coefficients เท่ากับ -0.451 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมากกับค่า peak time จากค่า correlation coefficients ที่สูงที่สุด ($r = 0.898$)

หากพิจารณาความสัมพันธ์เชิงลบ จะเห็นได้ว่าค่า breakdown จะมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณแอมิโลส และค่า setback 2, peak time และ pasting temperature ที่วิเคราะห์ได้จาก RVA profiles ยกเว้นค่า peak viscosity จะให้ความสัมพันธ์เชิงบวก ส่วนค่า setback 1 พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณแอมิโลสและทุกค่าจาก RVA profiles ยกเว้นค่า breakdown โดยค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่า setback 1 สูงสุดคือค่า final viscosity สำหรับค่า setback 2 พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณแอมิโลส และค่าอื่นๆ ทุกค่าจาก RVA profiles ยกเว้นค่า breakdown จะให้ค่าความสัมพันธ์เชิงลบและไม่มีความสัมพันธ์กับค่า peak viscosity ค่า setback 2 ให้ค่าความสัมพันธ์เชิงบวกสูงสุดเมื่อหาความสัมพันธ์กับค่า peak time ($r = 0.953$) และ pasting temperature ($r = 0.953$)

ผลจากการทำ correlation analysis ในการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Stephen et al. (1996) ซึ่งรายงานว่าค่า breakdown, setback 1, and setback 2 มีความสัมพันธ์อย่างมากกับค่า peak viscosity ($r = 0.917$), final viscosity ($r = 0.914$) และ breakdown ($r = -0.873$) ตามลำดับ Juliano et al. (1964) และ Delwiche et al. (1996) รายงานว่าค่า correlation coefficient สูงสุดได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลส (apparent amylose content) และค่า setback 1 ($r = 0.895$ จากรายงานของ Stephen et al., 1996) อย่างไรก็ตามจากการทดลองนี้พบว่าปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์สูงสุดกับค่า peak time ($r = 0.898$) และ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า setback 1 และ final viscosity ให้ค่า correlation coefficient สูงที่สุดเท่ากับ 0.986 รองลงมาคือความสัมพันธ์ระหว่างค่า setback 2 และค่า peak time ($r = 0.953$) และ pasting temperature ($r = 0.953$)

การเพิ่มขึ้นของค่า setback 1 เมื่อปริมาณแอมิโลสเพิ่มขึ้นมีรายงานในงานวิจัยเกี่ยวกับแป้งจากธัญพืชต่างๆ เช่นกัน (Sasaki, Yasui, & Matsuki, 2000; Vandeputte, Derycke, Geeroms, & Delcour, 2003) โดยผู้วิจัยสันนิษฐานว่าเกิดจากการเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชหลังการแตกตัว อย่างไรก็ตาม Srichuwong et al. (2005) เห็นว่านอกจากการเรียงตัวของแอมิโลสแล้วยังอาจเกิดจากการเกิดสารประกอบระหว่างแอมิโลสและไขมันเป็น amylose-lipid complexes ในแป้งที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ทำให้เกิดการพองตัวของเม็ดสตาร์ชน้อยลงและมีการรวมตัวของเม็ดสตาร์ชมากขึ้นทำให้เกิด re-association ภายในโครงสร้างของเจล

จากผลการทดลองพบว่าค่า peak viscosity และปริมาณแอมิโลสนั้นไม่มีความสัมพันธ์กัน ($P > 0.05$) ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองของ Lin et al (2011) ที่รายงานว่าค่า peak viscosity และปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญในเชิงบวก ($r = 0.830$, $p < 0.01$) โดย Lin et al. (2011) อธิบายว่าสมบัติด้านความหนืดจึงมีผลต่อคุณภาพแป้งทั้งประเภทที่เป็น waxy และ non waxy flours โดยแป้งมีสมบัติที่สามารถเกิดโครงสร้างเครือข่ายกับโปรตีนได้ในพวก waxy rice flours (Xie et al., 2008) หรือการเกิด amylose-lipid complex formation ในพวก non waxy rice flours อย่างไรก็ตาม Tan and Corke (2002) พบว่าสมบัติด้านความหนืดของแป้งประเภท waxy rice flours มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับปริมาณแอมิโลส ($r = -0.280$, $p < 0.05$)

