บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลองได้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ (1) การศึกษาคุณภาพเบื้องต้นของเมล็ดข้าวไม่ขัดสี (2) การศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกมมาโอไรซานอลในข้าวไม่ขัดสี (3) การศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโธไซยานินในเมล็ดข้าวไม่ขัดสี (4) การศึกษาผลของระยะเวลาในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °ซ ต่อระดับการสุกและกิจกรรมการต้านออกซิเดชันของเมล็ดข้าวไม่ขัดสี ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาคุณภาพเบื้องต้นของเมล็ดข้าวไม่ขัดสี

1.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

1.1.1 ขนาด รูปร่างเมล็ด และน้ำหนัก 100 เมล็ด

ขนาดและรูปร่าง เป็นลักษณะประจำพันธุ์ เพื่อจำแนกพันธุ์ข้าวและใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการซื้อขายข้าวของประเทศไทย โดยลักษณะการวัดขนาดของเมล็ดข้าวสาร ข้าวกล้องและข้าวเปลือกจะทำการวัดขนาดในลักษณะเดียวกันคือ วัดความยาว (length) ความกว้าง (width) ความหนา (thickness) ของเมล็ดข้าวมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร รูปร่างของเมล็ดข้าวสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข 2531) ซึ่งรูปร่างของเมล็ดข้าวกล้องสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ เรียว ปานกลาง และป้อม ดังแสดงในตารางที่ 13

ความยาวของเมล็ด หมายถึง ระยะทางจากปลายยอดสุดของเมล็ดถึงโคนเมล็ด

ความกว้างของเมล็ด หมายถึง ระยะทางส่วนที่กว้างที่สุดระหว่างเปลือกใหญ่ถึงเปลือกเล็ก

ความหนาของเมล็ด หมายถึง ระยะทางที่มากที่สุดระหว่างเปลือกใหญ่ด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

ตารางที่ 13 รูปร่างของเมล็ดข้าวซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง

รูปร่างของเมล็ดข้าวกล้อง	ขนาดความยาว/ความกว้าง
เรียว	3.1 หรือ >
ปานกลาง	2.1 – 3.0
ป้อม	2.0 หรือ <

ที่มา : USDA (1982)

สำหรับข้าวทั้ง 4 สายพันธุ์ ที่นำมาทำการทดลอง ได้แก่ ข้าวสายพันธุ์หอมมะลิแดง หอมนิล KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ขนาด รูปร่างเมล็ด และน้ำหนัก 100 เมล็ด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ขนาด รูปร่างเมล็ดและน้ำหนัก 100 เมล็ด ของเมล็ดข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์

คุณลักษณะ	พันธุ์ข้าว			
	หอมมะลิแดง	หอมนิล	KKU-GL-BL 06-043	KKU-GL-BL 05-003
ความกว้าง (มิลลิเมตร)	2.17 ± 0.06^{c}	2.11 ± 0.06^{d}	2.70 ± 0.03^{a}	2.25 ± 0.01^{b}
ความยาว (มิลลิเมตร)	7.63 ± 0.05^{a}	6.90 ± 0.06^{c}	6.10 ± 0.08^{d}	7.40 ± 0.06^{b}
ความหนา (มิลลิเมตร)	1.77 ± 0.02^{b}	1.72 ± 0.02^{b}	1.92 ± 0.04^{a}	1.88 ± 0.06^{a}
น้ำหนัก 100 เมล็ด (กรัม)	2.30 ± 0.03^{a}	1.96 ± 0.01^{b}	2.31 ± 0.05^{a}	2.25 ± 0.09^{a}
รูปร่างเมล็ด (ความยาว/ความกว้าง)	3.52 ± 0.01^{a}	3.28 ± 0.02^{b}	2.26 ± 0.03^{c}	3.29 ± 0.01^{b}

a, b... ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่าเฉลี่ยของความกว้าง ความยาว ความหนาและน้ำหนัก 100 เมล็ด แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) จากตารางที่ 14 ทำให้ทราบว่าความแตกต่างของความยาว ความกว้างและความหนา ซึ่งบ่งบอกถึงรูปร่างของเมล็ดทำให้สามารถแบ่งแยกเมล็ดโดยอาศัยรูปร่างของเมล็ดได้ โดยจากผลการทดลองพบว่าความกว้างของเมล็ดข้าวมีค่าอยู่ในช่วง 2.11-2.70 มิลลิเมตร ความยาวของเมล็ดข้าวมีค่าอยู่ในช่วง 6.10-7.63 มิลลิเมตร และความหนาของเมล็ดข้าวมีค่าอยู่ในช่วง 1.72-1.92 มิลลิเมตร โดยเมล็ดข้าวเหนียวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 มีความกว้างและความหนามากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์หอมมะลิแดงและหอมนิล ส่วนความยาวนั้นข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงมีความยาวมากที่สุด เมื่อพิจารณารูปร่างเมล็ดซึ่งมีการจำแนกตามอัตราส่วนระหว่างความยาวกับความกว้าง สามารถบอกถึงรูปร่างของเมล็ดข้าวได้ว่าข้าวพันธุ์หอมมะลิแดง หอมนิล และ KKU-GL-BL 05-003 มีรูปร่างเมล็ดเรียว (มากกว่า 3.0) ส่วน KKU-GL-BL 06-043 มีรูปร่างเมล็ดป้านกลาง (2.1–3.0) ซึ่งส่วนมากข้าวไทยมีรูปร่างเมล็ดเรียว ข้าวอิตาลีมีรูปร่างเมล็ดป้านกลางและข้าวญี่ปุ่นมีรูปร่างเมล็ดป้อม (อรอนงค์ นัยวิกุล 2547)

จากการชั่งน้ำหนักเมล็ดข้าวโดยใช้ตัวอย่างจำนวน 100 เมล็ด พบว่าน้ำหนักข้าว 100 เมล็ดของข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ มีน้ำหนักเมล็ดอยู่ในช่วง 1.96-2.31 กรัม/100 เมล็ด ซึ่ง KKU-GL-BL 06-043 มีน้ำหนักเมล็ดมากที่สุด รองลงมาคือ หอมมะลิแดง KKU-GL-BL 05-003 และหอมนิลมีน้ำหนัก 100 เมล็ดน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจากความยาว ความกว้างและความหนา จะเห็นว่าเมล็ดข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 05-003 มีความยาว ความกว้างและความหนามากกว่าหอมนิล และมีน้ำหนักต่อ 100 เมล็ด มากกว่าหอมนิลด้วยเช่นกันซึ่ง

คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุพิศา สมโต (2547) รายงานว่าน้ำหนักของเมล็ดข้าวจะสัมพันธ์กับขนาดของเมล็ด เมล็ดข้าวที่มีความยาว ความกว้างและความหนามากที่สุดจะมีน้ำหนักต่อ 100 เมล็ดสูงกว่าเมล็ดที่มีความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดน้อย ซึ่งน้ำหนักเมล็ดเป็นลักษณะที่ถูกควบคุมโดยพันธุกรรมและจะแปรปรวนไปตามสภาพแวดล้อม เช่น ชนิดของดิน การใส่ปุ๋ย ความชื้น และสภาพภูมิอากาศ จากการตรวจสอบน้ำหนักข้าว 100 เมล็ดของข้าวไทยสายพันธุ์ต่างๆจำนวน 344 สายพันธุ์ พบว่ามีน้ำหนักแปรปรวนอยู่ระหว่าง 1.62-4.17 กรัม (กัญญา เชื้อพันธุ์ 2547) ซึ่งข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์มีน้ำหนักต่อ 100 เมล็ดอยู่ในช่วงดังกล่าวด้วยเช่นกัน

1.1.2 ค่าสี

ค่าสี L* a* b* และ h° ของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ดังแสดงค่าในตารางที่ 15 ข้าวไม่ขัดสีทั้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้านั้นมีสารสำคัญที่แตกต่างจากข้าวขาว เนื่องจากมีรงควัตถุคือสารแอนโธไซยานินที่ทำให้เกิดสีน้ำตาล แดง หรือม่วงที่ผิวของเมล็ดข้าว (ดำเนิน กาละดี และคณะ 2543) ซึ่งข้าวทั้ง 4 สายพันธุ์ที่นำมาทำการทดลองนั้นได้วัดค่าสีด้วยระบบ CIE L* a* b* และนำค่า L* a* b* มาคำนวณค่า hue angle (h°) ซึ่งคำนวณได้จาก $h^{\circ} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$

ตารางที่ 15 ค่าสี L* a* b* และ h° ของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ และข้าวพันธุ์ กข 6 แพร่และสันป่าตอง 1

พันธุ์ข้าว	ค่าสี				อ้างอิง
	L*	a*	b*	h°	
หอมมะลิแดง	46.42 ± 0.24^{a}	8.70 ± 0.10^{a}	11.83 ± 0.13^{a}	53.67 ± 0.28^{a}	พนิตตรา
หอมนิล	43.49 ± 0.28^{b}	4.07 ± 0.01^{c}	5.64 ± 0.28^{b}	54.19 ± 1.35^{a}	ชำนาญศิลป์
KKU-GL-BL 06-043	38.77 ± 0.10^{d}	1.74 ± 0.16^{d}	1.57 ± 0.16^{d}	42.09 ± 3.45^{c}	(2554)
KKU-GL-BL 05-003	41.72 ± 0.59^{c}	4.34 ± 0.16^{b}	4.52 ± 0.53^{c}	46.06 ± 2.17^{b}	
กข 6 แพร่	71.00 ± 0.76	4.07 ± 0.21	17.83 ± 0.44	77.14	สุพิศา สมโต
สันป่าตอง 1	66.50 ± 0.35	5.12 ± 0.12	21.80 ± 0.61	76.78	(2547)

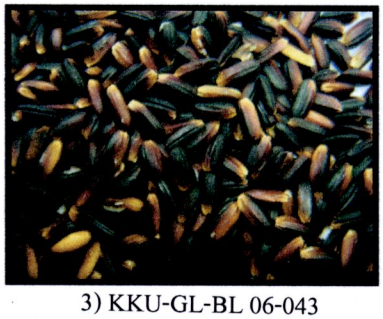
a, b... ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ มีค่าสี L* a* b* และ h° ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อาจเป็นผลมาจากปัจจัยของสายพันธุ์ข้าว ชนิดและปริมาณของรงควัตถุที่มีอยู่ในบริเวณเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ด ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าว (นิพัทธา ชาติสุวรรณ และ วริพัสย์ อารีกุล 2553) งานวิจัยของสุพิศา สมโต (2547) รายงานค่าสีของข้าวกข 6 แพร่และข้าวเหนียวสันป่าตอง 1 ซึ่งไม่จัดอยู่ในกลุ่มข้าวมีสี มีค่า L* b* และ h° สูงกว่าข้าวที่ไม่ขัดสี (ข้าวมีสี) ดังแสดงในตารางที่ 15 ค่าสีของข้าวทั้ง 4 สายพันธุ์ที่ทำการศึกษาพบว่าข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงมีค่า L* a* และ b* สูงที่สุด โดยค่า L* ข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ หอมนิล KKU-GL-BL 05-003 และ KKU-GL-BL 06-043 ตามลำดับ ค่า a* ในข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ KKU-GL-BL 05-003 ข้าวหอมนิล และ KKU-GL-BL 06-043 ตามลำดับ ค่า b* ในข้าวพันธุ์

หอมมะลิแดงมีค่าสูงที่สุดรองลงมาคือ หอมนิล KKU-GL-BL 05-003 และ KKU-GL-BL 06-043 ตามลำดับ และเมื่อนำค่า L* a* b* มาคำนวณค่า hue angle (h°) ของข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่าหอมมะลิแดงและหอมนิล (53.67 และ 54.19 องศา) มีค่า h° สูงกว่า KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 (42.09 และ 46.06 องศา) อาจกล่าวได้ว่าสีของเมล็ดข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงจะออกสีน้ำตาล และสีของเมล็ดข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 จะมีสีออกม่วงดำ ซึ่งภาพถ่ายของข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์แสดงในภาพที่ 17 จากผลการทดลองวัดค่าสี L* a* b* ของข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของสุรัตน์ นักหล่อ และ พูนพิสมัย มีลาภ (2550) ศึกษาค่าสีของเมล็ดข้าวกล้องแดงที่ปลูกบนที่สูง 10 ตัวอย่าง พบว่าข้าวกล้องแดงมีค่าสี L* a* b* เฉลี่ยเท่ากับ 46.19, 9.96 และ 19.92 ตามลำดับ และงานวิจัยของ นิพัทธา ชาติสุวรรณ และ วริพัสย์ อารีกุล (2553) ศึกษาค่าสีของข้าว 51 สายพันธุ์ วัดค่าสีด้วยระบบ CIE L* a* b* พบว่าข้าวขัดขาวมีค่า L* สูงที่สุด ส่วนข้าวเหนียวดำมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 94.00 และ 65.31 ตามลำดับ ซึ่งสามารถเรียงลำดับความสว่างจากมากไปน้อยได้ดังนี้ ข้าวขัดขาว ข้าวกล้อง ข้าวสีแดง ข้าวเหนียวดำ และข้าวสีม่วง ตามลำดับ ส่วนค่า a* ข้าวสีแดงมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ ข้าวสีม่วง ข้าวเหนียวดำ และข้าวกล้อง ส่วนข้าวขัดขาวมี a* ต่ำที่สุด ค่า b* ในข้าวกล้องมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ ข้าวสีแดง ข้าวขัดขาว ข้าวสีม่วง และข้าวเหนียวดำ ตามลำดับ ค่า hue angle (h°) พบว่า ข้าวกล้องเป็นกลุ่มที่มีค่า h° สูง ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 81.87-90.58 องศา ส่วนข้าวเหนียวดำและข้าวสีม่วงมีค่า h° อยู่ระหว่าง 14.61-55.73 องศา และ 32.81-37.74 องศา

