บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติทางเคมีของข้าวกล้องหอมมะลิแดง

ข้าวกล้องหอมมะลิแดง มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งปริมาณแอมิโลสที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มีผู้รายงานไว้ คือ 16.9% (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2549) และสามารถจัดข้าวกล้องหอมมะลิแดงอยู่ในข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำได้ เนื่องจากมีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วง 12-20% (Juliano, 1971) เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องหอมมะลิแดงกับข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องชนิดเมล็ดยาว (USDA, 2007) พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย อาจเป็นผลมาจากความแตกต่างในด้านสายพันธุ์ วิธีการเพาะปลูก หรือสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูก

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องหอมมะลิแดง

องค์ประกอบทางเคมี	ข้าวกล้องหอมมะลิแดง (% wb)[1]	ข้าวกล้องชนิดเมล็ดยาว (% wb)[2]
คาร์โบไฮเดรต	76.12	77.24
โปรตีน	6.12	7.94
ไขมัน	3.05	2.92
ใยอาหาร	3.83	3.50
เถ้า	1.14	1.53
ความชื้น	9.74	10.37
แอมิโลส	13.71	-

[1] รายงานเป็นค่าเฉลี่ย จากการทดลอง 3 ซ้ำ

[2] อ้างอิงจาก USDA, 2007

4.2 ผลของวิธีการทำแห้งต่อสมบัติของข้าวกล้องหอมมะลิแดง

4.2.1 สมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องหอมมะลิแดง

4.2.1.1 ความชื้นและค่า a_w

ความชื้นและค่า a_w ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 วิธี และไม่ได้ผ่านการเก็บรักษา แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์มีความชื้นและค่า a_w ต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก กล่าวคือ อุณหภูมิของอากาศระหว่างการทำแห้งในที่ร่ม จะมีค่าประมาณ 27-33°C ซึ่งการทำแห้งในที่ร่มนี้เป็นวิธีควบคุมและใช้เป็นการทำแห้งขั้นที่ 2 สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศระหว่างการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์จะมีค่าประมาณ 40-60°C (Inprasit และ Noomhorm, 2001; International Rice Reseach Institute, 2004) และมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าอากาศที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิของข้าวเปลือกกับอากาศแวดล้อมในระหว่างการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์จึงมีความแตกต่างกันมากกว่าค่าดังกล่าวในกรณีของการทำแห้งในที่ร่ม ระดับของความแตกต่างของอุณหภูมินี้นับเป็นแรงผลักดัน (driving force) สำหรับการแพร่ของน้ำออกสู่บรรยากาศ ดังนั้นโมเลกุลของน้ำในตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์จึงแพร่ออกมาสู่อากาศแวดล้อมได้เร็วกว่า (Brooker และคณะ, 1975) การทำแห้งด้วยวิธีที่มีอัตราการทำแห้งสูงกว่า อาจส่งผลให้ติดตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นและหาระยะเวลาการทำแห้งที่เหมาะสมได้ยากกว่า ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์จึงอาจผ่านการทำแห้งที่นานเกินไป จึงส่งผลให้ให้มีความชื้นและค่า a_w ต่ำที่สุด อย่างไรก็ดี ตัวอย่างที่ได้จากการทำแห้งทั้ง 3 วิธี ยังมีความชื้นอยู่ในช่วง 13-15% ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ในแผนการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ความชื้นและค่า a_w ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 วิธีและไม่ได้ผ่านการเก็บรักษา

วิธีการทำแห้ง	ความชื้น (% db)	a_w
ในที่ร่ม	$15.31^{a} \pm 0.05$	$0.77^{a} \pm 0.02$
ใช้แสงอาทิตย์	$13.58^{c} \pm 0.11$	$0.70^{b} \pm 0.01$
ฟลูอิไดเซชัน	$14.21^{b} \pm 0.11$	$0.77^{a} \pm 0.01$

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.2.1.2 ค่าสี

ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 วิธี และไม่ได้ผ่านการเก็บรักษา แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า วิธีการทำแห้งทั้ง 3 วิธี ไม่มีผลต่อค่า L a b อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ซึ่งเมื่อมองด้วยตาเปล่าก็ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้เช่นกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะรงควัตถุในกลุ่มแอนโทไซยานินซึ่งให้สีน้ำตาลแดงในตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิแดงถูกทำลายด้วยความร้อนในระหว่างการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์และวิธีฟลูอิไดเซชันในระดับที่ไม่แตกต่างกัน และไม่แตกต่างจากวิธีควบคุม

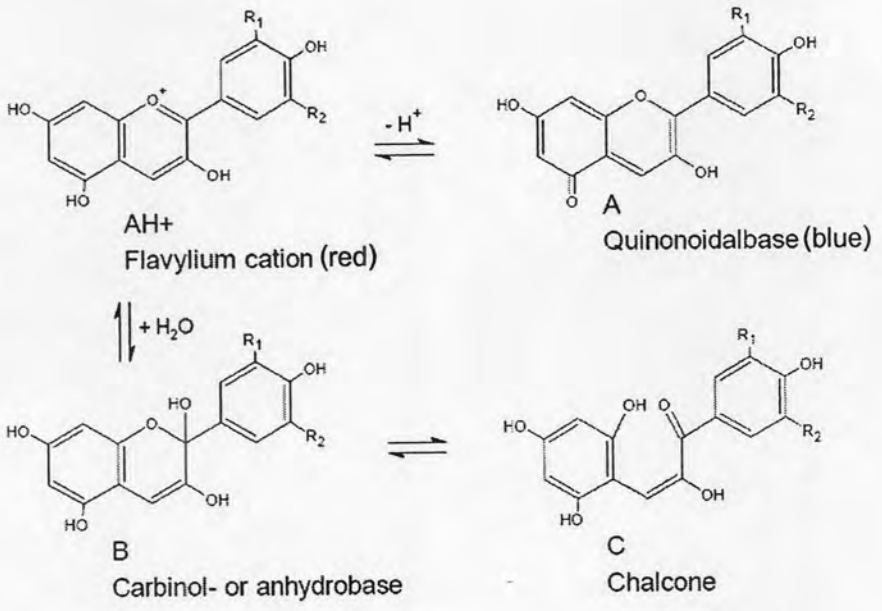
ตารางที่ 4.3 ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 วิธี และไม่ได้ผ่านการเก็บรักษา

วิธีการทำแห้ง	L^{ns}	a^{ns}	b^{ns}
ในที่ร่ม	30.32 ± 1.56	7.13 ± 0.57	6.77 ± 1.01
ใช้แสงอาทิตย์	31.10 ± 2.20	7.48 ± 0.61	7.23 ± 0.99
ฟลูอิไดเซชัน	30.49 ± 2.22	7.19 ± 0.60	7.11 ± 0.91

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

^{ns} ข้อมูลในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

มีงานวิจัยจำนวนมากรายงานถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสีของตัวอย่างเนื่องจากการสลายตัวของแอนโทไซยานิน ดังเช่นที่พบในตัวอย่างแยมสตรอเบอร์รี่ (Garcia-Viguera และ Zafrilla, 2001) น้ำสตรอเบอร์รี่กระป๋อง (Kammerer และคณะ, 2007) ไวน์แดง (Cliff, King และ Schlosser, 2007) หรือในสารสกัดจากกระเจี๊ยบแดง (Duangmal, Saicheua และ Sueeprasan, 2007) จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณแอนโทไซยานินมีความสัมพันธ์กับค่าสีที่วัดได้ในตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่มีการสลายตัวของแอนโทไซยานินในปริมาณมากจะมีการเปลี่ยนแปลงสีอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสลายตัวของแอนโทไซยานิน เช่น ในแยมสตรอเบอร์รี่ (Garcia-Viguera และ Zafrilla, 2001) ที่มีการแปรระดับของอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในระหว่างกระบวนการแปรรูป ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่ได้รับอุณหภูมิสูงและเป็นเวลานานจะมีค่าการสลายตัวของแอนโทไซยานินสูงขึ้น อีกทั้งมีความแตกต่างของค่าสีมากที่สุดอีกด้วย ส่วนในผลิตภัณฑ์น้ำสตรอเบอร์รี่กระป๋อง (Kammerer และคณะ, 2007) ที่เปรียบเทียบกระบวนการแปรรูป 2 วิธี คือ วิธีพาสเจอไรซ์และสเตอริไลซ์ พบว่า น้ำสตรอเบอร์รี่กระป๋องที่ให้ความร้อนด้วยวิธีสเตอริไลซ์จะมีค่าความสว่างต่ำกว่าตัวอย่างที่ให้ความร้อนด้วยวิธีพาสเจอไรซ์ จากการเกิดสารสีน้ำตาลมากขึ้นในตัวอย่างเมื่อระบบถูกเร่งด้วยความร้อน และปริมาณแอนโทไซยานินในตัวอย่างที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์มีค่าสูงกว่าในตัวอย่างที่ผ่านการสเตอริไลซ์ถึง 7 เท่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านความร้อนพบว่า ปริมาณแอนโทไซยานินในตัวอย่างที่ผ่านการพาสเจอไรซ์ลดลงไปถึง 50% ซึ่งให้ผลคล้ายคลึงกันในตัวอย่างแบลคเคอแรนท์ (Iversen, 1999) และ highbush blueberry (Skrede, Wrolstad และ Durst, 2000) การสลายตัวของแอนโทไซยานินเนื่องมาจากความร้อนนั้น สามารถเกิดได้ทั้งในระหว่างกระบวนการผลิตและการเก็บรักษา เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและการให้สีของแอนโทไซยานิน (ดังรูปที่ 4.1) พบว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโทไซยานินตามสมดุลเคมีในรูปที่ 4.1 เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ flavylium cation เปลี่ยนไปเป็น chalcone มากขึ้น ทำให้สีของแอนโทไซยานินซีดลง แต่การเปลี่ยน chalcone กลับมาอยู่ในรูปของ flavylium cation จะเกิดได้ช้ากว่า ซึ่งแอนโทไซยานินในรูปแบบ chalcone จะมีความเสถียรน้อยกว่าในรูปของ flavylium cation (Perera และ Baldwin, 2001)



รูปที่ 4.1 สูตรโครงสร้างของแอนโทไซยานินในรูปสมดุล (Shahidi และ Naczk, 2004)

อย่างไรก็ดีสำหรับในงานวิจัยนี้พบว่า ค่าสีของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์และใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กับการทำแห้งในที่ร่มซึ่งเป็นวิธีควบคุม แม้ว่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกระหว่างการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์และใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดจะมีค่าประมาณ 40-60°C (International Rice Research Institute, 2004) และ 72°C ตามลำดับ ในกรณีของการใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดระยะเวลาที่ใช้ทำแห้งค่อนข้างสั้น แม้จะมีการใช้อุณหภูมิสูงแต่หากให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในระยะเวลาสั้นๆ จะช่วยป้องกันการสลายตัวของแอนโทไซยานินและ/หรือการสลายตัวไปอยู่ในรูปที่ไม่มีสีได้ (Jackman และ Smith, 1996) นอกจากนี้ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ปรับความชื้นแล้ว จะมีความชื้นเริ่มต้นเพียง 26-30% wb ซึ่งจัดว่าค่อนข้างต่ำหากเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ ที่อ้างอิงถึงในงานวิจัยที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าความชื้นหรือค่า a_w เป็นปัจจัยที่ส่งเสริมการสลายตัวของแอนโทไซยานินระหว่างการให้ความร้อน ตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำจึงอาจมีการสลายตัวของแอนโทไซยานินระหว่างการให้ความร้อนน้อยลงด้วย