จากการทดลองนี้ พบว่าปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญในเชิงบวกกับค่า final viscosity ($r = 0.779$, $p < 0.01$) และค่า setback 2 ($r = 0.864$, $p < 0.01$) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดลองของ Lin et al (2011) โดยจากรายงานพบว่าค่า final viscosity ของแป้งข้าวที่มีแอมิโลสต่ำ ปานกลาง และสูงจะมีค่า 637–2423 cP, 3572–4637 cP, และ 5004–7626 cP ตามลำดับ โดยค่า final viscosity มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมากกับปริมาณแอมิโลส ($r = 0.945$, $p < 0.01$) สำหรับค่า setback 2 ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเกิด retrogradation ของเจลจากแป้งนั้น พบว่าแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีค่า setback 2 สูงกว่าแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางและต่ำ โดยปริมาณแอมิโลสจะมีผลต่อการเกิดการรวมตัวกันใหม่ของเม็ดสตาร์ช (reaggregation of starch granules) หลังการทำให้เย็น ซึ่งตรวจสอบได้จากความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างค่า setback 2 และปริมาณแอมิโลส ($r = 0.955$; $p < 0.01$) การเพิ่มขึ้นของความหนืดระหว่างช่วงการทำใหเย็นนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการเรียงตัวของสายแอมิโลส (Flores-Farias et al., 2000)

Chanapamokkhot and Thongngam (2007) รายงานว่าสตาร์ชและแป้งจากข้าวฟ่างและข้าวสาลีให้ค่า trough, final viscosity และ setback 2 ที่มีความสัมพันธ์เชิงลบ ($p < 0.05$) กับค่า breakdown ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองนี้ จากผลดังกล่าวแสดงว่าการ re-association ระหว่างโมเลกุลแป้งในขณะที่ทำให้แป้งสุกเย็นลงนั้นมีความสัมพันธ์กับการแตกตัวของเม็ดแป้ง (Srichuwong et al. 2005) ค่า setback 2 มีความสัมพันธ์กับการเกิด retrogradation และ reordering ของโมเลกุลแป้ง (Ragaei and Abdel-Aal, 2006) ดังนั้นแป้งที่มีค่า setback 2 ต่ำจะมีแนวโน้มในการเกิด retrogradation และ syneresis ต่ำกว่าแป้งที่มีค่าสูงกว่า

4.4 Regression analysis ระหว่างปริมาณแอมิโลสและสมบัติด้านความหนืด

ปริมาณแอมิโลสและค่าจากการวัดและวิเคราะห์ด้วย RVA ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย Backward multiple regression analyses (ตารางที่ 4.4) เพื่อตรวจสอบดูความสามารถในการทำนายปริมาณแอมิโลสจากค่าจากการวัดและวิเคราะห์ด้วย RVA โดยปริมาณแอมิโลสจะถูกตั้งเป็นตัวแปรตาม (dependent variable, Y) และค่าจาก RVA profiles ถูกตั้งเป็นตัวแปรอิสระ (independent variables) จากการวิเคราะห์ได้สมการที่สามารถนำมาใช้ในการทำนายได้ 7 สมการ โดยสมการที่ 1, 2 และ 3 ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดเท่ากับ 0.915 ($P < 0.01$) โดยตัวแปรอิสระที่นำมาใช้ในการคำนวณได้แก่ peak viscosity (cP), trough (cP), breakdown (cP), final viscosity, setback 1 (cP), peak time (min), และ pasting temperature ($^{\circ}\text{C}$) แสดงว่าค่าตัวแปรอิสระดังกล่าวสามารถอธิบายความแปรปรวนของปริมาณแอมิโลสได้ 91.5 เปอร์เซ็นต์ โดยหากใช้สมการที่ 1 คือ $Y = 5.556 - 0.010PV - 0.043T + 0.010BD + 0.051FV - 0.049ST_1 + 6.417PT - 0.258PTE$ จะสามารถทำนายปริมาณแอมิโลสได้โดยใช้ตัวแปรอิสระ 7 ตัวคือ peak viscosity, trough, breakdown, final viscosity, setback 1, peak time และ pasting temperature