1) หอมมะลิแดง

2) หอมนิล



3) KKU-GL-BL 06-043

4) KKU-GL-BL 05-003

ภาพที่ 17 ภาพถ่ายของเมล็ดข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์

1) หอมมะลิแดง (ซ้าย-บน)
2) หอมนิล (ขวา-บน)
3) KKU-GL-BL 06-043 (ล่าง-ซ้าย)
4) KKU-GL-BL 05-003 (ล่าง-ขวา)

1.1.3 คุณสมบัติด้านความหนืด

คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่าสายพันธุ์มีผลต่อค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่าเบรกดาวน์ (breakdown) ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความแตกต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับค่าความหนืดที่ต่ำสุดหรือค่าการคืนตัว (Setback) อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) มีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งคุณสมบัติด้านความหนืดเป็นคุณลักษณะเฉพาะของข้าวแต่ละสายพันธุ์ โดยพบว่ากลุ่มของข้าวเจ้าซึ่งเป็นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง คือข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงและหอมนิล มีค่าความหนืดสูงสุด เบรกดาวน์ ความหนืดสุดท้าย การคืนตัว และอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด สูงกว่ากลุ่มของข้าวเหนียวซึ่งเป็นข้าวที่มีแอมิโลสต่ำ คือข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 ดังแสดงค่าในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งจากข้าวทั้ง 4 สายพันธุ์

พันธุ์ข้าว	ความหนืดสูงสุด (RVU)	ค่าเบรกดาวน์ (RVU)	ความหนืดสุดท้าย (RVU)	ค่าการคืนตัว (RVU)	อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (°ซ)
หอมมะลิแดง	210.03±2.89[a]	108.97±5.62[a]	179.61±2.94[a]	-30.45±5.67[b]	73.95±1.00[b]
หอมนิล	188.06±1.47[b]	94.92±0.44[b]	163.92±2.40[b]	-24.14±1.10[a]	79.02±1.45[a]
KKU-GL-BL 06-043	114.86±1.65[d]	82.19±1.79[c]	46.72±0.50[d]	-68.14±1.24[d]	70.42±0.46[c]
KKU-GL-BL 05-003	126.28±0.97[c]	76.47±1.56[c]	65.25±1.02[c]	-61.03±1.34[c]	70.72±0.94[c]

a, b... ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความข้นหนืดขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ซึ่งเป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ 2546) จากการทดลองพบว่าค่าความหนืดสูงสุดของข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ หอมนิล KKU-GL-BL 05-003 และ KKU-GL-BL 06-043 ตามลำดับ แสดงว่าข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงสามารถดูดซึมน้ำเข้าไปได้มากและมีการพองตัวสูงก่อนที่เม็ดแป้งจะแตกออก ซึ่งปริมาณโปรตีนมีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ความหนืดของเม็ดแป้ง อัตราการดูดซับ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลาติไนเซชันนั้นลดลง (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ 2546)

เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โครงสร้างภายในเม็ดแป้งที่พองตัวเต็มที่แตกออก ความหนืดจะลดลง ค่าความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุดหรือเบรกดาวน์ (breakdown) เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงและทนทานต่อการให้ความร้อนและแรงที่ใช้กวน ซึ่งค่าเบรกดาวน์สูงแสดงว่าเม็ดแป้งมีความ

แข็งแรงต่ำและทนทานต่อการให้ความร้อนและแรงที่ใช้กวนต่ำ จากการทดลองพบว่าข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงมีค่าเบรกดาวน์สูงที่สุด รองลงมาคือ หอมนิล KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 ตามลำดับ แสดงว่าข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงมีความแข็งแรงและทนทานต่อการให้ความร้อนและแรงที่ใช้กวนต่ำที่สุด

เมื่อลดอุณหภูมิลงและปล่อยให้น้ำแป้งเย็นตัว ความหนืดของแป้งจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเรียกว่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่าเกิดจากการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดแป้งที่แตกออก โดยโมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความคงตัวมากขึ้นเกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (set back) (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล 2543) จากการทดลองพบว่าข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงมีค่าความหนืดสุดท้ายสูงที่สุด รองลงมาคือ หอมนิล KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 ตามลำดับ และค่าการคืนตัวของข้าวพันธุ์หอมนิลมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ หอมมะลิแดง KKU-GL-BL 05-003 และ KKU-GL-BL 06-043 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่ากลุ่มของข้าวเจ้ามีการคืนตัวสูงกว่า (มีค่าติดลบน้อยกว่า) ข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่า ซึ่งปริมาณของแอมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีแอมิโลสต่ำ (วราภรณ์ สกลไชย 2551) ปริมาณแอมิโลสและปริมาณโปรตีนมีความสัมพันธ์กับค่าการคืนตัว คือเมื่อปริมาณแอมิโลสและปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นค่าการคืนตัวของแป้งเพิ่มขึ้นตาม (อรุณี เชื้อแก้ว 2551)

อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ซึ่งอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดเป็นค่าที่แสดงถึงอุณหภูมิต่ำที่สุดที่ใช้ในการหุงต้มตัวอย่าง จากการทดลองพบว่าข้าวพันธุ์หอมนิลมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงที่สุด รองลงมาคือ หอมมะลิแดง KKU-GL-BL 05-003 และ KKU-GL-BL 06-043 ตามลำดับ หอมนิลมีปริมาณแอมิโลสสูงซึ่งปริมาณแอมิโลสทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งมีความแข็งแรงขึ้น พองตัวได้ต่ำและยังสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้กับไขมัน โปรตีน ทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจึงเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าแป้งที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (วราภรณ์ สกลไชย 2551)

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวทั้ง 4 สายพันธุ์ทำให้ทราบว่า การให้ความร้อนแก่แป้งข้าวเหนียวจะเกิดเจลาติไนเซชันมีความหนืดสูงขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าแป้งข้าวเจ้า เนื่องจากความร้อนจะทำลายพันธะไฮโดรเจน และโมเลกุลของน้ำจะเข้าไปแทรกระหว่างสายของโมเลกุลแอมิโลเพคตินได้ง่ายกว่าแอมิโลส ทำให้เม็ดแป้งของข้าวเหนียวซึ่งมีแอมิโลเพคตินสูงกว่าข้าวเจ้าเกิดการพองตัวให้ความหนืดที่อุณหภูมิต่ำกว่าแต่ก็จะเกิดการแตกตัวเร็วกว่าทำให้ได้ค่าความหนืดสูงสุดต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า และเมื่อเม็ดแป้งแตกตัวก็จะเกิดการคืนตัวน้อยกว่า เนื่องจากโมเลกุลของแอมิโลเพคตินมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ทำให้การเข้ามาเกาะจับกันอีกครั้งด้วยพันธะไฮโดรเจนทำได้ยาก แป้งข้าวเหนียวจึงมีความหนืดสุดท้ายน้อยกว่าแป้งข้าวเจ้า (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ 2546) แป้งข้าวเจ้าซึ่งมีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีค่าการคืนตัวมาก เนื่องจากโมเลกุลของแอมิโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรง สามารถเข้ามาเกาะจับกันใหม่เกิดการคืนตัวได้ง่าย ทำให้แป้งข้าวเจ้ามีค่าความหนืดสุดท้ายสูงอีกด้วย และการที่แป้งข้าวเจ้ามีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลได้แข็งแรงกว่าแป้งข้าวเหนียวและพองตัวได้ยากกว่า ทำให้แป้งข้าวเจ้ามีเวลาและอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดสูง (สุพิศา สมโต 2547) พฤติกรรมความหนืดของแป้งแต่ละชนิดที่มีค่าแตกต่างกันนั้นอาจเป็นเพราะปัจจัยต่างๆได้แก่ โปรตีนและ

องค์ประกอบในส่วนของเปลือกหุ้มเมล็ดซึ่งอาจไปขัดขวางการพองตัวของแป้ง และปริมาณของแอมิโลสโดยข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่อุณหภูมิสูงกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสที่ต่ำกว่า

1.2 คุณสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ที่ได้วิเคราะห์ ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า ปริมาณแอมิโลส ปริมาณฟีนอลิคทั้งหมด ปริมาณแกมมาโอไรซานอล ปริมาณแอนโธไซยานิน และกิจกรรมการต้านออกซิเดชันดังแสดงค่าในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 คุณสมบัติทางเคมีของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์

องค์ประกอบทางเคมี	พันธุ์ข้าว			
	หอมมะลิแดง	หอมนิล	KKU-GL-BL 06-043	KKU-GL-BL 05-003
ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	13.52+0.18^{a}	13.71±0.33^{a}	10.94±0.09^{b}	11.46±0.73^{b}
โปรตีน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	6.25±0.16^{c}	7.75±0.18^{b}	9.06±0.12^{a}	7.74±0.11^{b}
ไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	2.43±0.09^{b}	3.00±0.16^{a}	2.19±0.1^{b}	2.41±0.06^{b}
เส้นใย (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	6.34±0.33^{a}	5.35±0.29^{a}	4.96±0.87^{a}	3.47±0.17^{b}
เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	1.23±0.06^{b}	1.63±0.13^{a}	1.67±0.02^{a}	1.77±0.04^{a}
ปริมาณแอมิโลส (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	15.00±0.79^{b}	16.19±0.67^{a}	5.14±0.52^{c}	3.90±0.13^{d}
ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (mg gallic acid/100 g_{db})	21.10±2.79^{a}	4.42±0.16^{d}	11.41±1.08^{b}	6.82±0.49^{c}
ปริมาณแกมมาโอไรซานอล (mg/100 g_{db})	8.56±0.10^{c}	10.30±0.25^{b}	11.85±0.41^{a}	12.09±0.48^{a}
ปริมาณแอนโธไซยานิน (mg/100 g_{db})	14.09±0.31^{d}	60.19±1.97^{c}	273.72±2.02^{a}	212.03±1.70^{b}
กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน (mg trolox/100 g_{db})	39.23±1.21^{a}	3.89±1.22^{d}	15.94±0.09^{b}	8.01±0.30^{c}

a, b... ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 17 พบว่า ข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยข้าวที่นำมาทำการทดลองมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 10.94-13.71 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งข้าวพันธุ์หอมนิลมีปริมาณความชื้นสูงที่สุด รองลงมาคือหอมมะลิแดง KKU-GL-BL 05-003 และ KKU-GL-BL 06-043 ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานข้าวของกระทรวงพาณิชย์ (2540) กำหนดความชื้นของข้าวทุกประเภทและทุกชนิดไว้ไม่ควรเกินร้อยละ 14 เพื่อลดการเสื่อมเสียในระหว่างการเก็บรักษา ถ้าต้องการเก็บให้นานหลายเดือนควรลดความชื้นข้าวลงให้อยู่ในช่วงร้อยละ 12-12.5 ปริมาณโปรตีนมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 6.25-9.06 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งพบในข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 มากที่สุด รองลงมาคือ หอมนิล KKU-GL-BL 05-003 และหอมมะลิแดง ตามลำดับ โดยโปรตีนจะพบมากที่บริเวณผิวนอกของเมล็ดข้าวกล้องและบริเวณคัพภะมากกว่าที่ส่วนอื่นๆ ของเมล็ด แต่ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวจะมีมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวและสภาพแวดล้อมที่

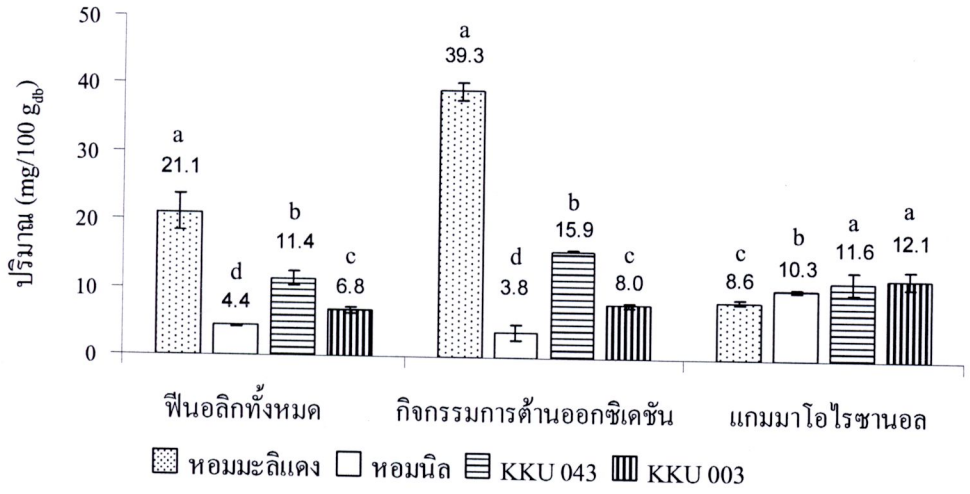
ปลูกข้าว เช่น สภาพของดิน ลมฟ้าอากาศ และการให้ปุ๋ย เป็นต้น โดยปกติข้าวกล้องจะมีปริมาณโปรตีนตั้งแต่ร้อยละ 4.3–18.2 (บุญหงส์ จงคิด 2547) ซึ่งโปรตีนที่พบในเมล็ดข้าวนั้นจะประกอบด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นหลายชนิด โดยข้าวกล้องมีปริมาณของกรดอะมิโนลิวซีนมากกว่ากรดอะมิโนชนิดอื่น (อรอนงค์ นัยวิกุล 2547) ปริมาณไขมันมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.19-3.00 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งพบในข้าวพันธุ์หอมนิลมากที่สุด รองลงมาคือ หอมมะลิแดง KKU-GL-BL 05-003 และ KKU-GL-BL 06-043 ตามลำดับ ข้าวมีปริมาณไขมันประมาณร้อยละ 3.30 และมีอยู่ในส่วนด้านนอกของเมล็ดมากกว่าในใจกลางเมล็ด ซึ่งประเภทของไขมันในข้าวส่วนใหญ่คือ ไตรกลีเซอไรด์ รองลงมาคือ ฟอสฟอลิพิด ไกลโคลิพิด เทอร์พีนอยด์ นอกจากนี้วิตามินอีและแกมมาโอไรซานอลเป็นสารธรรมชาติที่พบอยู่ในส่วนของไขมันในเมล็ดข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล 2547) ปริมาณเส้นใยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 3.47-6.34 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งพบมากที่สุดในข้าวพันธุ์หอมมะลิแดง รองลงมาคือ หอมนิล KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 ตามลำดับ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วข้าวกล้องจะมีปริมาณเส้นใยมากบริเวณของคัพภะและชั้นแอลิวโรน (อรอนงค์ นัยวิกุล 2547) ซึ่งข้าวที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีเข้ม (แดงถึงแดงเข้มเกือบดำ) มีแนวโน้มที่มีเยื่อใยอาหารมากกว่าข้าวที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีอ่อน (ขาว- เหลืองถึงแดงอ่อน) (อาทิตย์ กุคำอู และคณะ 2551) ปริมาณเถ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.23-1.77 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งพบในข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 05-003 มากที่สุดรองลงมาคือ KKU-GL-BL 05-043 หอมนิลและหอมมะลิแดง ตามลำดับ ปริมาณแอมิโลสพบว่าข้าวในกลุ่มข้าวเจ้ามีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 15.00-16.19 ซึ่งมีค่าสูงกว่ากลุ่มของข้าวหนียวมีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 3.90-5.14 ซึ่งปริมาณแอมิโลสใช้เป็นเกณฑ์ในการจัดกลุ่มข้าวที่มีความแตกต่างกันจากคุณสมบัติการหุงสุก (อรอนงค์ นัยวิกุล 2547)

ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในกลุ่มข้าวที่มีสี คือ กลุ่มข้าวสีแดง ข้าวสีม่วงและข้าวเหนียวดำ มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่ากลุ่มข้าวที่ไม่มีสี (นิพัทธา ชาติสุวรรณ และวริพัสย์ อารีกุล 2553) ซึ่งผลการศึกษาจากตารางที่ 17 พบว่าข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ที่นำมาศึกษามีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 21.10-4.42 mg gallic acid/100g_{db} และกิจกรรมการต้านออกซิเดชันมีค่าอยู่ในช่วง 39.23-3.89 mg trolox/100 g_{db} ซึ่งพบในข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงสูงที่สุด รองลงมาคือ KKU-GL-BL 06-043 KKU-GL-BL 05-003 และข้าวหอมนิล ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sadabpod and others (2010) ศึกษากิจกรรมการต้านออกซิเดชันและปริมาณฟีนอลิกในข้าวเหนียวดำและข้าวหอมนิล พบว่ากิจกรรมการต้านออกซิเดชันและปริมาณฟีนอลิกในข้าวเหนียวดำมีสูงกว่าข้าวหอมนิล โดยข้าวเหนียวดำมีกิจกรรมการต้านออกซิเดชันและปริมาณฟีนอลิกเท่ากับ 1.245 และ 458.37 mg/g_{db} ตามลำดับ ส่วนในข้าวหอมนิลมีกิจกรรมการต้านออกซิเดชันและปริมาณฟีนอลิกเท่ากับ 1.189 และ 272.07 mg/g_{db} ตามลำดับ และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sompong and others (2011) ศึกษาคุณสมบัติในการต้านออกซิเดชันของข้าวสีแดง 9 สายพันธุ์ ข้าวสีดำ 2 สายพันธุ์ พบว่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการต้านออกซิเดชันพบมากที่สุดในข้าวสีแดง โดยปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวสีแดงมีค่าอยู่ในช่วง 79.18-691.37 mg /100 g และข้าวสีดำมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 336.69-665.16 mg /100 g ส่วนกิจกรรมการต้านออกซิเดชันนั้นในข้าวสีแดงมีค่าอยู่ในช่วง 2.08-12.29 mmol Trolox/100 g และข้าวสีดำอยู่ในช่วง 4.98-12.03 mmol Trolox/100 g

ปริมาณแกมมาโอไรซานอล มีค่าอยู่ในช่วง 8.56-12.09 mg/100 g_{db} ซึ่งกลุ่มของข้าวเหนียวจะมีปริมาณแกมมาโอไรซานอลสูงกว่ากลุ่มของข้าวเจ้า โดยข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 05-003 มีปริมาณแกมมาโอไรซานอลสูงที่สุดรองลงมาคือ KKU-GL-BL 06-043 หอมนิล และหอมมะลิแดง ตามลำดับ โดยปกติแกมมาโอไรซานอลจะ

พบมากที่สุดในส่วนของรำข้าว รองลงมาคือข้าวกล้องและข้าวขาว ตามลำดับ (Kong and Lee 2010) และข้าวเหนียวดำจะมีปริมาณแกมมาโอไรซานอลสูงกว่าข้าวเหนียวขาว ซึ่งความแตกต่างกันของปริมาณแกมมาโอไรซานอลในแต่ละพันธุกรรมนั้นอาจเกิดจากความแตกต่างทางพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม (ปณิตา บุญสิทธิ์ และคณะ 2549)

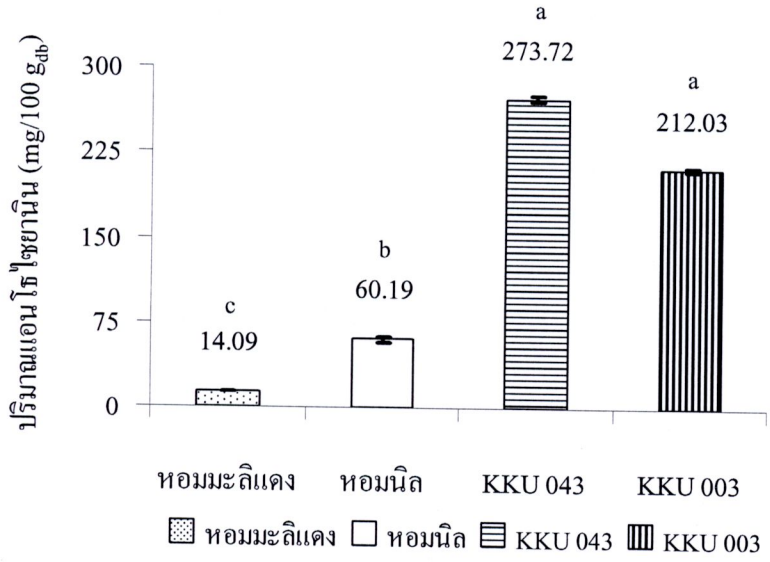
ปริมาณแอนโธไซยานิน มีค่าอยู่ในช่วง 273.72-14.09 mg/100 g_{db} และกลุ่มของข้าวเหนียวจะมีปริมาณแอนโธไซยานินสูงกว่ากลุ่มของข้าวเจ้า โดยข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 มีปริมาณแอนโธไซยานินสูงที่สุด รองลงมาคือ KKU-GL-BL 05-003 หอมนิลและหอมมะลิแดง ตามลำดับ ปริมาณแอนโธไซยานินจะมีผลต่อความเข้มของสีในข้าวเนื่องจาก แอนโธไซยานินเป็นรงควัตถุที่มีสีแดงถึงม่วง โดยสารแอนโธไซยานินในธัญพืชจะพบอยู่ในบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอกและเนื้อเยื่อชั้นใน (Abdel-Aal and others 2006) ผลการศึกษาสอดคล้องกับค่าสี (ตารางที่ 15) ดังนั้นข้าวหอมมะลิแดงมีสีน้ำตาลแดงและตรวจพบปริมาณแอนโธไซยานินต่ำที่สุด ขณะที่ข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 มีสีดำเข้มที่สุด ซึ่งตรวจพบแอนโธไซยานินสูงที่สุด โดยในข้าวเหนียวดำจะมีปริมาณแอนโธไซยานินสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวสีม่วง ข้าวสีแดงและข้าวกล้อง ตามลำดับ ซึ่งข้าวที่มีปริมาณแอนโธไซยานินต่ำจะมีสีแดงอ่อน ส่วนข้าวที่มีปริมาณแอนโธไซยานินสูงจะมีสีม่วงเข้ม (นิพัทธา ชาติสุวรรณ และ วริพัสย์ อารีกุล 2553) แต่อย่างไรก็ตามข้าวบางชนิด เช่น กลุ่มข้าวสีแดงจะมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดใกล้เคียงกับข้าวเหนียวดำ แต่มีปริมาณแอนโธไซยานินต่ำกว่าข้าวเหนียวดำมาก แสดงว่าในข้าวบางกลุ่มที่มีแอนโธไซยานินเป็นองค์ประกอบ แต่แอนโธไซยานินอาจไม่ใช่องค์ประกอบหลักของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่พบในข้าวกลุ่มนั้น ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกอื่นๆ ที่พบในข้าว ได้แก่ กรดเฟอร์รูลิก กรดพาราคูมาริก และกรดวานิลลิก เป็นต้น (Hu and others 2003) การที่ข้าวกล้องมีความสามารถในการต้านการเกิดออกซิเดชันนั้นเนื่องมาจากว่า ข้าวมีรงควัตถุแอนโธไซยานิน ซึ่งมีโครงสร้างเป็นวงแหวนฟีนอลและสามารถให้ไฮโดรเจนอะตอมในโมเลกุลของตัวเองกับออกซิเจนได้ ทำให้ออกซิเจนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไป นอกจากนี้ยังมีแคโรทีนอยด์ ซึ่งสามารถจับกับอะตอมออกซิเจน และทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ เกิดเป็นสารที่มีเสถียรภาพจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อไป ปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเกิดได้น้อยลง และในข้าวกล้องยังมีวิตามินอีและโอไรซานอลซึ่งจะมีมากในส่วนของรำข้าวและมีคุณสมบัติเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันตามธรรมชาติอีกด้วย (สุพิศา สมโต 2547) ปริมาณสารสำคัญที่มีผลดีต่อสุขภาพในข้าวทั้ง 4 สายพันธุ์ ที่นำมาทำการศึกษาได้แก่ ฟีนอลิกทั้งหมด กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน และแกมมาโอไรซานอล ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน และปริมาณแกมมาโอไรซานอลในข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์

หมายเหตุ : ตัวเลขที่กำกับในรูปกราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด กิจกรรมการต้าน ออกซิเดชัน และปริมาณแกมมาโอไรซานอล

a,b... ตัวเลขค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ภาพที่ 19 ปริมาณแอนโธไซยานินในข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์

หมายเหตุ : ตัวเลขที่กำกับในรูปกราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณแอนโธไซยานิน

a,b... ตัวเลขค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากภาพที่ 18 พบว่าข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ที่ยังไม่ผ่านการแช่น้ำนั้นมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน และปริมาณแกมมาโอไรซานอลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการต้านออกซิเดชันในข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ จะเห็นว่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการต้านออกซิเดชันมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ ข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการต้านออกซิเดชันสูงที่สุด ส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอลนั้นพบว่าข้าว KKU-GL-BL 05-003 มีปริมาณแกมมาโอไรซานอลสูงที่สุด และจากภาพที่ 19 พบว่าปริมาณแอนโธไซยานินในข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 มีปริมาณแอนโธไซยานินสูงที่สุด ปัจจัยที่อาจมีผลต่อปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน ปริมาณแกมมาโอไรซานอลและปริมาณแอนโธไซยานินที่แตกต่างกันของข้าวมีสีทั้ง 4 สายพันธุ์ เกิดจากปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ความแตกต่างของพื้นที่ปลูก อุณหภูมิ แสงและความแตกต่างของพันธุกรรม โดยเฉพาะหน่วยพันธุกรรม (gene) ในการควบคุมการสังเคราะห์สารสำคัญของข้าวในแต่ละพันธุ์มีความแตกต่างกัน (Mazza and Miniati 1993 อ้างถึงใน สุรัตน์ นักหล่อ และ พูนพิสมัย มีลาภ 2550)

2. ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกมมาโอไรซานอลในข้าวไม่ขัดสี

ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกมมาโอไรซานอลในข้าวไม่ขัดสีหลังผ่านการแช่ที่อุณหภูมิสูง พบว่า อุณหภูมิ (65, 75, 85 และ 95 °ซ) และเวลา (30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที) มีผลต่อปริมาณแกมมาโอไรซานอลของข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่ข้าวเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณแกมมาโอไรซานอลที่คงอยู่ในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แกมมาโอไรซานอลเป็นสารที่ไม่ละลายในน้ำ มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 161.2 °ซ (วราพร พงษ์ธรวรากุลพานิช 2543) ซึ่งแกมมาโอไรซานอลเป็นกลุ่มของสารประกอบที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นสารเอสเตอร์ระหว่างกรดเฟอรูลิก (ferulic acid) กับหมู่สเตอรอล (sterol) หรือหมู่ไตรเทอปีนแอลกอฮอล์ (triterpene alcohols) ชนิดต่างๆ โดยถูกจัดเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันตามธรรมชาติของไขมันเช่นเดียวกับโทโคฟีรอลและโทโคไตรอีนอล (Xu and others 2000) คงสภาพได้นานที่อุณหภูมิสูงจึงยังไม่ถูกทำลายหรือสูญเสียไปในระหว่างการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ จากการทดลองปริมาณแกมมาโอไรซานอลที่ตรวจพบหลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในเมล็ดข้าวพันธุ์หอมมะลิแดง หอมนิล KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 แสดงในตารางที่ 18 และร้อยละของแข็งทั้งหมดในน้ำแช่ของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์หลังผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.06-7.92 ดังแสดงในตารางที่ 51 (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 18 ปริมาณแกมมาโอไรซานอลเฉลี่ย (mg/100 g_{db}) ที่คงอยู่ในเมล็ดข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ หลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	มะลิแดง	หอมนิล	KKU-GL-BL 06-043	KKU-GL-BL 05-003
65	30	8.42+0.20^{o}	10.87+0.23^{o}	11.83+0.14^{q}	11.60+0.23^{r}
	45	8.72+0.18^{o}	12.58+1.11^{m}	12.39+0.21^{op}	12.01+0.16^{qr}
	60	9.17+0.30^{n}	13.62+0.40^{kl}	12.92+0.16^{lm}	12.30+0.11^{pq}
	75	9.33+0.08^{mn}	14.34+0.15^{ij}	13.32+0.06^{jk}	12.95+0.17^{mn}
	90	9.8+0.03^{jk}	14.52+0.10^{i}	13.53+0.06^{ij}	13.13+0.09^{lmn}
	105	9.88+0.23^{jk}	14.83+0.12^{hi}	13.68+0.29^{hi}	13.51+0.04^{kl}
	120	10.54+0.29^{fgh}	16.38+0.23^{e}	14.24+0.22^{fg}	14.58+0.23^{gh}
75	30	8.68+0.15^{o}	11.84+0.13^{n}	12.22+0.23^{p}	12.46+0.07^{opq}
	45	9.24+0.11^{n}	13.69+0.18^{jkl}	12.74+0.23^{mn}	12.75+0.47^{nop}
	60	9.43+0.23^{lmn}	14.22+0.04^{ijk}	13.31+0.25^{jk}	13.16+0.08^{lmn}
	75	9.83+0.14^{jk}	14.53+0.15^{i}	13.70+0.22^{hi}	13.42+0.05^{klm}
	90	10.39+0.38^{hi}	15.65+0.21^{fg}	13.95+0.22^{gh}	14.27+0.33^{hi}
	105	10.46+0.04^{fgh}	16.69+0.19^{de}	14.55+0.18^{ef}	14.54+0.14^{gh}
	120	10.76+0.28^{fg}	17.18+0.13^{cd}	14.82+0.19^{de}	15.19+0.30^{ef}
85	30	9.15+0.33^{n}	13.14+0.11^{lm}	12.47+0.17^{nop}	12.68+0.46^{nop}
	45	9.74+0.16^{jki}	14.17+0.40^{ijk}	12.95+0.09^{lm}	13.39+0.25^{klm}
	60	10.08+0.23^{ij}	15.20+0.27^{gh}	13.39+0.19^{jik}	13.65+0.37^{jk}
	75	10.49+0.22^{fgh}	16.03+0.11^{ef}	14.14+0.16^{g}	14.04+0.17^{ij}
	90	10.80+0.09^{e}	16.67+0.58^{de}	14.52+0.30^{ef}	14.50+0.15^{ghi}
	105	11.17+0.02^{e}	17.67+0.65^{c}	15.09+0.16^{cd}	15.57+0.21^{de}
	120	11.55+0.42^{d}	18.74+0.11^{b}	15.39+0.30^{c}	15.90+0.33^{d}
95	30	9.59+0.35^{klm}	13.38+0.96^{l}	12.57+0.12^{mno}	12.81+0.20^{no}
	45	10.41+0.19^{ghi}	14.73+0.10^{hi}	13.16+0.31^{kl}	14.75+0.37^{fgh}
	60	11.18+0.23^{e}	15.67+0.08^{fg}	14.13+0.18^{g}	14.84+0.86^{fg}
	75	11.71+0.21^{d}	16.22+0.23^{ef}	14.61+0.39^{e}	15.47+0.59^{de}
	90	12.15+0.22^{c}	17.15+0.51^{cd}	14.94+0.21^{d}	16.71+0.22^{c}
	105	12.54+0.20^{b}	18.72+0.54^{b}	15.75+0.32^{b}	17.19+0.37^{b}
	120	12.88+0.24^{a}	19.40+0.93^{a}	16.16+0.22^{a}	17.81+0.23^{a}

a, b... ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 18 พบว่าในข้าวพันธุ์หอมมะลิแดง หอมนิล KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 หลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิ 65 °ซ นาน 30 นาที มีปริมาณแกมมาโอไรซานอลคงอยู่ในเมล็ดเท่ากับ 8.42, 10.87, 11.83 และ 11.60 mg/100 g_{db} ตามลำดับ และเมื่อสภาวะการการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาเท่ากับ 95 °ซ นาน 120 นาที ปริมาณแกมมาโอไรซานอลคงอยู่ในเมล็ดมีค่าเท่ากับ 12.88, 19.40, 16.16, 17.81 mg/100 g_{db} ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงปริมาณแกมมาโอไรซานอลในเมล็ดข้าวระหว่างการแช่ข้าวนาน 120 นาที ที่อุณหภูมิคงที่ (ตารางที่ 18) สามารถอธิบายความสัมพันธ์กับเวลาในการแช่ด้วยปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero-order reactions) ดังสมการที่ (1)

$$C = C_0 + kt \qquad (1)$$

กำหนดให้

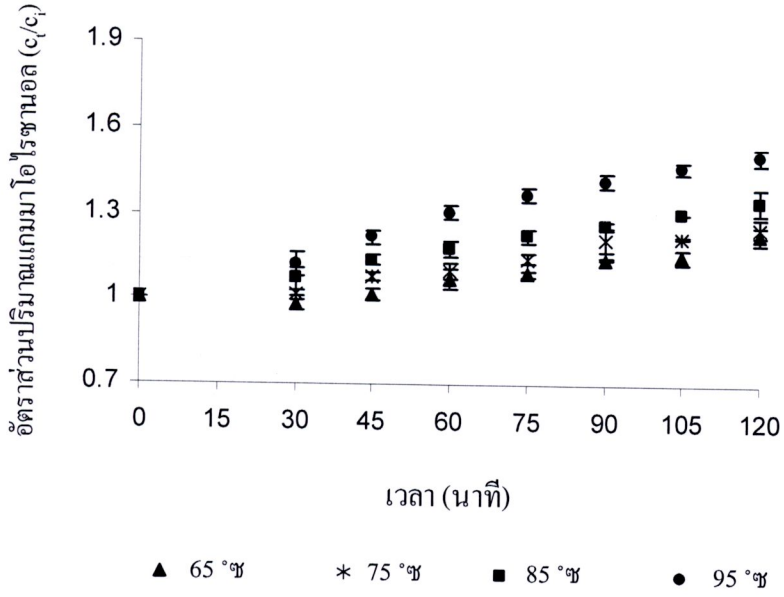
k คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแกมมาโอไรซานอล (mg ml^{-1} min^{-1})

t คือ เวลา (นาที)

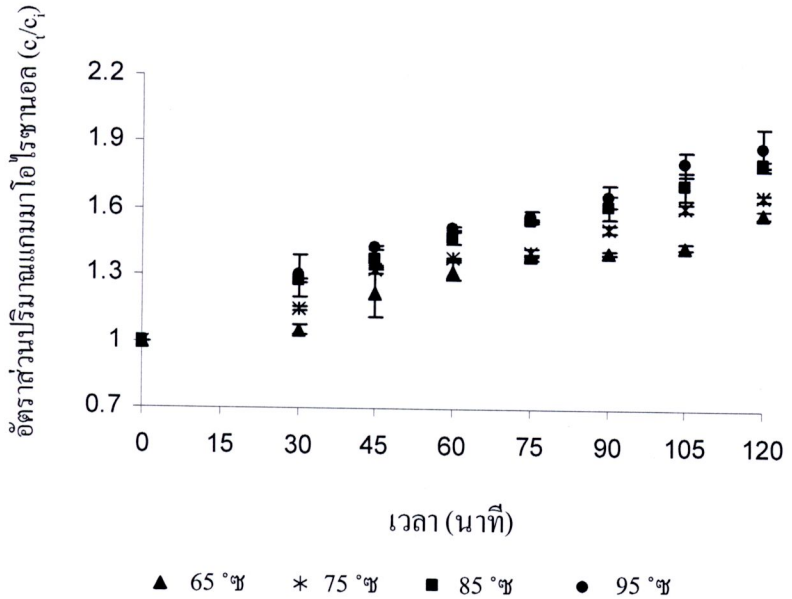
C คือ อัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอลที่เวลา t ใดๆ (c_t) ต่อปริมาณแกมมาโอไรซานอลในเมล็ดข้าวที่ยังไม่ผ่านการแช่ (c_i)

C_0 คือ อัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอลที่เวลา t = 0 (c_t) ต่อปริมาณแกมมาโอไรซานอลในเมล็ดข้าวที่ยังไม่ผ่านการแช่ (c_i)

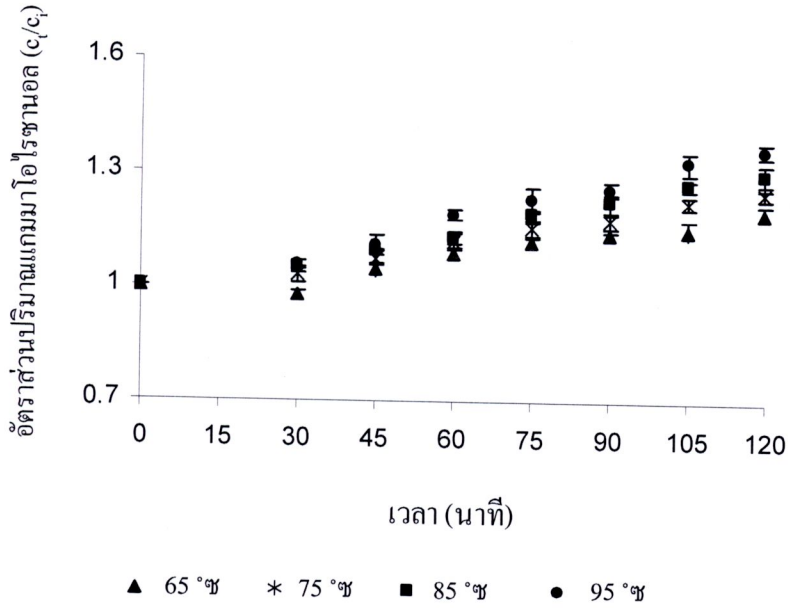
จากผลการศึกษาพบว่า ข้าวเหนียวมีปริมาณแกมมาโอไรซานอลคงอยู่ในเมล็ดสูงกว่าข้าวเจ้าเมื่อผ่านการแช่ที่สภาวะต่างๆ และมีปริมาณสูงขึ้นตามอุณหภูมิในการแช่ที่สูงขึ้น เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอล (c_t/c_i) กับเวลาในการแช่ (t) ค่าความชันของเส้นกราฟคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแกมมาโอไรซานอล (k) ของข้าว 4 สายพันธุ์ (สมการที่ (1)) จะได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 20, 21, 22 และ 23 ตามลำดับ



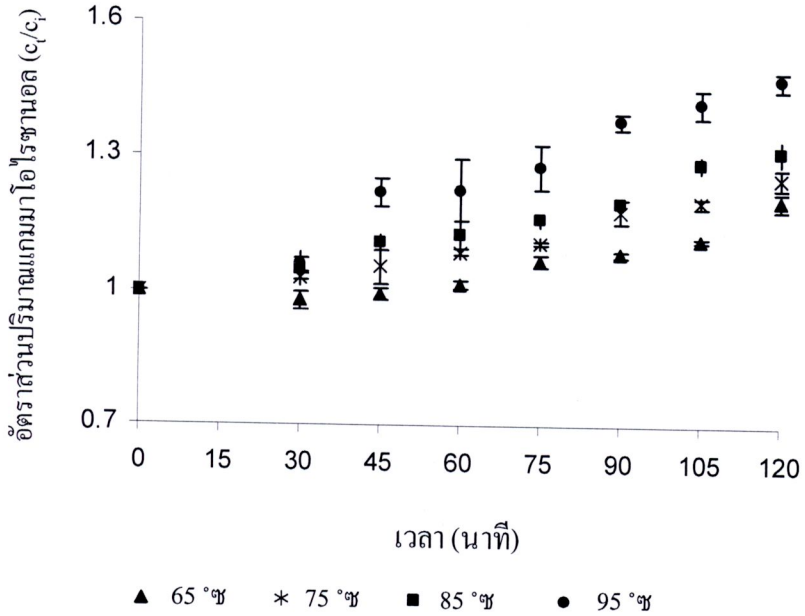
ภาพที่ 20 อัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอล c_t/c_i ของข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงหลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