4.2.2 ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดง

ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ซึ่งพิจารณาจากความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH) และกำลังการรีดิวซ์ (วิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP) ของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 วิธี และไม่ได้ผ่านการเก็บรักษา แสดงดังตารางที่ 4.4 จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า วิธีการทำแห้งมีผลต่อปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดง โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่มมีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันทั้ง 2 รูปแบบ ไม่แตกต่างจากตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิของอากาศระหว่างการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ไม่แตกต่างจากอุณหภูมิของอากาศระหว่างการทำแห้งในที่ร่มมากนัก จึงส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อฤทธิ์ต้านออกซิเดชันทั้ง 2 รูปแบบ อีกทั้งสารสกัดจากตัวอย่างอาจประกอบด้วยสารกลุ่ม nonphenolic เช่น กรดอะมิโน ที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน จึงทำให้ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 2 วิธี มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดมีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันทั้ง 2 รูปแบบ ต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) การที่ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดมีค่าลดลงมากที่สุดนั้น อาจเป็นเพราะทำแห้งที่อุณหภูมิสูง (115°C) แม้ใช้ระยะเวลาเพียง 215 วินาที แต่ก็ทำให้เมล็ดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 72°C ในขณะที่อุณหภูมิของเมล็ดที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์อาจมีค่าสูงสุดเพียง 40-60°C เท่านั้น ความร้อนสูงที่ใช้ระหว่างการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด จึงอาจส่งผลให้สารฟีนอลิกในกลุ่มต่างๆ และสารต้านออกซิเดชันลดลงมากสุดและทำให้ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันลดลงมากที่สุดด้วย

ตารางที่ 4.4 ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 วิธี และไม่ได้ผ่านการเก็บรักษา

วิธีการทำแห้ง	ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด (µg gallic acid/g flour)	ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (µmole trolox/g flour)	กำลังการรีดิวซ์ (µmole trolox/g flour)
ในที่ร่ม	2134.13^{a} ± 74.23	11.95^{a} ± 0.69	12.70^{a} ± 0.22
ใช้แสงอาทิตย์	2017.40^{b} ± 59.68	12.03^{a} ± 0.30	12.23^{a} ± 0.34
ฟลูอิไดเซชัน	1750.93^{c} ± 24.48	9.66^{b} ± 0.11	10.72^{b} ± 0.38

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

มีงานวิจัยที่รายงานถึงการลดลงของปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากพืชเนื่องจากกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน เช่น Dimberg และคณะ (1996) ได้เปรียบเทียบปริมาณกรดฟีนอลิกแต่ละชนิดและปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งหมดของตัวอย่างข้าวโอ๊ตที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อน และผ่านการให้ความร้อน ที่ 100°C เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง พบว่าปริมาณ ferulic acid ของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อน แต่เมื่อพิจารณาปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งหมด พบว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนมีปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งหมด สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) Lim และ Murtijaya (2007) ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP) ของสารสกัดจากสมุนไพรลูกใต้ใบ (*Phyllanthus amarus*) โดยมีวิธีการทำแห้ง คือ การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (เป็นเวลา 3 วัน) การทำแห้งในเตาอบ (50°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง) และการทำแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟ (800 W, 50 Hz, 4 นาที) ซึ่งพบว่าในทุกตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งจะมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการทำแห้ง โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟจะมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยวิธีอื่นๆ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทำแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าการทำแห้งด้วยวิธีอื่นๆ แม้จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งค่อนข้างสั้นก็ตาม อย่างไรก็ดีกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนอาจทำให้ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจาก

พืชมีค่าเพิ่มขึ้น ดังจะพบได้จากงานวิจัยของ Zieliński และคณะ (2001) ที่พบว่าปริมาณกรดฟีนอลิกของสารสกัดจากธัญพืชทั้งในรูปอิสระ และในรูป soluble conjugated เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยวิธีเอ็กซ์ทรูชัน (อุณหภูมิในเอ็กซ์ทรูเดอร์ เท่ากับ 120-160-200°C) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการทำลายพันธะเอสเทอร์ระหว่างกรดฟีนอลิกในรูปที่ถูกตรึงกับองค์ประกอบของผนังเซลล์ด้วยความร้อน นอกจากนี้งานวิจัยบางส่วนของ Perez-Jimenez และ Saura-Calixto (2005) ที่ศึกษาปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากแป้งสาลีและขนมปังฝรั่งเศส พบว่าขนมปังฝรั่งเศสมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP) สูงกว่าแป้งสาลี แต่มีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดต่ำกว่าแป้งสาลี ซึ่งฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นนี้ อาจเป็นผลมาจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเมลลาร์ดในระหว่างการอบ และ Tomaino และคณะ (2005) ที่ศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH ของน้ำมันจาก basil, cinnamon, clove, nutmeg, oregano และ thyme โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C 100°C 120°C และ 180°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าน้ำมันจากเครื่องเทศทุกชนิดยกเว้น nutmeg มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันคงที่แม้ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่น้ำมันจาก nutmeg กลับมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิ 180°C ซึ่งความร้อนอาจทำให้ปริมาณสารกลุ่มอื่นๆ ในน้ำมันจาก nutmeg เพิ่มมากขึ้น ทำให้ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้น จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนทั้งในด้านอุณหภูมิ เวลา หรือวิธีในการให้ความร้อนนั้น ล้วนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่าง ทั้งในแง่ของปริมาณที่ลดลง ปริมาณที่เพิ่มขึ้น หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับ enzymatic หรือ chemical oxidation ของสารกลุ่มฟีนอลิก แต่ทั้งนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในของตัวอย่างด้วย (Nicoli, Anese และ Parpinel, 1999)

ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 1700-2100 µg gallic acid/g flour ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าที่พบในธัญพืชบางชนิด เช่น ข้าวฟ่าง ข้าวโพดและข้าวบาร์เลย์ที่มีสี ซึ่งมีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกอยู่ในช่วง 2000-9000 µg gallic acid/g flour (Dykes และ Rooney, 2007) อย่างไรก็ดีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกที่รายงานในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่พบในข้าวกลุ่มที่มีสีเข้ม เช่น ข้าวมันปูและข้าวเหนียวดำที่มีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกประมาณ 729-1910 µg gallic acid/g flour (ประพันธ์ ปิ่นศิโรดม, 2545) สำหรับฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP มีค่าประมาณ 9-12 µmole trolox/g flour dry mass (7-10 µmole trolox/g flour fresh mass) ซึ่งมีค่า

น้อยกว่าฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของธัญพืชหรือผลิตภัณฑ์จากธัญพืชที่รายงานไว้ในงานวิจัยอื่น เช่น Miller และคณะ (2000) รายงานว่าฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH) ของอาหารเช้าจากธัญพืชและขนมปังโฮลวีต มีค่าประมาณ 12-35 μmole trolox/g fresh ทั้งนี้ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างจากพืชอาจแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและวิธีวิเคราะห์ที่ใช้

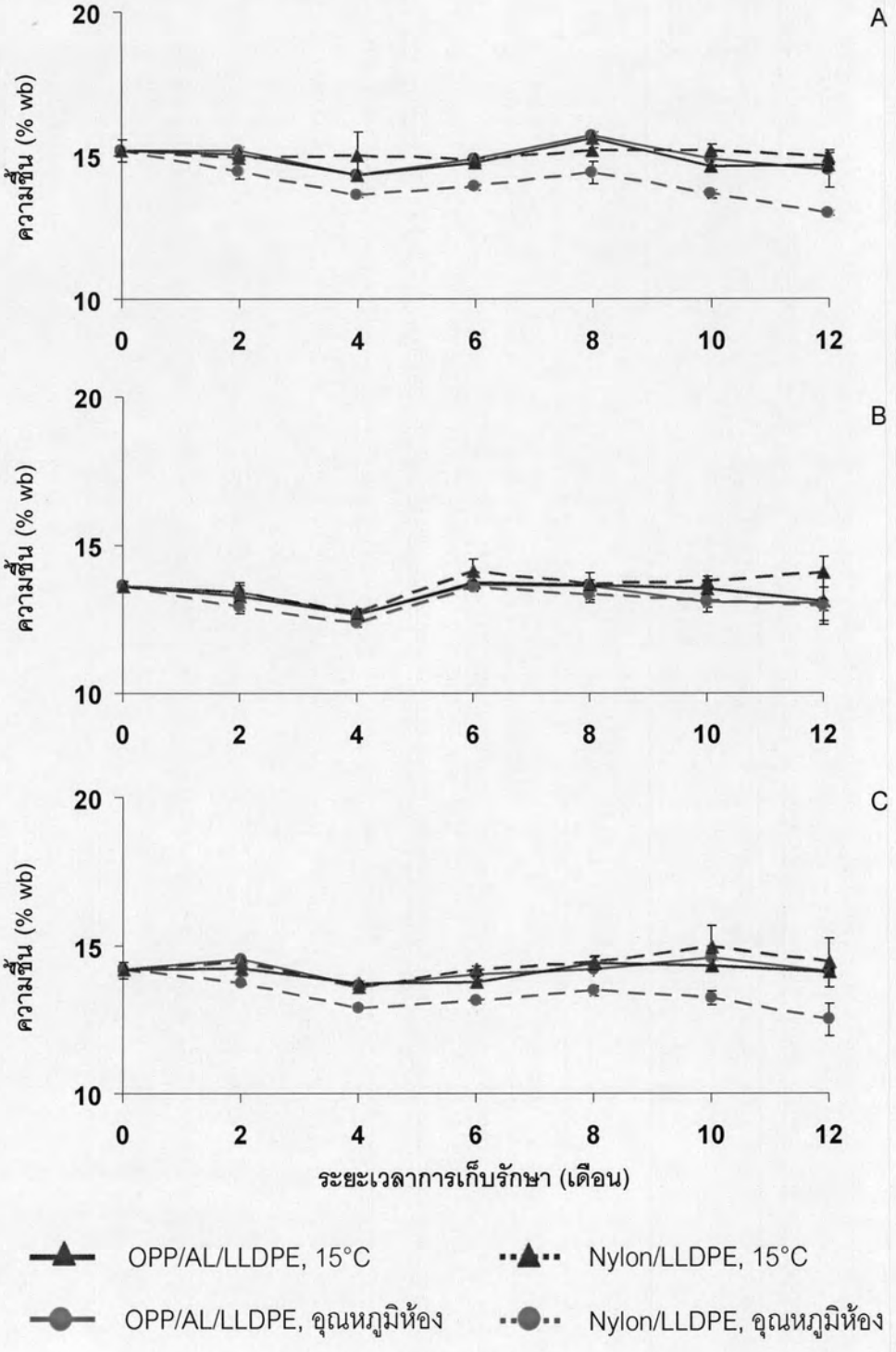
4.3 ผลของภาวะการเก็บรักษาต่อสมบัติของข้าวกล้องหอมมะลิแดง