อย่างไรก็ตามการทำนายปริมาณแอมิโลสสามารถทำได้โดยใช้ตัวแปรอิสระน้อยที่สุดคือ peak time เพียงค่าเดียวดังแสดงในสมการที่ 7 คือ $Y = -5.820 + 4.638PT$ โดยยังคงให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงเท่ากับ 0.898 ($P < 0.01$) แสดงว่าค่า peak time สามารถอธิบายความแปรปรวนของปริมาณแอมิโลสได้ 89.8 เปอร์เซ็นต์ จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์กับค่า peak time > final viscosity > trough > setback 1 > pasting temperature > breakdown > peak viscosity > setback 2 ซึ่งใกล้เคียงกับรายงานของ Wang et al. (2010) บางส่วนโดยพบว่าปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์กับค่า peak time > breakdown > trough > setback 2 > final viscosity > peak viscosity > setback 1 (consistency) > pasting temperature

Wang et al. (2010) รายงานเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณแอมิโลสและค่าจากการวิเคราะห์ด้วย RVA โดยพบว่าสมการจากการทำ Multiple regression โดยให้แอมิโลสเป็นตัวแปรตาม (Y) และค่า peak viscosity, trough, breakdown, final viscosity, setback 1, setback 2, peak time และ pasting temperature คือ $Y = -6.647 - 0.285X_1 + 0.68X_2 + 0.873X_3 - 0.4X_4 + 0.623X_5 + 3.515X_6 - 0.046X_7 - 0.155X_8$ ซึ่งมีค่า F value = 57.298 > F 0.01 (8, 25) = 3.32 and R value เท่ากับ 0.974 แสดงถึงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง ปริมาณแอมิโลสและค่าจากการวิเคราะห์ด้วย RVA ($P < 0.01$)

4.5 ปริมาณ 2-acetyl-1-pyrroline และ n-hexanal ก่อนและหลังการหุงต้ม

ข้าวที่ไม่ผ่านการหุงต้มและข้าวที่ผ่านการหุงต้มทั้ง 9 สายพันธุ์ถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบให้กลิ่นในข้าวคือ ปริมาณ 2-acetyl-1-pyrroline (ACPY) และ n-hexanal และคำนวณอัตราการลดลงของสารประกอบทั้งสองชนิดหลังการหุงต้ม ดังแสดงในตารางที่ 4.5 รูปที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 จากผลการทดลองพบว่าข้าวหอมมะลิ 105 มีปริมาณ ACPY สูงที่สุดเท่ากับ 156.88 ng/g รองลงมาคือ ข้าวหอมอุบล ข้าวหอมนิล และข้าวหอมกัญญา ตามลำดับ ข้าวสังข์หยดและข้าวมะลิแดงมีปริมาณ 40-60 ng/g ส่วนข้าวสินเหล็ก ข้าวเหนียวดำอุบลและข้าวเหนียวเจ้าแตกมีปริมาณต่ำมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ สำหรับข้าวที่ใช้ในการทดลองทุกสายพันธุ์เป็นข้าวกล้องยังไม่ผ่านการขัดสี จะมีปริมาณ ACPY สูงกว่าข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้ว

ข้าวทุกสายพันธุ์เมื่อผ่านการหุงต้มแล้วจะมีปริมาณ ACPY ลดลง โดยข้าวหอมมะลิ 105 และข้าวหอมอุบลจะมีปริมาณ ACPY สูงสุดหลังการหุงต้มและมีปริมาณ ACPY ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) โดยอัตราการลดลงหลังการหุงต้มของข้าวหอมมะลิ 105 เท่ากับ 72.42 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ข้าวหอมอุบลลดลงเท่ากับ 57.45 เปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบอัตราการลดลงของ ACPY พบว่า ข้าวหอมนิลมีอัตราการลดลงสูงที่สุด รองลงมาเป็น ข้าวหอมมะลิ 105 และข้าวหอมกัญญา ส่วนข้าวหอมมะลิแดง ข้าวหอมอุบล ข้าวสังข์หยดอุบลมีอัตราการลดลงอยู่ในช่วง 53-60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนข้าวสินเหล็ก ข้าวเหนียวดำอุบลและข้าวเหนียวเจ้าแตกอยู่ในกลุ่มที่มีปริมาณ ACPY ต่ำน้อยกว่า 10 ng/g จึงไม่สามารถนำมาคิดอัตราการลดลงได้