ภาพที่ 21 อัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอล c_t/c_i ของข้าวพันธุ์หอมนิลหลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



ภาพที่ 22 อัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอล c_t/c_i ของข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 หลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



ภาพที่ 23 อัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอล c_t/c_i ของข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 05-003 หลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

จากภาพที่ 20, 21, 22 และ 23 พบว่าอัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอล c_t/c_i มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแกมมาโอไรซานอลในลักษณะแบบเดียวกัน และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแกมมาโอไรซานอล (k) หลังจากแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 65, 75, 85 และ 95 °ซ ดังแสดงในตารางที่ 19

ตารางที่ 19 อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกมมาโอไรซานอล (mg $ml^{-1}min^{-1}$) ของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ ซึ่งผ่านการแช่ที่อุณหภูมิ 65, 75, 85 และ 95 °ซ นาน 30-120 นาที

อุณหภูมิ (°ซ)	พันธุ์ข้าว							
	หอมมะลิแดง		หอมนิล		KKU GL BL 06-043		KKU GL BL 05-003	
	k (mg ml^{-1} min^{-1})	r^2	k (mg ml^{-1} min^{-1})	r^2	k (mg ml^{-1} min^{-1})	r^2	k (mg ml^{-1} min^{-1})	r^2
65	0.002	0.89	0.0049	0.95	0.0019	0.91	0.0017	0.91
75	0.0024	0.96	0.0056	0.98	0.0022	0.98	0.0022	0.98
85	0.003	0.99	0.0065	0.99	0.0027	0.99	0.0027	0.99
95	0.0044	0.98	0.0071	0.98	0.0032	0.99	0.0041	0.99

หมายเหตุ : k หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกมมาโอไรซานอล (mg ml^{-1} min^{-1})

r^2 หมายถึง determination coefficient

จากตารางที่ 19 พบว่าในข้าวพันธุ์หอมนิลมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงที่สุด (k=0.0071 mg ml^{-1} min^{-1}) รองลงมาคือ มะลิแดง (k=0.0044 mg ml^{-1} min^{-1}) KKU-GL-BL 05-003 (k=0.0041 mg ml^{-1} min^{-1}) และ KKU-GL-BL 06-043 (k=0.0032 mg ml^{-1} min^{-1}) ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ว่าข้าวพันธุ์หอมนิลมีปริมาณแกมมาโอไรซานอลคงอยู่ในเมล็ดข้าวสูงกว่าข้าวสายพันธุ์อื่นๆ หลังผ่านการแช่ที่อุณหภูมิ 95 °ซ นาน 120 นาที

ค่าคงที่ (k) ในสมการที่ (1) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการแช่ และเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการ Arrhenius ดังสมการที่ (2) (Ahromrit and others 2007) ดังนั้นการคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) จึงใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $-\ln k$ และ $1/T$ ดังสมการที่ (3)

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

$$-\ln k = -\ln k_0 + (E_a/R)(1/T) \quad (3)$$

กำหนดให้

E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy) ของปฏิกิริยา (kJ mol^{-1})

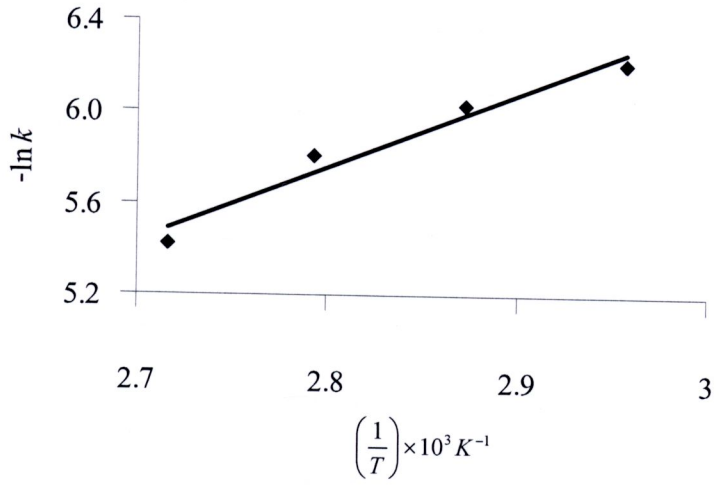
R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/K.mol)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

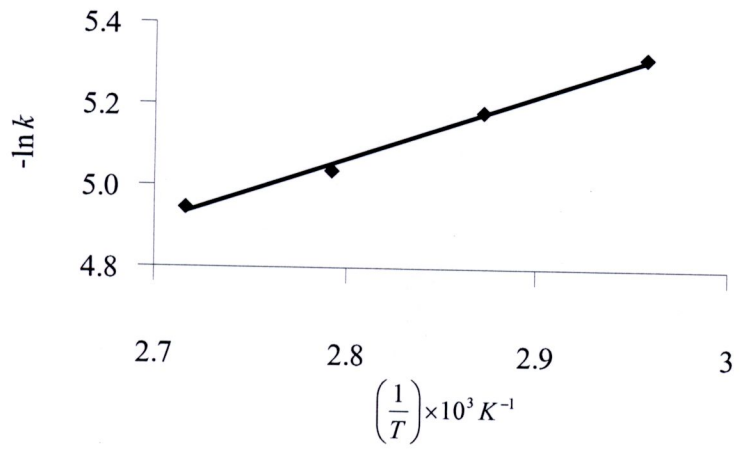
k คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแกมมาโอไรซานอล (mg ml^{-1} min^{-1})

k_0 คือ frequency factor (mg ml^{-1} min^{-1})

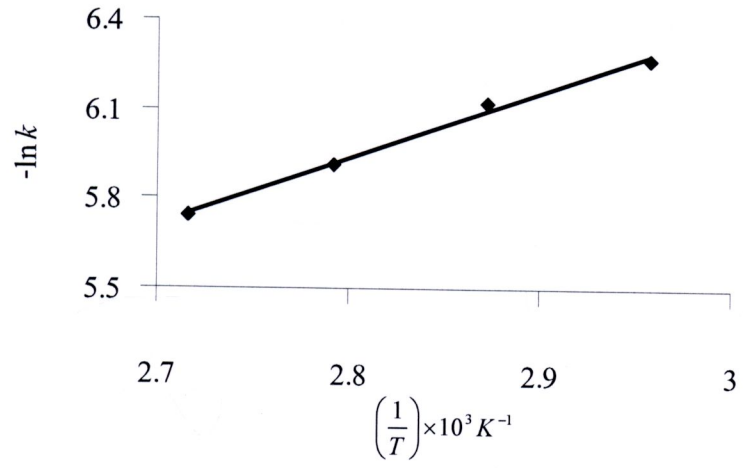
เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง -ln k และ 1/T x 10^3K^{-1} ของอัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอล จะได้กราฟเป็นเส้นตรงและมีค่าความชันเท่ากับ E_a/R แล้วจึงคำนวณหาค่า E_a กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง -ln k และ (1/T)x 10^3K^{-1} ของอัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอลของข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ในช่วงอุณหภูมิ 65-95 °ซ แสดงดังภาพที่ 23, 24, 25 และ 26 ตามลำดับ



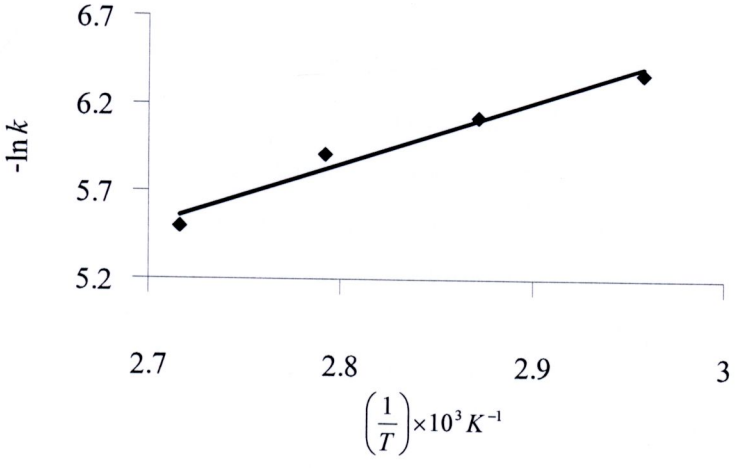
ภาพที่ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง -ln k และ (1/T)x10^3K^{-1} ของอัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอล ของข้าวพันธุ์หอมมะลิแดงในช่วงอุณหภูมิ 65-95 °ซ



ภาพที่ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง -ln k และ (1/T) x 10^3K^{-1} ของอัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอลของข้าวพันธุ์หอมนิลในช่วงอุณหภูมิ 65-95 °ซ



ภาพที่ 26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง -ln k และ (1/T) x 10^3K^{-1} ของอัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอลของข้าวพันธุ์ KKU GL BL 06-043 ในช่วงอุณหภูมิ 65-95 °ซ



ภาพที่ 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง -ln k และ (1/T) x 10^3K^{-1} ของอัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอลของข้าวพันธุ์ KKU GL BL 05-003 ในช่วงอุณหภูมิ 65-95 °ซ

จากภาพที่ 24, 25, 26 และ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง -ln k และ (1/T)x10^3K^{-1} ของอัตราส่วนปริมาณแกมมาโอไรซานอลตามสมการของ Arrhenious (Ahromrit and others 2007) (สมการที่ (2) และ (3)) จะได้กราฟเป็นเส้นตรงและมีค่าความชันเท่ากับ E_a/R ซึ่งคำนวณหาค่า E_a (kJ mol^{-1}) ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ หรือ E_a (kJ mol^{-1}) ของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ ที่ผ่านการแช่ในช่วงอุณหภูมิ 65-95 °ซ นาน 30-120 นาที

พันธุ์ข้าว	E_a (kJ mol^{-1})	r^2
หอมมะลิแดง	26.66	0.96
หอมนิล	13.08	0.99
KKU GL BL 06-043	18.28	0.99
KKU GL BL 05-003	29.35	0.97

หมายเหตุ : E_a หมายถึง activation energy (kJ/mol)

r^2 หมายถึง determination coefficient

E_a (activation energy; kJ mol^{-1}) คือ พลังงานต่ำสุดที่ต้องการในการทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารในการศึกษาครั้งนี้ จึงอธิบายได้ว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ คือ พลังงานต่ำสุดที่ทำให้เริ่มเกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณแกมมาโอไรซานอลที่ตรวจพบในข้าวหลังผ่านการแช่ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งค่า E_a (kJ mol^{-1}) ในช่วงอุณหภูมิ 65-95 °ซ ของข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ (ตารางที่ 20) แสดงให้เห็นว่าข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 05-003 มีค่า E_a มากที่สุด (E_a =29.35 kJ mol^{-1}) รองลงมาคือหอมมะลิแดง (E_a =26.66 kJ mol^{-1}) KKU-GL-BL 06-043 (E_a =18.28 kJ mol^{-1}) และหอมนิลมีค่าน้อยที่สุด (E_a =13.08 kJ mol^{-1}) อธิบายได้ว่าสารแกมมาโอไรซานอลในข้าวพันธุ์หอมนิลมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่าข้าวพันธุ์อื่น เมื่ออุณหภูมิในการแช่เพิ่มขึ้น ปริมาณแกมมาโอไรซานอลคงอยู่ในเมล็ดข้าวจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นและมีปริมาณมากกว่าข้าวพันธุ์อื่น อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิและเวลาในการแช่ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อเยื่อหุ้มเมล็ดทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดเกิดการอ่อนตัวลง นิ่มขึ้น พันธะที่ยึดเกาะกันของโครงสร้างเกิดการคลายตัวหรือเสียสภาพไปทำให้ส่งผลดีต่อการสกัดโดยสามารถสกัดสารที่มีอยู่ออกมาได้ง่ายและมากขึ้นเมื่อนำไปตรวจหาปริมาณสารแกมมาโอไรซานอลจึงตรวจพบได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kiing and others (2009) ทำการงอกข้าวกล้องทั้ง 8 สายพันธุ์ได้แก่ Chelum, Sabak, Silah, Biris, Hitam, Boria, Udang Halus และ Mamut ที่ 25 °ซ เป็นเวลา 4, 8, 12, 16, 18, 20 และ 24 ชั่วโมง ทำแห้งแล้วจึงนำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแกมมาโอไรซานอล พบว่าปริมาณแกมมาโอไรซานอลและแอลฟาโทโคเฟอรอล ในข้าวมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งได้รายงานว่าองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาล และเนื้อเยื่อของพืชจะอ่อนตัวลง เอนไซม์ไฮโดรไลซ์เริ่มทำงาน ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณของวิตามิน โอลิโกแซคคาไรด์ เกลือแร่ และกรดอะมิโนต่างๆ เพิ่มขึ้น เช่น ส่วนที่ไม่ใช่แป้ง และโปรตีน การย่อยโพลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลมากๆ ในระหว่างการงอกมีผลทำให้มีสารชีวภาพต่างๆเกิดขึ้น ปริมาณของแกมมาโอไรซานอลที่ต่างกันในข้าวกล้องงอกขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ อัตราส่วนของการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวที่ต่างกันและเวลาในการแช่ข้าว เป็นต้น ซึ่งปริมาณสารโอไรซานอลในข้าวกล้องงอกมีปริมาณมากกว่าในข้าวสารที่ไม่ผ่านการงอก 4.4 เท่า (สุภาณี จงดี และคณะ 2551)

3. ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโธไซยานินในเมล็ดข้าวไม่ขัดสี

ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโธไซยานินในข้าวไม่ขัดสีหลังผ่านการแช่ที่อุณหภูมิสูง พบว่า อุณหภูมิ (28, 65, 75, 85 และ 95 °ซ) และเวลา (30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที) มีผลต่อปริมาณแอนโธไซยานินของข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่ข้าวเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ตรวจพบปริมาณแอนโธไซยานินในเมล็ดข้าวลดลง ปริมาณแอนโธไซยานินที่ลดลงอาจเป็นผลมาจากว่าสารแอนโธไซยานินมีคุณสมบัติในการละลายน้ำและถูกทำลายได้ง่ายในกระบวนการแปรรูปอาหารตัวอย่างเช่น การใช้อุณหภูมิสูงและสภาวะที่มีออกซิเจน จะมีผลเร่งอัตราเร็วของการสลายตัวของแอนโธไซยานินให้เกิดเร็วขึ้น (นิธิยา รัตนาปนนท์ 2545) ระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลทำให้สารแอนโธไซยานินมีความคงตัวต่ำลง (Cabrita and others 2000) และระยะเวลาที่นานขึ้นมีผลทำให้แอนโธไซยานินถูกทำลายได้มากขึ้นเช่นกันซึ่งจากการทดลองพบว่า ปริมาณแอนโธไซยานินที่คงอยู่ในเมล็ดข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ หลังผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ แสดงในตารางที่ 21 ซึ่งพบว่าข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ หลังผ่านการแช่นาน 30 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ มีปริมาณแอนโธไซยานินสูญเสียไปมากกว่าร้อยละ 70-98 ของปริมาณแอนโธไซยานินในข้าวที่ไม่ผ่านการแช่ (ตารางที่ 22) และร้อยละของแข็งทั้งหมดในน้ำแช่ของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์หลังผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.06-7.92 ดังแสดงในตารางที่ 51 (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 21 ปริมาณแอนโธไซยานิน (mg/100 g_{db}) ที่คงอยู่ในเมล็ดข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ หลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	มะลิแดง	หอมนิล	KKU-GL-BL 06-043	KKU-GL-BL 05-003
28	30	$2.41+0.03^{a}$	$4.89+0.03^{a}$	$81.66+1.30^{a}$	$24.15+0.21^{a}$
	45	$2.17+0.03^{b}$	$4.59+0.05^{b}$	$78.16+0.84^{b}$	$23.32+0.13^{b}$
	60	$2.15+0.03^{bc}$	$4.06+0.06^{c}$	$77.29+1.20^{b}$	$21.66+0.12^{c}$
	75	$2.05+0.03^{cd}$	$3.67+0.06^{d}$	$76.18+0.86^{c}$	$21.25+0.08^{d}$
	90	$1.85+0.08^{fg}$	$3.23+0.04^{e}$	$68.25+0.93^{d}$	$20.35+0.10^{e}$
	105	$1.77+0.09^{gh}$	$3.08+0.02^{fg}$	$64.78+0.71^{e}$	$19.58+0.14^{f}$
	120	$1.74+0.07^{gh}$	$2.69+0.04^{h}$	$61.34+1.42^{f}$	$19.34+0.08^{f}$

ตารางที่ 21 ปริมาณแอนโธไซยานิน (mg/100 g_{db}) ที่คงอยู่ในเมล็ดข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ หลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	มะลิแดง	หอมนิล	KKU-GL-BL 06-043	KKU-GL-BL 05-003
65	30	$2.20+0.17^{b}$	$3.16+0.30^{f}$	$63.92+1.19^{e}$	$9.95+0.25^{g}$
	45	$1.91+0.19^{ef}$	$2.98+0.12^{g}$	$56.23+0.37^{g}$	$9.04+0.42^{h}$
	60	$1.72+0.06^{h}$	$2.22+0.21^{i}$	$53.85+0.26^{h}$	$8.04+0.32^{ij}$
	75	$1.46+0.08^{i}$	$2.13+0.08^{i}$	$43.22+0.36^{i}$	$7.19+0.13^{lm}$
	90	$1.12+0.07^{k}$	$1.83+0.04^{j}$	$42.05+0.41^{j}$	$7.00+0.20^{m}$
	105	$0.89+0.11^{l}$	$1.43+0.21^{k}$	$41.41+0.03^{jk}$	$6.61+0.41^{n}$
	120	$0.51+0.08^{mn}$	$0.78+0.25^{n}$	$40.77+0.20^{k}$	$5.75+0.20^{op}$
75	30	$2.00+0.14^{de}$	$2.10+0.06^{i}$	$20.72+0.38^{l}$	$9.75+0.04^{g}$
	45	$1.45+0.04^{i}$	$1.94+0.09^{j}$	$19.75+0.29^{m}$	$8.26+0.20^{i}$
	60	$1.36+0.08^{ij}$	$1.33+0.04^{k}$	$19.48+0.18^{mn}$	$7.23+0.54^{lm}$
	75	$1.29+0.11^{j}$	$1.17+0.14^{l}$	$17.26+0.33^{pq}$	$6.49+0.32^{n}$
	90	$1.11+0.08^{k}$	$0.65+0.07^{no}$	$16.83+0.34^{qr}$	$6.06+0.25^{o}$
	105	$0.98+0.11^{l}$	$0.62+0.05^{op}$	$15.75+0.17^{st}$	$5.59+0.22^{p}$
	120	$0.36+0.21^{opqr}$	$0.48+0.07^{pqr}$	$14.83+0.11^{tu}$	$4.89+0.09^{rs}$
85	30	$0.61+0.04^{m}$	$0.99+0.14^{m}$	$20.45+0.10^{lm}$	$8.37+0.59^{i}$
	45	$0.54+0.07^{mn}$	$0.65+0.06^{no}$	$20.09+0.10^{lm}$	$7.18+0.56^{lm}$
	60	$0.45+0.04^{nop}$	$0.59+0.03^{opq}$	$19.65+0.11^{mn}$	$6.48+0.03^{n}$
	75	$0.45+0.11^{nop}$	$0.51+0.04^{opqr}$	$16.44+0.06^{qrs}$	$6.04+0.18^{o}$
	90	$0.35+0.06^{pqr}$	$0.47+0.03^{pqrs}$	$14.96+0.46^{tu}$	$5.45+0.14^{pq}$
	105	$0.26+0.02^{rst}$	$0.36+0.04^{rst}$	$13.67+0.09^{v}$	$4.76+0.04^{s}$
	120	$0.19+0.02^{st}$	$0.22+0.04^{t}$	$12.62+0.38^{w}$	$4.57+0.11^{s}$
95	30	$0.49+0.06^{mno}$	$0.79+0.06^{n}$	$18.75+0.20^{no}$	$7.73+0.09^{jk}$
	45	$0.40+0.03^{nopq}$	$0.67+0.07^{no}$	$18.12+0.47^{op}$	$7.56+0.10^{kl}$
	60	$0.28+0.03^{qrs}$	$0.62+0.05^{op}$	$16.05+0.04^{rs}$	$7.26+0.10^{lm}$
	75	$0.23+0.01^{rst}$	$0.56+0.05^{opq}$	$14.94+0.11^{tu}$	$6.97+0.11^{m}$
	90	$0.18+0.02^{st}$	$0.44+0.02^{qrs}$	$14.26+0.03^{uv}$	$5.48+0.28^{pq}$
	105	$0.13+0.02^{tu}$	$0.39+0.02^{rs}$	$12.54+1.10^{w}$	$5.17+0.15^{qr}$
	120	$0.03+0.01^{u}$	$0.31+0.05^{st}$	$12.14+1.22^{w}$	$4.70+0.16^{s}$

a, b... ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 21 มาคำนวณเป็นร้อยละการสูญเสียของแอนโธไซยานินที่คงอยู่ในเมล็ดข้าวหลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยเทียบปริมาณแอนโธไซยานินที่คงอยู่ในเมล็ดข้าวที่ไม่ผ่านการแช่ พบว่าอุณหภูมิและเวลาในการแช่ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้มีร้อยละการสูญเสียของแอนโธไซยานินที่คงอยู่ในเมล็ดข้าวนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งร้อยละการสูญเสียแอนโธไซยานินของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์แสดงค่าในตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ร้อยละการสูญเสียของแอนโธไซยานินในข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ หลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	หอมมะลิแดง	หอมนิล	KKU-GL-BL 06-043	KKU-GL-BL 05-003
28	30	82.93±0.26^{u}	91.87+0.05^{t}	70.17+0.47^{w}	88.61+0.10^{s}
	45	84.59±0.23^{t}	92.37+0.08^{s}	71.45+0.31^{v}	89.00+0.06^{r}
	60	84.79±0.20st	93.26+0.10^{r}	71.77+0.44^{v}	89.79+0.06^{q}
	75	85.50±0.23^{rs}	93.90+0.10^{q}	72.17+0.31^{u}	89.98+0.04^{p}
	90	86.86±0.57^{op}	94.63+0.07^{p}	75.07+0.35^{t}	90.41+0.05^{o}
	105	87.47±0.67^{no}	94.89+0.03^{no}	76.34+0.26^{s}	90.77+0.06^{n}
	120	87.65±0.49^{no}	95.54+0.07^{m}	77.59+0.52^{r}	90.88+0.04^{n}
65	30	84.43±1.23^{t}	94.75+0.50^{op}	76.65+0.43^{s}	95.31+0.12^{m}
	45	86.42±1.37^{pq}	95.06+0.21^{n}	79.46+0.14^{q}	95.74+0.20^{l}
	60	87.81±0.42^{n}	96.32+0.35^{l}	80.33+0.09^{p}	96.21+0.15^{jk}
	75	89.65±0.57^{m}	96.46+0.14^{l}	84.21+0.13^{o}	96.61+0.06^{g}
	90	92.03±0.46^{k}	96.96+0.07^{k}	84.64+0.15^{n}	96.70+0.10^{g}
	105	93.72±0.79^{j}	97.62+0.35^{j}	84.87+0.01^{mn}	96.88+0.19^{f}
	120	96.42±0.57^{hi}	98.70+0.41^{g}	85.11+0.07^{m}	97.29+0.09^{de}
75	30	85.83±1.03^{qr}	96.52+0.10^{l}	92.43+0.14^{l}	95.41+0.02^{m}
	45	89.74±0.31^{m}	96.77+0.15^{k}	92.79+0.10^{k}	96.11+0.09^{k}
	60	90.35±0.57^{lm}	97.80+0.06^{j}	92.88+0.07^{jk}	96.59+0.25^{gh}
	75	90.87±0.77^{l}	98.05+0.23^{i}	93.70+0.12^{gh}	96.94+0.15^{f}
	90	92.10±0.54^{k}	98.92+0.12^{fg}	93.85+0.12^{fg}	97.14+0.12^{e}
	105	93.06±0.77^{j}	98.98+0.08^{ef}	94.25+0.06^{de}	97.37+0.10^{d}
	120	97.47±1.47^{defg}	99.20+0.12^{cde}	94.58+0.04^{cd}	97.69+0.04^{ab}

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ตารางที่ 22 ร้อยละการสูญเสียของแอนโธไซยานินในข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ หลังจากผ่านการแช่ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (นาที)	หอมมะลิแดง	หอมนิล	KKU-GL-BL 06-043	KKU-GL-BL 05-003
85	30	95.70±0.28^{i}	98.37+0.24^{h}	92.53+0.04^{kl}	96.06+0.28^{k}
	45	96.21±0.52^{hi}	98.93+0.11^{fg}	92.66+0.04^{kl}	96.62+0.26^{g}
	60	96.81±0.28^{fgh}	99.02+0.05^{def}	92.83+0.04^{jk}	96.94+0.02^{f}
	75	96.78±0.79^{fgh}	99.15+0.07^{cdef}	94.00+0.02^{efg}	97.15+0.09^{e}
	90	97.50±0.39^{def}	99.22+0.04^{bcde}	94.54+0.16^{cd}	97.43+0.06^{cd}
	105	98.18±0.13^{bcd}	99.40+0.07^{abc}	95.01+0.03^{b}	97.75+0.02^{a}
	120	98.63±0.15^{bc}	99.64+0.05^{a}	95.39+0.14^{a}	97.85+0.05^{a}
95	30	96.52±0.44^{ghi}	98.70+0.10^{g}	93.15+0.08^{ij}	96.35+0.04^{ij}
	45	97.16±0.15^{efgh}	98.89+0.11^{fg}	93.38+0.18^{hi}	96.43+0.05^{hi}
	60	98.04±0.21^{cde}	98.97+0.09^{ef}	94.14+0.01^{ef}	96.58+0.05^{gh}
	75	98.35±0.08^{bcd}	99.07+0.08^{def}	94.54+0.04^{cd}	96.71+0.05^{g}
	90	98.69±0.15^{bc}	99.27+0.04^{bcd}	94.79+0.01^{bc}	97.42+0.13^{cd}
	105	99.04±0.13^{ab}	99.36+0.03^{bc}	95.42+0.40^{a}	97.56+0.07^{bc}
	120	99.83±0.10^{a}	99.48+0.08^{ab}	95.57+0.44^{a}	97.78+0.07^{a}

a, b... ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 21 และ 22 พบว่า ข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 มีร้อยละการสูญเสียของปริมาณแอนโธไซยานินคงอยู่ในเมล็ดน้อยที่สุด และข้าวพันธุ์หอมนิลมีร้อยละการสูญเสียของปริมาณแอนโธไซยานินคงอยู่ในเมล็ดมากที่สุด สำหรับสภาวะการแช่ที่ไม่มีการให้ความร้อน คือ อุณหภูมิ 28 °ซ นาน 120 นาที พบว่าปริมาณแอนโธไซยานินคงอยู่ในเมล็ดเท่ากับ 1.74, 2.68, 61.34 และ 19.34 mg/100 g_{db} ในข้าวพันธุ์หอมมะลิแดง หอมนิล KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 ตามลำดับ และเมื่อแช่ในสภาวะการให้ความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 95 °ซ 120 นาที พบว่าข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 มีร้อยละการสูญเสียของปริมาณแอนโธไซยานินคงอยู่ในเมล็ดน้อยที่สุด ซึ่งมีปริมาณแอนโธไซยานินคงอยู่ในเมล็ดเท่ากับ 12.14 mg/100 g_{db} ส่วนข้าวพันธุ์หอมมะลิแดง หอมนิล และ KKU-GL-BL 05-003 มีปริมาณแอนโธไซยานินคงอยู่ในเมล็ดเท่ากับ 0.03, 0.31 และ 4.70 mg/100 g_{db} ตามลำดับ ซึ่งแอนโธไซยานินมีการสลายตัวมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นนั้นเนื่องมาจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ทำให้โครงสร้างของแอนโธไซยานินเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่อุณหภูมิสูงจะเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลเซชัน (hydrolyzation) ของ 3-glycoside ทำให้ flavylium cation เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็น chalcone ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความคงตัวน้อยจึงส่งผลให้แอนโธไซยานินมีความคงตัวลดลง (Laleh and others

2006) ซึ่งสภาวะการเก็บรักษาในที่มีแสงและไม่มีแสง อัตราการสลายตัวของแอนโธไซยานินเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น (Morais and others 2002)

ระยะเวลาในการแช่ข้าวที่นานขึ้นมีผลทำให้ตรวจพบแอนโธไซยานินคงอยู่ในเมล็ดข้าวได้น้อยลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ แสงทิวา สุริยงค์ และคณะ (2553) ศึกษาผลของขบวนการแช่ต่อปริมาณของสารแอนโธไซยานินในข้าวก่ำหรือข้าวมีสีม่วง 4 พันธุ์คือ ข้าวเหนียวดำหรือข้าวก่ำพันธุ์ดอยสะเก็ด สายพันธุ์ที่เก็บสะสมเลขที่ 88061 ข้าวเจ้าก่ำพันธุ์หอมนิล เปรียบเทียบกับข้าวเจ้าขาวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พบว่าระยะเวลาในการแช่ข้าวมีผลต่อการลดลงของปริมาณไซยานิดิน 3 กลูโคไซน์ (cyanidin 3 glucoside) ของข้าวแต่ละพันธุ์โดยปริมาณแอนโธไซยานินลดลงตามระยะเวลาการแช่ที่นานขึ้น

สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง แอนโธไซยานินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากว่าในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง จะทำให้สมดุลของแอนโธไซยานินเลื่อนจากซ้ายไปขวาดังนี้

Blue quinonoid (สีน้ำเงิน) ⟷ Red Flavylium (สีแดง) ⟷ Colorless Cabinol base (ไม่มีสี) ⟷ Colorless Chalcone (ไม่มีสี)

การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เกิด chalocone (ไม่มีสี) มากขึ้น ปริมาณ flavylium (สีแดง) ลดลง ความคงตัวของสีแดงของแอนโธไซยานินจึงลดลง และการเปลี่ยนแปลงของแอนโธไซยานินจะเกิดได้มากที่สุดเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและมีแสง เนื่องจากสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงจะก่อให้เกิด chalocone ได้เร็วขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิและแสงจึงเป็นปัจจัยส่งเสริมให้อัตราการเกิด chalocone เพิ่มขึ้น (ยุพาพร ผลาขจรศักดิ์ 2547) จึงสรุปได้ว่า สภาวะที่มีอุณหภูมิสูงส่งผลทำให้ความคงตัวของแอนโธไซยานินจะลดลงมากกว่าสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ

4. ผลการศึกษาผลของระยะเวลาในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °ซ ต่อระดับการสุกและกิจกรรมการต้านออกซิเดชันของเมล็ดข้าวไม่ขัดสี

4.1 ผลของระยะเวลาต่อระดับการสุกของเมล็ดข้าวที่สภาวะการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °ซ

ทำการวัดค่าเอนทาลปีที่ทำให้เม็ดแป้งสุกของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °ซ นาน 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รายงานผลเป็นค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (T_o) อุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) ค่าพลังงานในการทำให้เม็ดแป้งสุกหรือเกิดเจลาติไนเซชันหรือค่าเอนทาลปี (ΔH, J/g) ดังแสดงผลในตารางที่ 28-29 นำค่าเอนทาลปี (ΔH) ของข้าวที่ผ่านการแช่ที่สภาวะต่างๆและข้าวที่ไม่ผ่านการแช่ของแต่ละสายพันธุ์ มาคำนวณหาร้อยละระดับการสุกของเมล็ดข้าว (degree of gelatinization; %) โดยใช้สมการที่ (4) และ (5) (Ahromrit and others 2007)

$$\%\text{un-gelatinization} = (\Delta H_{treated}/\Delta H_{raw}) \times 100 \quad (4)$$

$$\%\text{gelatinization} = 100 - \%\text{un-gelatinization} \quad (5)$$

กำหนดให้

$\Delta H_{treated}$ คือ ค่าเอนทาลปีของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ (treated rice)

ΔH_{raw} คือ ค่าเอนทาลปีของข้าวที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อน (untreated rice or raw rice)

จากตารางที่ 23 พบว่าข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีค่าเอนทาลปีไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) โดยค่าเอนทาลปีของข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 มีค่าเท่ากับ 3.19±0.19 J/g KKU-GL-BL 05-003 มีค่าเท่ากับ 3.11±0.16 J/g หอมนิล มีค่าเท่ากับ 3.06±0.17 J/g และหอมมะลิแดง มีค่าเท่ากับ 3.04±0.27 J/g และข้าวพันธุ์หอมนิลมีค่าอุณหภูมิแป้งสุกหรืออุณหภูมิที่ทำให้เม็ดแป้งเกิดเจลาติไนซ์ (T_p) สูงที่สุด คือ 74.68±0.17 °ซ

ตารางที่ 23 ค่าเอนทาลปี (ΔH, J/g) อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (onset, T_o) อุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak, T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (end, T_c) ของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน

พันธุ์ข้าว	onset, T_o (°ซ)	peak, T_p(°ซ)	end, T_c(°ซ)	ΔH_{raw} (J/g)
หอมมะลิแดง	64.77±0.54^{b}	70.13±0.20^{b}	76.72±0.72^{b}	3.04±0.27^{ns}
หอมนิล	67.66±0.22^{a}	74.68±0.17^{a}	81.12±0.32^{a}	3.06±0.17^{ns}
KKU-GL-BL 06-043	65.35±0.69^{b}	70.03±0.12^{b}	75.91±0.50^{bc}	3.19±0.19^{ns}
KKU-GL-BL 05-003	64.73±0.52^{b}	69.60±0.32^{c}	75.28±1.44^{c}	3.11±0.16^{ns}

a, b... ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
ns ตัวอักษรในแนวตั้งแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

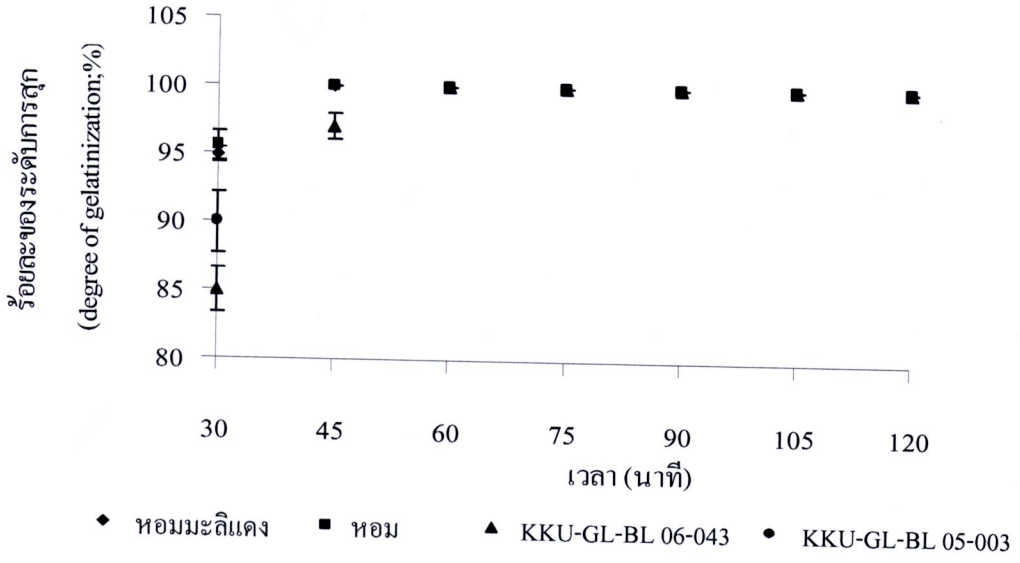
ตารางที่ 24 ร้อยละระดับการสุก (% gelatinization) ค่าเอนทาลปี (ΔH, J/g) อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (onset, T_o) อุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak, T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (end, T_c) ของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ ที่อุณหภูมิ 95 °ซ นาน 30 นาที

คุณสมบัติ	ข้าวหอมมะลิแดง	ข้าวหอมนิล	KKU-GL-BL 06-043	KKU-GL-BL 05-003
% gelatinization	94.88± 0.49^{a}	95.53±1.10^{a}	85.00±1.57^{c}	89.96±2.25^{b}
$\Delta H_{95,30}$ (J/g)	0.16±0.01^{c}	0.14±0.03^{c}	0.48±0.05^{a}	0.31±0.07^{b}
onset , T_o (°ซ)	71.48±0.68^{b}	73.59±1.09^{a}	69.96±0.24^{c}	69.45±0.77^{c}
peak , T_p(°ซ)	76.07±0.01^{b}	79.89±0.70^{a}	75.27±0.36^{c}	75.26±0.59^{c}
end , T_c(°ซ)	81.80±2.20^{ns}	86.00±4.30^{ns}	82.55±0.49^{ns}	81.50±0.71^{ns}

a, b... ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
ns ตัวอักษรในแนวนอนแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 24 พบว่า สภาวะการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °ซ นาน 30 นาที ข้าวพันธุ์หอมนิลและหอมมะลิแดงมีร้อยละของระดับการสุกไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) และมีค่ามากกว่าร้อยละ 94 ขณะที่ข้าวเหนียวทั้ง 2 สายพันธุ์ คือ KKU-GL-BL 05-003 และ KKU-GL-BL 06-043 มีร้อยละระดับการสุก 89.96 และ 85.00

ตามลำดับ ข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่ามีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงและอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุดต่ำกว่ากลุ่มของข้าวเจ้า และค่าเอนทาลปีของกลุ่มข้าวเหนียวมีค่าสูงกว่ากลุ่มของข้าวเจ้า เนื่องจากแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำจะมีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันต่ำกว่า แต่ใช้พลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH) สูงกว่าแป้งที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (ศันสนีย์ อุดมระติ และคณะ2546) ข้าวหอมนิลมีค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงสูงที่สุดอาจเนื่องมาจากว่ามีปริมาณไขมันและแอมิโลสสูงกว่าข้าวสายพันธุ์อื่นจึงอาจไปขัดขวางการพองตัวของแป้งทำให้น้ำถูกดูดซึมได้ยากกว่าข้าวพันธุ์อื่นจึงมีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงสูงกว่า การเปลี่ยนแปลงร้อยละระดับการสุกของข้าวทั้ง 4 สายพันธุ์ หลังผ่านการแช่ที่ 95 °ซ นาน 120 นาที แสดงดังภาพที่ 28



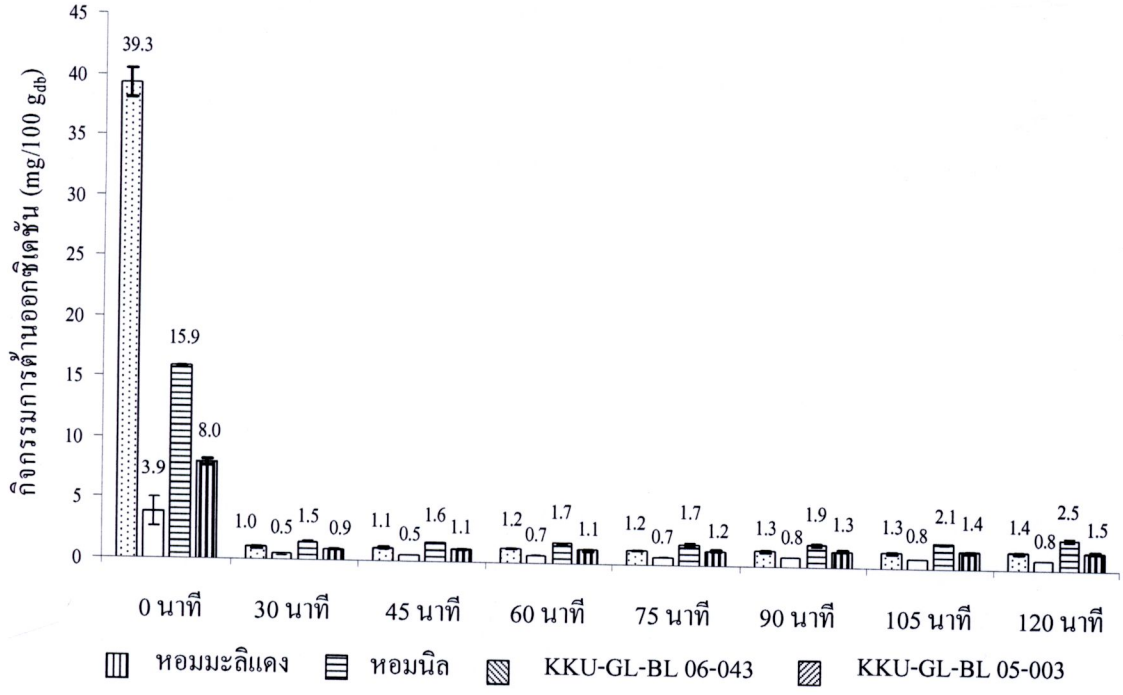
ภาพที่ 28 ร้อยละของระดับการสุกของข้าวมีสี 4 สายพันธุ์ ที่ 95 °ซ นาน 120 นาที

จากภาพที่ 28 ผลของการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °ซ นาน 120 นาที ต่อระดับการสุก พบว่า ร้อยละระดับการสุกของข้าวทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการให้ความร้อนข้าวที่นานขึ้น และจะเห็นชัดในช่วงเวลาไม่เกิน 60 นาที และที่สภาวะการให้ความร้อนนานมากกว่า 60 นาที ร้อยละระดับการสุกของเมล็ดข้าวทุกสายพันธุ์มีค่าคงที่ คือ ข้าวสุกทั้งเมล็ด (ระดับการสุกเท่ากับ 100%) การเพิ่มขึ้นของระดับการสุกสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเวลาในการให้ความร้อนข้าวที่นานขึ้นทำให้เมล็ดข้าวมีโอกาสดูดน้ำได้มากขึ้น และการใช้อุณภูมิในการให้ความร้อนข้าวที่สูงกว่าอุณหภูมิแป้งสุก (T_p) ทั้ง 4 สายพันธุ์ที่ทำการศึกษา จึงมีผลทำให้เม็ดแป้งมีการดูดน้ำอย่างรวดเร็วและพองตัวขึ้นมาก การพองตัวอย่างเต็มที่ของเม็ดแป้งจะทำให้สูญเสียลักษณะ birefringence ซึ่งเป็นลักษณะที่บ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในเม็ดแป้งอย่างเป็นระเบียบ แป้งแต่ละชนิดมีช่วงอุณหภูมิแป้งสุกแตกต่างกันไปขึ้นกับปริมาณแอมิโลสที่เป็นองค์ประกอบ (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ 2546) จากผลการศึกษาการให้ความร้อนข้าวที่ 95 °ซ นาน 45 นาที สามารถทำให้ข้าว 3 สายพันธุ์คือ หอมมะลิแดง หอมนิล และ KKU-GL-BL 05-003 มีระดับการสุกเท่ากับ 100% ($\Delta H_{95,45} = 0$) ส่วน KKU-GL-BL 06-043 เมล็ดข้าวจะมีระดับการสุกเท่ากับ 100% เมื่อให้ความร้อนที่ 95°ซ นาน 60 นาที ($\Delta H_{95,60} = 0$) การหุงข้าวให้สุกส่วน

ใหญ่ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95-100 °ซ นาน 20-60 นาที (Ahromrit and others 2007) ซึ่งอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนเซชันของเม็ดแป้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียวอยู่ในช่วง 61-78 °ซ และ 55-65 °ซ ตามลำดับ (ชาญ มงคล 2536; Ahromrit 2005) และการหุงข้าวที่อุณหภูมิสูงทำให้ปริมาณความชื้นของข้าวเพิ่มขึ้นและเกิดเจลาติไนเซชันอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการหุงข้าวที่อุณหภูมิต่ำกว่า ที่ระดับความดันเดียวกัน การหุงข้าวในสภาวะน้ำเดือดช่วยทำให้น้ำแพร่เข้าสู่เมล็ดข้าวและเกิดเจลาติเซชันได้เร็วขึ้นแต่เมล็ดข้าวที่ได้มีลักษณะปริบานออกตามแนวยาวของเมล็ดและเนื้อสัมผัสค่อนข้างเละ (อาลักษณ์ ทิพยรัตน์ และ พงษ์ธร ลีละยุทธสุนทร 2548)

4.2 ผลของระยะเวลาต่อกิจกรรมการต้านออกซิเดชันของเมล็ดข้าวที่สภาวะการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °ซ

กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน (mg trolox/100 g_{db}) ของข้าวพันธุ์หอมมะลิแดง หอมนิล KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 ในเมล็ดข้าวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (0 นาที) และเมล็ดข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 95 °ซ เวลา 30-120 นาที แสดงในภาพที่ 29 เมล็ดข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °ซ นาน 30-120 นาที เวลาในการให้ความร้อนมีผลต่อกิจกรรมการต้านออกซิเดชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งการให้ความร้อนเมล็ดข้าวที่ 95 °ซ นาน 30 นาที มีผลทำให้กิจกรรมการต้านออกซิเดชันในเมล็ดข้าวไม่ขัดสีทั้ง 4 สายพันธุ์ เกิดการสูญเสียกิจกรรมการต้านออกซิเดชันไปมากกว่าร้อยละ 87 ของค่ากิจกรรมการต้านออกซิเดชันในข้าวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกิจกรรมการต้านออกซิเดชันในเมล็ดข้าว 4 สายพันธุ์ แสดงในตารางที่ 25



ภาพที่ 29 กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน (mg trolox/100 g_{db}) ของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนและผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °ซ เวลา 30-120 นาที

ตารางที่ 25 กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน (mg trolox/100 g_{db}) ของข้าวไม่ขัดสี 4 สายพันธุ์ ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนและผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °ซ เวลา 30-120 นาที

เวลา (นาที)	กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน (mg trolox/100 g_{db})			
	หอมมะลิแดง	หอมนิล	KKU-GL-BL 06-043	KKU-GL-BL 05-003
0	39.23±1.21^{a}	3.89±1.22^{a}	15.94±0.09^{a}	8.01±0.30^{a}
30	1.03±0.05^{b}	0.48±0.05^{b}	1.49±0.07^{g}	0.92±0.04^{e}
45	1.10±0.04^{b}	0.55±0.04^{b}	1.59±0.03^{fg}	1.08±0.03^{de}
60	1.17±0.01^{b}	0.69±0.06^{b}	1.67±0.03^{ef}	1.14±0.03^{d}
75	1.19±0.06^{b}	0.70±0.03^{b}	1.72±0.11^{e}	1.24±0.05^{cd}
90	1.27±0.08^{b}	0.77±0.02^{b}	1.89±0.10^{d}	1.34±0.06^{bc}
105	1.30±0.04^{b}	0.80±0.02^{b}	2.12±0.06^{c}	1.41±0.01^{bc}
120	1.41±0.07^{b}	0.83±0.03^{b}	2.51±0.12^{b}	1.50±0.04^{b}

a, b... ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 25 พบว่าข้าวพันธุ์หอมมะลิแดง หอมนิล KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีกิจกรรมการต้านออกซิเดชันคงอยู่ในเมล็ดเท่ากับ 39.2, 3.9, 15.9 และ 8.0 mg trolox/100 g_{db} ตามลำดับ และหลังจากเมล็ดข้าวผ่านการให้ความร้อนที่ 95 °ซ เวลา 30-120 นาที ตรวจพบค่ากิจกรรมการต้านออกซิเดชันอยู่ในช่วง 1.03-1.41, 0.48-0.83, 1.49-2.51 และ 0.92-1.50 mg trolox/100 g_{db} ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสภาวะการให้ความ ร้อนข้าวที่อุณหภูมิ 95 °ซ นาน 120 นาที กิจกรรมการต้านออกซิเดชันคงอยู่ในเมล็ดข้าวพันธุ์หอมมะลิแดง หอมนิล KKU-GL-BL 06-043 และ KKU-GL-BL 05-003 มีค่าเท่ากับ 1.41, 0.83, 2.51 และ 1.50 mg trolox/100 g_{db} ตามลำดับ ซึ่งข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 มีกิจกรรมการต้านออกซิเดชันคงอยู่ในเมล็ดสูงที่สุด

ข้าวพันธุ์หอมมะลิแดง หอมนิล และ KKU-GL-BL 05-003 ที่สุกทั้งเมล็ด (ระดับการสุก 100%) จากสภาวะการให้ความร้อนที่ 95 °ซ นาน 45 นาที มีค่ากิจกรรมการต้านออกซิเดชันที่คงอยู่ในเมล็ดเท่ากับ 1.10, 0.55, และ 1.08 mg trolox/100 g_{db} ตามลำดับ ส่วนข้าว KKU-GL-BL06-043 จะต้องใช้เวลานานขึ้นเป็น 60 นาที ข้าวจึงสุกทั้งเมล็ด (ระดับการสุก100%) และมีค่ากิจกรรมการต้านออกซิเดชันที่คงอยู่ในเมล็ดเท่ากับ 1.67 mg trolox/100 g_{db} ผลการศึกษาที่ได้ทำให้ทราบว่าข้าวที่มีระดับการสุก 100% และมีกิจกรรมการต้านออกซิเดชันคงอยู่ในเมล็ดสูงที่สุดคือข้าวพันธุ์ KKU-GL-BL 06-043 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sadabpod and others (2010) ศึกษากิจกรรมการต้านออกซิเดชันข้าวดิบและข้าวสุก ในข้าวหอมนิลและข้าวเหนียวดำ พบว่ากิจกรรมการต้านออกซิเดชันในข้าวดิบมีค่าสูงกว่าในข้าวสุก และการแช่ข้าวมีผลต่อการลดลงของปริมาณสารต้านออกซิเดชันมีปริมาณลดลงตามระยะเวลาการแช่นานขึ้น (แสงทิวา สุริยงค์ และคณะ 2553) การให้ความร้อนข้าวที่อุณหภูมิ 95 °ซ นาน 30-120 นาที เวลามีผลทำให้กิจกรรมการต้านออกซิเดชันในเมล็ดข้าวลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดข้าวที่ไม่ผ่านการให้

ความร้อน อาจเป็นเพราะอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนส่งผลให้สารที่มีคุณสมบัติในการต้านออกซิเดชันที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวนั้นถูกทำลายไปเนื่องจากความร้อนและระยะเวลาในการให้ความร้อนนั้นเอง เช่น สารแอนโธไซยานินซึ่งเป็นสารที่ไม่ทนร้อนพบมากบริเวณเยื่อหุ้มเมล็ด ดังนั้นกิจกรรมการต้านออกซิเดชันที่ยังคงเหลืออยู่ในเมล็ดข้าวอาจเป็นผลมาจากสารที่มีคุณสมบัติในการต้านออกซิเดชันที่ยังไม่ถูกทำลายหรือยังถูกทำลายไม่หมด เช่น สารแกมมาโอไรซานอล สารในกลุ่มไฟโตสเตอรอล กลุ่มพอลิฟีนอล และวิตามินอี (โทโคเฟอรอลและโทโคไตรอินอล) ซึ่งสารเหล่านี้เป็นไขมันที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพเนื่องจากการมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (Qureshi and others 2002) และกิจกรรมการต้านออกซิเดชันมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารโพลีฟีนอลและสารแอนโธไซอะนิดินที่มีในข้าวสี ซึ่งมีค่าลดลงระหว่างการหุง ขณะที่การหุงทำให้ปริมาณวิตามินอีและปริมาณเบต้าแคโรทีนลดลงเพียงเล็กน้อย (เพ็ญพรรณ จันทร์พรหม 2550) ส่วนรงควัตถุสีดำหรือสีแดงที่พบในข้าวมีหน้าที่ในการต่อต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ซึ่งรงควัตถุเหล่านี้ถูกจัดอยู่ในรงควัตถุประเภทฟลาโวนอยด์ โดยเฉพาะกลุ่มแอนโธไซยานิน โดยแอนโธไซยานินในข้าวแดงและข้าวเหนียวดำจัดอยู่ในกลุ่มของ cyaniding-3-O-beta-D-glucoside (Cy 3-Glc) และมีวิจัยในประเทศอเมริกาพบว่าข้าวและธัญญพืชที่มีรงควัตถุสีดำหรือสีแดงมีกิจกรรมของการต่อต้านอนุมูลอิสระสูงใกล้เคียงกับผลบลูเบอรี่ ซึ่งผลไม้ในตระกูลเบอรี่ได้ชื่อว่าเป็นแห่งที่ดีของสารต่อต้านอนุมูลอิสระ (วาริช ศรีละออง 2549)