4.3.1 สมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องหอมมะลิแดง

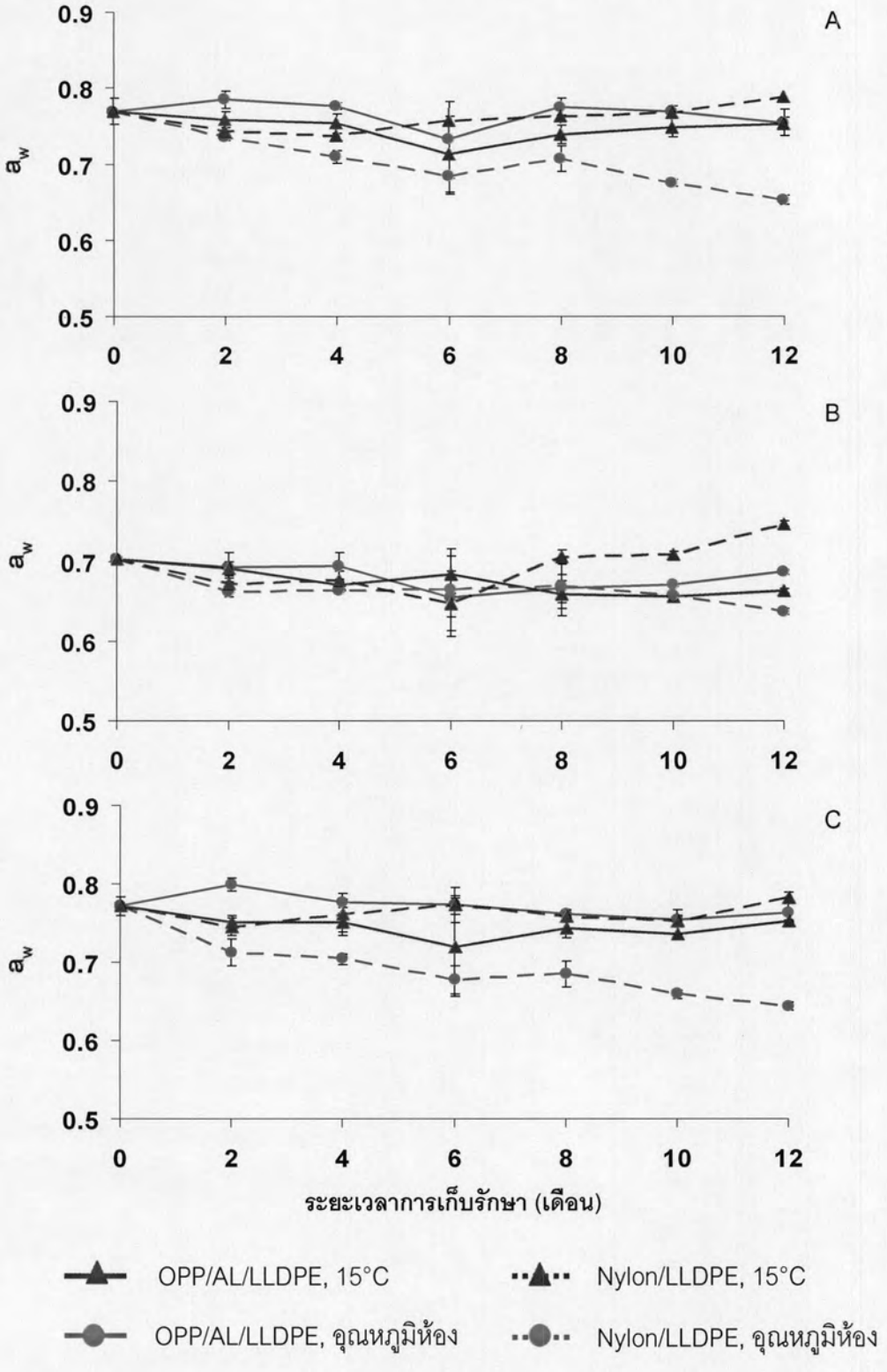
4.3.1.1 ความชื้นและค่า a_w

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของความชื้นและค่า a_w ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งในแต่ละวิธีและเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค.4-ค.5) พบว่ามีอิทธิพลร่วมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ระหว่างปัจจัยหลัก (คือ อุณหภูมิ บรรจุภัณฑ์ และระยะเวลาในการเก็บรักษา) จำนวน 2 และ/หรือ 3 ปัจจัย อย่างไรก็ดีพบว่า บรรจุภัณฑ์และอุณหภูมิมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ต่อความชื้นและค่า a_w ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 วิธี (ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ง ตารางที่ ง.1-ง.6) จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2-4.3 พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีใดก็ตามเมื่อบรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง จะมีความชื้นและค่า a_w เปลี่ยนแปลงมากที่สุดในระหว่างการเก็บรักษา เมื่อพิจารณาข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่า a_w ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่มและเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง.1 ง.3 ง.4 และ ง.6) ที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเท่ากัน (4-12 เดือน) ความชื้นและค่า a_w ของตัวอย่างที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE มีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิด OPP/AL/LLDPE (ตารางที่ 3.1) บรรจุภัณฑ์ชนิดหลังนี้จึงสามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำเข้าหรือออกจากเมล็ดข้าวได้ดีกว่า เนื่องจากในการทดลองนี้ไม่ได้มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเก็บ ดังนั้นความชื้นและค่า a_w ของเมล็ดข้าวจึงเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในระหว่างการเก็บรักษา เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่

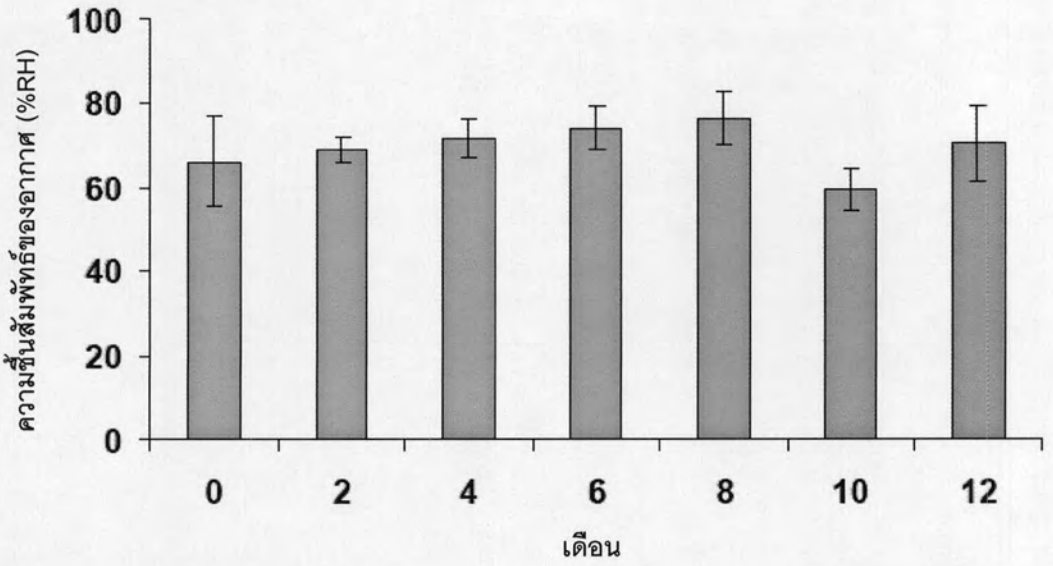
อุณหภูมิห้อง (27-35°C และ 50-80%RH แสดงดังรูปที่ 4.4-4.5) การสูญเสียความชื้นจากตัวอย่างจึงเกิดขึ้นได้เพื่อทำให้เมล็ดข้าวมีความชื้นเข้าใกล้ค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) (Grist, 1986) จึงทำให้ความชื้นและค่า a_w ของตัวอย่างที่เก็บที่อุณหภูมิห้องมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 13.58% wb ซึ่งอาจมีค่าใกล้เคียงกับความชื้นสมดุล จึงทำให้ความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา สำหรับตัวอย่างที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15°C ความชื้นและค่า a_w ไม่เปลี่ยนแปลงมากเท่าตัวอย่างที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิดเดียวกันและเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง อาจเป็นเพราะความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในตู้แช่เย็นไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักระหว่างการเก็บรักษา



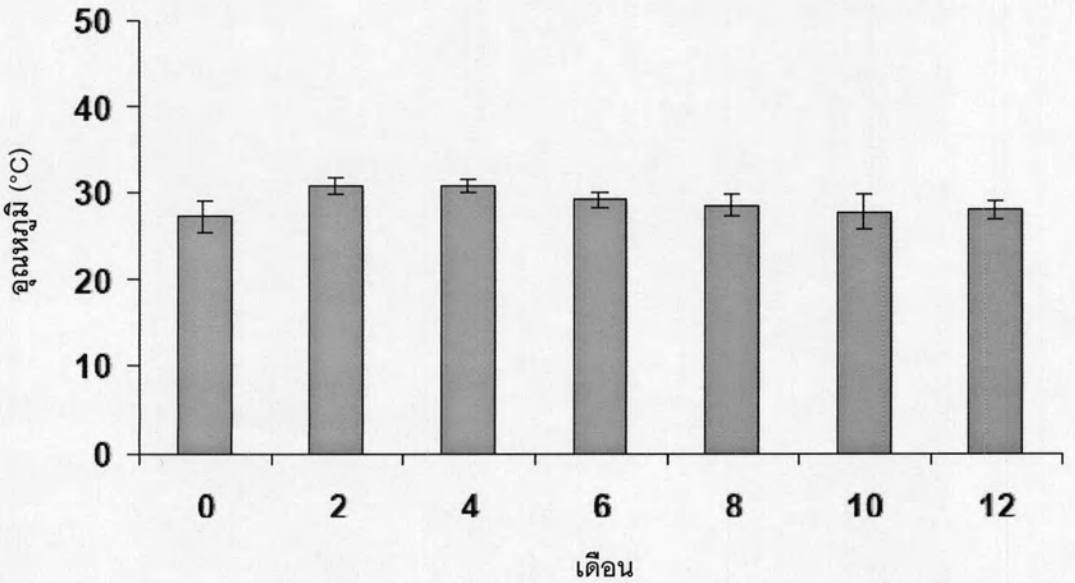
รูปที่ 4.2 ความชื้นของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่ม (A) การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (B) และฟลูอิไดเซชัน (C) และเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน โดย error bar แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ



รูปที่ 4.3 ค่า a_wของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่ม (A) การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (B) และฟลูอิไดเซชัน (C) และเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน โดย error bar แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ



รูปที่ 4.4 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในกรุงเทพมหานคร ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2550 – กุมภาพันธ์ 2551 (กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, 2551)



รูปที่ 4.5 อุณหภูมิห้องของอากาศในกรุงเทพมหานคร ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2550 – กุมภาพันธ์ 2551 (กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, 2551)