กลิ่นหอมในข้าวจัดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ในการจำแนกประเภทข้าว ข้าวหอมและข้าวเจ้าจะมีความแตกต่างกันทั้งในด้านกลิ่นรสและเนื้อสัมผัส โดยข้าวหอม (aromatic/scented rice) จะมีกลิ่นที่เหมือนกับข้าวโพดคั่ว (popcorn-like) หรือเหมือนกับใบเตย (pandan-like) จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ความหอมที่ปรากฏในข้าวหอมนั้นเกิดจากสารประกอบหลักที่มีชื่อว่า 2-acetyl-1-pyrroline (ACPY) และนอกจากจะเป็นสารประกอบที่แสดงคุณสมบัติของข้าวหอมแล้ว ยังเป็น

สารหอมหลักที่พบได้ในใบเตย (*Pandanus amaryllifolius* Roxb.) (Buttery et al., 1983 ; Lin et al., 1990 ; Laksanalamai and Ilangantileke, 1993)

สารประกอบ ACPY เป็นสารประกอบที่มีความสำคัญและเป็นสารที่ให้กลิ่นหลักในข้าวหอม (aromatic rice) สายพันธุ์ต่างๆ ในข้าวที่ไม่ใช่ข้าวหอม (nonaromatic rice) นั้น Buttery et al (1983) รายงานว่าตรวจพบปริมาณ ACPY <0.008 ppm สำหรับข้าวที่เป็นสายพันธุ์ basmati-type rice Sarreal et al (1997) ตรวจสอบพบว่า มี ACPY <208 ng/g และปริมาณ ACPY มีแนวโน้มลดลงระหว่างการเก็บรักษา และหากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37°C อัตราการลดลงของ ACPY จะสูงกว่าการเก็บรักษา 25°C นอกจากนี้ยังพบว่าความเสถียรของ ACPY ในข้าวกล้องจะสูงกว่าข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้ว

Buttery et al. (1988) รายงานว่าตรวจพบ ACPY ครั้งแรกในการตรวจปริมาณสารระเหยที่เกิดจากกระบวนการเกิดสีน้ำตาล (browning volatiles) ACPY ถูกรายงานครั้งแรกว่าเป็นสารประกอบให้กลิ่นที่สำคัญที่พบในข้าวสุก และยังสามารถพบได้ในอาหารอื่น เช่น ขนมปัง ข้าวโพดคั่ว rice cake และอื่นๆ Mahatheeranont et al. (1995) รายงานว่าในข้าวหอมมะลิ KDML-105 มีสารหลักที่ให้กลิ่นหอมคือ ACPY และยังมีสารประกอบที่ให้กลิ่นอื่นๆ ด้วย ได้แก่ butyl acetate, diethyl carbonate, butyl cyclopropane, 1,4-dimethylbenzene, isocyanatomethylbenzene, hexanal, nonanal, 7-octen-4-ol, 2-(2-propoxyethoxy)ethanol และ 2,6-bis(1,1-dimethyl-ethyl)-4-methylphenol ซึ่งสารประกอบให้กลิ่นที่พบโดยส่วนใหญ่คล้ายคลึงกับที่พบในใบเตย

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณ n-hexanal ในข้าวที่วิเคราะห์นั้น ข้าวสังข์หยดอุบลมีปริมาณ n-hexanal สูงสุด (10.33 $\mu\text{g}/\text{kg}$) รองลงมาคือ ข้าวหอมอุบล ข้าวหอมมะลิ 105 และข้าวหอมนิลซึ่งมีปริมาณ n-hexanal ไม่แตกต่างกัน ($P>0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8.87-9.34 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ถัดไปเป็นข้าวเหนียวแล้วแต่ก็มีปริมาณ n-hexanal 8.16 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ข้าวหอมกัญญามีปริมาณ n-hexanal 6.67 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ส่วนข้าวสินเหล็กและข้าวหอมมะลิแดงมีปริมาณ n-hexanal ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 5.46-5.68 $\mu\text{g}/\text{kg}$ หลังการหุงต้มพบว่าทุกสายพันธุ์มีปริมาณ n-hexanal ลดลง 90-98 เปอร์เซ็นต์ และหลังการหุงต้มมีปริมาณ n-hexanal ต่ำกว่า 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ทุกสายพันธุ์

n-hexanal เป็นสารประกอบในกลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl compound) Bennion (1980) รายงานว่าสารประกอบในกลุ่มคาร์บอนิลจะให้กลิ่นหืนหรือกลิ่นอับ (rancid/stale odors) โดยในช่วงหลังการเก็บเกี่ยวและระหว่างการเก็บรักษาจะเกิดกระบวนการ lipid deterioration ทำให้เกิดสารประกอบในกลุ่มคาร์บอนิลเพิ่มขึ้น Gon Shin et al. (1986) พบว่าปริมาณ n-hexanal เพิ่มขึ้น

จากกระบวนการ lipid deterioration การตรวจวิเคราะห์ n-hexanal จึงถือว่าเป็นดัชนีในการบ่งชี้คุณภาพของข้าวได้ในแง่ของการเกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์และกลิ่นเหม็นหืน

ในระหว่างการเก็บรักษาพบว่ามี的增加ขึ้นของปริมาณ n-hexanal (Tulyathan et al., 2008) โดยพบว่าช่วง 4 เดือนแรกมีการเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อเข้าสู่เดือนที่ 5 Widjaja et al. (1996) รายงานว่าระหว่างการเก็บรักษาพบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ n-hexanal ในข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้วจะมากกว่าข้าวกล้องและข้าวที่ยังไม่ผ่านการกระเทาะเปลือกตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากข้าวกล้องยังคงมีส่วนของเยื่อหุ้มด้านนอกและข้าวที่ยังไม่ผ่านการกระเทาะเปลือกก็ยังคงมีเปลือกห่อหุ้มอยู่ทำให้เกิดการป้องกันไม่ให้เกิดการแพร่ผ่านของออกซิเจนได้ง่าย จึงทำให้เกิดกระบวนการ lipid oxidation ลดลงในข้าวกล้องและข้าวที่ไม่ผ่านการกระเทาะเปลือก จากงานวิจัยต่างๆ พบว่า n-hexanal ที่เพิ่มขึ้นในข้าวระหว่างการเก็บรักษานั้นโดยส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการ lipolysis และการ autooxidation ของ linoleic acid ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์และกลิ่นอับ (Grosch et al., 1981; Shin et al., 1986) โดยกระบวนการดังกล่าวขึ้นกับอุณหภูมิในการเก็บรักษาด้วย (Shin et al., 1986) Ogawa et al. (2002) แสดงให้เห็นว่าไขมันที่เกิดกระบวนการดังกล่าวนั้นอยู่ในบริเวณเยื่อหุ้มด้านนอกของของเมล็ดข้าวกล้องและถูกพบในเยื่อชั้นในที่อยู่ติดกับส่วนของเมล็ดข้าวด้วย โดยกระบวนการ lipid oxidation เกิดจากการเร่งโดยเอนไซม์ lipase และ lipoxygenase ในข้าว จากงานวิจัยของ Yang et al. (2012) พบว่าข้าวในกลุ่มข้าวหอม (aromatic varieties) มีแนวโน้มจะเกิดการเหม็นหืนได้มากกว่าข้าวที่ไม่ใช่ข้าวหอม (non-aromatic varieties)

ตารางที่ 4.3 Pearson correlation coefficients^a ระหว่างปริมาณแอมิโลส, peak viscosity, trough, breakdown, final viscosity, setback 1, setback 2, peak time และ pasting temperature

	amylose	PV	T	BD	FV	ST ₁	ST ₂	PT	PTE
amylose	1	.120	.694**	-.451*	.779**	.794**	.864**	.898**	.866**
PV		1	.629**	.737**	.566**	.509**	.032	.023	-.047
T			1	-.061	.954**	.892**	.746**	.724**	.681**
BD				1	-.103	-.122	-.606**	-.598**	-.651**
FV					1	.986**	.842**	.798**	.760**
ST ₁						1	.862**	.809**	.774**
ST ₂							1	.953**	.953**
PT								1	.984**
PTE									1

^a amylose = amylose content (% dry weight), PV = peak viscosity (cP), T = trough (cP), BD = breakdown (cP), FV = final viscosity, ST₁ = setback 1 (cP), ST₂ = setback 2 (cP), PT = peak time (min), PTE = pasting temperature (°C)

*, ** Correlation is significant at the 0.05 and 0.01 level, respectively.

ตารางที่ 4.4 Backward Multiple Regression Formulas ระหว่าง amylose content และค่าจาก RVA profiles (pasting parameters)

Multiple regression Formulas ^a	Multiple R ²	Multiple R	F-Ratio	P ^b
1. $Y = 5.556 - 0.010PV - 0.043T + 0.010BD + 0.051FV - 0.049ST_1 + 6.417PT - 0.258PTE$	.837	.915	13.953	**
2. $Y = 5.122 - 0.045T + 0.0010BD + 0.044FV - 0.042ST_1 + 6.373PT - 0.250PTE$	.837	.915	17.087	**
3. $Y = 7.836 - 0.044T + 0.043FV - 0.041ST_1 + 6.336PT - 0.281PTE$	.836	.915	21.475	**
4. $Y = -2.695 - 0.044T + 0.043FV - 0.041ST_1 + 3.857PT$	.830	.911	26.856	**
5. $Y = -2.300 - 0.004T + 0.002FV + 3.808PT$	.822	.907	35.373	**
6. $Y = -4.616 + 0.001FV + 3.935PT$	.817	.904	53.657	**
7. $Y = -5.820 + 4.638PT$	.807	.898	104.338	**

^a Y = amylose content (% dry weight), PV = peak viscosity (cP), T = trough (cP), BD = breakdown (cP), FV = final viscosity, ST₁ = setback 1 (cP), PT = peak time (sec), PTE = pasting temperature (°C)

^b ** and * = P < 0.01 and 0.05, respectively.

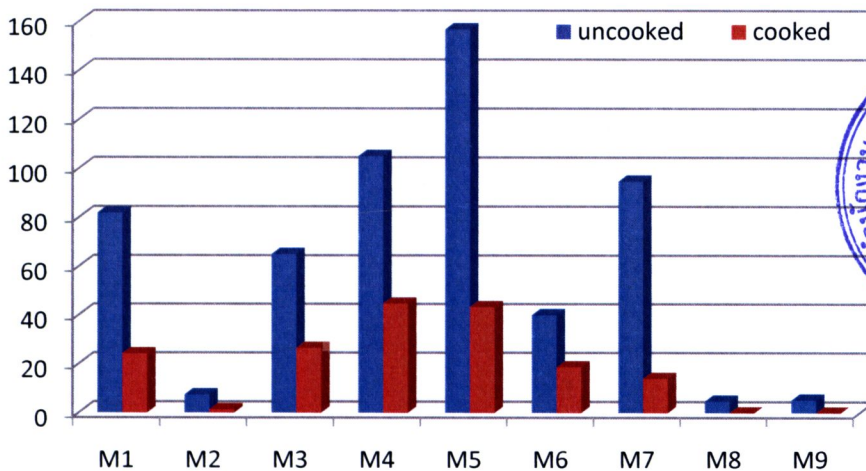
ตารางที่ 4.5 ปริมาณ 2-acetyl-1-pyrroline และ n-hexanal ก่อนและหลังการหุงต้ม* และเปอร์เซ็นต์การลดลงหลังการหุงต้มในข้าว 9 สายพันธุ์

พันธุ์ข้าว	ACPY(ng/g โดยน้ำหนักแห้ง)				n-hexanal (µg/kg โดยน้ำหนักแห้ง)		
	ไม่ผ่านการหุงต้ม	ผ่านการหุงต้ม	เปอร์เซ็นต์การลดลง	ไม่ผ่านการหุงต้ม	ผ่านการหุงต้ม	เปอร์เซ็นต์การลดลง	
ข้าวหอมกัญญา	81.9 ± 6.4 ^{ea}	24.2 ± 5.5 ^{db}	70.51	6.87 ± 0.59 ^{ba}	0.55 ± 0.04 ^{gb}	92.01	
ข้าวสินเหล็ก	7.4 ± 1.7 ^{ba}	ND	NC	5.46 ± 0.51 ^{ea}	0.57 ± 0.05 ^{gb}	89.57	
ข้าวหอมมะลิแดง	65.0 ± 1.6 ^{da}	26.5 ± 0.9 ^{db}	59.30	5.68 ± 0.38 ^{ga}	0.46 ± 0.03 ^{db}	91.96	
ข้าวหอมอุบล	105.1 ± 6.8 ^{ga}	44.7 ± 11.6 ^{eb}	57.45	8.87 ± 0.31 ^{da}	0.66 ± 0.03 ^{hb}	92.56	
ข้าวหอมมะลิ 105	156.9 ± 4.8 ^{ha}	43.3 ± 6.0 ^{eb}	72.42	9.34 ± 0.42 ^{da}	0.42 ± 0.04 ^{cdB}	95.53	
ข้าวสังข์หยด	40.0 ± 2.2 ^{ca}	18.7 ± 2.2 ^{cb}	53.31	10.33 ± 0.24 ^{ea}	0.33 ± 0.02 ^{bb}	96.78	
ข้าวหอมนิล	94.8 ± 6.5 ^{fa}	14.0 ± 1.2 ^{bb}	85.25	9.03 ± 0.45 ^{da}	0.48 ± 0.06 ^{dfB}	94.66	
ข้าวเหนียวดำ	4.7 ± 1.5 ^a	ND	NC	5.68 ± 0.28 ^{ea}	0.38 ± 0.05 ^{bcb}	93.39	
ข้าวเหนียวเจ้าแตก	5.2 ± 1.3 ^a	ND	NC	8.16 ± 0.46 ^{ca}	0.23 ± 0.03 ^{ab}	97.22	

ND = not detected, NC = not calculated

*ค่าที่แสดงในตารางเป็น ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทำการทดลอง 3 ซ้ำ อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกันและตัวพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแถวอนเดียวกันมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

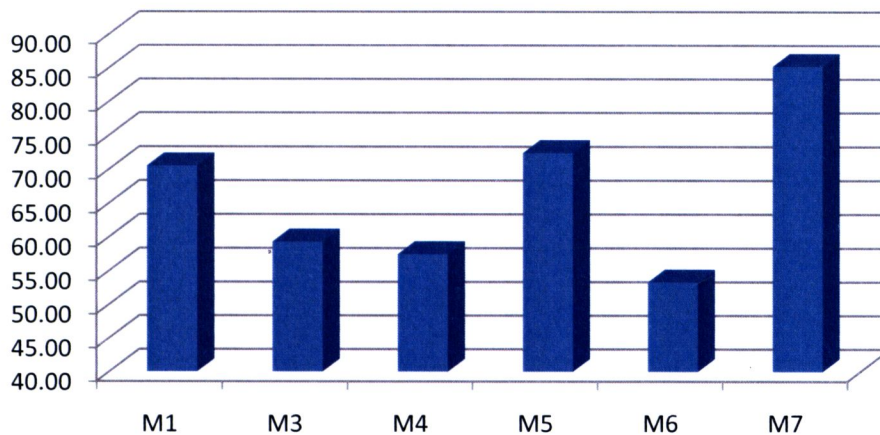
ACPY (ng/g)



- | | | |
|-------------------|-----------------------|------------------------|
| M1 : ข้าวหอมกัญญา | M2 : ข้าวสินเหล็ก | M3 : ข้าวหอมมะลิแดง |
| M4 : ข้าวหอมอุบล | M5 : ข้าวหอมมะลิ 105 | M6 : ข้าวสังข์หยดอุบล |
| M7 : ข้าวหอมนิล | M8 : ข้าวเหนียวดำอุบล | M9 : ข้าวเหนียวเจ้าแตก |

