บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัตถุดิบ

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตข้าวกล้องงอก หุงสุกไว คือ ข้าวกล้องหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3 พบว่าข้าวกล้องวัตถุดิบมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 79.13-83.01 มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 6.58-10.74 มีไขมันร้อยละ 2.11-2.73 มีความชื้นร้อยละ 10.27-13.44 มีปริมาณเถ้าร้อยละ 1.06-1.29 และมีปริมาณอะไมโลส ร้อยละ 13.45-14.31 ดังตาราง 6 ซึ่งพบว่ามีสูงกว่าในข้าวกล้องทั่วไปที่พบปริมาณโปรตีนร้อยละ 7.1-8.3 และไขมันร้อยละ 1.6-2.8 (Juliano, 1993 อ้างโดยอรอนงค์, 2550) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยหลายชนิด เช่น ฤดูกาลปลูก สภาพภูมิอากาศ สภาพภูมิประเทศ การปักดำ และการบำรุงดูแลรักษาต้นข้าว อีกทั้งยังรวมไปถึงปัจจัยทางกายภาพของเมล็ดข้าวเองเช่น ข้าวกล้องที่มีสีนั้นมีเยื่อหุ้มเมล็ดที่มีไขมันสะสมอยู่ และไขมันในส่วนของจมูกข้าวหรือคัพภะ ที่เป็นสาเหตุให้มีการตรวจพบว่ามีไขมันอยู่ในเมล็ดข้าวกล้องที่มีสีเป็นจำนวนมาก (งามชื่น, 2546)

ตาราง 6 องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของข้าวกล้องหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3

องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี	พันธุ์ข้าว	
	ข้าวกล้องหอมดำสุโขทัย 2	ข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3
ความชื้น (ร้อยละ)	12.67 ± 1.05	12.12 ± 0.35
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	79.13 ± 0.00	83.01 ± 0.01
ไขมัน (ร้อยละ)	2.73 ± 0.07	2.11 ± 0.05
โปรตีน (ร้อยละ)	6.58 ± 0.18	10.74 ± 0.00
เถ้า (ร้อยละ)	1.29 ± 0.01	1.06 ± 0.01
อะมิโลส (ร้อยละ)	13.45 ± 0.16	14.31 ± 0.03

หมายเหตุ ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของข้าวกล้องวัตถุดิบนั้นได้ทำการวัดค่าสีของเมล็ดข้าว ที่ประกอบด้วยค่า L* a* และ b* โดย L* หมายถึง ค่าความสว่างซึ่งจะอยู่ในช่วง 0-100 โดยที่ 0 คือ สีดำ (สว่างน้อย) และ 100 คือ สีขาว (สว่างมาก) ค่า (+) a* หมายถึงค่าความเป็นสีแดง ค่า (-) a* หมายถึง ค่าความเป็นสีเขียว และส่วนค่า (+) b* หมายถึง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่า (-) b* หมายถึง ค่าความเป็นสีน้ำเงิน

และจากการวัดค่าสีของเมล็ดข้าววัตถุดิบพบว่า เมล็ดข้าวกล้องสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย2 นั้นมีค่าสี L* a* และ b* เท่ากับ 19.04, 6.28, 2.17 และข้าวพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 นั้นมีค่าสี L* a* และ b* เท่ากับ 28.74, 11.49, 10.52 ตามลำดับแสดงดังตาราง 7 จากค่าสีที่วัดได้พบว่าเมล็ดข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์มีค่าความสว่างน้อย หรือมีค่าความเป็นสีดำมาก เนื่องมาจากเยื่อหุ้มเมล็ดที่มีสีม่วงดำ และสีแดง ตามลำดับ โดยค่าสีของเมล็ดข้าวนั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณของสารประกอบโพลีฟีนอลชนิด แอนโธไซยานินบนเยื่อหุ้มเมล็ดโดย Singha et al. (1991) กล่าวว่าเมล็ดข้าวที่มีสีเข้มและมีค่าสีเข้าใกล้ศูนย์ (0) นั้นมีแอนโธไซยานินเป็นองค์ประกอบ และมีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านออกซิเดชันอีกด้วย (Pasko et al. 2009) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Lancaster and Lister (1997) ที่ทำการศึกษารงควัตถุบนเปลือกหรือเยื่อหุ้มชั้นนอกของผลไม้ที่มีสีหลายชนิดพบว่าองุ่นดำมีค่าความสว่าง L* น้อยและมีปริมาณของแอนโธไซยานินสูงกว่าในกว่าองุ่นเขียว อีกทั้งแอนโธไซยานินยังมีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย (Shahidi and Naczk, 2003) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang and Lin (2000) ซึ่งค้นพบว่าราสเบอร์รี่ดำ และแบล็คเบอร์รี่มีแอนโธไซยานินในประมาณสูงเช่นเดียวกัน

ตาราง 7 ค่าสีของข้าวกล้องหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3

พันธุ์ข้าว	ค่าสี		
	L*	a*	b*
ข้าวกล้องหอมดำสุโขทัย 2	19.04±0.37	6.28± 0.02	2.17± 0.02
ข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3	28.74± 0.17	11.49± 0.13	10.52± 0.09

หมายเหตุ ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีซึ่งได้แก่ สมบัติการต้านออกซิเดชัน (ด้วยวิธี $ABTS^{\cdot+}$ และ FRAP) ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และปริมาณไฟเตทของตัวอย่างเมล็ดข้าว

กล้องสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 (ตาราง 8) พบว่าในตัวอย่างแห้งปริมาณ 100 กรัมนั้นมีสมบัติการต้านออกซิเดชันเทียบเท่ากับโทรลอกซ์ 65.74 และ 75.57 มิลลิกรัมตามลำดับ และมีค่าเทียบเท่ากับเฟอร์รัสซัลเฟต 34.46 และ 112.16 มิลลิกรัมตามลำดับซึ่งจากข้อมูลที่ได้พบว่าข้าวกล้องทั้ง 2 สายพันธุ์นั้นมีสมบัติการต้านออกซิเดชันสูง เมื่อเทียบกับข้าวกล้อง หรือข้าวสารขาวโดยทั่วๆ ไป (Ryu et al., 1998) โดยไมตรี และ ศิริวรรณ (2547) กล่าวว่าสารประกอบในกลุ่มแอนโธไซยานินที่อยู่ในเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์มีประสิทธิภาพในการเป็นสารต้านออกซิเดชันอีกทั้งสารประกอบอื่นๆ เช่น วิตามิน ซี ที่อยู่ในเมล็ดนั้นก็มีประสิทธิภาพในการเป็นสารต้านออกซิเดชันเช่นเดียวกัน (Frias et al., 2005) ซึ่งจากปริมาณของสารต้านออกซิเดชันที่ตรวจพบนั้นยังสามารถกล่าวได้ว่าข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์นั้นจัดอยู่ในกลุ่มของข้าวกล้องที่มีประสิทธิภาพของการเป็นสารต้านออกซิเดชันในระดับสูงอีกด้วย (Suttajit et al., 2006)

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลในข้าวกล้องวัตถุดิบทั้ง 2 สายพันธุ์พบว่าในตัวอย่างแห้งปริมาณ 100 กรัมมีปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลเทียบเท่ากรดแกลลิค 182.34 และ 240.12 มิลลิกรัม ตามลำดับ เนื่องจากเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวนั้นมีรงควัตถุหรือแอนโธไซยานินที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารฟลาโวนอยด์ที่พบได้ในดอกไม้ ผักและผลไม้ (Bravo, 1998 อ้างโดย วิวัฒน์, 2545) เนื่องจากเยื่อหุ้มเมล็ดของข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์นั้นประกอบไปด้วยรงควัตถุที่ทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดมีสีเข้มซึ่งประกอบไปด้วยสารกลุ่มแอนโธไซยานินเป็นหลัก (Zhang et al., 2006) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Goffman and Bergman (2002) ที่กล่าวว่าเมล็ดข้าวสายพันธุ์ที่มีสีบริเวณเยื่อหุ้มโดยเฉพาะสีแดงและสีม่วงนั้นมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมากกว่าเมล็ดข้าวที่มีเยื่อหุ้มเป็นสีขาวถึง 20 เท่า

จากการวิเคราะห์ปริมาณไฟเตทในข้าวกล้องวัตถุดิบพบว่า ในตัวอย่างแห้ง 100 กรัม มีปริมาณไฟเตทคิดเทียบกรดไฟติก 1,780.64 และ 1,021.97 มิลลิกรัม ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นไฟเตทที่พบในปริมาณสูง (พนารัตน์, 2542) ซึ่งจากงานวิจัยของ Greiner and Konietzny (2006) พบว่าสารประกอบไฟเตทหรือฟอสฟอรัสนั้นจะถูกสะสมอยู่ในเมล็ดของพืชผักโดยทั่วไป และพบการสะสมมากในเมล็ดธัญพืช เช่นเมล็ดข้าว โดย Erdman and Forbes (1977) กล่าวว่า ไฟเตทจะส่งผลต่อกระบวนการดูดซึมเกลือแร่จากอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากไฟเตทที่ตรวจพบนั้นมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 1 ของน้ำหนักอาหารที่เราบริโภคเข้าไป อีกทั้งยังพบว่าส่งผลต่อการดูดซึมสารสำคัญอื่นๆ เช่น เกลือแร่ (Erdman and Forbes, 1977 อ้างโดยนัยนา และคณะ, 2533) และโปรตีน โดยไฟเตทจะรวมตัวกับโปรตีนกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโมเลกุลใหญ่ และทำให้ร่างกายไม่สามารถดึงเอาโปรตีนไปใช้ได้ (Rham and Jost, 1979)

ตาราง 8 สมบัติการต้านออกซิเดชันปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องวัตถุดิบสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และหอมแดงสุโขทัย 3

วิธีวิเคราะห์	ข้าวกล้องหอมดำ สุโขทัย 2	ข้าวกล้องหอมแดง สุโขทัย 3
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี $ABTS^{\cdot+}$) (มิลลิกรัมสมมูลโทรลอกซ์ต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	65.74 ± 3.02	75.57 ± 2.81
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี FRAP) (มิลลิกรัมสมมูลเฟอร์รัสซัลเฟตต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	34.46 ± 2.77	112.16 ± 7.36
ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิคต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	182.34 ± 7.50	240.17 ± 1.78
ปริมาณไฟเตท (มิลลิกรัมกรดไฟติกต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	1,780± 106	1,021± 88

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

การศึกษาเวลาการแช่และวิธีการให้น้ำที่มีต่อปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องวัตถุดิบ

การศึกษาอิทธิพลของเวลาการแช่และวิธีการให้น้ำที่มีต่อปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องวัตถุดิบ ได้แก่ ข้าวกล้องหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3 โดยเมล็ดข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์จะถูกนำมาล้างด้วยน้ำสะอาดสะเด็ดน้ำบนกระชอนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นแบ่งเป็นส่วนๆ เพื่อศึกษาการงอกของข้าวใน 2 วิธีการได้แก่วิธีการที่ 1 นำเมล็ดข้าวกล้องวัตถุดิบที่สะเด็ดน้ำแล้วมาแช่ในน้ำสะอาดด้วยอัตราส่วนเมล็ดข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2 โดยแช่ในภาชนะพลาสติกที่มีฝาปิดสนิท จากนั้นตัวอย่างเมล็ดข้าวจะถูกสุ่มเก็บทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมงเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าว และสังเกตการงอกของเมล็ดข้าว วิธีการที่ 2 นำเมล็ดข้าวที่ล้างน้ำสะอาดและสะเด็ดน้ำแล้วมาใส่ในภาชนะที่มีลักษณะเป็นตะแกรงไม่อุ้มน้ำ วางซ้อนในกล่องพลาสติกที่มีฝาปิดสนิท ทำการฉีดพรมน้ำปริมาณ 15-20 มิลลิลิตรลงบนเมล็ดข้าวทุกๆ 15 นาทีด้วยกระบอกฉีด เป็นเวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง โดยจะมีการรินน้ำส่วนเกินที่อยู่ด้านล่างของภาชนะออกทุกชั่วโมง เพื่อไม่ให้เมล็ดข้าวแช่อยู่ในน้ำ จากนั้นตัวอย่างเมล็ดข้าวจะถูกสุ่มเก็บทุกๆ 1 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าว และสังเกตการงอกของเมล็ดข้าวกล้องโดยการทดลองทั้งหมดจะถูกควบคุมให้อยู่ภายใต้อุณหภูมิห้อง หรือประมาณ 28-30 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาวิธีการงอกทั้ง 2 วิธี พบว่าเมล็ดข้าวกล้องที่ถูกสุ่มเก็บจากวิธีการที่ 1 และ 2 นั้นมีปริมาณความชื้นในเมล็ดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5-7 ชั่วโมงแรกซึ่งทั้งสองวิธีส่งผลให้เมล็ดข้าวมีปริมาณความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 35-40 จากนั้นปริมาณความชื้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนค่อนข้างคงที่เมล็ดข้าวกล้องวัดถุดิบมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ14-15 และเมื่อได้รับความชื้นทำให้เมล็ดข้าวสามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมากในช่วงแรกโมเลกุลของน้ำถูกดูดซับเข้าในเมล็ดเพื่อใช้ในการเริ่มต้นกลไกต่างๆ ภายในเมล็ด รวมถึงกระบวนการงอกของเมล็ดข้าว (Bradford, 1986) ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าเมล็ดข้าวกล้องในวิธีการที่ 2 นั้นสามารถเกิดกระบวนการงอกได้ในช่วง 8-10 ชั่วโมงแรกของการทดลอง เนื่องจากเมล็ดข้าวโดยทั่วไปสามารถเกิดกระบวนการงอกของรากได้หากได้รับความชื้นอย่างพอเพียงที่ประมาณร้อยละ 35 ขึ้นไป (Komatsuzaki et al., 2007) สำหรับวิธีการที่ 1 พบว่าเมล็ดข้าวไม่สามารถเกิดกระบวนการงอกของรากได้อย่างสมบูรณ์ อีกทั้งเมล็ดข้าวและน้ำที่ใช้ในการแช่นั้นมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยว และน้ำที่แช่มีลักษณะขุ่น โดย Komatsuzaki et al. (2007) กล่าวว่าการแช่เมล็ดข้าวในน้ำเป็นเวลานานๆ ร่วมกับสภาวะไร้อากาศ จะส่งผลให้แบคทีเรียจำพวก Lactic acid bacteria เจริญได้ดีเนื่องจากได้อาหารจากโมเลกุลของแป้งข้าวที่ละลายปนออกมากับน้ำ ทำให้เกิดการสร้างกรดแลคติค ที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นเปรี้ยว ซึ่งส่งผลต่อ สี กลิ่น และรสชาติของผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Marcelo etal., 2004) อีกทั้งกรด

แลคติคที่เกิดขึ้นจะไปยับยั้งกลไกต่างๆ ในเมล็ดข้าว จึงทำให้เมล็ดข้าวไม่สามารถเกิดกระบวนการงอกของรากได้ (Komatsuzaki et al., 2007)

การศึกษารูปแบบการผลิตข้าวกล้องงอกที่มีต่อลักษณะทางกายภาพ สมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตทของผลิตภัณฑ์

จากวิธีการเตรียมข้าวกล้องและอัตราการให้น้ำที่เหมาะสม ข้อมูลดังกล่าวถูกมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ฉีดพรมน้ำที่มีการควบคุมปริมาณน้ำ และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง โดยศึกษารูปแบบการผลิตข้าวกล้องงอก 3 วิธี ได้แก่ วิธีการที่ 1 ล้างเมล็ดข้าวกล้องวัตถุดิบด้วยน้ำสะอาดและสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำมาแช่ในน้ำสะอาดด้วยอัตราส่วนเมล็ดข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2 ในภาชนะพลาสติกที่มีฝาปิดสนิท วิธีการที่ 2 ล้างเมล็ดข้าวกล้องวัตถุดิบด้วยน้ำสะอาด และสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำมาแช่ในน้ำสะอาดด้วยอัตราส่วนเมล็ดข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2 ในภาชนะพลาสติกที่มีฝาปิดสนิทเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วรินน้ำภายในภาชนะออกจนหมด จากนั้นถ่ายเมล็ดข้าวลงในภาชนะที่มีลักษณะเป็นตะแกรง เพื่อนำไปสเปรย์น้ำต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเมื่อครบเวลา ได้นำตะแกรงที่บรรจุเมล็ดข้าวมาใส่ในภาชนะที่มีฝาปิดสนิทวิธีการที่ 3 ล้างเมล็ดข้าวกล้องวัตถุดิบด้วยน้ำสะอาด และสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาทีจากนั้นใส่เมล็ดข้าวลงในภาชนะที่มีลักษณะเป็นตะแกรงสเปรย์น้ำให้เมล็ดข้าวเป็นเวลา 7 ชั่วโมง จากนั้นนำตะแกรงที่บรรจุเมล็ดข้าวมาใส่ในภาชนะที่มีฝาปิดสนิทการทดลองทั้งหมดจะถูกควบคุมที่ 30±0.5-35±0.5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 ชั่วโมงและทำการสุ่มเก็บตัวอย่างเมล็ดข้าวที่เวลา 10, 15, 20, 25 และ 30 ชั่วโมง

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิ ระยะเวลาการบ่ม และวิธีการงอกทั้ง 3 วิธีนั้นส่งผลต่อปริมาณสมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และไฟเตท โดยพบว่าตัวอย่างเมล็ดข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ผ่านกระบวนการงอกโดยใช้วิธีการที่ 3 มีปริมาณสารต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้นสูงสุด ในช่วงเวลาการบ่ม 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 35±0.5 องศาเซลเซียสและมีการลดลงของไฟเตทมากที่สุดดังตาราง 9 และตาราง 10 ตามลำดับ

ตาราง 9 ปริมาณไฟเตท ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และสมบัติการต้านออกซิเดชันของข้าววัตถุดิบสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 ที่ผ่านกระบวนการทำงอกทั้ง 3 วิธีการภายใต้อุณหภูมิ 30±0.5 และ 35±0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	วิธีการ	เวลา (ชั่วโมง)	สมบัติการต้านออกซิเดชัน		สารประกอบโพลีฟีนอล	สารประกอบไฟเตท
			ABTS (mg TEAC/100 g DM)	FRAP (mg FeSO4/100 g DM)	(mg GAE/100 g DM)	(mg KDP /100 g DM)
30	1	10	29.16 ± 10.03^{abc}	31.09 ± 7.91^{a}	118.89 ± 18.80^{hi}	1,393 ± 448^{ij}
		15	61.95 ± 5.92^{fg}	49.00 ± 10.03^{d}	139.77 ± 10.30^{j}	1,313 ± 600^{ij}
		20	65.14 ± 8.70^{gh}	48.46 ± 14.30^{d}	161.61 ± 11.84^{m}	1,258 ± 1,033^{ij}
		25	25.71 ± 11.29^{a}	39.11 ± 13.52^{c}	139.89 ± 5.20^{j}	1,299 ± 1,060^{ij}
		30	30.76 ± 16.25^{abcd}	34.52 ± 10.18^{ab}	111.98 ± 16.66^{fgh}	1,327 ± 1,091^{ij}
	2	10	35.34 ± 11.17^{abcd}	30.91 ± 8.08^{a}	105.63 ± 13.92^{def}	1,321 ± 496^{ij}
		15	62.35 ± 8.52^{fg}	41.83 ± 7.02^{c}	141.21 ± 11.18^{j}	1,273 ± 647^{ij}
		20	72.82 ± 8.34^{h}	50.90 ± 14.51^{de}	166.28 ± 8.74^{m}	1,163 ± 1,081^{hij}
		25	36.34 ± 13.42^{cde}	40.98 ± 11.85^{c}	141.15 ± 5.86^{j}	1,236 ± 1,064^{ij}
		30	33.74 ± 17.00^{bcde}	34.05 ± 10.18^{ab}	115.36 ± 9.30^{gh}	1,262 ± 1,099^{ij}
	3	10	39.78 ± 14.64^{e}	40.58 ± 4.43^{c}	127.13 ± 9.32^{ij}	920 ± 103^{fgh}
		15	64.62 ± 10.02^{fgh}	50.31 ± 4.95^{de}	128.50 ± 17.20^{j}	840 ± 228^{efg}
		20	86.41 ± 5.62^{i}	64.22 ± 15.04^{f}	161.05 ± 33.84^{m}	405 ± 448^{bcd}
		25	39.63 ± 13.98^{e}	55.82 ± 6.85	129.78 ± 25.60^{jk}	419 ± 336^{bcd}
		30	37.34 ± 14.60^{de}	38.12 ± 9.13^{bc}	100.85 ± 18.03^{de}	566 ± 250^{cde}
35	1	10	57.69 ± 9.32^{f}	54.46 ± 5.08^{efgh}	84.33 ± 11.67^{a}	620 ± 132^{cdef}
		15	62.39 ± 6.10^{fg}	56.68 ± 5.42^{ghi}	107.63 ± 12.53^{efg}	1,050 ± 612^{ghi}
		20	66.61 ± 4.56^{ghi}	66.40 ± 3.25^{ik}	137.49 ± 5.83^{kl}	395 ± 700^{bc}
		25	33.96 ± 22.32^{bcde}	58.77 ± 5.02^{hi}	100.66 ± 17.47^{de}	719 ± 265^{def}
		30	24.95 ± 22.58^{a}	49.29 ± 7.82^{d}	80.87 ± 17.00^{a}	791 ± 265^{efg}
	2	10	63.50 ± 6.67^{fg}	52.83 ± 6.26^{defg}	88.59 ± 10.20^{ab}	590 ± 137^{cde}
		15	64.84 ± 5.98^{gh}	56.75 ± 6.51^{ghi}	101.54 ± 12.92^{de}	908 ± 679^{fgh}
		20	74.28 ± 5.05^{h}	72.43 ± 4.05^{l}	137.02 ± 6.13^{kl}	231 ± 100^{ab}
		25	36.32 ± 26.49^{cde}	59.73 ± 2.97^{i}	97.31 ± 25.00^{bcd}	527 ± 305^{bcde}
		30	28.38 ± 25.35ab	48.71 ± 6.10^{d}	83.84 ± 19.14^{a}	786 ± 390^{efg}
	3	10	71.17 ± 6.08^{ikl}	55.45 ± 4.97^{fghi}	89.42 ± 23.39^{abc}	345 ± 187^{abc}
		15	64.83 ± 9.71^{gh}	69.24 ± 7.22^{kl}	97.67 ± 25.00^{cd}	426 ± 334^{bcd}
		20	93.00 ± 4.09^{l}	84.82 ± 5.33^{m}	124.66 ± 8.74^{ij}	85 ± 62^{a}
		25	91.13 ± 4.10^{kl}	65.42 ± 8.40^{ik}	96.46 ± 30.00^{bcd}	365 ± 291^{abc}
		30	36.07 ± 29.59^{cde}	51.96 ± 4.07^{def}	84.62 ± 34.23^{a}	555 ± 354^{cde}

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

- $^{a-m}$อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันในแต่ละคุณภาพในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

ตาราง 10 ปริมาณไฟเตท ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และสมบัติการต้านออกซิเดชันของข้าววัตถุดิบสายพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 ที่ผ่านกระบวนการทำงอกทั้ง 3 วิธีการภายใต้อุณหภูมิ 30±0.5 และ 35±0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	วิธีการ	เวลา (ชั่วโมง)	สมบัติการต้านออกซิเดชัน		สารประกอบโพลีฟีนอล	สารประกอบ ไฟเตท
			ABTS	FRA		
			(mg TEAC/100 g DM)	(mg FeSO4/100 g DM)	(mg GAE/100 g DM)	(mg KDP /100 g DM)
30	1	10	36.42 ± 10.62^{de}	45.35 ± 7.59^{bcd}	133.42 ± 27.27^{a}	819 ± 148^{p}
		15	43.64 ± 10.20^{gh}	48.97 ± 7.70^{def}	162.81 ± 16.62^{efg}	738 ± 132.3^{o}
		20	50.05 ± 7.26^{ijk}	57.51 ± 7.07^{hij}	189.33 ± 8.29^{l}	423 ± 152.9^{fgh}
		25	41.89 ± 5.32^{fgh}	48.90 ± 3.61^{def}	175.35 ± 4.76^{ijk}	518 ± 101^{ij}
		30	23.93 ± 3.40^{a}	44.16 ± 5.34^{abc}	155.66 ± 8.76^{cde}	491 ± 127^{i}
	2	10	37.30 ± 9.88^{def}	46.40 ± 5.78^{bcde}	137.46 ± 21.15^{ab}	760 ± 144^{o}
		15	45.44 ± 9.88^{gh}	49.16 ± 8.24^{def}	167.68 ± 13.37^{gh}	619 ± 94^{lm}
		20	50.60 ± 8.26^{ijk}	56.94 ± 7.95^{hij}	190.42 ± 7.54^{l}	374 ± 136^{ef}
		25	45.29 ± 7.31^{gh}	51.06 ± 6.56^{ijg}	180.12 ± 4.98^{k}	483 ± 116^{hi}
		30	27.55 ± 5.19^{ab}	45.88 ± 3.69^{bcde}	167.80 ± 5.39^{gh}	485 ± 109^{hi}
	3	10	41.12 ± 7.81^{efg}	48.22 ± 4.77^{cdef}	133.88 ± 24.30^{a}	524 ± 108^{ijk}
		15	49.07 ± 13.10^{ij}	54.41 ± 9.65^{gh}	159.82 ± 24.38^{def}	411 ± 110^{fg}
		20	54.70 ± 10.14^{k}	68.16 ± 6.86^{k}	189.61 ± 18.56^{l}	82 ± 70^{a}
		25	48.74 ± 7.49^{ij}	57.84 ± 4.14^{hij}	173.81 ± 15.71^{ijk}	310 ± 123^{d}
		30	31.68 ± 5.98^{bc}	50.63 ± 2.90^{ijg}	159.98 ± 7.54^{def}	366 ± 109^{def}
35	1	10	61.14 ± 6.42^{l}	40.84 ± 7.40^{a}	141.83 ± 10.48^{b}	750 ± 210^{o}
		15	73.72 ± 5.76^{n}	48.91 ± 9.26^{def}	158.28 ± 13.36^{cdef}	680 ± 101^{n}
		20	82.18 ± 7.53^{pq}	65.45 ± 9.48^{k}	172.95 ± 9.60^{ijk}	231 ± 151^{c}
		25	45.40 ± 12.93^{gh}	59.15 ± 11.20^{ij}	168.52 ± 9.91^{gh}	487 ± 108^{hi}
		30	25.27 ± 17.01^{a}	47.55 ± 9.55^{cdef}	137.30 ± 19.25^{ab}	610 ± 113^{km}
	2	10	62.56 ± 8.39^{l}	43.15 ± 6.91^{ab}	142.39 ± 10.10^{b}	647 ± 124^{mn}
		15	75.03 ± 9.15^{mn}	51.20 ± 9.78^{ijg}	157.28 ± 14.25^{cdef}	581 ± 75^{kl}
		20	85.78 ± 5.65^{q}	65.88 ± 6.46^{k}	169.64 ± 11.16^{ghi}	180 ± 156^{bc}
		25	46.57 ± 12.77^{hij}	56.71 ± 11.07^{hij}	163.54 ± 6.40^{ijg}	476 ± 82^{hi}
		30	24.32 ± 17.35^{a}	49.67 ± 8.96^{ef}	141.73 ± 18.58^{b}	569 ± 84^{jkl}
	3	10	68.82 ± 8.39^{m}	46.40 ± 6.24^{bcde}	152.11 ± 3.73^{c}	341 ± 195de
		15	81.25 ± 7.83^{pq}	57.73 ± 8.16^{hij}	176.37 ± 7.23^{ijk}	158 ± 138^{b}
		20	91.72 ± 4.69^{r}	73.76 ± 5.21^{l}	188.46 ± 21.47^{l}	41 ± 44^{a}
		25	78.90 ± 6.42^{op}	61.00 ± 10.51^{ij}	178.03 ± 11.24^{k}	204 ± 89^{bc}
		30	32.93 ± 16.6^{cd}	49.91 ± 7.53^{ef}	153.82 ± 19.37^{cd}	468 ± 86^{ghi}

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

- $^{a-r}$อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันในแต่ละคุณภาพในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

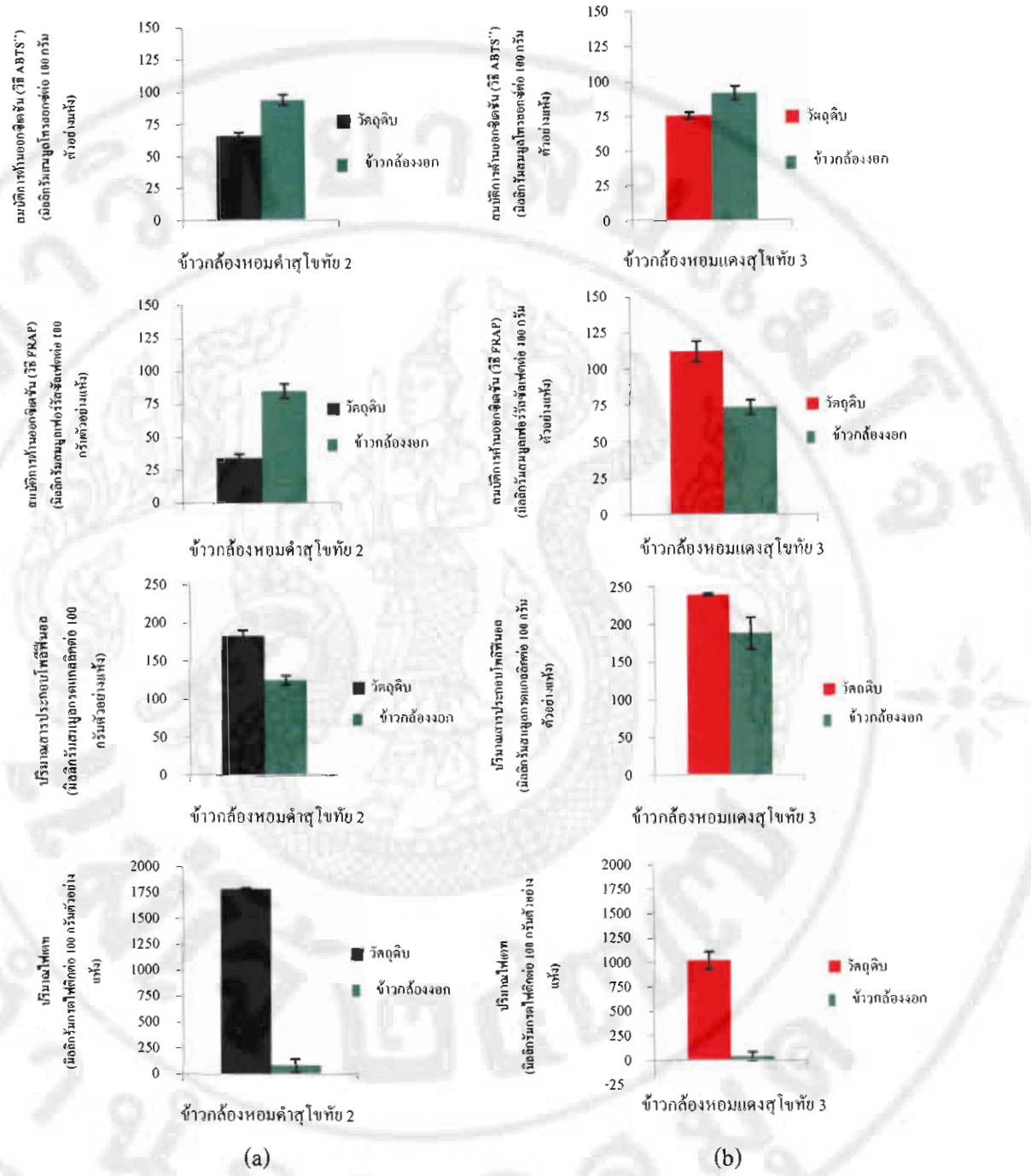
จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิสูงที่ 35 องศาเซลเซียสนั้นส่งผลให้ตัวอย่างเมล็ดข้าวมีความชื้นมากกว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดย สุธยา (2549) กล่าวว่าเมื่อชั้นเส้นใยเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะเกิดการขยายตัวของเส้นใยและเกิดช่องว่าง ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถซึมผ่านเข้าสู่เนื้อเมล็ดข้าวได้ง่ายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Marcelo et al. (2004) ที่กล่าวว่าอัตราการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสภาวะเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระสารประกอบโพลีฟีนอลบางส่วนของเมล็ดข้าวลดลง เนื่องจากแอนโธไซยานินที่เป็นสารประกอบโพลีฟีนอล และมีประสิทธิภาพเป็นสารต้านอนุมูลอิสระนั้นละลายได้ในน้ำที่สัมผัสเมล็ดข้าวซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Laleh et al. (2006) ที่พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลเซชัน (hydrolyzation) ของ 3-glycoside ทำให้ flavyliumcation เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโธไซยานินไปเป็น chalcone ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความคงตัวน้อย และสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kirca et al. (2007) ที่พบการสลายตัวของแอนโธไซยานินในแครอทม่วงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

ในส่วนของวิธีการที่ใช้ในกระบวนการงอกพบว่าวิธีการที่ 2 และ 3 หรือการแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการสเปรย์น้ำ และการสเปรย์น้ำเพียงอย่างเดียว ยังคงมีสารประกอบต่างๆทั้งสารต้านอนุมูลอิสระ และสารประกอบโพลีฟีนอลอยู่ และมีปริมาณไฟเตทลดลงมากกว่าวิธีการที่ 1 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการที่ 1 นั้นเป็นการนำเมล็ดข้าวไปแช่ในน้ำซึ่งทำให้สารประกอบต่างๆ ที่มีคุณสมบัติในการละลายในน้ำ รวมถึงโมเลกุลของแป้งภายในเนื้อเมล็ดถูกชะล้างออกจากเยื่อหุ้มเมล็ด (Luh and Mikus, 1980) ซึ่งโมเลกุลแป้งที่ถูกละลายออกมาจากภายในเนื้อเมล็ดข้าวนั้นจะถูกเชื้อแบคทีเรียจำพวก lactic acid bacteria นำไปใช้เป็นอาหารเพื่อการเจริญและเกิดการผลิตกรดแลคติคจากกระบวนการหมักขึ้นกรดแลคติคมีคุณสมบัติในการยับยั้งและทำลายสารตั้งต้นของสารสำคัญต่างๆ เช่นสาร โทโคเฟอรอล และวิตามินซีที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันภายในเมล็ด (Frias et al., 2005) ดังนั้นตัวอย่างเมล็ดข้าวที่ได้จากวิธีการที่ 1 จึงพบสารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบโพลีฟีนอลในปริมาณน้อยอีกทั้งยังพบว่าวิธีการที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นการสเปรย์น้ำลงสู่เมล็ดข้าวนั้น ส่งผลให้เกิดการชะล้างสารประกอบไฟเตทที่มีคุณสมบัติที่สามารถละลายในน้ำได้ดีออกจากเมล็ดข้าว (Liang et al., 2008) อีกทั้งโมเลกุลของน้ำยังเข้าไปกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ไฟเตส (phytase) และเกิดการกระบวนการย่อยสารประกอบไฟเตทภายในเมล็ด (Liang et al., 2009) ดังนั้นจึงทำให้ตัวอย่างเมล็ดข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการงอกโดยวิธีการที่ 2 และ 3 มีสารประกอบไฟเตทในเมล็ดข้าวที่ลดลง เมื่อเทียบกับข้าวกล้องวัตถุดิบ ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vijayakumari et al. (1998) ที่พบว่าเอนไซม์ไฟเตสสามารถลดปริมาณสารประกอบ

ไฟเตทในพืชตระกูลถั่ว และในเมล็ดลูกเดือยที่ผ่านการแช่น้ำได้และส่งผลให้ปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในลูกเดือยเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 14-20 (Lestienne et al., 2005a)

จากการศึกษาปัจจัยด้านเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการงอกพบว่า ตัวอย่างเมล็ดข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์มีปริมาณสารประกอบต่างๆเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และเพิ่มมากขึ้นสูงสุดที่ชั่วโมงที่ 20 และลดลงเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 25 และ 30 ของกระบวนการและพบว่าในตัวอย่างเมล็ดข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และหอมแดงสุโขทัย 3 ปริมาณ 100 กรัม (dry basis, db.) ที่ผ่านกระบวนการงอกโดยใช้วิธีการที่ 3 เป็นเวลา 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 35±0.5 องศาเซลเซียสมีสมบัติการต้านออกซิเดชันเทียบเท่าโทรลอกซ์ 93.99 และ 91.72 มิลลิกรัมสมบัติการต้านออกซิเดชันด้วยเทียบเท่ากับเฟอร์รัสซัลเฟต 84.83 และ 73.76 มิลลิกรัมสมมูลมีปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลเทียบเท่ากับ 124.63 และ 188.46 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิคและมีปริมาณไฟเตทในรูปกรดไฟติก 85.6 และ 41.4 มิลลิกรัมตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อโมเลกุลของน้ำซึมผ่านเข้าสู่ภายในเมล็ดข้าว จะเกิดการกระตุ้นสารประกอบภายในเมล็ด ให้เกิดกิจกรรมทางชีวเคมีหรือกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเมล็ดขึ้นเพื่อสร้างสารสำคัญที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและส่งผลให้เกิดกระบวนการงอก (Augustin and Klein, 1989, Ruiz and Bressani, 1990) โดย Champagne et al. (2004) กล่าวว่าเมล็ดข้าวที่เกิดกระบวนการงอกนั้นจะมีปริมาณสารประกอบสำคัญต่างๆเช่น สารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบโพลีฟีนอล วิตามิน และ แร่ธาตุ ต่างๆ เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถพบได้ทั้งในเมล็ดข้าวสาลีงอก (Yang et al., 2001) และเมล็ดข้าวบาร์เลย์ (Rimsten et al., 2003) ซึ่งจากการศึกษาของ Kayahara (2004) พบว่าโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ภายในเมล็ดข้าวกล้อง จะกระตุ้นให้เกิดการย่อยสลายโมเลกุลของโปรตีนโดยเอนไซม์ โปรติเอส (protease) ได้กรดอะมิโนอิสระ (free Amino acid) เช่นซิสเทอิน (cysteine) และเฟอรูลิค (ferulic) อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการสังเคราะห์สารสำคัญ เช่น วิตามินอีและ วิตามินซีที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันขึ้นภายในเมล็ด (Frias et al. 2005) และเมื่อกระบวนการงอกถึงจุดหนึ่ง ต้นอ่อนภายในคัพภะจะทำการดึงเอาสารอาหารเหล่านั้นไปใช้เพื่อช่วยในการเจริญเติบโต จึงทำให้สารประกอบเหล่านั้นลดปริมาณลง (Kayahara, 2004) ในส่วนของปริมาณไฟเตทในตัวอย่างเมล็ดที่เกิดกระบวนการงอกที่อุณหภูมิ 35±0.5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมงนั้น Lestienne et al. (2005b) กล่าวว่าเมื่อเมล็ดข้าวถูกกระตุ้นให้เกิดการงอกจะส่งผลให้เกิดการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์หลายชนิดเช่น เอนไซม์ ไฟเตส ที่มีประสิทธิภาพในการช่วยสลายสารประกอบไฟเตทในเมล็ดข้าวให้ลดปริมาณลงได้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sandberg et al. (1989) ที่กล่าวว่าเอนไซม์ ไฟเตสที่เกิดขึ้นนั้นจะทำการย่อยสลายสารประกอบไฟเตท หรือ myo-inositol 1, 2, 3, 4, 5, 6-hexakisphosphate (InsP6) ให้อยู่ในรูปอื่นเช่น inositol pentaphosphate (IP5), inositol tetraphosphate (IP4), inositoltriphosphate

(IP3) และ inositol di- หรือ monophosphates ซึ่งไม่สามารถทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุ หรือสารอาหารได้ เนื่องจากมีเพียงสารประกอบไฟเตทที่อยู่ในรูป IP6 และ IP5 เท่านั้นที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบการดูดซึมแร่ธาตุและสารอาหารของร่างกาย โดยพบว่าในตัวอย่างเมล็ดข้าวกล้องงอก 100 กรัม (d.b) มีปริมาณไฟเตทเท่ากับ 85.57 และ 41.87 มิลลิกรัมในรูปกรดไฟติก ตามลำดับซึ่งถือว่ามีปริมาณลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับข้าวกล้องวัตถุดิบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liang et al. (2008) ที่กล่าวว่าสารประกอบไฟเตทที่พบในเมล็ดข้าวที่ผ่านกระบวนการงอกแล้วนั้น น้อยกว่าในเมล็ดข้าวกล้องวัตถุดิบ ซึ่งขึ้นอยู่ปัจจัยหลายชนิดเช่น การทำงานของเอนไซม์ การแช่ และการแพร่ของน้ำ เป็นต้น (Henderson and Ankrah, 1985) จากการวิเคราะห์ข้าวกล้องหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3 ที่ผ่านกระบวนการงอกในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ วิธีการที่ 3 การสเปรย์เมล็ดข้าวด้วยน้ำร่วมกับการบ่มเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35±0.5 องศาเซลเซียสส่งผลให้เมล็ดข้าวกล้องงอกมีสมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวกล้องในวิธีการและสภาวะอื่น และมีปริมาณไฟเตทลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องวัตถุดิบ ดังภาพ 7



ภาพ 7 สมบัติการต้านออกซิเดชันปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องวัตถุดิบเปรียบเทียบกับข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการงอกของข้าวกล้องหอมดำสุโขทัย 2 (a) และข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3 (b)

การศึกษากระบวนการผลิตข้าวหุงสุกไวที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพ สมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตท

ตัวอย่างข้าวกล้องงอกหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องงอกหอมแดงสุโขทัย 3 ที่ผ่านกระบวนการงอกโดยใช้วิธีการที่ 3 หรือการสเปรย์เมล็ดข้าวด้วยน้ำเป็นเวลา 7 ชั่วโมงและบ่มให้เกิดการงอกเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35±0.5 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะการงอกที่ดีที่สุดนั้นได้ถูกคัดเลือกเพื่อนำมาศึกษาผลของการให้ความร้อนที่มีต่อคุณภาพข้าวกล้องงอกหุงสุกไว รวมถึงสมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และไฟเตทตามวิธีการผลิตข้าวหุงสุกไวของ ลัสพรรณ (2552) โดยการนำเมล็ดข้าวมาผ่านการให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 103 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 0.5-1.5 นาที ซึ่งผู้วิจัยได้นำสภาวะการให้ความร้อนดังกล่าวมาใช้กับข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และนำมาประยุกต์ใช้กับข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 ด้วยเนื่องจากข้าวกล้องงอกสายพันธุ์ดังกล่าวเป็นข้าวกล้องที่ถูกพัฒนามาจากสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 จนมีเพียงลักษณะทางกายภาพบางประการที่เปลี่ยนแปลงไปจากสายพันธุ์เดิมเช่น สีของเยื่อหุ้มเมล็ด (สมเดช, 2549) ซึ่งผลการทดลองพบว่าตัวอย่างข้าวกล้องงอกหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องงอกหอมแดงสุโขทัย 3 หลังจากการให้ความร้อนที่เวลา 0.5-1.5 นาที มีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 35.57-39.86 (ตาราง 11) ค่าความสว่าง (L*) อยู่ในช่วง 20.29-25.69 ค่าความเป็นสีแดง (a*) อยู่ในช่วง 9.18-11.29 ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) อยู่ในช่วง -0.17-1.59 (ตาราง 12 และ 13)

ตาราง 11 ปริมาณความชื้นหลังการให้ความร้อนของข้าวกล้องงอกหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องงอกหอมแดงสุโขทัย 3 โดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 103 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 0.5-1.5 นาที

เวลา (นาที)	ความชื้น (ร้อยละ)	
	ข้าวกล้องงอกหอมดำสุโขทัย 2	ข้าวกล้องงอกหอมแดงสุโขทัย 3
0.5	35.57 ± 0.26^{a}	36.67 ± 0.99^{a}
1	38.25 ± 0.67^{b}	39.15 ± 0.75^{b}
1.5	39.86 ± 0.92^{c}	39.49 ± 0.58^{b}

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

- $^{a-b}$อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันของความชื้นของข้าวแต่ละสายพันธุ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)
- ^{ns}ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตาราง 12 ค่าสีหลังการให้ความร้อนของข้าวกล้องงอกหอมดำสุโขทัย 2 โดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียส 103 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 0.5-1.5 นาที

เวลา (นาที)	ค่าสี		
	L^{*ns}	a^{*ns}	b^{*ns}
0.5	20.29 ± 0.15	10.86 ± 0.04	1.59 ± 0.01
1	21.02 ± 0.17	9.73 ± 0.19	0.81 ± 0.04
1.5	21.83 ± 0.04	9.18 ± 0.01	1.20 ± 0.18

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

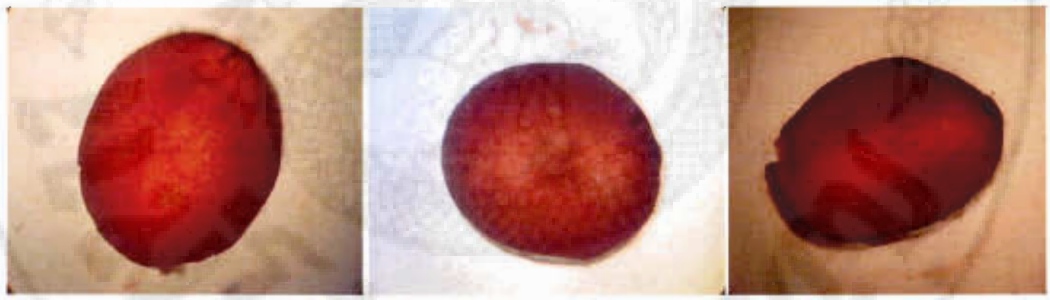
- ^{ns}ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตาราง 13 ค่าสีหลังการให้ความร้อนของข้าวกล้องงอกหอมแดงสุโขทัย 3 โดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียส 103 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 0.5-1.5 นาที

เวลา (นาที)	ค่าสี		
	L^{*ns}	a^{*ns}	b^{*ns}
0.5	25.69 ± 0.11	11.29 ± 0.07	0.48 ± 0.28
1	24.91 ± 0.03	10.38 ± 0.12	0.21 ± 0.17
1.5	25.15 ± 0.01	9.33 ± 0.08	-0.17 ± 0.11

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

- ^{ns}ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)



(a) (b) (c)

ภาพ 8 ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวแสดงการเกิดเจลาทิไนเซชันหลังการให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียส 103 กิโลปาสคาล

หมายเหตุ (a) การเกิดเจลาทิไนเซชันของเมล็ดข้าวหลังการให้ความร้อนเป็นเวลา 0.5 นาที

(b) การเกิดเจลาทิไนเซชันของเมล็ดข้าวหลังการให้ความร้อนเป็นเวลา 1.0 นาที

(c) การเกิดเจลาทิไนเซชันของเมล็ดข้าวหลังการให้ความร้อนเป็นเวลา 1.5 นาที

การศึกษาในขั้นตอนนี้พบว่า เมล็ดข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์สามารถเกิดการเจลาทิไนเซชันได้สมบูรณ์ร้อยละ 100 โดยใช้เวลาเพียง 0.5 นาที ที่ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 103 กิโลปาสคาล (ภาพ 7) และเมื่อวิเคราะห์สมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตท พบว่าในตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกไวสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 จำนวน 100 กรัม (d.b.) เมื่อผ่านกรให้ความร้อนที่ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 103 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 0.5, 1 และ 1.5 นาที พบว่ามีสมบัติการต้านออกซิเดชันเทียบเท่าโทรลอกซ์ 32.64, 28.31 และ 25.25 มิลลิกรัมหรือเทียบเท่าเฟอร์รัสซัลเฟต 33.91, 59.55 และ 55.67 มิลลิกรัม ตามลำดับ มีปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลเทียบเท่ากรดแกลลิค 54.75, 67.65 และ 68.46 มิลลิกรัมและมีปริมาณไฟเตทในรูปกรดไฟติก 35.60, 61.32 และ 61.37 มิลลิกรัมตามลำดับ (ตาราง 14) และสำหรับข้าวกล้องงอกหุงสุกไวสายพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3จำนวน 100 กรัม (d.b.) มีสมบัติการต้านออกซิเดชันเทียบเท่าโทรลอกซ์ 37.10, 22.67 และ 21.58 มิลลิกรัมหรือเทียบเท่าเฟอร์รัสซัลเฟต 31.17, 60.44 และ 58.72 มิลลิกรัมตามลำดับมีปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลเทียบเท่ากรดแกลลิค 102.30, 84.58 และ 84.29 มิลลิกรัมและมีปริมาณไฟเตท 36.80, 43.10 และ 34.56 มิลลิกรัมตามลำดับ (ตาราง 15)

กระบวนการให้ความร้อนในขั้นตอนนี้ส่งผลให้ตัวอย่างข้าวกล้องงอกมีสมบัติการต้านออกซิเดชัน และปริมาณโพลีฟีนอล ลดน้อยลง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ไม่ทนต่อความร้อนสูง (Honke et al., 1999) อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการให้ความร้อนนี้สามารถช่วยให้ปริมาณสารประกอบไฟเตทในเมล็ดข้าวลดลงได้ เนื่องมาจากปัจจัยหลายชนิด โดย Sathe and Venkatachalam (2002) กล่าวว่าความร้อนและความดันสูงมีส่วนที่ช่วยในการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสที่อยู่ภายในเมล็ดให้สามารถย่อยสลายสารประกอบไฟเตทได้มากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Shimelis and Rakshit (2006) ที่กล่าวว่าธัญพืชที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไอน้ำจะมีปริมาณสารประกอบไฟเตทลดลงมากกว่าร้อยละ 50-60 เมื่อเทียบกับธัญพืชวัตถุดิบ รวมถึงเมล็ดพืชที่แช่น้ำ (Reddy et al., 1978) เมล็ดพืชที่มีการงอก (Khalil and Mansour, 1995) เมล็ดพืชที่ผ่านกระบวนการหมัก (Kozlowska et al., 1996) และการหุงต้ม (Marfo et al., 1990) ล้วนส่งผลให้สารประกอบไฟเตทในเมล็ดพืชลดปริมาณลงได้ จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่ากระบวนการให้ความร้อนทั้ง 3 ช่วงเวลาส่งผลให้สมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) อีกทั้งยังพบว่าข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 มีปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลสูง เมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนในช่วงเวลาที่น้อยที่สุด (0.5 นาที) ดังนั้นจึงเลือก

ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการให้ความร้อนในช่วงเวลาที่น้อยที่สุดหรือ 0.5 นาที มาใช้ในการศึกษาในขั้นตอนการทำแห้งต่อไป

ตาราง 14 สมบัติการต้านออกซิเดชันปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 หลังการให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียส 103 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 0.5, 1 และ 1.5 นาที

วิธีวิเคราะห์	เวลา (นาที) ในการให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 103 กิโลปาสคาล		
	0.5	1	1.5
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี $ABTS^{\cdot+}$)^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลโทรลอกซ์ต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	32.64 ± 8.38	28.31 ± 2.72	25.25 ± 2.66
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี FRAP)^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลเฟอร์รัสซัลเฟตต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	33.91 ±10.56	59.55 ± 1.56	55.67 ± 2.27
ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิคต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	54.75 ± 9.01	67.65 ± 3.63	68.46 ± 3.56
ปริมาณไฟเตท^{ns} (มิลลิกรัมกรดไฟติกต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	35.60 ± 0.27	61.32 ± 48.59	61.37 ± 35.11

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

- ^{ns}ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

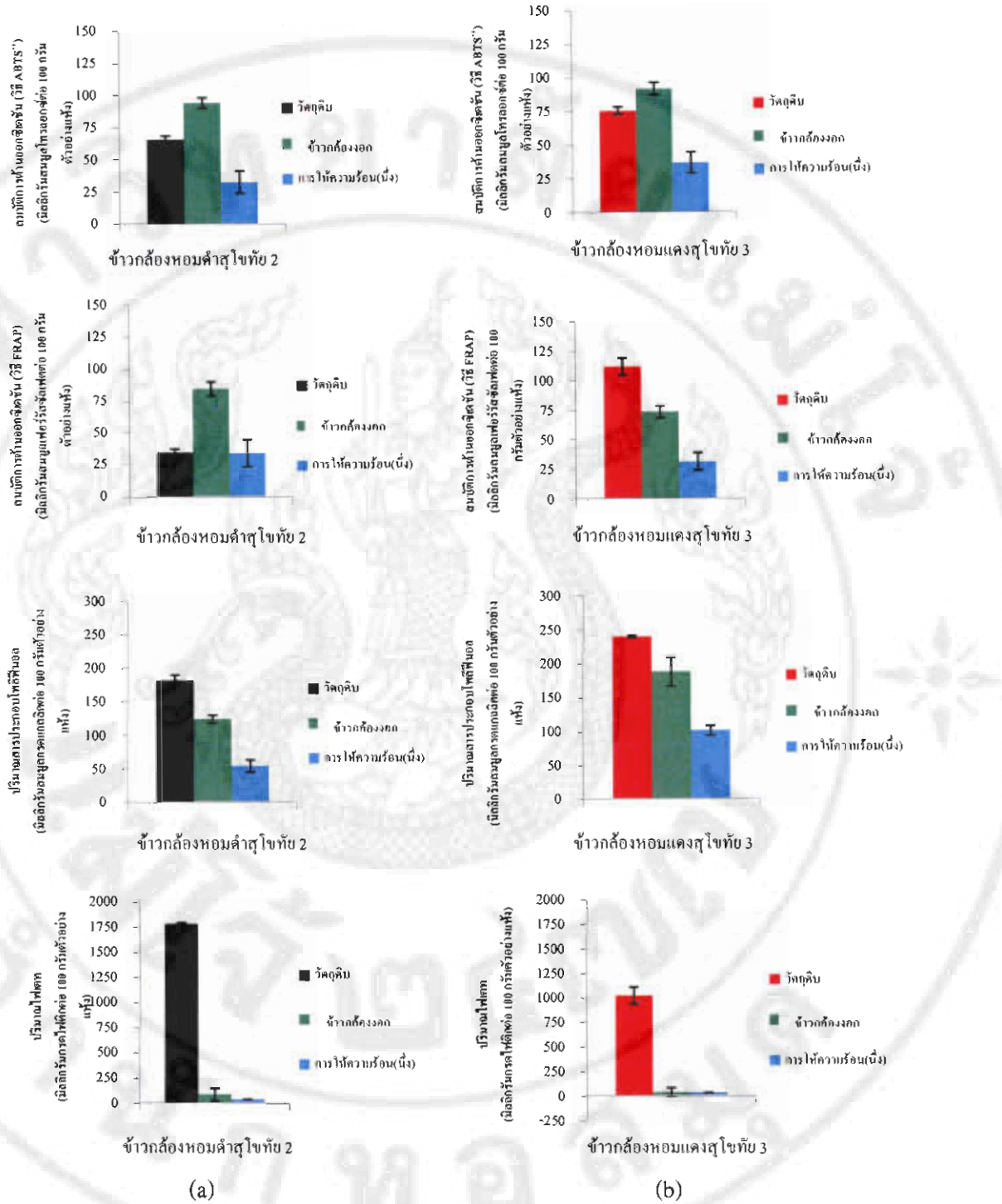
ตาราง 15 สมบัติการต้านออกซิเดชันปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 หลังการให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียส 103 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 0.5, 1 และ 1.5 นาที

วิธีวิเคราะห์	เวลา (นาที) ในการให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 103 กิโลปาสคาล		
	0.5	1	1.5
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี $ABTS^{\cdot+}$)^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลโทรลอกซ์ต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	37.10 ± 7.89	22.67 ± 3.04	21.58 ± 3.02
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี FRAP)^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลเฟอร์รัสซัลเฟตต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	31.17 ± 7.46	60.44 ± 2.46	58.72 ± 1.87
ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิคต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	102.30 ± 7.3^{b}	84.58 ± 3.06^{a}	84.29 ± 2.30^{a}
ปริมาณไฟเตท^{ns} (มิลลิกรัมกรดไฟติกต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	36.80 ± 0.94	43.10 ±37.41	34.56 ± 11.95

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)
- ^{a}อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p\leq0.05$)
- ^{ns}ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ในส่วนของสมบัติการต้านออกซิเดชัน และปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลที่ลดลงในขั้นตอนนี้อาจเนื่องมาจากการสูญเสีย แอนโธไซยานิน ซึ่งเป็นรงควัตถุที่พบในข้าวกล้องทั้ง 2 สายพันธุ์ และการสลายตัวของสารอื่นๆ ในระหว่างกระบวนการงอกของเมล็ด (Luh and Mikus, 1980) และเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kalt (2005) ซึ่งพบว่าวิธีและหลักการแปรรูปอาหารนั้นส่งผลให้ปริมาณของสารต้านออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์อาทิ เช่น พืช ผักต่างๆลดลงเช่นเดียวกับงานวิจัยของ (Marcelo et al., 2004) ที่พบว่ากระบวนการให้

ความร้อนแก่เมล็ดข้าวนั้นส่งผลให้สารสำคัญเช่น สารประกอบฟีนอลิคและกรดอะมิโนลดปริมาณลง ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้าวกล้องงอกหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3 ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนพบว่ามีสมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และปริมาณไฟเตทลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องวัตถุดิบ ดังภาพ 9



ภาพ 9 สมบัติการต้านออกซิเดชันปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเดทของข้าวกล้องวัตถุดิบเปรียบเทียบกับข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการงอกและผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียส 103 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 0.5 นาทีของข้าวกล้องหอมดำสุโขทัย 2 (a) และข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3 (b)

การศึกษาผลของการทำแห้งที่มีต่อคุณภาพข้าวกล้องงอกหุงสุกไวสมบัติการต้านออกซิเดชัน สารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตท

ตัวอย่างข้าวกล้องงอกหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องงอกหอมแดงสุโขทัย 3 ที่ผ่านกระบวนการงอกโดยใช้วิธีการที่ 3 หรือการสเปรย์เมล็ดข้าวด้วยน้ำเป็นเวลา 7 ชั่วโมงและบ่มจนเกิดการงอกเป็นเวลา 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 35±0.5 องศาเซลเซียสและผ่านการให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียส 103 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 0.5 นาทีจะถูกนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยใช้ตู้อบลมร้อน ซึ่งผู้วิจัยได้ดำเนินวิธีการทดลองตามวิธีของลัสพรรณ (2552) ที่พบว่าการให้ความร้อนแก่เมล็ดข้าวที่อุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 130 นาทีและอุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 170 นาทีเป็นช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแปรรูปข้าวกล้องที่มีสีสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และสายพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 1 ตามลำดับซึ่งผู้วิจัยได้นำสภาวะการให้ความร้อน ทั้งสองสภาวะของ ลัสพรรณ (2552) มาทดลองใช้กับข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 เนื่องจากเป็นข้าวกล้องสายพันธุ์เดียวกันและนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้ความร้อนแก่ข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 เนื่องจากข้าวกล้องสายพันธุ์ดังกล่าวเป็นพันธุ์ข้าวที่ถูกพัฒนามาจากสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 จนมีเพียงลักษณะทางกายภาพบางประการที่เปลี่ยนแปลงไปจากสายพันธุ์เดิมเช่น สีของเยื่อหุ้มเมล็ด (สมเดช, 2549)

ผลการทดลองพบว่ากระบวนการให้ความร้อนดังกล่าวทำให้ตัวอย่างเมล็ดข้าวกล้องงอกหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องงอกหอมแดงสุโขทัย 3 มีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 6.29-6.85 และ 6.33-6.44 ตามลำดับ ค่าความสว่าง (L*) อยู่ในช่วง 28.49-34.75 ค่าความเป็นสีแดง (a*) อยู่ในช่วง -1.57-1.45ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) อยู่ในช่วง -0.18-2.58 และมีสมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และไฟเตท ดังตาราง 16 และ ตาราง 17

ตาราง 16 ปริมาณความชื้น ค่าสี สมบัติการต้านออกซิเดชันปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 หลังการทำแห้ง โดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 170 นาที และอุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 130 นาที

วิธีวิเคราะห์	สภาวะการให้ความร้อน	
	อุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส, 170 นาที	อุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียส, 130 นาที
ความชื้น (ร้อยละ)	6.85 ± 0.50^{a}	6.29 ± 0.14^{b}
ค่าความสว่าง (L*)^{ns}	33.26 ± 0.19	34.75 ± 0.25
ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a*)^{ns}	0.28 ± 0.16	1.45 ± 1.03
ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b*)^{ns}	1.92 ± 0.01	2.58 ± 0.58
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี $ABTS^{\cdot+}$)^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลโทรลอกซ์ต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	12.76 ± 1.13	16.33 ± 0.37
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี FRAP) (มิลลิกรัมสมมูลเฟอร์รัสซัลเฟตต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	22.20 ± 1.33^{b}	14.55 ± 3.68^{a}
ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิคต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	40.31 ± 1.99	36.55 ± 2.28
ปริมาณไฟเตท (มิลลิกรัมกรดไฟติกต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	20.85 ± 27.76^{b}	6.33 ± 0.18^{a}

หมายเหตุ
- ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)
- $^{a-b}$อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)
- ^{ns}ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตาราง 17 ปริมาณความชื้น ค่าสี สมบัติการต้านออกซิเดชันปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 หลังการทำแห้ง โดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 170 นาที และอุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 130 นาที

วิธีวิเคราะห์	สภาวะการให้ความร้อน	
	อุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส, 170 นาที	อุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียส, 130 นาที
ความชื้น (ร้อยละ) ^{ns}	6.44± 0.22	6.33± 0.14
ค่าความสว่าง (L) ^{ns}	28.49 ± 0.17	29.02 ± 0.39
ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a) ^{ns}	0.16 ± 0.47	-1.57 ± 0.02
ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b) ^{ns}	-0.18 ± 0.11	0.37 ± 0.19
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี $ABTS^{\cdot+}$) ^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลโทรลอกซ์ต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	16.06 ± 4.46	18.35 ± 1.56
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี FRAP) (มิลลิกรัมสมมูลเฟอร์รัสซัลเฟตต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	15.28 ± 3.57^{a}	28.07 ± 1.58^{b}
ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล ^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิคต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	68.67 ± 4.29	71.55 ± 3.70
ปริมาณไฟเตท (มิลลิกรัมกรดไฟติกต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	6.42 ± 0.21^{a}	20.42 ± 12.43^{b}

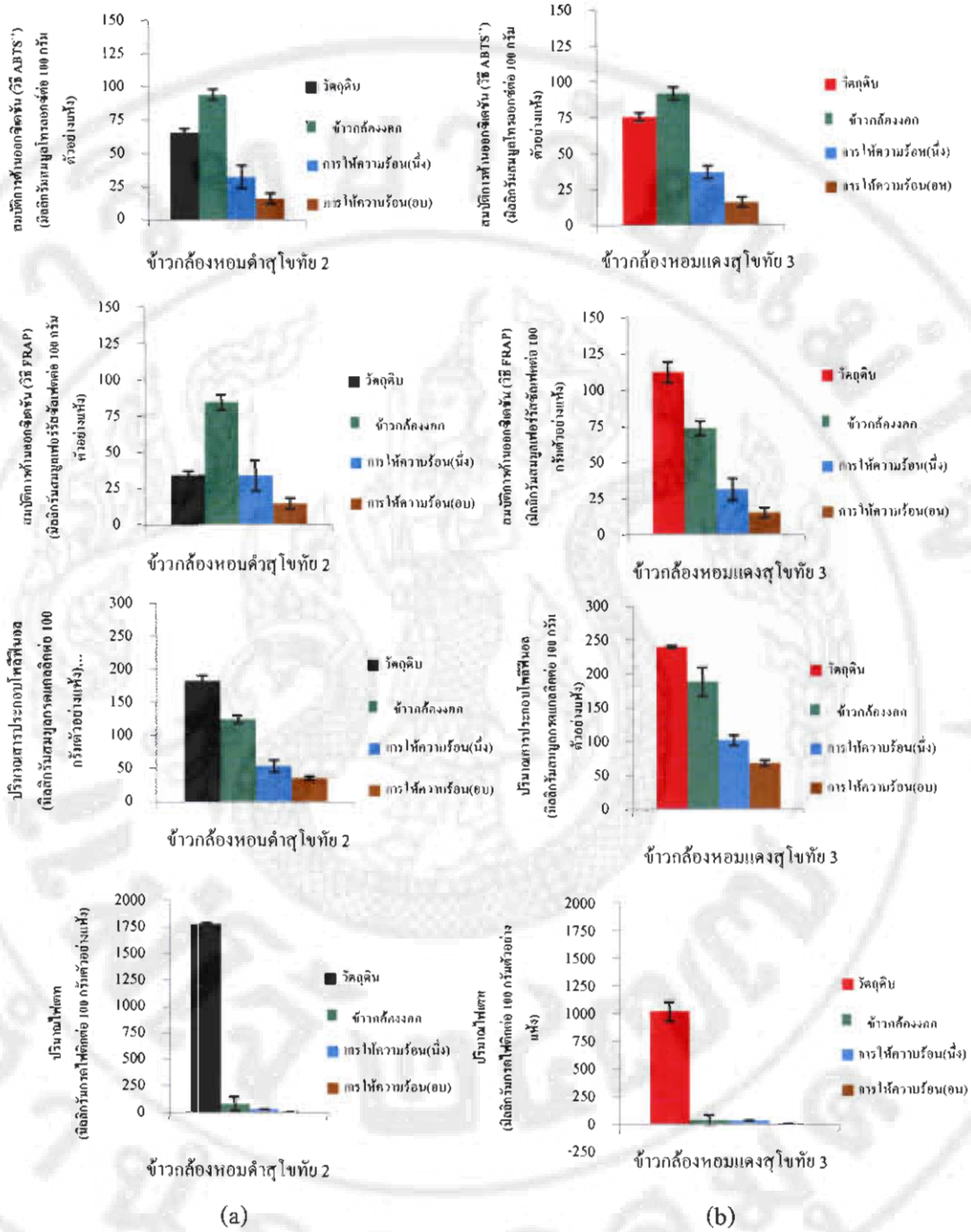
หมายเหตุ
- ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)
- $^{a-b}$อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)
- ^{ns}ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

การทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน ส่งผลให้เมล็ดข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และหอมแดงสุโขทัย 3 มีความชื้นลดลงซึ่งนิธิยา (2545) กล่าวว่า ปริมาณความชื้นดังกล่าวอยู่ในช่วงความชื้นที่จุลินทรีย์ไม่สามารถนำน้ำอิสระ (a_w) จากตัวผลิตภัณฑ์ไปใช้ได้ จึงไม่ทำให้เกิดการเน่าเสีย และสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานแม้ไม่ได้เก็บไว้ในอุณหภูมิต่ำ อีกทั้งลดโอกาสที่ตัวผลิตภัณฑ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน หรือการเกิดการเหม็นหืนภายในเมล็ด เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยานั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของความชื้นและปริมาณน้ำอิสระของตัวผลิตภัณฑ์เป็นหลัก (Harman and Mattick, 1976)

ด้านสมบัติการต้านออกซิเดชัน สารประกอบโพลีฟีนอล และไฟเตทของข้าวกล้องงอกหลังการให้ความร้อนโดยใช้ตู้อบลมร้อนตามวิธีการทดลองของ ลัสพรรณ (2552) สำหรับข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และนำมาประยุกต์ใช้ในข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 โดยผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกไวทั้ง 2 สายพันธุ์มีสมบัติการต้านออกซิเดชัน สารประกอบโพลีฟีนอล และไฟเตทที่ลดน้อยลงเนื่องจากสารประกอบต่างๆ มีคุณสมบัติที่ไม่ทนต่อความร้อน (Laleh et al., 2006; Marcelo et al., 2004 and Kirca et al., 2007) อีกทั้งยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ในระหว่างกระบวนการผลิต เช่น น้ำที่ใช้ในกระบวนการงอก (Luh and Mikus, 1980) เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Choi et al. (2007) ที่กล่าวว่าสารประกอบจำพวกสารต้านออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปนั้นจะมีน้อยกว่าในวัตถุดิบ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Shimelis and Rakshit (2007) ที่ทำการศึกษาการแปรรูปถั่วเหลืองและพบว่าการใช้ความร้อนเพื่อทำให้เมล็ดถั่วสุกนั้นส่งผลให้สารสำคัญเช่น กรดอะมิโนอิสระชนิดต่างๆ และเอนไซม์ที่มีบทบาทในการยับยั้งการทำงานของสารพิษจำพวก แลคทิน (lectin) ภายในร่างกายเช่นเอนไซม์โปรติเอสลดปริมาณลงอย่างมาก

ทั้งนี้พบว่าสมบัติการต้านออกซิเดชันของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์วัดโดยวิธีการ FARP มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติในส่วนของสารประกอบโพลีฟีนอล อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 ที่ผ่านผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 130 นาทีและที่อุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 170 นาที ตามลำดับนั้นพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งจากข้อมูลทำให้สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการให้ความร้อนโดยที่เหมาะสมต่อการผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุกไวสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องงอกสายพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 คือการใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 130 นาทีและที่อุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 170 นาที ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ข้าวกล้องงอกหอมดำสุโขทัย 2 และข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3 ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยใช้ตู้อบลมร้อน พบว่ามีสมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และปริมาณไฟเดท ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องวัตถุดิบ ดังภาพ 10



ภาพ 10 สมบัติการต้านออกซิเดชันปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลและปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องวัตถุดิบเปรียบเทียบกับข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการงอก ผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียส 103 กิโลปาสคาลเป็นเวลา 0.5 นาที และหลังการทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 130 นาที สำหรับข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 (a) และ 73 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 170 นาที สำหรับข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 (b)

การศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกไวหลังการคืนรูป

จากการศึกษาผลของกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุกไวจากข้าวกล้องสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และหอมแดงสุโขทัย 3 สามารถสรุปได้ดังนี้ นำเมล็ดข้าวกล้องวัตถุดิบทั้ง 2 สายพันธุ์มาล้างด้วยน้ำสะอาดและสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก โดยใช้วิธีการที่ 3 หรือการสเปรย์เมล็ดข้าวด้วยน้ำสะอาดเป็นเวลา 7 ชั่วโมงและบ่มให้เกิดการงอกเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35±0.5 องศาเซลเซียส และนำข้าวกล้องงอกที่ได้มาให้ความร้อนในหม้อนึ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียส 103 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 0.5 นาที จากนั้นตัวอย่างจะถูกนำมาลดความชื้นโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 130 นาที สำหรับข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และ 73 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 170 นาที สำหรับข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมแดงสุโขทัย 3 จากนั้นผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกไวที่ได้จะถูกนำมาบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหุงสุกไวหลังการคืนรูปโดยการหุงด้วยหม้อนึ่งไฟฟ้า ในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ 1:2

ในการเปรียบเทียบการยอมรับของผู้บริโภคระหว่างข้าววัตถุดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป (ชุดควบคุม) และข้าวกล้องงอกหุงสุกไวในด้านความนุ่ม และความชอบรวม ผู้วิจัยได้เลือกใช้แบบทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคแบบ line scale ในรูปแบบเส้นคะแนนแบบปลายเปิดยาว 15 เซนติเมตร โดยมีการระบุด้านปลายเส้นคะแนนด้านความนุ่มของตัวอย่างเป็นคะแนน 0 คือนุ่มน้อย คะแนน 15 คือนุ่มมาก และด้านความชอบรวมของตัวอย่าง คะแนน 0 คือชอบน้อย และคะแนน 15 คือชอบมาก ทั้งนี้จากการคืนรูปผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหุงสุกไวของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์พบว่าใช้เวลาในการคืนรูปประมาณ 15 นาทีซึ่งใช้เวลาสั้นกว่าชุดควบคุมที่ใช้เวลาคืนรูปหรือหุงให้สุกทั้งหมดถึง 45 นาที และจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความนุ่มและความชอบรวมของผู้บริโภคจำนวน 100 คน ที่มีต่อผลิตภัณฑ์หลังการคืนรูป พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านความชอบรวมของข้าวกล้องสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 ($p \leq 0.05$) โดยพบว่าผู้บริโภคให้คะแนนด้านความชอบรวมของตัวผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกไวสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 มากกว่าในชุดควบคุม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ในด้านความนุ่มของทั้ง 2 สายพันธุ์พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ($p>0.05$) ดังแสดงในตาราง 18

ตาราง 18 การประเมินการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคที่มีต่อความนุ่ม และความชอบรวมของตัวผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกไวสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 และหอมแดงสุโขทัย 3 เปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ลักษณะทางประสาทสัมผัส	ข้าวกล้องหอมดำสุโขทัย 2		ข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3	
	ความนุ่ม*^{ns}	ความชอบรวม**	ความนุ่ม*^{ns}	ความชอบรวม**^{ns}
ชุดควบคุม	6.48 ± 1.81	6.26 ± 1.36^{a}	6.18 ± 1.50	6.45 ± 1.51
ข้าวกล้องงอกหุงสุกไว	6.26 ± 1.26	6.72 ± 1.22^{b}	6.35 ± 1.19	6.14 ± 1.31

หมายเหตุ
- ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- $^{a-b}$อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)
- ^{ns}ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)
- * คะแนน 0 = นุ่มน้อย และ 15 = นุ่มมาก
- ** คะแนน 0 = ชอบน้อย และ 15 = ชอบมาก

จากการนำผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกไวหลังการคืนรูปมาทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น สมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และปริมาณไฟเตท พบว่าสมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องงอกหุงสุกไวทั้ง 2 สายพันธุ์มีปริมาณน้อยกว่าข้าวกล้องวัตถุดิบ ($p \leq 0.05$) ดังตาราง 19 และตาราง 20 ตามลำดับ

ตาราง 19 สมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องหอมดำสุโขทัย 2 (วัตถุดิบ) และผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกไวจากข้าวกล้องงอกหอมดำสุโขทัย 2 หลังการคืนรูป

คุณภาพผลิตภัณฑ์	วัตถุดิบ หลังการคืนรูป	ข้าวกล้องงอกหุงสุกไว หลังการคืนรูป
ความชื้น (ร้อยละ)^{ns}	69.51 ± 1.16	69.14 ± 0.95
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี $ABTS^{\cdot+}$)^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลโทรลอกซ์ต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	17.74 ± 2.03	14.20 ± 0.98
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี FRAP) (มิลลิกรัมสมมูลเฟอร์รัสซัลเฟตต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	32.87 ± 4.09^{b}	25.15 ± 1.15^{a}
ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิคต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	87.19 ± 7.25^{b}	71.45 ± 3.55^{a}
ปริมาณไฟเตท (มิลลิกรัมกรดไฟติกต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	209.89 ±195^{b}	101.40 ± 35.15^{a}

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

- $^{a-b}$อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันในแต่ละคุณภาพในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

- ^{ns}ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตาราง 20 สมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล และปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องหอมแดงสุโขทัย 3 (วัตถุดิบ) และผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกไวจากข้าวกล้องงอกหอมแดงสุโขทัย 3 หลังการคืนรูป

คุณภาพผลิตภัณฑ์	วัตถุดิบ หลังการคืนรูป	ข้าวกล้องงอกหุงสุกไว หลังการคืนรูป
ความชื้น (ร้อยละ)^{ns}	70.43 ± 035	70.50 ± 0.78
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี $ABTS^{\cdot+}$)^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลโทรลอกซ์ต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	24.10 ± 2.50	18.35 ± 1.31
สมบัติการต้านออกซิเดชัน (วิธี FRAP)^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลเฟอร์รัสซัลเฟตต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	39.45 ± 6.05	32.98 ± 2.55
ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล^{ns} (มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิคต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	103.11 ± 9.70	89.56 ± 5.27
ปริมาณไฟเตท (มิลลิกรัมกรดไฟติกต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง)	301±15^{b}	161 ± 49^{a}

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

- $^{a-b}$อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันในแต่ละคุณภาพในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p\leq0.05$)

- ^{ns}ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น สมบัติการต้านออกซิเดชัน ปริมาณโพลีฟีนอล และปริมาณไฟเตท ข้าวกล้องงอกหุงสุกไวทั้ง 2 สายพันธุ์หลังจากการคืนรูปและเปรียบเทียบกับข้าวกล้องวัตถุดิบ พบว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกไวสายพันธุ์หอมดำสุโขทัย 2 หลังการคืนรูปมีสมบัติการต้านออกซิเตชัน ปริมาณโพลีฟีนอล ต่างจากชุดควบคุมหรือข้าววัตถุดิบหลังการคืนรูปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) รวมไปถึงปริมาณไฟเตทของข้าวกล้องงอกหุงสุกไวทั้ง 2 สาย

พันธุ์ที่พบว่ามีปริมาณต่างจากชุดควบคุมหรือข้าววัตถุดิบหลังการคืนรูปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เช่นเดียวกัน เนื่องจากเมล็ดข้าวกล้องงอกที่ผ่านกระบวนการหุงสุกไวได้มีการสลาย และสูญเสียสารสำคัญต่างๆ ไปในระหว่างกระบวนการผลิต ทั้งการใช้น้ำในขั้นตอนการทำให้เมล็ดข้าวเกิดกระบวนการงอก (Laleh et al., 2006) การใช้ความร้อนและความดันสูง (Sathe and Venkatachalam, 2002) การใช้หม้อนึ่งความดันไอ และตู้อบลมร้อน (ลัสพรรณ, 2552) ที่พบว่ามีผลโดยตรงต่อการลดปริมาณลงของสารประกอบไฟเตทที่ไม่คงตัวต่อสภาวะที่ความร้อนสูง และพบว่าการลดลงของสารประกอบไฟเตท นั้นมีผลให้สมบัติการต้านอกซิเดชันลดลงด้วยเช่นการเนื่องจากพบว่าไฟเตทนั้นมีสมบัติการเป็นสารต้านมะเร็งหรือสารต้านออกซิเดชัน (Torsahakul, 2007) ซึ่งจากรายงานของ Shimelis and Rakshit (2007) ที่ทำการศึกษาเมล็ดถั่วเหลืองหลังจากผ่านกระบวนการแปรรูป ทั้งการทำให้เมล็ดถั่วเหลืองเกิดกระบวนการงอกและการใช้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งความดันไอนั้นนอกจากจะสามารถกำจัดสารประกอบที่ไม่พึงประสงค์ได้แล้วแต่ก็พบว่าเกิดการสูญเสียสารสำคัญที่จำเป็นต่อร่างกายไปด้วยเช่นเดียวกัน