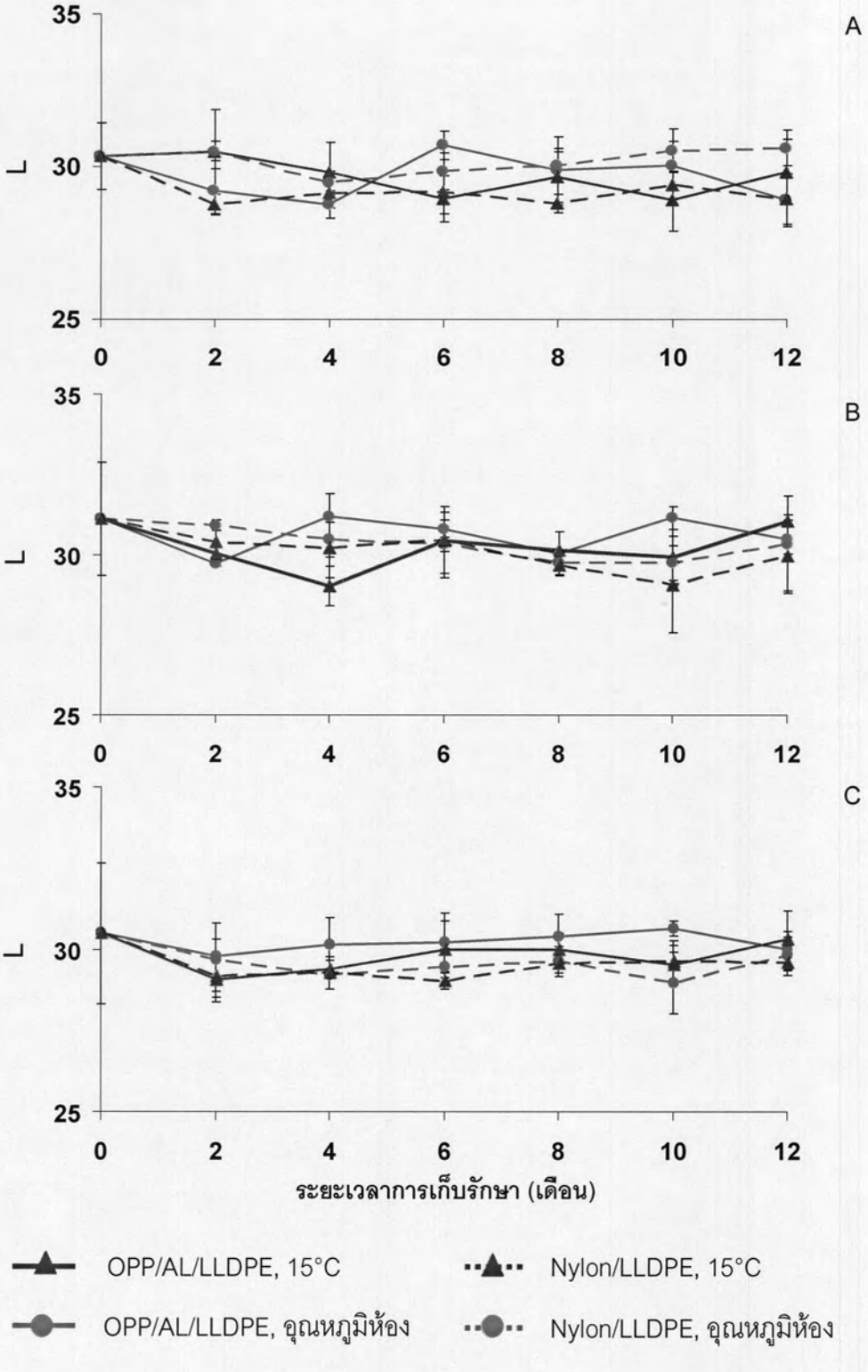
4.3.1.2 ค่าสี

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งในแต่ละวิธีและเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ และความแตกต่างของค่าสีที่ระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ เทียบกับค่าสีเดือนที่ 0 (ΔE) (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค.6-ค.9) พบว่ามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากปัจจัยหลักหรืออิทธิพลร่วมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ระหว่าง 2 และ/หรือ 3 ปัจจัย (ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ง ตารางที่ ง.7-ง.18) แต่อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.6-4.9 พบว่าไม่สามารถสรุปแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าสี และค่า ΔE ของตัวอย่างระหว่างการเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ ได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ความแตกต่างของค่าสี มีค่าน้อยกว่า 5 ($\Delta E \leq 5$) จึงไม่สามารถแยกความแตกต่างในแต่ละตัวอย่างด้วยสายตาได้ (Garcia-Viguera และ Zafrilla, 2001)

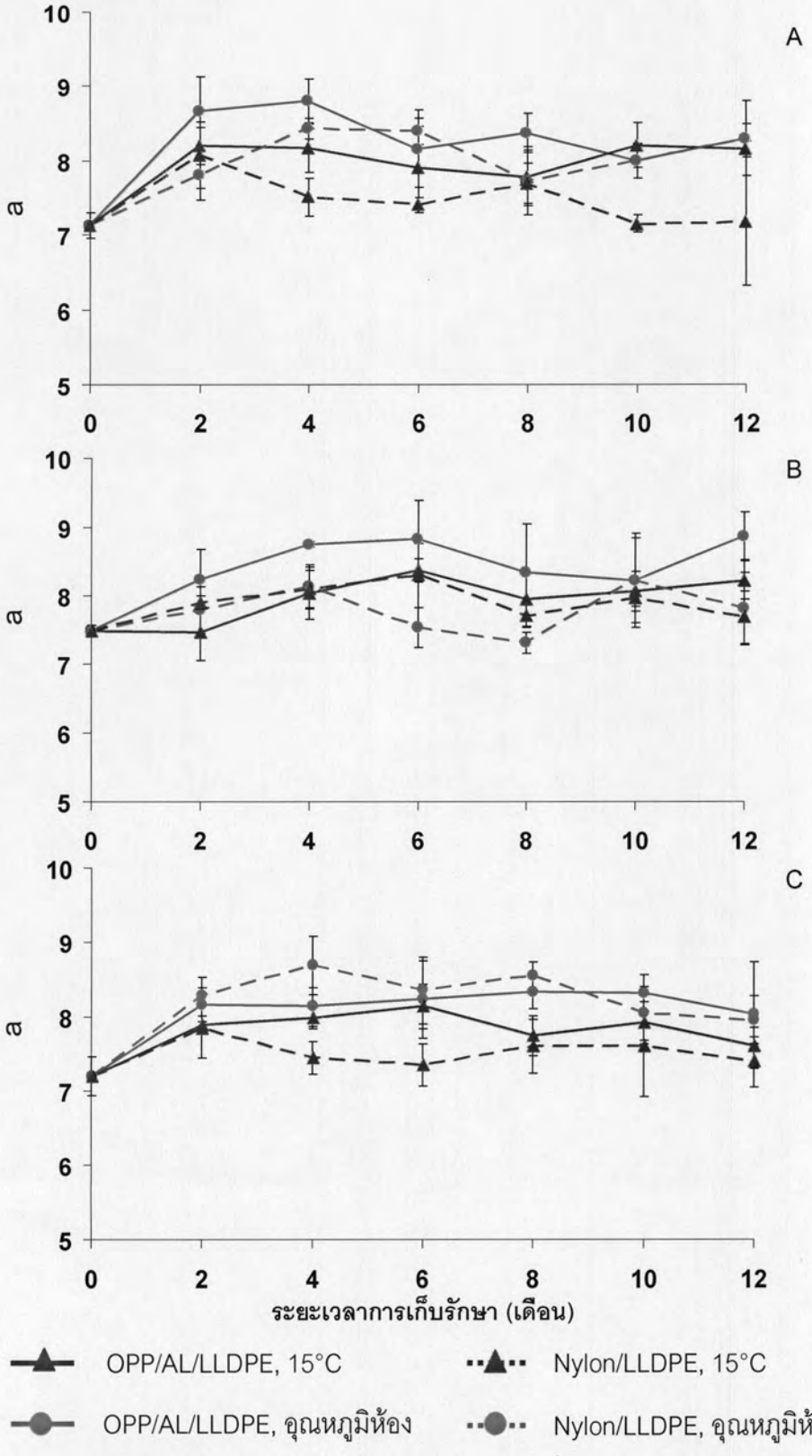
จากที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีในตัวอย่างที่ประกอบด้วยแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุชนิดหลัก โดยมากจะเป็นผลมาจากการสลายตัวของแอนโทไซยานิน มีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อการสลายตัวของแอนโทไซยานิน เช่น อุณหภูมิ แสง ออกซิเจน ค่า a_w มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาผลของปัจจัยเหล่านี้ต่อการสลายตัวของแอนโทไซยานิน เช่น ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อค่าสีและแอนโทไซยานินในตัวอย่างสตรอเบอร์รี่และราสเบอร์รี่ (Kalt และคณะ, 1999) แยมสตรอเบอร์รี่ (Garcia-Viguera และ Zafrilla, 2001) และแครนเบอร์รี่ (Wang และ Strecth, 2001) ผลของแสงต่อค่าสีและปริมาณแอนโทไซยานินในตัวอย่างน้ำองุ่น (Palamidis และ Markakis, 1975) broth ที่เตรียมจากรำข้าวบาร์เลย์ (Deguchi และคณะ, 2000) และเครื่องดื่มที่เติมสารสกัดจากกะหล่ำปลีม่วง (Dyrby, Westergaard และ Stapelfeldt, 2001) โดยแสงจะเร่งให้แอนโทไซยานินเกิดการสลายตัว โดยไปกระตุ้นแอนโทไซยานินให้อยู่ในภาวะ excited-state ซึ่งไวต่อการสลายตัว (Perera และ Baldwin, 2001) และโมเลกุลของแอนโทไซยานินที่มีการแทนที่ในตำแหน่งที่ 5 ภายในโครงสร้างจะไวต่อการสลายตัวเนื่องจากแสงเช่นกัน (von Elbe และ Schwartz, 1996) ซึ่งการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันแสงจะช่วยชะลอการสลายตัวของแอนโทไซยานินได้ (Skrede และ Wrolstad, 2002) นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยที่กล่าวถึงผลของออกซิเจนต่อค่าสีและแอนโทไซยานินในตัวอย่างน้ำแครนเบอร์รี่ (Starr และ Francis, 1968) และ broth ที่เตรียมจากรำข้าวบาร์เลย์ (Deguchi และคณะ, 2000) ซึ่งออกซิเจนจะทำให้แอนโทไซยานินเกิดการสลายตัว

เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันกล่าวคือ สารประกอบที่ถูกออกซิไดซ์จะไปทำปฏิกิริยากับแอนโทไซยานิน ได้เป็นแอนโทไซยานินในรูปที่ไม่มีสีหรือเกิดเป็นสารสีน้ำตาลขึ้น โดยเฉพาะในระบบที่มีออกซิเจนและวิตามินซีอยู่ร่วมกัน วิตามินซีจะถูกออกซิไดซ์และทำให้เกิดไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่สามารถออกซิไดซ์แอนโทไซยานินได้ ดังนั้นการบรรจุแบบสุญญากาศจะทำให้แอนโทไซยานินสลายตัวได้ช้าลง (Skrede และ Wrolstad, 2002)