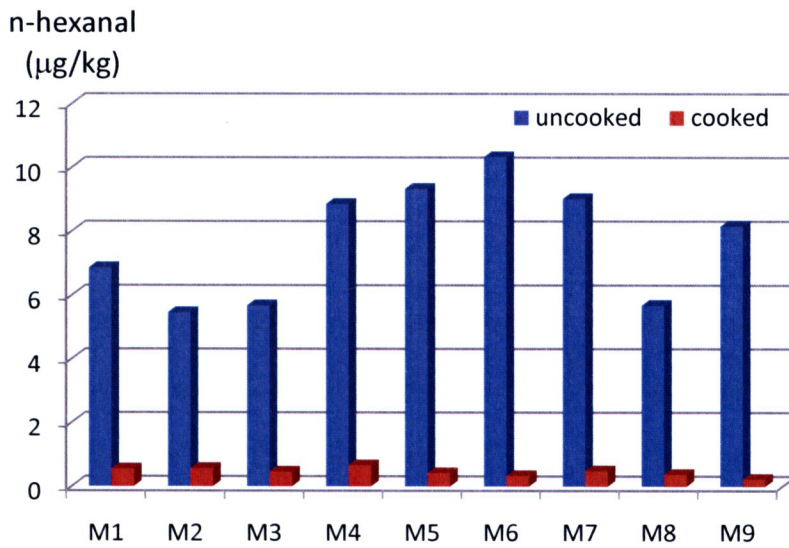
รูปที่ 4.5 ปริมาณ 2-acetyl-1-pyrroline ก่อนและหลังการหุงต้มในข้าว 9 สายพันธุ์

ACPY reduction (%)



- | | | |
|-------------------|-----------------------|------------------------|
| M1 : ข้าวหอมกัญญา | M2 : ข้าวสินเหล็ก | M3 : ข้าวหอมมะลิแดง |
| M4 : ข้าวหอมอุบล | M5 : ข้าวหอมมะลิ 105 | M6 : ข้าวสังข์หยดอุบล |
| M7 : ข้าวหอมนิล | M8 : ข้าวเหนียวดำอุบล | M9 : ข้าวเหนียวเจ้าแตก |

รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การลดลงของปริมาณ 2-acetyl-1-pyrroline หลังการหุงต้มในข้าว 9 สายพันธุ์



M1 : ข้าวหอมกัญญา

M2 : ข้าวสินเหล็ก

M3 : ข้าวหอมมะลิแดง

M4 : ข้าวหอมอุบล

M5 : ข้าวหอมมะลิ 105

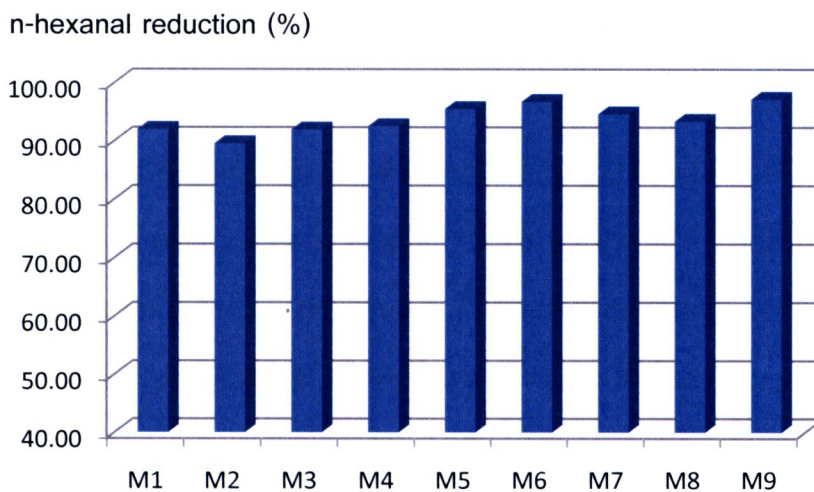
M6 : ข้าวสังข์หยดอุบล

M7 : ข้าวหอมนิล

M8 : ข้าวเหนียวดำอุบล

M9 : ข้าวเหนียวเจ้าแตก

รูปที่ 4.7 ปริมาณ n-hexanal ก่อนและหลังการหุงต้มในข้าว 9 สายพันธุ์



M1 : ข้าวหอมกัญญา

M2 : ข้าวสินเหล็ก

M3 : ข้าวหอมมะลิแดง

M4 : ข้าวหอมอุบล

M5 : ข้าวหอมมะลิ 105

M6 : ข้าวสังข์หยดอุบล

M7 : ข้าวหอมนิล

M8 : ข้าวเหนียวดำอุบล

M9 : ข้าวเหนียวเจ้าแตก

รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การลดลงของปริมาณ n-hexanal หลังการหุงต้มในข้าว 9 สายพันธุ์