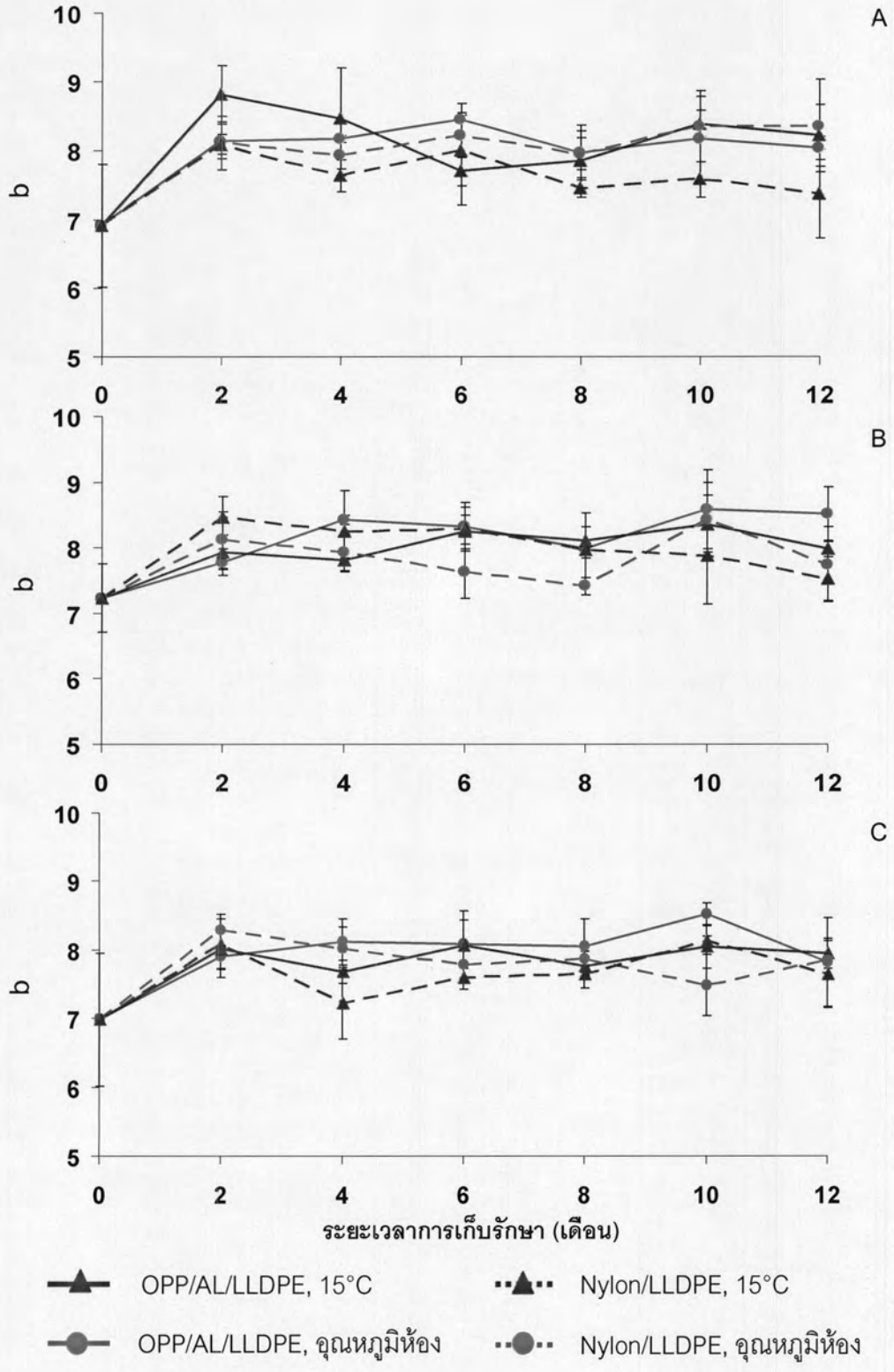
สำหรับในงานวิจัยนี้แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าสีของตัวอย่างระหว่างการเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ ยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน อาจเป็นเพราะในงานวิจัยนี้มีการเก็บตัวอย่างโดยการบรรจุแบบสุญญากาศ ทำให้มีปริมาณออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในบรรจุภัณฑ์เพียงเล็กน้อย การที่มีออกซิเจนในปริมาณน้อยจึงช่วยป้องกันการสลายตัวของแอนโทไซยานินได้ (Skrede และ Wrolstad, 2002) แม้ว่าบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด ที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีค่าการซึมผ่านของออกซิเจนต่างกัน กล่าวคือบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE มีค่าการซึมผ่านของออกซิเจนสูงกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิด OPP/AL/LLDPE (ตารางที่ 3.1) ปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษาอาจมีค่าน้อยจนไม่มีผลต่อการสลายตัวของแอนโทไซยานินมากนัก รวมทั้งความชื้นและค่า a_w ของตัวอย่างมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยแอนโทไซยานินจะมีความเสถียรในช่วง a_w ประมาณ 0.63-0.79 (von Elbe และ Schwartz, 1996) ซึ่งตัวอย่างมีค่า a_w ประมาณ 0.70-0.77 จึงทำให้ปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิในการเก็บรักษา ออกซิเจน หรือ แสง ไม่มีผลอย่างเด่นชัดต่อค่าสีของตัวอย่างเหมือนในงานวิจัยอื่น



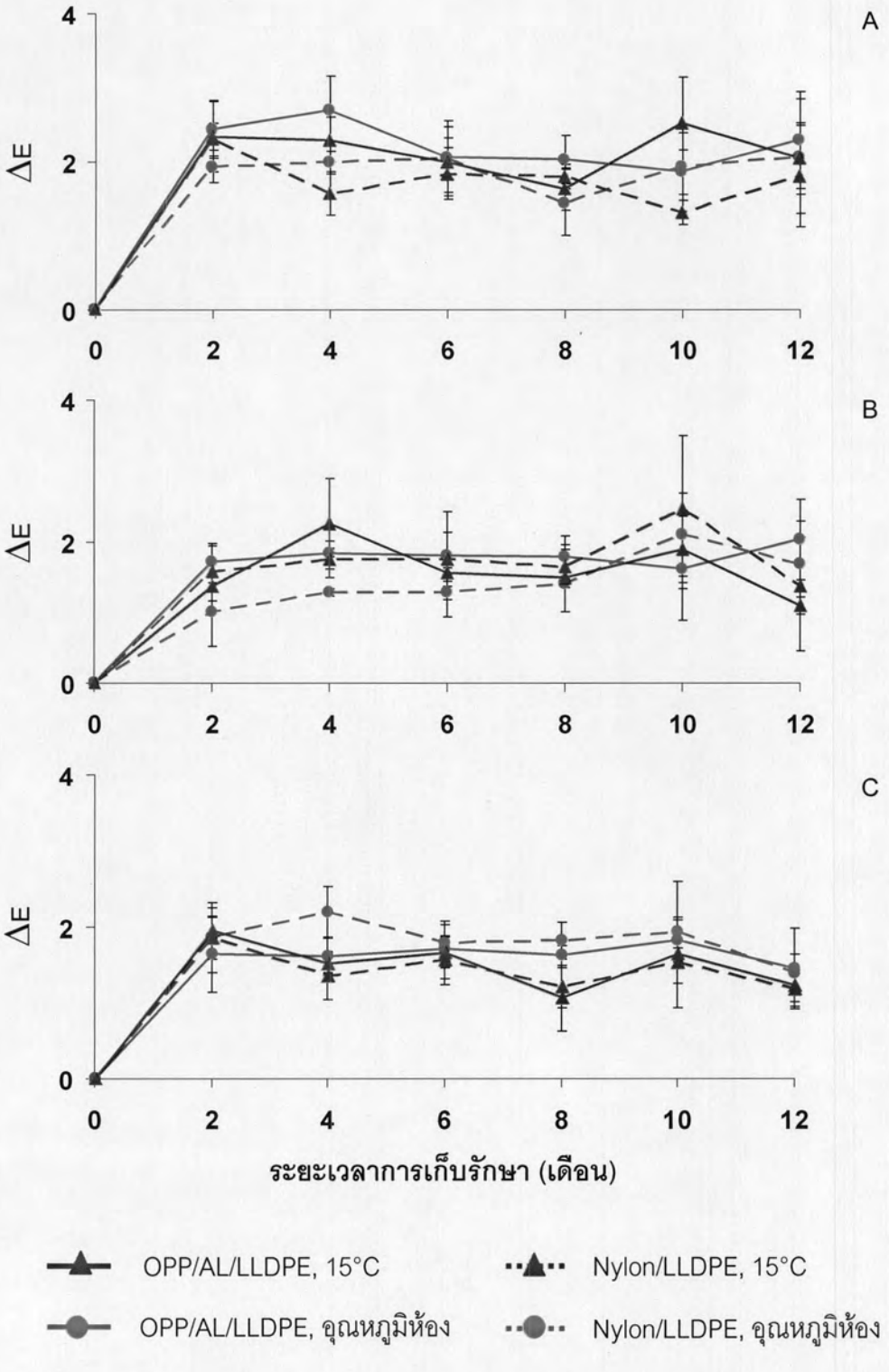
รูปที่ 4.6 ค่า L ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่ม (A) การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (B) และฟลูอิไดเซชัน (C) และเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน โดย error bar แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ



รูปที่ 4.7 ค่า a ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่ม (A) การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (B) และฟลูอิไดเซชัน (C) และเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน โดย error bar แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ



รูปที่ 4.8 ค่า b ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่ม (A) การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (B) และฟลูอิไดเซชัน (C) และเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน โดย error bar แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ



รูปที่ 4.9 ความแตกต่างของค่าสี (ΔE) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่ม (A) การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (B) และฟลูอิไดเซชัน (C) และเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน โดย error bar แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

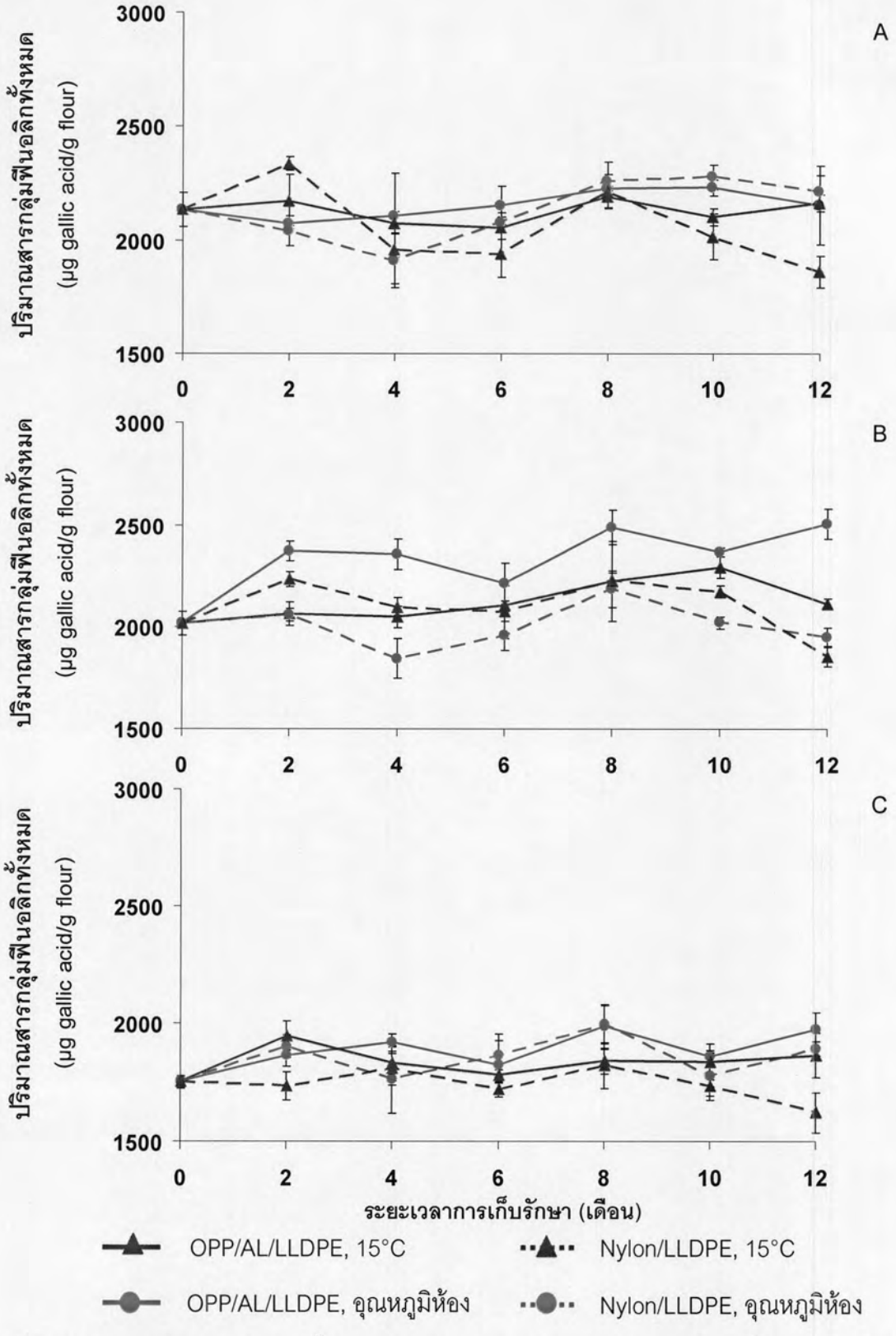
4.3.2 ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดง

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งแต่ละวิธีและเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค.10-ค.12) พบว่ามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากปัจจัยหลักหรืออิทธิพลร่วมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ระหว่าง 2 และ/หรือ 3 ปัจจัย (ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ง ตารางที่ ง.19-ง.27) แต่เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.10-4.12 พบว่าไม่สามารถสรุปแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างระหว่างการเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ ได้อย่างชัดเจน โดยในระหว่างการเก็บรักษาปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH (ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ) และ FRAP (กำลังการรีดิวซ์) อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงไม่เกิน 24% 20% และ 26% ของค่าเริ่มต้น (เดือนที่ 0) ตามลำดับ

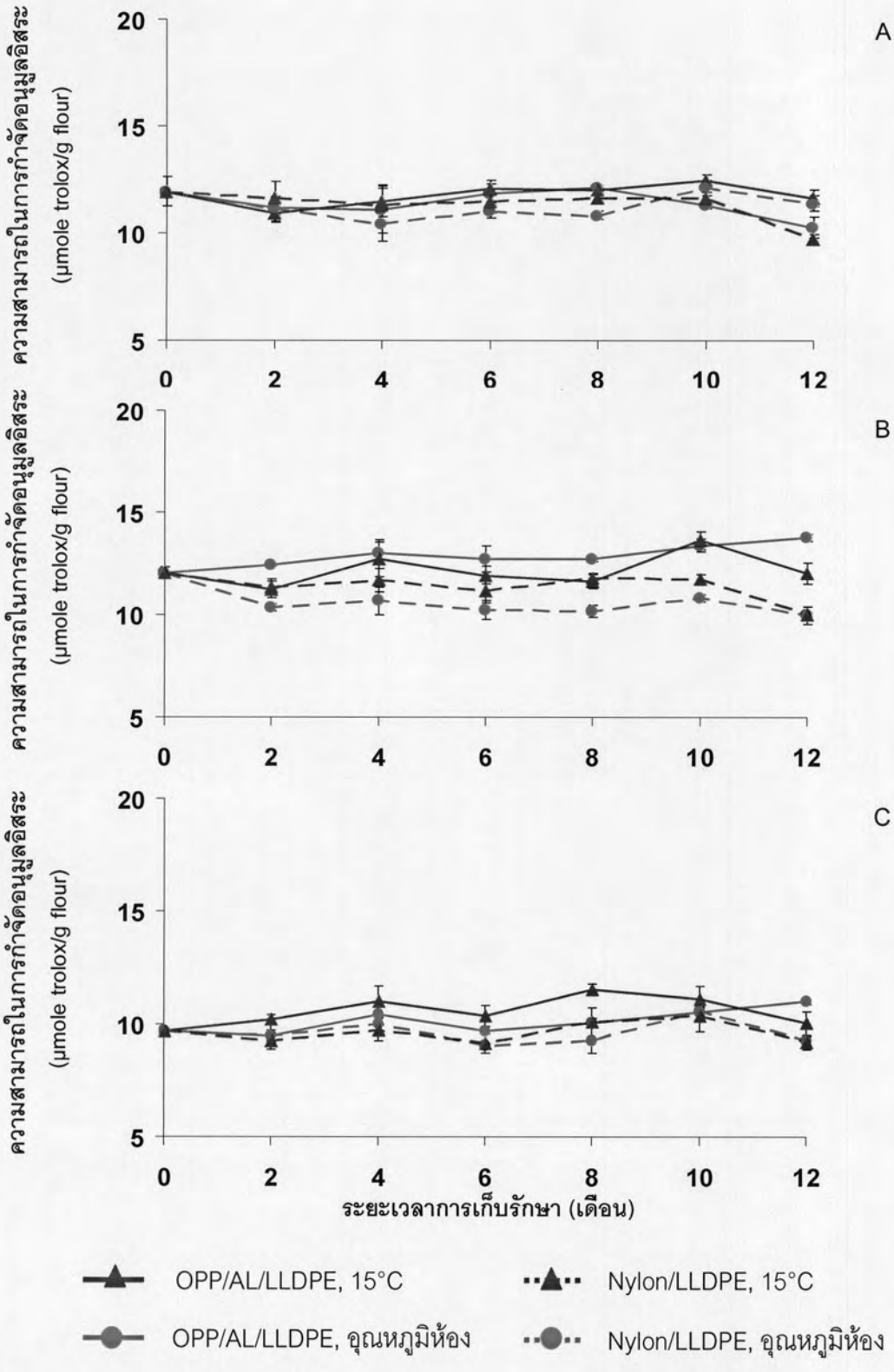
มีงานวิจัยได้รายงานถึงภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ดังเช่นที่พบในตัวอย่างข้าวโอ๊ต (Dimberg และคณะ, 1996) ที่ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษา (3.5 และ 15.5 เดือน) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ (30 55 และ 80% RH) ต่อปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งหมดพบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาและค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศไม่มีผลต่อปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งหมด กล่าวคือ ปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งหมดของตัวอย่างที่เก็บรักษาที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน และ/หรือเวลาต่างกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน ต่างจากงานวิจัยของ Zhou และคณะ (2004) ที่พบว่าปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวจะมีค่าลดลงเมื่อเก็บเป็นเวลา 6 เดือน โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37°C จะทำให้ปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งหมดลดลงมากกว่าการเก็บรักษาที่ 4°C อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) Ayala-Zavala และคณะ (2004) พบว่า เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างสตรอเบอรี่เป็นเวลา 13 วัน ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH) มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาการเก็บรักษาเมื่อเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 5°C และ 10°C ในขณะที่ตัวอย่างที่เก็บที่ 0°C มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันเพียงเล็กน้อย ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยของ Klimczak และคณะ (2007) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิ (8°C 28°C และ 38°C) และระยะเวลาในการเก็บรักษา (2 4 และ 6 เดือน) ต่อปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP) ในน้ำส้ม ซึ่งพบว่าปริมาณ

สารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (ทั้ง 2 วิธี) ในน้ำส้มจะมีค่าลดลงมากที่สุดในตัวอย่างที่เก็บรักษาที่ 38°C เป็นเวลา 6 เดือน ความแตกต่างของผลการทดลองที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากตัวอย่างมีลักษณะและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน รวมทั้งวิธีในการสกัดและวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ไม่เหมือนกันในแต่ละงานวิจัย

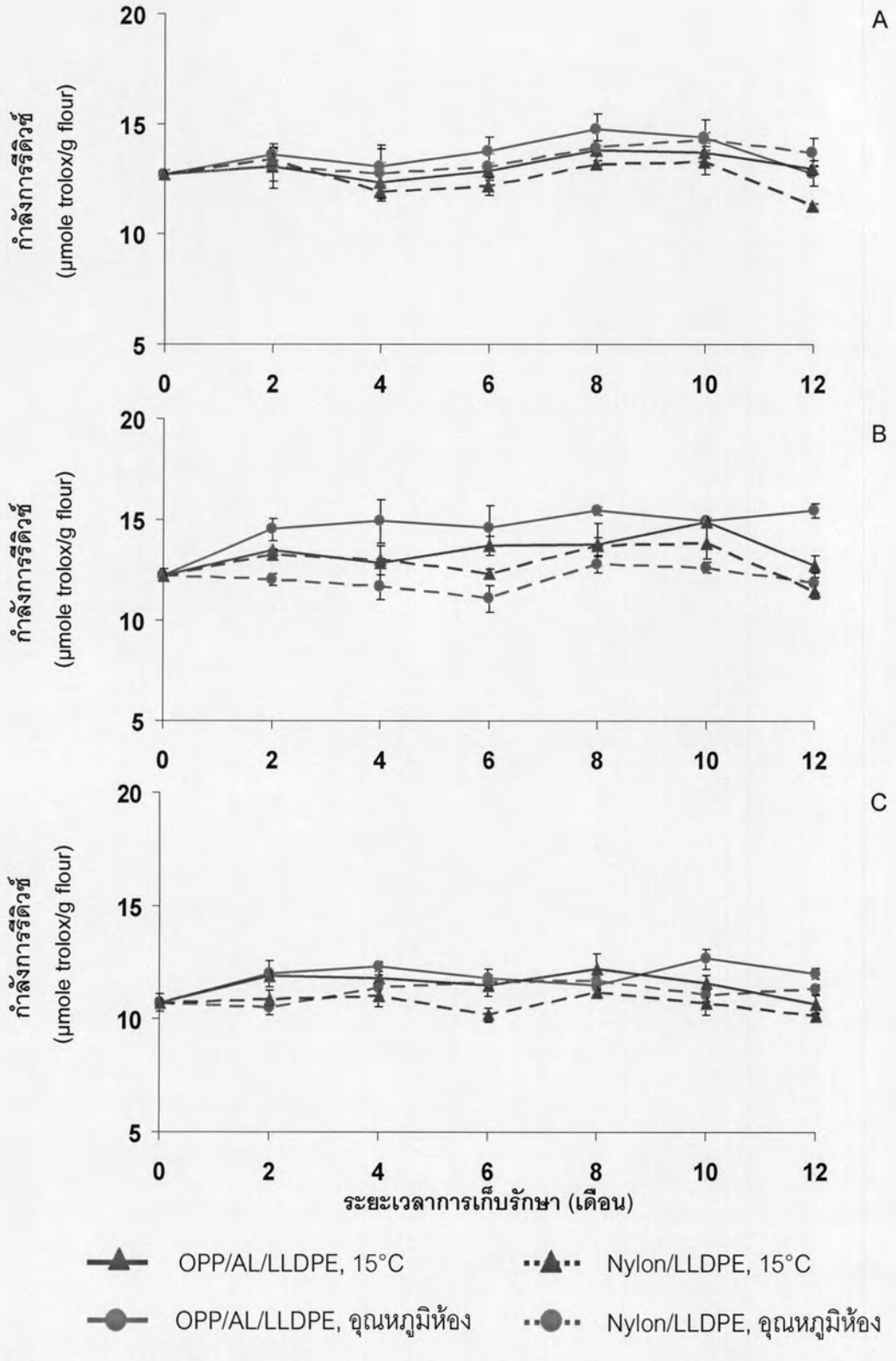
สำหรับในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถสรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างที่ชัดเจนได้ อาจเป็นเพราะความชื้นและค่า a_w ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงมีค่าต่ำและเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยระหว่างการเก็บรักษา อีกทั้งตัวอย่างมีการบรรจุแบบสุญญากาศ จึงอาจทำให้ปฏิกิริยาต่างๆ เกิดขึ้นได้อย่างช้าๆ และไม่เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของค่าที่ตรวจวัด อนึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันระหว่างการเก็บรักษาอาจเกิดปฏิกิริยาประเภท enzymatic หรือ non-enzymatic hydrolysis ซึ่งช่วยทำลายพันธะเอสเทอร์ของสารกลุ่มฟีนอลิกในรูปที่ถูกตรึง ทำให้มีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดในรูปอิสระเพิ่มขึ้น (Zhou และคณะ, 2004) นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสารกลุ่มฟีนอลิกระหว่างการเก็บรักษาอาจเกิดจาก enzymatic หรือ non-enzymatic oxidation (Nicoli และคณะ, 1999)



รูปที่ 4.10 ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่ม (A) การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (B) และฟลูอิไดเซชัน (C) และเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน โดย error bar แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ



รูปที่ 4.11 ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH) ของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่ม (A) การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (B) และฟลูอิไดเซชัน (C) และเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน โดย error bar แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ



รูปที่ 4.12 กำลังการรีดิวซ์ (วิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP) ของสารสกัดจากของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่ม (A) การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (B) และฟลูอิไดเซชัน (C) และเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน โดย error bar แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผันตรง (ตารางที่ 4.5) กล่าวคือ ตัวอย่างข้าวที่มีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดสูงมีแนวโน้มที่จะมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันสูงตามเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน เช่น งานวิจัยของ Choi และคณะ (2007) ที่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผันตรงระหว่างปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี ABTS และ reducing power ของสารสกัดจากธัญพืชและถั่วต่างชนิด (R^2 มีค่า 0.9973, $p < 0.01$ และ 0.9075, $p < 0.05$ ตามลำดับ) และงานวิจัยของประพันธ์ ปิ่นศิโรดม (2545) ที่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันระหว่างปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมดและค่า log EC_{50} ($r = -0.9494$) กล่าวคือ ตัวอย่างข้าวที่มีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมดสูงจะมีค่า EC_{50} ต่ำ (นั่นคือ มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันสูง) อย่างไรก็ดีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่วิเคราะห์ได้นั้นอยู่ในรูปอิสระ ซึ่งสกัดได้ด้วยตัวทำละลาย โดยสารกลุ่มฟีนอลิกในรูปอิสระนี้มีค่าน้อยกว่าสารกลุ่มฟีนอลิกในรูปที่ถูกตรึงที่พบในธัญพืช (Adom และ Liu, 2002) จึงอาจทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าไม่สูงมากนัก

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH) และกำลังการรีดิวซ์ (วิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP) ของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดง

รูปแบบความสัมพันธ์	ค่า Pearson correlation (r)
• ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด กับความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ	0.738*
• ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด กับกำลังการรีดิวซ์	0.853*

* มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$)

4.4 ผลของการหุงข้าวต่อสมบัติของข้าวกล้องหอมมะลิแดงหุงสุก

4.4.1 ค่าสี

ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุก แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่า ข้าวหุงมีค่า L ที่แสดงถึงความสว่างของค่าสี สูงกว่าข้าวดิบ ค่าความสว่างที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากในระหว่างการหุงข้าว เกิดการแพร่ของน้ำเข้าไปในเนื้อเมล็ดระหว่างการให้ความร้อนทำให้สตาร์ชเกิดเจลาทิไนเซชัน ซึ่งส่งผลต่อลักษณะปรากฏของเมล็ดข้าวโดยรวม (โดยเฉพาะค่าสี) สำหรับค่า a ที่แสดงระดับของสีแดง ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงรงควัตถุในกลุ่มแอนโทไซยานิน พบว่า มีค่าต่ำกว่าค่า a ของข้าวดิบ อาจเป็นเพราะความร้อนที่ใช้ในการหุงข้าว ที่มีอุณหภูมิสูงถึง 100°C ทำให้แอนโทไซยานินเกิดการสลายตัวได้และน้ำที่แพร่เข้าไปในเนื้อเมล็ด ยังมีผลในการเจือจางแอนโทไซยานินที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวด้วย จึงทำให้ค่า a ของข้าวหุงลดลง และค่า b ที่แสดงถึงระดับของสีเหลือง พบว่ามีค่าต่ำกว่าข้าวดิบเช่นเดียวกับค่า a ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าสีในแต่ละตัวอย่างของข้าวหุงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวดิบให้ผลไปในทางเดียวกัน จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าสีในข้าวหุงพบว่า ตัวอย่างมีค่า L และค่า a ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่ในกรณีของค่า b พบว่า ตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะไม่สามารถแยกความแตกต่างของระดับสีเหลืองในข้าวหุงได้

ตารางที่ 4.6 ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งและเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ

วิธีการทำแห้ง	ระยะเวลาการเก็บรักษา	อุณหภูมิการเก็บรักษา	บรรจุภัณฑ์	L		a		b	
				ข้าวดิบ^{ns}	ข้าวหุง^{ns}	ข้าวดิบ	ข้าวหุง^{ns}	ข้าวดิบ	ข้าวหุง
ในที่ร่ม	0	-	-	30.32 ± 1.09	36.54 ± 2.33	7.13^{c} ± 0.17	5.48 ± 0.29	6.77^{c} ± 1.01	3.79^{cd} ± 0.13
ใช้แสงอาทิตย์	0	-	-	31.10 ± 1.76	35.08 ± 1.83	7.48^{c} ± 0.09	6.36 ± 0.62	7.23^{c} ± 0.99	4.46^{a} ± 0.21
ฟลูอิไดเซชัน	0	-	-	30.48 ± 2.17	35.19 ± 1.35	7.19^{c} ± 0.26	6.22 ± 0.30	7.11^{c} ± 0.91	4.53^{a} ± 0.36
ใช้แสงอาทิตย์	6	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	30.29 ± 1.03	34.56 ± 1.03	7.53^{c} ± 0.29	5.61 ± 0.15	7.64^{abc} ± 0.92	3.74^{cd} ± 0.03
ใช้แสงอาทิตย์	6	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	30.79 ± 0.28	36.77 ± 2.27	8.82^{a} ± 0.57	5.44 ± 0.38	8.30^{ab} ± 0.83	4.26^{ab} ± 0.18
ใช้แสงอาทิตย์	6	15°C	Nylon/LLDPE	30.45 ± 1.03	37.90 ± 0.73	8.29^{ab} ± 0.47	5.59 ± 0.19	8.29^{ab} ± 0.81	3.62^{d} ± 0.23
ใช้แสงอาทิตย์	12	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	30.31 ± 1.51	34.97 ± 0.15	7.80^{bc} ± 0.53	5.64 ± 0.49	7.75^{abc} ± 1.02	3.90^{bcd} ± 0.29
ใช้แสงอาทิตย์	12	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	30.46 ± 0.45	34.56 ± 0.86	8.87^{a} ± 0.35	6.33 ± 0.52	8.52^{a} ± 0.77	4.18^{abc} ± 0.27
ใช้แสงอาทิตย์	12	15°C	Nylon/LLDPE	29.97 ± 1.10	36.93 ± 2.91	7.68^{bc} ± 0.39	5.97 ± 1.26	7.53^{abc} ± 0.90	3.68^{d} ± 0.27

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.4.2 ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงหุงสุก

4.4.2.1 ตัวอย่างที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์) ของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุก และเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าต่างๆ หลังการหุง แสดงดังตารางที่ 4.7-4.8 ซึ่งพบว่าปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างข้าวดิบ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ขึ้นอยู่กับภาวะการทำแห้งและการเก็บรักษา และไม่สามารถสรุปแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวได้ชัดเจน (ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.3.2) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างข้าวหุงสุกมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าดังกล่าวในข้าวดิบแต่ละตัวอย่างที่นำมาทดสอบ อย่างไรก็ดีพบว่า สำหรับทุกตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ การหุงข้าวทำให้ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP มีค่าลดลงใกล้เคียงกันคือ 79-82% 85-88% และ 81-85% ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสลายตัวของสารกลุ่มฟีนอลิกเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการหุงข้าวที่ประมาณ 100°C เป็นเวลานานถึง 30 นาที ในภาวะที่มีน้ำเกินพอ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองบางส่วนของ Pérez-Jiménez และ Saura-Calixto (2005) ที่ศึกษาปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (วิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP) ของสารสกัดจากข้าวดิบและข้าวสุกพบว่า การหุงข้าวทำให้ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าลดลง 84.16% แต่มีผลต่อฤทธิ์ต้านออกซิเดชันเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีค่าลดลง 31.85% ผู้วิจัยให้เหตุผลว่าสารกลุ่ม nonphenolic ที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันอาจละลายออกมาในระหว่างการหุงข้าว จึงทำให้ข้าวสุกมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันไม่แตกต่างจากข้าวดิบมากนัก เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การลดลงของปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดของตัวอย่างจากงานวิจัยดังกล่าวพบว่า มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้ แต่เปอร์เซ็นต์การลดลงของฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างจากงานวิจัยของ Pérez-Jiménez และ Saura-Calixto (2005) มีค่าน้อยกว่า อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของตัวอย่าง กล่าวคือข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันสูงกว่าข้าวในงานวิจัยดังกล่าวซึ่งเป็นข้าวไม่มีสี การหุงข้าวจึงอาจมีผลให้ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างลดลงมากกว่า

ตารางที่ 4.7 ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดในสารสกัดเมทานอลจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งและเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ

วิธีการทำแห้ง	ระยะเวลาการเก็บรักษา	อุณหภูมิการเก็บรักษา	บรรจุภัณฑ์	ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด (µg gallic acid/g flour)		
				ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก	เปอร์เซ็นต์การลดลง[ns]
ในที่ร่ม	0	-	-	$2134^{bc} \pm 74$	$379^{d} \pm 25$	82 ± 1
ใช้แสงอาทิตย์	0	-	-	$2017^{cd} \pm 60$	$412^{bc} \pm 8$	80 ± 1
ฟลูอิไดเซชัน	0	-	-	$1751^{f} \pm 24$	$378^{d} \pm 30$	78 ± 2
ใช้แสงอาทิตย์	6	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	$1958^{de} \pm 71$	$385^{d} \pm 8$	80 ± 0
ใช้แสงอาทิตย์	6	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	$2212^{b} \pm 100$	$444^{ab} \pm 14$	80 ± 1
ใช้แสงอาทิตย์	6	15°C	Nylon/LLDPE	$2073^{cd} \pm 129$	$395^{d} \pm 43$	81 ± 3
ใช้แสงอาทิตย์	12	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	$1951^{de} \pm 43$	$407^{bc} \pm 19$	79 ± 1
ใช้แสงอาทิตย์	12	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	$2502^{a} \pm 74$	$473^{a} \pm 23$	81 ± 1
ใช้แสงอาทิตย์	12	15°C	Nylon/LLDPE	$1852^{ef} \pm 45$	$393^{d} \pm 26$	79 ± 1

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

เปอร์เซ็นต์การลดลง คำนวณจาก (ผลต่างของปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดจากข้าวดิบและข้าวหุงสุก / ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดจากข้าวดิบ) x 100

a, b, c, ... ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

[ns] ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดเมทานอลจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งและเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ

วิธีการทำแห้ง	ระยะเวลาการเก็บรักษา	อุณหภูมิการเก็บรักษา	บรรจุภัณฑ์	ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (µmole trolox/g flour)			กำลังการรีดิวซ์ (µmole trolox/g flour)		
				ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก	เปอร์เซ็นต์การลดลง	ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก	เปอร์เซ็นต์การลดลง
ในที่ร่ม	0	-	-	$11.95^{b} \pm 0.69$	$1.46^{bc} \pm 0.00$	$87.8^{a} \pm 0.8$	$12.70^{b} \pm 0.22$	$1.96^{de} \pm 0.04$	$84.5^{a} \pm 0.6$
ใช้แสงอาทิตย์	0	-	-	$12.03^{b} \pm 0.30$	$1.51^{b} \pm 0.04$	$87.4^{a} \pm 0.6$	$12.23^{bc} \pm 0.34$	$2.03^{de} \pm 0.05$	$83.4^{abc} \pm 0.5$
ฟลูอิไดเซชัน	0	-	-	$9.66^{d} \pm 0.11$	$1.39^{c} \pm 0.08$	$85.7^{b} \pm 0.8$	$10.72^{e} \pm 0.38$	$1.92^{e} \pm 0.12$	$82.0^{bcd} \pm 1.7$
ใช้แสงอาทิตย์	6	อุณหภูมิห้อง	NY/LLDPE	$10.23^{d} \pm 0.48$	$1.47^{bc} \pm 0.06$	$85.6^{b} \pm 0.1$	$11.09^{de} \pm 0.67$	$2.02^{de} \pm 0.09$	$81.8^{cd} \pm 1.2$
ใช้แสงอาทิตย์	6	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	$12.74^{b} \pm 0.63$	$1.60^{a} \pm 0.04$	$87.4^{a} \pm 0.9$	$14.61^{a} \pm 1.07$	$2.36^{b} \pm 0.05$	$83.8^{ab} \pm 1.5$
ใช้แสงอาทิตย์	6	15°C	NY/LLDPE	$11.15^{c} \pm 0.59$	$1.45^{bc} \pm 0.02$	$86.9^{a} \pm 0.7$	$12.34^{bc} \pm 0.20$	$2.05^{cd} \pm 0.02$	$83.5^{abc} \pm 0.2$
ใช้แสงอาทิตย์	12	อุณหภูมิห้อง	NY/LLDPE	$9.88^{d} \pm 0.45$	$1.48^{b} \pm 0.04$	$85.2^{b} \pm 0.9$	$11.88^{bcd} \pm 0.50$	$2.04^{de} \pm 0.04$	$82.8^{abcd} \pm 1.0$
ใช้แสงอาทิตย์	12	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	$13.76^{a} \pm 0.17$	$1.66^{a} \pm 0.02$	$87.9^{a} \pm 0.3$	$15.47^{a} \pm 0.32$	$2.60^{a} \pm 0.04$	$83.2^{abc} \pm 0.6$
ใช้แสงอาทิตย์	12	15°C	NY/LLDPE	$10.01^{d} \pm 0.09$	$1.50^{b} \pm 0.07$	$85.0^{b} \pm 0.3$	$11.47^{cde} \pm 0.37$	$2.16^{c} \pm 0.07$	$81.2^{d} \pm 0.9$

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

%การลดลง คำนวณจาก (ผลต่างของฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวดิบและข้าวหุงสุก / ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวดิบ) x 100

a, b, c, ... ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.4.2.2 ตัวอย่างที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์

ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงหุงสุก ที่สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์และได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยเลียนแบบการย่อยตัวอย่างด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ แสดงดังตารางที่ 4.9 จากการทดลองพบว่า ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากตัวอย่างที่สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ โดยปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP) มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 16 เท่า และ 6 เท่า ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pérez-Jiménez และ Saura-Calixto (2005) ที่ได้ศึกษาปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากธัญพืชและผลิตภัณฑ์จากธัญพืช โดยใช้วิธีการสกัดตัวอย่างด้วยตัวทำละลายอินทรีย์และใช้การย่อยด้วยเอนไซม์ที่พบในระบบทางเดินอาหาร พบว่าปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างจากการย่อยด้วยเอนไซม์มีปริมาณสูงกว่าค่าที่ได้จากตัวอย่างที่สกัดจากตัวทำละลายอินทรีย์ โดยตัวอย่างจากการย่อยด้วยเอนไซม์มีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นประมาณ 2-15 เท่า และมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (วิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP) เพิ่มขึ้นประมาณ 2-5 เท่า และในงานวิจัยของ Serrano, Goñi และ Saura-Calixto (2007) ได้เปรียบเทียบฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากอาหารในกลุ่ม ผัก ผลไม้ ธัญพืช ผลไม้เปลือกแข็ง และถั่ว โดยสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์และย่อยด้วยเอนไซม์ วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP และ ABTS พบว่า ตัวอย่างที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันสูงกว่าตัวอย่างที่สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี ABTS โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1-6 เท่า และเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP พบว่า การย่อยด้วยเอนไซม์ทำให้มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของผัก ธัญพืช และผลไม้เปลือกแข็งเพิ่มขึ้นประมาณ 1-3 เท่า ในขณะที่ตัวอย่างจากผลไม้และถั่วที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันน้อยกว่าสารสกัดจากตัวทำละลายอินทรีย์จากตัวอย่างเดียวกัน การที่ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าสูงกว่าค่าที่พบในตัวอย่างที่สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ อาจเนื่องมาจากวิธีการย่อยตัวอย่างด้วยเอนไซม์มีการเลียนแบบภาวะการย่อยตัวอย่างในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งทำให้เกิดการย่อยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน และอาจช่วยปลดปล่อยสารกลุ่มฟีนอลิกในรูปที่ถูกตรึงที่มักจับอยู่กับคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนด้วย จึงทำให้ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดในรูปอิสระเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์จะไม่สามารถสกัดสารกลุ่มฟีนอลิกในรูปที่ถูกตรึงหรือสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ๆ เช่น condensed tannins จึงอาจมีสารเหล่านี้หลงเหลืออยู่ในกากได้

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกของตัวอย่างที่ย่อยด้วยเอนไซม์มีระดับการเพิ่มขึ้นมากกว่าการเพิ่มขึ้นของฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดเมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดที่ได้จากตัวทำละลายอินทรีย์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธี Folin-Ciocalteau ที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด สามารถวิเคราะห์สารที่มีหมู่ฟีนอลิกที่มีอยู่ในตัวอย่าง เช่น กรดอะมิโนได้ จึงอาจให้ค่าที่วิเคราะห์ได้สูงกว่าความเป็นจริง (Shahidi และ Naczk, 2004) อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาขั้นตอนในการใช้เอนไซม์ย่อยตัวอย่างในการทดลองนี้ พบว่ามีลำดับการย่อยตัวอย่างด้วยเอนไซม์ต่างจากที่พบในร่างกายมนุษย์ โดยในร่างกายนั้นการย่อยอาหารจะเริ่มจากเอนไซม์ α-amylase (ในน้ำลาย) ตามด้วยเอนไซม์ pepsin (ในกระเพาะอาหาร) และเอนไซม์ pancreatin (ในลำไส้เล็ก) (สุรวัฒน์ จริยาวัฒน์, 2545) แต่ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เอนไซม์ pepsin ย่อยตัวอย่างก่อนแล้วจึงใช้เอนไซม์ pancreatin และเอนไซม์ α-amylase ทั้งนี้เพื่อให้สะดวกต่อการปรับค่า pH ของตัวอย่าง โดยเริ่มจาก pH ต่ำ ไปถึง pH สูง

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการสกัดสารกลุ่มฟีนอลิกในงานวิจัยต่างๆ พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะนิยมสกัดตัวอย่างด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เพราะเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากและใช้เวลาสั้นกว่า (โดยเฉพาะการสกัดสารกลุ่มฟีนอลิกในรูปอิสระ) จึงนิยมใช้วิธีนี้ในการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของตัวอย่างและผลของกระบวนการแปรรูปต่อปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างจากพืช แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ค่าที่วิเคราะห์ได้อาจต่ำกว่าค่าที่ร่างกายควรได้รับจริง สำหรับวิธีการย่อยด้วยเอนไซม์แม้จะใช้เวลานานและมีความยุ่งยากกว่า แต่สามารถให้ข้อมูลในเชิงชีวปริมาณออกฤทธิ์ (bioavailability) ของสารกลุ่มฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของพฤกษเคมี (phytochemicals) ในร่างกายมนุษย์ได้มากกว่า เพราะค่าที่ได้น่าจะใกล้เคียงกับค่าที่ร่างกายจะได้รับจริงมากขึ้น จึงอาจประยุกต์ใช้กับงานวิจัยที่มุ่งพิจารณาประโยชน์ของสารกลุ่มฟีนอลิกต่อสุขภาพได้ และควรใช้กับตัวอย่างอาหารพร้อมบริโภค

ตารางที่ 4.9 ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงหุงสุกที่สกัดด้วยวิธีต่างกัน

วิธีการทำแห้ง	ระยะเวลาการเก็บรักษา	ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด (µg gallic acid/g flour)			ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (µmole trolox/g flour)			กำลังการรีดิวซ์ (µmole trolox/g flour)		
		สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์^{ns}	ย่อยด้วยเอนไซม์^{ns}	จำนวนเท่า^{ns}	สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์^{ns}	ย่อยด้วยเอนไซม์^{ns}	จำนวนเท่า^{ns}	สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์^{ns}	ย่อยด้วยเอนไซม์^{ns}	จำนวนเท่า^{ns}
ในที่ร่ม	0	379 ± 25	6219 ± 240	16 ± 2	1.46 ± 0.01	8.19 ± 0.33	5.6 ± 0.2	1.97 ± 0.04	12.52 ± 0.76	6.4 ± 0.41
ใช้แสงอาทิตย์	0	412 ± 8	6299 ± 87	15 ± 0	1.51 ± 0.04	8.27 ± 0.10	5.5 ± 0.1	2.03 ± 0.05	12.93 ± 0.65	6.4 ± 0.5
ฟลูอิไดเซชัน	0	378 ± 30	6135 ± 373	16 ± 1	1.39 ± 0.08	7.85 ± 0.52	5.7 ± 0.1	1.93 ± 0.12	11.88 ± 0.48	6.2 ± 0.5
ใช้แสงอาทิตย์	6	385 ± 8	6227 ± 147	16 ± 1	1.47 ± 0.06	8.05 ± 0.72	5.5 ± 0.7	2.01 ± 0.09	12.05 ± 0.21	6.0 ± 0.3
ใช้แสงอาทิตย์	12	407± 19	6217 ± 292	15 ± 1	1.48 ± 0.04	8.07 ± 0.49	5.5 ± 0.5	2.04 ± 0.04	12.12 ± 0.32	5.9 ± 0.2

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

จำนวนเท่า คำนวณจาก (ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดหรือฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างที่สกัดด้วยเอนไซม์ / ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดหรือฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างที่สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์)

^{ns} ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตัวอย่างที่ผ่านการเก็บรักษา จะบรรจุในบรรจุภัณฑ์ Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง