

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันผู้บริโภคดูแลสุขภาพมากขึ้น การบริโภคอาหารเสริมสุขภาพจึงมีแนวโน้มสูงขึ้น โยอาหารผงและผลิตภัณฑ์เสริมโยอาหารเป็นผลิตภัณฑ์ในกลุ่มอาหารเสริมที่มีผู้นิยมบริโภค เนื่องจากการบริโภคโยอาหารมีบทบาทสำคัญในการป้องกันการเกิดโรคต่าง ๆ เช่น โรคท้องผูก โรคกรดไหลย้อน ภาวะไขมันในเลือดสูง และโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ (Lairo และคณะ, 2004) เป็นต้น แหล่งของโยอาหารที่สำคัญได้แก่ ธัญพืช ผัก และผลไม้

กะหล่ำปลี (*Brassica oleracea* L. var. capitata) เป็นพืชตระกูลกะหล่ำ สามารถบริโภคได้หลายรูปแบบ เช่น บริโภคสด ประุงอาหารและแปรรูป กะหล่ำปลีเป็นแหล่งสำคัญของเส้นใยอาหารและสารพฤกษเคมีที่สำคัญ ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี เบต้าแคโรทีน วิตามินอี ซึ่งมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ และสารในกลุ่มกลูโคซิโนเลตซึ่งมีฤทธิ์ด้านมะเร็ง มีงานวิจัยมากมายที่รายงานว่า การบริโภคกะหล่ำปลีช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งหลายชนิด เช่น มะเร็งปอด มะเร็งลำไส้ใหญ่ มะเร็งเต้านม และมะเร็งต่อมลูกหมาก (Ciska และ Pathak, 2004; Higdon และคณะ, 2007)

ในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร กาบใบนอกของกะหล่ำปลีจะถูกทิ้งและนำมาใช้ประโยชน์เป็นเพียงอาหารสัตว์และปุ๋ย ทั้งที่เศษเหลือทิ้งยังคงมีสารอาหารที่เป็นประโยชน์ ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้เศษกะหล่ำปลีเหลือทิ้งจึงนำมาเป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตโยอาหารผงเสริมสุขภาพ โดยได้มีการศึกษาที่ผ่านมารายงานว่า โยอาหารผงที่ผลิตจากกากใบนอกกะหล่ำปลีมีโยอาหารทั้งหมดอยู่ถึง 43.1% (Jongaroontaprangsee และคณะ, 2007) นอกจากนี้ยังคงมีสารประกอบฟีนอลิกและวิตามินซี 78.44 มิลลิกรัม GAE/100 กรัม (ฐานแห้ง) และ 108.13 มิลลิกรัม/100 กรัม (ฐานแห้ง) (Nilnakara และ คณะ, 2007) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเศษเหลือทิ้งของกะหล่ำปลีมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตโยอาหารผง

โดยทั่วไปขั้นตอนการผลิตโยอาหารผงเริ่มจากการล้างทำความสะอาดวัตถุดิบและลดขนาดให้เล็กลงโดยการหั่นหรือบดเพื่อสะดวกในการอบแห้ง จากนั้นอาจจะทำการลวกหรือแช่สารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพของ

ผลิตภัณฑ์ก่อนการนำไปอบแห้งเพื่อให้ได้ความชื้นต่ำกว่า 9% (ฐานเปียก) หรือ 9.9% (ฐานแห้ง) แล้วนำไปบดให้มีขนาดในช่วง 125-450 ไมโครเมตร (Larrauri, 1999)

ในระหว่างกระบวนการผลิต กะหล่ำปลีต้องผ่านทั้งกระบวนการทางกลและทางความร้อนดังนั้นอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและสารพฤกษเคมีในกะหล่ำปลี สารพฤกษเคมีในกะหล่ำปลีประกอบไปด้วยสารหลายชนิดซึ่งมีสมบัติแตกต่างกัน เช่น ความสามารถในการละลายน้ำและความสามารถในการทนความร้อน (Pokorn และคณะ, 2001; Ball, 2006) วิตามินซีและสารประกอบฟีนอลิกสามารถละลายน้ำได้และไม่ทนความร้อนดังนั้นอาจเกิดการสูญเสียไปในระหว่างการลวก (Davey และคณะ, 2000; Singh และคณะ, 2007) Ismail และ Lee (2005) รายงานว่า การลวกกะหล่ำปลีด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 98 °C ส่งผลให้เกิดการลดลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและวิตามินซีอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเวลาลวกนานขึ้นทำให้การลดลงของสารประกอบฟีนอลิกและวิตามินซีมากขึ้น นอกจากนี้ได้มีรายงานว่า กลูโคซิโนเลตก็สามารถเกิดการสูญเสียไปในระหว่างการลวก เนื่องจากเอนไซม์ ความร้อนและละลายไปกับน้ำที่ใช้ลวก (Verkerk และคณะ, 2001; Wachtel-Galor และคณะ, 2008)

นอกจากนี้การอบแห้งยังส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีได้เช่นกัน Mrkic และคณะ (2006) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการอบแห้ง (50-100 °C) ต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิกและวิตามินซีในบร็อคโคลี่ จากการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นส่งผลให้การเสื่อมสลายของสารประกอบฟีนอลิกและวิตามินซีในระหว่างการอบแห้งสูงขึ้นเช่นกัน Katsube และคณะ (2008) รายงานว่า การอบแห้งใบหม่อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้สารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลง นอกจากนี้ Mrkic และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงของอินโดลกลูโคซิโนเลต (indole glucosinolates) ในบร็อคโคลี่ ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณกลูโคซิโนเลตลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น

เมื่อในกระบวนการผลิตโยอาหารผงจากเศษกะหล่ำปลีต้องผ่านกระบวนการทางกล เช่น การหั่น การบด และกระบวนการทางความร้อนเช่น การลวกและการอบแห้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษกะหล่ำปลีเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารมาเป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิต

โภชนาการส่งเสริมสุขภาพ โดยศึกษาถึงผลของกระบวนการแปรรูปต่อปริมาณสารพฤกษเคมี ที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาผลของกระบวนการ ได้แก่ การเตรียมตัวอย่างเบื้องต้น การลวก และการอบแห้ง ต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี เบต้าแคโรทีน วิตามินอี ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และกลูโคซิโนเลต

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาองค์ประกอบหลักทางเคมีและสารพฤกษเคมีในกาบใบกะหล่ำปลี
2. ศึกษาผลของการเตรียมการเบื้องต้นก่อนการอบแห้งต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี เบต้าแคโรทีน วิตามินอี ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และกลูโคซิโนเลต
3. ศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้งด้วยลมร้อน (60 70 และ 80 °C) ที่มีต่อสารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี เบต้าแคโรทีน วิตามินอี ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และกลูโคซิโนเลตที่พบในกาบใบนอกกะหล่ำปลี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ความเข้าใจกลไกการเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมสลายสารพฤกษเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแปรรูป จะนำไปสู่การพัฒนาและออกแบบกระบวนการแปรรูปที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโยอาหารผงเสริมสุขภาพ นอกจากการนำเศษพืชเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหารมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มจะช่วยลดต้นทุนการผลิตในส่วนของวัตถุดิบแล้ว ยังช่วยโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย ส่งผลให้ประเทศไทยมีการใช้ทรัพยากรอย่างมีคุณค่าและเป็นการประหยัดต้นทุนการผลิตในภาพรวมของประเทศ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กบใบนอกกะหล่ำปลีเป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากการผลิตและการบริโภค แต่เนื่องจากกบใบนอกกะหล่ำปลียังคงมีปริมาณสารพฤกษเคมีและใยอาหารในปริมาณที่สูงจึงมีการนำกบใบนอกกะหล่ำปลีมาแปรรูปเป็นใยอาหารผงเพื่อเพิ่มมูลค่าและเป็นการลดต้นทุนการผลิต อย่างไรก็ตามขั้นตอนการผลิตใยอาหารผงซึ่งมีทั้งกระบวนการทางกลเช่น การหั่นและกระบวนการทางความร้อนเช่น การลวก การอบแห้ง ดังนั้นในระหว่างขั้นตอนกระบวนการผลิตอาจส่งผลต่อปริมาณของสารพฤกษเคมี โดยรายละเอียดในหัวข้อต่างๆ มีดังนี้

2.1 กะหล่ำปลี

กะหล่ำปลีมีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Brassica oleracea* var. *capitata* จัดเป็นผักที่อยู่ในวงศ์ Brassicaceae (Cruciferae) หรือพืชตระกูลกะหล่ำ เป็นพืชล้มลุก ลำต้นสั้น ลักษณะหัวกลม ใบเรียงสลับซ้อนกันแน่นหลายชั้น แผ่นใบหนา (Decotean, 2000) แหล่งกำเนิดดั้งเดิมของกะหล่ำปลีอยู่ในแถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียน ต่อมาได้มีผู้นำเข้ามาเผยแพร่ในยุโรปและอเมริกา จนกระทั่งเข้ามาสู่ประเทศไทย กะหล่ำปลีสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ กะหล่ำปลีธรรมดา (cabbage, common cabbage, white cabbage) เป็นชนิดที่พบเห็นกันมากที่สุด นิยมบริโภคสด ประุงอาหารและแปรรูป มีความสำคัญทางเศรษฐกิจมากกว่ากะหล่ำปลีชนิดอื่น ๆ กะหล่ำปลีแดง (red cabbage) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่ากะหล่ำปลีม่วง มีลักษณะหัวค่อนข้างกลม ใบมีสีม่วงแดง เนื่องจากมีสาร Anthocyanin มาก มักใช้เป็นผักสลัดประกอบอาหาร และกะหล่ำปลีใบย่น (Savoy cabbage) มีผิวใบหยิกย่นและเป็นคลื่นมากกว่ากะหล่ำปลีธรรมดา สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นเดียวกับกะหล่ำปลีทั่วไป (Ghosh และ Madhavi, 1998)

กะหล่ำปลีมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำซึ่งมีอยู่ประมาณ 91% คาร์โบไฮเดรต 5% โปรตีนและอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 นอกจากนี้กะหล่ำปลียังเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น วิตามินซี สารประกอบฟีนอลิก เบต้าแคโรทีนและสารที่มีฤทธิ์ต้านมะเร็ง เช่น กลูโคซิโนเลต (Ghosh และ Madhavi, 1998; Song และ Thornalley, 2007; Chen และ Andreasson, 2001)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของกะหล่ำปลี

ที่มา: Ghosh และ Madhavi, 1998

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัม, ฐานสด)
น้ำ	90.7
ไนโตรเจนทั้งหมด	0.23
โปรตีน	1.4
ไขมัน	0.2
คาร์โบไฮเดรต	5.0
แป้ง	0.1
น้ำตาลทั้งหมด	4.9
ใยอาหาร	2.1

2.2 ใยอาหาร (Dietary fiber)

ใยอาหารเป็นส่วนของพืชผักที่เราบริโภคเข้าไปแต่ร่างกายไม่สามารถย่อยได้ เนื่องจากใยอาหารเป็นสารประกอบของน้ำตาลเชิงซ้อนที่มีโมเลกุลใหญ่มาก มีโครงสร้างหลักและมีโมเลกุลของน้ำตาลอื่นๆ มาเกาะทางด้านข้างทำให้มีโครงสร้างซับซ้อนยิ่งขึ้น บางครั้งมีลักษณะแข็งเช่น เนื้อไม้จนย่อยไม่ได้ ส่วนประกอบของน้ำตาลในใยอาหาร เช่น กลูโคส กาแลคโตส ไซโลส แมนโนส ทั้งยังมีส่วนประกอบที่เป็นแอลกอฮอล์และส่วนประกอบอื่นๆ อีก เช่น กูมาริลและกรดกาแลคตูโรนิก เป็นต้น (ปาริชาติ สักกะทำนุ , 2541)

ใยอาหารแบ่งตามความสามารถในการละลายน้ำได้ 2 ชนิด คือชนิดที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber, IDF) และชนิดละลายน้ำ (Soluble dietary fiber, SDF) ซึ่งโดยทั่วไปพืชแต่ละชนิดจะมีใยอาหารทั้งสองชนิดอยู่ร่วมกัน หากแต่ถ้ามีใยอาหารชนิดใดมากกว่าก็จะแสดงสมบัติของใยอาหารชนิดนั้นชัดเจนมากกว่า (ประทุม พุทธิวิช และ พิมพาภรณ์ ไตรณรงค์สกุล, 2540; จรรยา วัฒนทวีกุล, 2545)

2.2.1 ใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber, IDF)

มีลักษณะเหนียว เคี้ยวยาก ซึ่งเป็นธรรมชาติของโครงสร้างของผนังเซลล์พืช อีกทั้งยังอุ้มน้ำได้ดีจึงช่วยเพิ่มปริมาตรของกากอาหาร ทำให้กากอ่อนนุ่ม เคลื่อนตัวผ่านลำไส้ได้เร็วขึ้น มีผลทำให้การถ่ายอุจจาระสะดวกขึ้น ใยอาหารไม่ละลายน้ำ ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (lignin)

เซลลูโลส เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืช ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนนับพันเชื่อมกันโดยพันธะ เบต้า-1,4-ไกลโคซิดิก (β -1,4-glycosidic linkage) (ลาวัลย์ นัทรวิรุฬ, 2539) เซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสเช่นเดียวกันกับในแป้งแต่ตัวเชื่อมด้วยพันธะที่ต่างจากแป้ง จึงไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของสัตว์กระเพาะเดี่ยว

เฮมิเซลลูโลส เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืช ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลเชิงเดี่ยว (Monosaccharide) ชนิดต่างๆ ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปเป็นจำนวนร้อยละ 1 โมเลกุล มีสมบัติในการละลายในสารละลายต่าง น้ำตาลเชิงเดี่ยวนี้แบ่งได้เป็นสองชนิดคือ เพนโทแซนส์ (Pentosans) และเฮกโซแซนส์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส (Non-cellulose hexosans) น้ำตาลเชิงเดี่ยวที่พบมากในเฮมิเซลลูโลส คือ ดี-ไซโลส (D-xylose) และดี-แมนโนส (D-manose) และมีไซค์เซนเป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น แอล-อะราบินโนส (L-arabinose)

ลิกนิน เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแอลกอฮอล์ที่พืชผลิตเมื่อแก่ขึ้น ทำให้ส่วนต่างๆ ของพืชมีโครงสร้างที่แข็งแรง เช่น เปลือกนอกของธัญพืช ซึ่งถูกทำลายในระหว่างกระบวนการขัดสี

2.2.2 ใยอาหารที่ละลายน้ำ (Soluble dietary fiber, SDF)

ใยอาหารที่ละลายน้ำเป็นส่วนหนึ่งของเซลล์พืชต่างๆ ไปอาจถูกย่อยได้บ้างจึงมีสมบัติในการสร้างความหนืด โดยใยอาหารอาจถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเจลและเคลือบผนังลำไส้ให้หนาขึ้น ทำให้การดูดซึมสารอาหารที่มีประจุลบล เช่น การดูดซึมน้ำตาล ส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดไม่สูงแบบเฉียบพลัน (จรรยา ทวีวัฒนทวีกุล, 2545) ชนิดของใยอาหารละลายน้ำ ได้แก่

กัม เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลของน้ำตาลจำนวนมากและในหมู่โมเลกุลน้ำตาลบางหมู่จะมีกลุ่มกรดคาร์บอนิก ไม่มีทางโครงสร้างทางเคมีที่แน่นอน

เพคติน พบมากในผนังเซลล์พืช ทำหน้าที่ยึดเซลล์ให้เชื่อมติดกัน เป็นโพลิเมอร์ของกรดกาแลกตอโรนิก (D-galacturonic acid) ซึ่งเชื่อมกันด้วยพันธะ แอลฟา-1,4-ไกลโคซิดิก (α -1,4-glycosidic linkage) และหมู่คาร์บอกซิล (COOH) บางส่วนถูกแทนที่ด้วยหมู่เมทิลเอสเทอร์ (COOCH₃) (วาสนา อ่อนหวาน, 2534) เพคตินพบมากในผนังเซลล์พืชโดยเฉพาะในผลไม้ เช่น แอปเปิ้ลและผลไม้ตระกูลส้ม ซึ่งมีเพคตินเป็นองค์ประกอบในปริมาณค่อนข้างสูง (รัชนี ดัชนีพานิชกุล, 2544)

นอกจากนี้ยังมีอนุลินซึ่งพบในหัวหอม เมล็ดข้าวสาลี และโอลิกโอแซคคาไรด์ ได้แก่ มอลโตเดรกตริน ฟรุกโตโอลิกโอแซคคาไรด์ และกาแลคโตโอลิกโอแซคคาไรด์ เป็นต้น (Thebaudin และคณะ, 1997)

2.2.3 แหล่งของใยอาหาร

แหล่งใยอาหารที่สำคัญ ได้แก่ ธัญพืช ผัก ผลไม้ ถั่วเมล็ดแห้ง ถั่วเปลือกแข็งและเมล็ดพืช (จรรยา วัฒนทวีกุล, 2545; Michael และคณะ, 1998) ธัญพืชมีใยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำในปริมาณสูง โดยเฉพาะข้าวกล้อง ข้าวโพด ข้าวสาลีไม่ขัดขาว รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่ทำจากธัญพืชดังกล่าว เช่น ขนมปังโฮลวีต ถั่วเมล็ดแห้งมีใยอาหารสูงทั้งชนิดที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ผักหลายชนิด เช่น แครอท ดอกกะหล่ำ ถั่วฝักยาว ผักกวางตุ้ง มีใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำสูง ส่วนผลไม้ เช่น ละมุด ฝรั่ง แอปเปิ้ลกล้วยน้ำว้า น้อยหน่า ส้ม มะนาวมีใยอาหารชนิดละลายน้ำได้ในปริมาณสูง (จรรยา วัฒนทวีกุล, 2545) ปริมาณใยอาหารในธัญพืช ผักและผลไม้ แสดงในตารางที่ 2.2

ปัจจุบันได้มีความสนใจนำเศษเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารผงบ Larrauri และคณะ (1996) ได้ศึกษาการผลิตอาหารผงบจากเปลือกมะม่วงซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไซร้พบว่า ได้อาหารผงบที่มีสมบัติการละลายน้ำและมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง นอกจากนี้ Chantaro และคณะ, 2008 รายงานว่า มีความเป็นไปได้ในการนำเปลือกแครอทมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารผงบเนื่องจากมีปริมาณอาหารทั้งหมดและสารต้านอนุมูลอิสระสูง

มีการนำใยอาหารผงที่ผลิตจากเศษเหลือทิ้งจากแหล่งต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ โดยเติมลงในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ปรุงสุก เพื่อเพิ่มน้ำหนักของผลิตภัณฑ์และปรับปรุงสมบัติการกักเก็บน้ำและไขมัน สำหรับผลิตภัณฑ์ทอด มีการเติมใยอาหารลงไปเพื่อลดปริมาณน้ำมันและเพิ่มปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Reghavendra และคณะ, 2006; Thebaudin และคณะ, 1997) นอกจากนี้ยังมีการเติมใยอาหารลงในผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้แก่ ขนมปั่นกรอบ ลูกกวาด เครื่องดื่ม ซอส ของหวาน โยเกิร์ต เพื่อเป็นสารเพิ่มเนื้อ (Bulking agent) (Larrauri, 1999)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณใยอาหารในธัญพืช ผักและผลไม้

ที่มา: ปาริชาติ สักกะทำนุ, 2541

ผักและผลไม้	ปริมาณใยอาหารทั้งหมด (กรัม/ 100 กรัม, ฐานสด)
รำข้าว	12.8
ข้าวกล้อง	2.1
ถั่วเขียว	26.7
ถั่วแดง	27.7
ถั่วลิสง	19.8
กะหล่ำดอก	2.2
กะหล่ำปลี	1.6
ข้าวโพดอ่อน	2.2
คะน้า	3.2
แครอท	4.0
ถั่วลันเตา	3.3
บรอกโคลี	2.9
ผักกาดขาว	1.9
กล้วยหอม	1.6
มะม่วงดิบ	2.7
ส้มเขียวหวาน	1.6
สับปะรด	1.2
องุ่น	1.1

2.3 สารพฤกษเคมีในผักและผลไม้

ผักและผลไม้เป็นแหล่งของสารพฤกษเคมีหลายชนิดที่มีฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ด้านมะเร็ง สารพฤกษเคมีทั้งหลายนี้มีบทบาทที่สำคัญในการป้องกันโรคต่างๆ (Song และ Thornalley, 2007)

2.3.1 สารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระ คือ โมเลกุลที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งรวมทั้งโมเลกุลที่เป็นอนุมูลอิสระ หรือที่ไม่เป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของโรคภัยเรื้อรังหลายชนิดของมนุษย์ ได้แก่ โรคมะเร็ง โรคหัวใจ โรคเบาหวาน และโรคอัลไซเมอร์ เป็นต้น (Zulueta และคณะ, 2007; Abeyasinghe และคณะ, 2007) อนุมูลอิสระเป็นโมเลกุลที่ไม่เสถียร เนื่องจากมีอิเล็กตรอนวงนอกไม่ครบคู่ ดังนั้นจึงมีความไวสูงในการเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ ข้างเคียง เนื่องจากต้องการดึงเอาอิเล็กตรอนจากโมเลกุลอื่นมาเป็นของตนเอง ดังนั้นปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระจึงเรียกได้ว่าเป็น ปฏิกิริยาลูกโซ่ อนุมูลอิสระเหล่านี้โดยทั่วไปจะทำลายชีวโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและกรดนิวคลีอิก เป็นต้น โดยทำให้โปรตีนหรือเอนไซม์ต่างๆ ในร่างกายไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ดีเอ็นเอหรือสารพันธุกรรมที่เปลี่ยนแปลงไป นำไปสู่การเป็นโรคมะเร็งในที่สุด (Ubando-Rivera และคณะ, 2005)

สารต้านอนุมูลอิสระจะทำหน้าที่ต่อต้านหรือยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ โดยสารต้านอนุมูลอิสระจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระแทนออกซิเจนหรือให้อิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระแทนโมเลกุลอื่นๆ ทำให้ได้ Antioxidant free radical ซึ่งจัดเป็นอนุมูลอิสระที่มีเสถียรภาพ จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อไป ปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเกิดได้น้อยลง (กฤติกา นรจิตร์, 2548) สารต้านอนุมูลอิสระแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ สารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถละลายในน้ำ เช่น ฟีนอลิกและวิตามินซี และสารต้านอนุมูลอิสระที่ละลายในไขมัน เช่น เบต้าแคโรทีนและวิตามินอี โดยฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของสารแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระ อุณหภูมิ ออกซิเจน และองค์ประกอบของอาหาร ได้แก่ ไขมัน โปรตีน และน้ำ (Pokorny และคณะ, 2001)

2.3.1.1 สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารกลุ่มใหญ่ พบทั่วไปในพืชแทบทุกชนิด มีบทบาทสำคัญในการทำให้เกิดกลิ่น สีและรสชาติในพืชผักและผลไม้ โครงสร้างทั่วไปของสารประกอบฟีนอลิก ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติกและมีหมู่แทนที่เป็นหมู่ไฮดรอกซี อย่างน้อย 1 หมู่ถือเป็น secondary metabolite ของพืช สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารที่มีบทบาทสำคัญเนื่องจากมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ด้านการอักเสบ ด้านการแพ้ และมีคุณสมบัติในการสลายลิ่มเลือด รวมไปถึงการเป็นสารต้านการก่อมะเร็งและสามารถลด

ความดันโลหิตจากฤทธิ์ขยายหลอดเลือด เหล่านี้เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (นวลศรี รักอริยะธรรม และ อัญญา เจนวิถีสุข, 2545) ในปัจจุบันพบสารประกอบฟีนอลิกซึ่งมีประมาณ 8,000 ชนิดในธรรมชาติ นับจากโมเลกุลอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก ฟีนิลโพรพานอยด์และฟลาโวนอยด์ ไปจนถึงโครงสร้างโพลีเมอร์ที่ซับซ้อน เช่น ลิกนิน เมลานิน และแทนนิน เป็นต้น สารประกอบฟีนอลิกที่สำคัญและพบมากในผักและผลไม้ได้แก่ ฟลาโวนอยด์

สารฟลาโวนอยด์พบอยู่ทั่วไปในพืชที่มีสีเขียวและพบในทุกส่วนของพืช ไม่ว่าจะเป็นใบ ราก เนื้อไม้ เปลือกต้น ดอก ผล หรือ เมล็ด ในสัตว์สามารถพบได้บ้าง โดยเชื่อว่ามาจากพืชที่บริโภคเข้าไปมากกว่าการเกิดชีวิตสังเคราะห์ในร่างกายของสัตว์เอง ฟลาโวนอยด์จัดเป็นสารสำคัญของกลุ่มโพลีฟีนอล มีสูตรโครงสร้างเป็นฟลาเวน (flavane) หรือ 2-ฟีนิลเบนโซไพแรน (2-phenylbenzopyran) ประกอบด้วยคาร์บอน 15 อะตอม เรียงกันเป็นระบบ $C_6C_3C_6$ โดยมีวงเบนซีน 2 วง จับกันด้วยคาร์บอน 3 อะตอม ซึ่งอาจจัดเรียงเกิดเป็นวงที่ 3 ทำให้โครงสร้างหลักที่ได้เหมือนโครงสร้างหลักของวิตามินอี แหล่งอาหารสำคัญที่มีสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์แสดงในตารางที่ 2.3

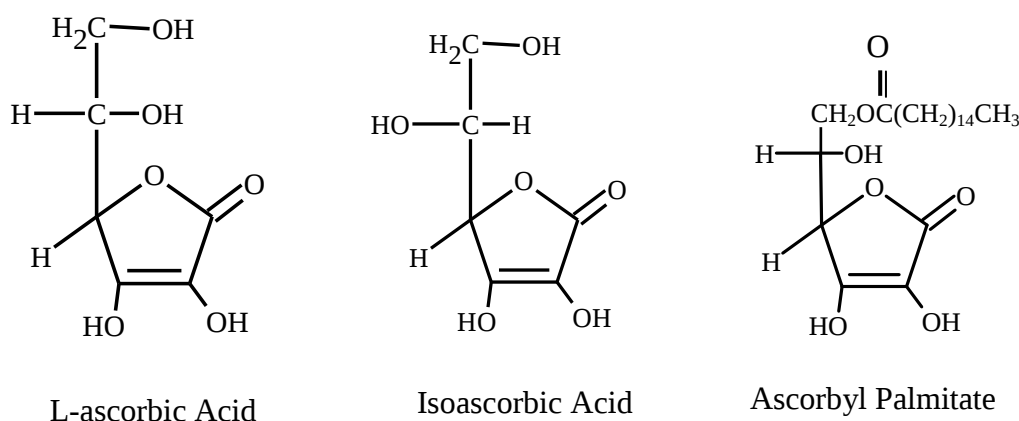
ตารางที่ 2.3 สารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่พบบ่อยและแหล่งอาหารที่พบมาก

ที่มา: นวลศรี รักอริยะธรรม และ อัญชนา เจนวิสิฐ, 2545

โครงสร้างหลัก	ชื่อสาร	แหล่งที่พบ
Flavone	Epicatechin Catechin Epicatechin gallate Epigallocatechin gallate	ชาเขียว ชาดำ ไวน์แดง
Flavonones	Naringin Taxfolin Fisetin Hesperetin	ผลของพืชตระกูลส้มมะนาว เปลือกของพืชตระกูลส้มมะนาว
Flavonols	Kaemferol Quercetin	ผักลึก (leek) บรอกโคลี เกรฟฟรุต ชาดำ แอปเปิ้ล เบอร์รี่ โอลีฟ ชา ไวน์แดง องุ่นแดง ไวน์แดง แคนเบอร์รี่
Flavones	Chrysin Apigenin	เปลือกไม้ ขึ้นฉ่าย (cerery) ผักชีฝรั่ง
Anthocyanin	Malvidin Cyanidin Apigenidin	องุ่นแดง ไวน์แดง เชอร์รี่ ราสเบอร์รี่ สตรอเบอร์รี่ องุ่นแดง ผลไม้และเปลือกไม้มีสีแดง
Phenylpropanoids	Ferulic acid Caffeic acid <i>p</i> -coumaric acid Chlorogenic acid	ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าว มะเขือเทศ ผักขม กะหล่ำปลี หน่อไม้ฝรั่ง องุ่นขาว ไวน์ขาว ผักขม กะหล่ำปลี หน่อไม้ฝรั่ง กาแฟ องุ่นขาว ไวน์ขาว มะเขือเทศ ผักขม กะหล่ำปลี หน่อไม้ฝรั่ง แอปเปิ้ล สาลี่ เชอร์รี่ ลูกพลัม มะเขือเทศ

2.3.1.2 วิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก

วิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลเฮกโซสซึ่งมีหลายโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปวิตามินซีจะหมายถึง L-ascorbic acid ซึ่งมีอะซิมเมตริกคาร์บอน 2 อะตอมจึงมี 4 สเตอริโอไอโซเมอร์ที่เป็นไปได้ ได้แก่ L-ascorbic acid, D-ascorbic acid, L-isoascorbic acid และ D- isoascorbic acid แต่ D-ascorbic acid, L-isoascorbic acid และ D- isoascorbic acid มีคุณค่าทางชีวภาพน้อยมากและไม่พบในธรรมชาติ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของวิตามินซีและอนุพันธ์ (Pokorny และคณะ, 2001)

วิตามินซีส่วนมากเป็นผลึกสีขาวหรือเหลืองซีด หลอมเหลวหรือสลายตัวที่อุณหภูมิ 190 °C (Ball, 2006) วิตามินซีสามารถละลายได้ดีในน้ำ (33 กรัม/100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 °C) ละลายได้เล็กน้อยในเอทานอลเข้มข้น 95% (3.3 กรัม/100 มิลลิลิตร) ไม่ละลายในตัวทำละลายไขมัน ได้แก่ อีเทอร์ (Ball, 2006; Moser และ Bendich, 1991) เนื่องจากวิตามินซีละลายน้ำได้ดี ดังนั้นวิตามินซีจึงสูญเสียได้ง่ายจากการล้าง การหั่น การปอกหรือการชำของพืชอาหาร นอกจากนี้วิตามินซียังเป็นสารรีดิวซิงเอเจนต์อย่างแรง จึงไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีและปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเอนไซม์ การสูญเสียที่สำคัญที่สุดหลังผ่านกระบวนการผลิตคือ เกิดการแตกหักทางเคมีโดยปัจจัยที่มีผลต่อการแตกหักทางเคมีของวิตามินซี ได้แก่ ออกซิเจน pH อุณหภูมิ และโลหะหนัก เช่น ทองแดงไอออนและเหล็กไอออน (Moser และ Bendich, 1991)

วิตามินซีมีประโยชน์ต่อร่างกายโดยมีส่วนสำคัญต่อกระบวนการสร้างโปรตีนคอลลาเจนในกระดูก กระดูกอ่อนและกล้ามเนื้อ นอกจากนี้ยังช่วยเสริมสร้างการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย วิตามินซีสามารถพบมากในผลไม้หลายชนิด เช่น ฝรั่ง มะนาว ส้ม ส่วนในผัก ได้แก่ บรอกโคลี พริกหยวก กะหล่ำปลี ปริมาณวิตามินซีในผักและผลไม้ชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณวิตามินซีในผักและผลไม้

ที่มา: นิธิยา รัตนานนท์, 2545; Ball, 2006

ผักและผลไม้	ปริมาณ (มิลลิกรัม/100 กรัม, ฐานสด)
ฝรั่ง	187
พริกหยวก (แดง)	155
พริกหยวก (เขียว)	134
บรอกโคลี	97
ส้ม (ฟลอริดา)	63
ดอกกะหล่ำ	63
ผักขม	52\
มะนาว	50
กะหล่ำปลี	42
กล้วย	19
เกรปฟรุต	24
มะเขือเทศ	14
มันฝรั่ง (ปอกเปลือก)	11

2.2.1.3 วิตามินอี

วิตามินอี หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า โทโคฟีรอล (tocopherol) เป็นวิตามินที่ละลายในไขมัน มีลักษณะเป็นของเหลว ในธรรมชาติมีวิตามินอีอยู่หลายชนิด ปัจจุบันแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ โทโคฟีรอลและโทโคไทรโอนอล (tocotrienol) แต่ละกลุ่มยังแยกเป็นวิตามินย่อยๆ อีก 4 ชนิด มีชื่อเรียกตามพยัญชนะในภาษา

ละตินว่า แอลฟา (α -) เบต้า (β -) แกมมา (γ -) และเดลต้า (δ -) แต่เดิมมีความเข้าใจว่าแอลฟา-โทโคฟีรอล เท่านั้นที่ทำหน้าที่เป็นวิตามินอี แต่ในปัจจุบันมีการศึกษาพบว่าโทโคไทรอินอลก็ทำหน้าที่ของวิตามินอีได้เช่นกัน

บทบาทที่สำคัญของวิตามินอี คือ สมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เมื่อวิตามินอีถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย จะถูกนำไปสะสมตามเซลล์ต่างๆ โดยมักสะสมอยู่บนผนังเซลล์ซึ่งเป็นด่านแรกในระบบป้องกันเซลล์ของร่างกาย คอยดักจับอนุมูลอิสระที่ผ่านจากเลือดเข้ามา นอกจากนี้วิตามินอียังช่วยด้านฤทธิ์ของสารก่อมะเร็งอื่นๆ เช่น สารไนโตรซามีน (nitrosamine) ได้ด้วย ดังนั้นผู้ที่ได้รับวิตามินอีจากอาหารเป็นประจำจึงมีความเสี่ยงต่อโรคหัวใจและมะเร็งน้อยกว่าผู้ที่ไม่ได้รับวิตามินอีเลย

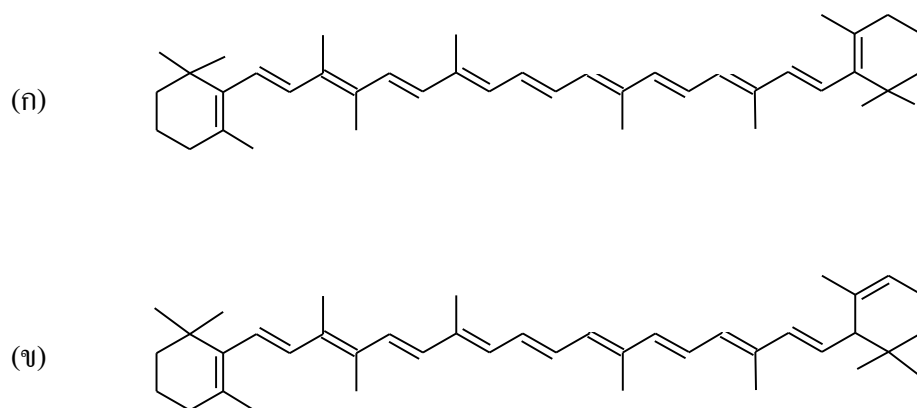
แหล่งของวิตามินอี ได้แก่ น้ำมันจากเมล็ดพืชต่างๆ เช่น เมล็ดข้าวโพด เมล็ดฝ้าย เมล็ดทานตะวัน ดอกคำฝอย ถั่วเหลืองและน้ำมันรำข้าว ฯลฯ นอกจากนี้ก็พบในถั่วต่างๆ เนย ปลา และเนื้อสัตว์ (โดยเฉพาะในตับ) ซึ่งจะพบวิตามินอีในรูปแอลฟา-โทโคฟีรอล ส่วนในผักที่มีสีเขียวปนเหลืองก็พบวิตามินอีบ้างแต่ไม่มากนัก เนื่องจากวิตามินอีไม่ทนต่อแสงแดดและออกซิเจน

2.2.1.4 แคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์เป็นสารสำคัญที่พบในคลอโรพลาสต์ของพืช มีบทบาทสำคัญเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง โดยทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยคลอโรฟิลล์ซึ่งอยู่ในคลอโรพลาสต์ในการรับพลังงานแสง ดังนั้นจึงพบว่าผักใบเขียวมีแคโรทีนอยด์ด้วยเช่นกัน สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์มีจำนวนหลายร้อยชนิดซึ่งให้ทั้งสีแดง ส้ม และเหลือง แคโรทีนอยด์แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ แซนโทฟิลล์และแคโรทีน

แซนโทฟิลล์ เช่น ลูทีน (lutein) ซีแซนทีน (zeaxanthin) และเบต้า-คริปโตแซนทีน (beta-cryptoxanthin) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำหน้าที่ป้องกันเลนส์ตาจากการทำลายของอนุมูลอิสระที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต อาหารที่มีแซนโทฟิลล์สูงโดยเฉพาะลูทีนและซีแซนทีน เช่น ผักขม บรอกโคลีและไข่ สามารถลดอัตราการเกิดต้อกระจกได้ถึง 20% และลดอัตราการเสื่อมทางสายตาดำได้ถึง 40% นอกจากนี้ลูทีนยังสามารถยับยั้งการเกิดมะเร็งลำไส้ได้ด้วย

แคโรทีน เช่น แอลฟาแคโรทีน เบต้าแคโรทีนและ แกมมาแคโรทีน มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะเบต้า-แคโรทีน (รูปที่ 2) ที่ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด เมื่อเบต้าแคโรทีนถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย เบต้า-แคโรทีนจะผ่านไปตามผนังของทางเดินอาหารและถูกเอนไซม์ย่อยเพื่อเปลี่ยนเป็นวิตามินเอก่อนที่จะถูกลำเลียงไปที่ตับ เบต้าแคโรทีน 1 โมเลกุลจะถูกเปลี่ยนไปเป็นวิตามินเอ 2 โมเลกุล ดังนั้นการที่เรารับประทานอาหารที่มีเบต้าแคโรทีนสูงจะทำให้ตับได้รับวิตามินเอตามความต้องการของร่างกาย ส่วนเบต้าแคโรทีนที่ไม่ถูกเปลี่ยนเป็นวิตามินเอก็จะยังคงถูกเก็บไว้ในส่วนของไขมันในร่างกายและนำไปใช้ประโยชน์ได้ อาหารที่เป็นแหล่งของแอลฟาแคโรทีนและเบต้าแคโรทีนแสดงในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.2 โครงสารของ (ก) เบต้าแคโรทีน (ข) แอลฟาแคโรทีน (Rao และ Rao, 2007)

ตารางที่ 2.5 ปริมาณแอลฟาแคโรทีนและเบต้าแคโรทีนในผักและผลไม้

ผักและผลไม้	ปริมาณ (มิลลิกรัม /100 กรัม, ฐานสด)		อ้างอิง
	แอลฟาแคโรทีน	เบต้าแคโรทีน	
แอปเปิ้ล	-	72	Setiawan และคณะ, 1999
กล้วย	-	97	Setiawan และคณะ, 1999
มะเขือเทศ	-	0.28	Kurilich และคณะ, 1999
กะหล่ำปลี	0.002	0.08	Kurilich และคณะ, 1999
คะน้า	0.06	4.86	Kurilich และคณะ, 1999
ดอกกะหล่ำ	-	0.07	Ball, 2006
บรอกโคลี	-	2.33	Ball, 2006
ผักขม	-	8.9	Ball, 2006
ถั่วเขียว	0.08	0.47	Ball, 2006

2.2.1.5 สารต้านอนุมูลอิสระในพืชตระกูลกะหล่ำ

พืชในตระกูลกะหล่ำหลายชนิด เช่น บรอกโคลี ดอกกะหล่ำ กะหล่ำปลี และคะน้า เป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี วิตามินอี และ แคโรทีนอยด์ (Kurilich และคณะ, 1999; Podsedek และคณะ, 2007) โดยปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระจะแตกต่างกันไปตามชนิดของผัก ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในพืชตระกูลกะหล่ำ

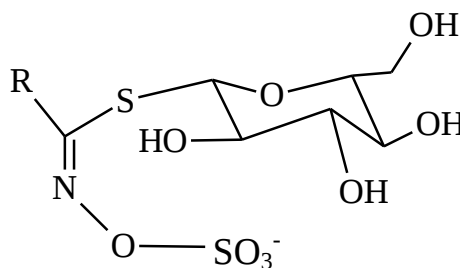
ผัก	สารประกอบฟีนอลิก ^d	วิตามินซี ^e	วิตามินอี ^e	เบต้า-แคโรทีน ^e
บรอกโคลี	63.4 ^b	52.9 ^b	0.47 ^b	0.81 ^b
ดอกกะหล่ำ	19.1 ^b	0.08 ^b	0.15 ^b	19.3 ^b
กะหล่ำปลี	18.7 ^b	9.65 ^b	0.08 ^b	0.05 ^b
Brussels sprouts	37.7 ^b	15.8 ^b	0.15 ^b	0.14 ^b
คะน้า	-	-	1.92 ^a	4.86 ^a
ผักกาดขาว	9.93 ^b	9.71 ^b	0.08 ^b	0.01 ^b

^aKurilich และคณะ, 1999, ^bSingh และคณะ, 2006, ^cZhang และคณะ, 2004

^dGallic acid equivalent/100 กรัม, ฐานสด, มิลลิกรัม /100 กรัม, ฐานสด

2.2.2 กลูโคซิโนเลต (Glucosinolates)

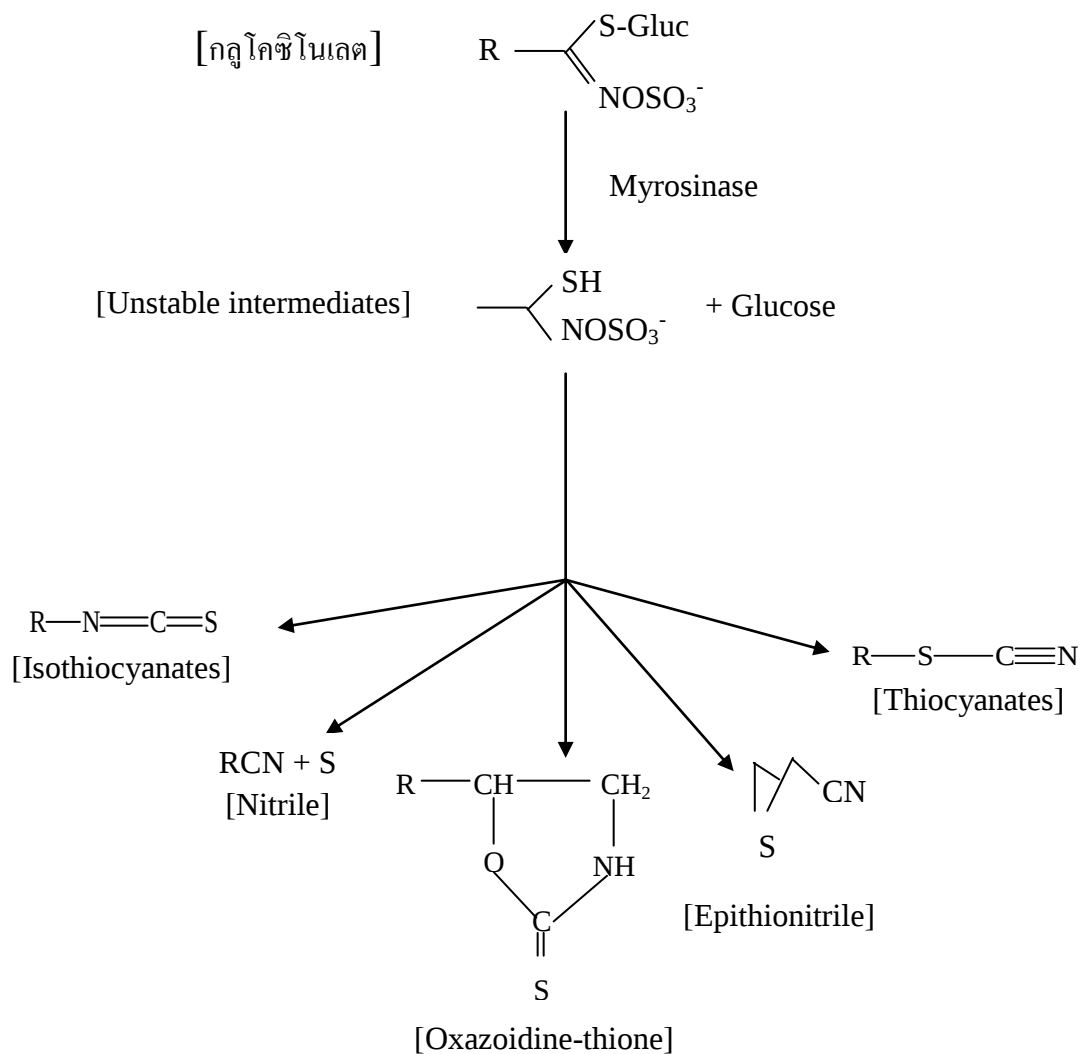
กลูโคซิโนเลตเป็นสารที่พบในพืชตระกูลกะหล่ำ มีโครงสร้างประกอบไปด้วย β -thioglucoside N-hydroxysulfate และ sulfur-linked β -D-glucopyranose ดังรูปที่ 2.3 กลูโคซิโนเลตสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของกรดอะมิโน โดยกลุ่มอะลิฟาติก (aliphatic) มาจากเมไธโอนีน กลุ่มอะโรมาติก (aromatic) หรือแอลคีนิล (alkenyl) มาจาก ฟีนิลอะลานีนหรือไทโรซีน และกลุ่มอินโดล (indole) มาจาก ทริปโตเฟน (Cartea และ Velasco, 2008)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโดยทั่วไปของกลูโคซิโนเลต (Chen และ Andreasson, 2001)

กลูโคซิโนเลตเป็นสารประกอบอยู่ในส่วนของพืชที่เรียกว่าแวคคิวโอ (vacuole) เป็นสารประกอบที่ค่อนข้างเสถียรแต่เมื่อเกิดการฉีกขาดของเซลล์พืช เอนไซม์ไมโรซิเนส (myrosinase) ที่อยู่ในเซลล์ไมโรซิน (myrocin) จะทำปฏิกิริยากับกลูโคซิโนเลตได้ผลิตภัณฑ์เป็น intermediates ที่ไม่เสถียร จากนั้น intermediates จะจัดเรียงตัวใหม่เป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด ได้แก่ ไธโอไซยาเนต (thiocyanates) ไอโซไธโอไซยาเนต (isothiocyanates) อีพิไธโอไนไตร (epithionitrile) ไนไตร (nitrile) และออกซาไอดีน-ไธโอน (oxazoidine-thione) (ดังรูปที่ 2.4) โดยชนิดของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น ความเป็นกรดค่า Fe^{+} และ โปรตีนอีพิไธโอสเปซิฟายเออร์ (epithiopecifier protein) ซึ่งมีการศึกษาทางด้านการแพทย์หลายงานที่รายงานว่า ไอโซไธโอไซยาเนต (isothiocyanates) มีฤทธิ์ยับยั้งการเกิดเซลล์มะเร็งหลายชนิด เช่น มะเร็งปอด มะเร็งลำไส้ มะเร็งเต้านม และมะเร็งต่อมลูกหมาก (Wennberg และคณะ, 2006; Volden และคณะ, 2009)

กลูโคซิโนเลตที่พบในพืชตระกูลกะหล่ำมีมากกว่า 110 ชนิด โดยปริมาณและชนิดของกลูโคซิโนเลตจะแตกต่างกันไปตามชนิดพืช พันธุ์พืช ส่วนของพืช สภาพการปลูกและการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว (Chen และ Pathak, 2004) Rosa (1997) ได้ศึกษาปริมาณของกลูโคซิโนเลตในแต่ละส่วนของพืชตระกูลกะหล่ำ เช่น กะหล่ำปลี คื่นห่าน และ rapeseed พบว่า ปริมาณกลูโคซิโนเลตในเมล็ดมีมากที่สุด รองลงมาคือที่ใบ รากและก้านตามลำดับ นอกจากนี้ Velasco และคณะ (2007) รายงานว่าปริมาณกลูโคซิโนเลตรวมและกลูโคซิโนเลตแต่ละชนิดในคื่นห่านแตกต่างกันไปตามระยะเวลาการเจริญเติบโต ปริมาณและชนิดกลูโคซิโนเลตในพืชตระกูลกะหล่ำแสดงในตารางที่ 2.7



รูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไฮโดรไลซ์กลูโคซิโนเลตด้วยไมโรซิเนส (Jones และคณะ, 2008)

ตารางที่ 2.7 ปริมาณและชนิดกลูโคซิโนเลตในพืชตระกูลกะหล่ำ

ที่มา: Kushad และคณะ, 1999

กลูโคซิโนเลต	ปริมาณ (ไมโครโมล/กรัม,ฐานสด)				
	บร็อคโคลี่	Brussels sprouts	กะหล่ำปลี	ดอกกะหล่ำ	คะน้า
Sinigrin	0.1	8.9	7.8	9.3	10.4
Gluconapin	1.0	6.9	0.7	0.3	1.0
Glucobrassicinapin	0.3	0.5	0.2	0.1	0.1
Progoitrin	1.0	2.4	0.2	0.3	0.6
Glucoiberin	0.1	-	-	-	-
Glucoraphanin	7.1	1.0	0.1	0.4	1.0
Glucobrassicin	1.1	3.2	0.9	1.3	1.2

2.4 การอบแห้ง

การอบแห้งหมายถึง การใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อกำจัดน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ในอาหารโดยการระเหยน้ำหรือการระเหิดของแข็งในการอบแห้งแบบระเหิด (freeze drying) วัตถุประสงค์ของการอบแห้งคือการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยการลดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (water activity) ซึ่งมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ นอกจากนั้นการลดน้ำหนักและปริมาณของอาหารยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาและขนส่ง เพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์และเพิ่มความสะดวกให้แก่ผู้บริโภค อย่างไรก็ตามการอบแห้งทำให้เกิดการสูญเสียทั้งคุณภาพการบริโภคและคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร (วิไล รังสาทอง, 2547)

2.4.1 การเคลื่อนที่ของน้ำในระหว่างการอบแห้ง

ในระหว่างการอบแห้ง น้ำในผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนตัวออกจากผลิตภัณฑ์มาที่ผิวหน้าของวัสดุ จากนั้นน้ำที่ผิวหน้าจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอระเหยออกไปสู่บรรยากาศ จากการศึกษพบว่ากลไกภายในของการไหลของของเหลวและผลของสภาพภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม มีส่วนเกี่ยวข้อง

กับการเคลื่อนตัวของน้ำในระหว่างการอบแห้ง การเคลื่อนที่ของน้ำในระหว่างการอบแห้งพบว่ามีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2537) ได้แก่

แรงผ่านช่องแคบ (capillary force) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกัน เป็นทางแคบๆ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของความดันภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ เกิดแรงดันทำให้น้ำเคลื่อนที่ตามช่องว่างระหว่างเซลล์

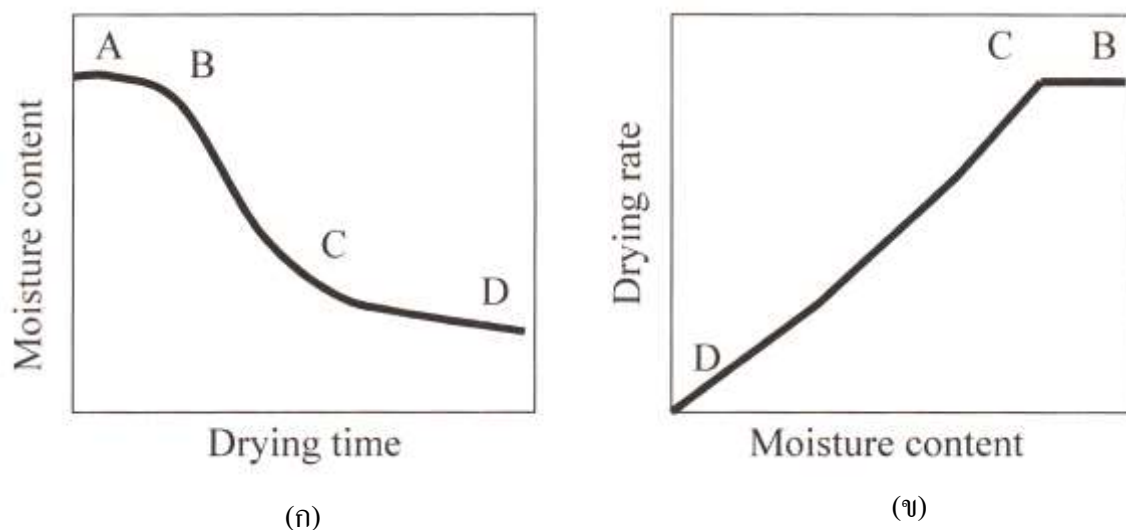
การแพร่ของของเหลว (liquid diffusion) เกิดเนื่องจากความแตกต่างของปริมาณน้ำในแต่ละตำแหน่งของ ผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำในผลิตภัณฑ์อาจจะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือไอ ถ้าเป็นของเหลวการเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นที่ต่างกันที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำได้ระเหยไปจาก ผิวหน้า นั่นคือ ความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาณน้ำลดลง

การแพร่ของไอน้ำ (water vapor diffusion) เกิดจากความแตกต่างของความดันย่อยของอากาศที่อยู่ในรูเปิด เล็กๆ มีลักษณะคงที่ แต่พอไอน้ำที่เกิดจากการระเหยของน้ำในระหว่างการอบแห้งแพร่ซึมผ่านเข้าไปยังรูเปิดเล็กๆ นี้ จะไปไล่อากาศจากบริเวณที่มีความดันไอน้ำสูงไปสู่ที่ความดันไอน้ำต่ำ

2.4.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จลนพลศาสตร์การอบแห้งคือ การอธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของวัตถุระหว่างการอบแห้งโดย แสดงได้จากกราฟการอบแห้งและกราฟอัตราการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยในช่วงแรกของการอบแห้งเป็นช่วงเวลาที่ทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง (AB) จากนั้นจึงเริ่มการทำแห้งโดยน้ำในผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากับน้ำที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ระเหยออกไปเรียกช่วงนี้ว่าเป็นช่วงอัตราเร็วคงที่ (constan rate period) ช่วง BC ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็วจนเกือบเป็นเส้นตรงจนกระทั่งความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงจนถึงความชื้นวิกฤต (critical moisture content), x_c (C) เป็นจุดที่อัตราการอบแห้งเปลี่ยนจากช่วงอัตราเร็วคงที่เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) ช่วง CD อัตราการอบแห้งในช่วงนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ หากปล่อยให้กระบวนการทำ

แห้งดำเนินต่อไปความชื้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าเท่ากับความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะการอบแห้งนั้นๆ (สุคนธ์ ศรีงาม, 2546)



รูปที่ 2.5 กราฟการอบแห้ง (ก) และกราฟอัตราการอบแห้ง (ข) (สุคนธ์ ศรีงาม, 2546)

2.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้ง

โดยทั่วไปแล้วปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำแห้งมีด้วยกันหลายปัจจัย อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญต่อระยะเวลาในการอบแห้ง การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งได้ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการอบแห้งทั้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง สำหรับช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยได้มากและทำให้อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง จึงเป็นการเพิ่ม Driving force สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ ทำให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น ส่วนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การใช้อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อัตราการแพร่ของน้ำในผลิตภัณฑ์สูงขึ้น จึงทำให้อัตราการทำแห้งสูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม การใช้ อุณหภูมิสูงอาจส่งผลเสียต่อผลิตภัณฑ์ได้ ความเร็วลมร้อนที่ใช้ในการทำแห้งมีผลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากผิวหน้าผลิตภัณฑ์ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วมจึงมีผลหลักต่อการทำแห้งเฉพาะในช่วงอัตราการการอบแห้งคงที่เท่านั้น นอกจากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ยังส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศยังส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ใน

อากาศทำให้ความแตกต่างระหว่างความดันไอที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์และความดันไอในอากาศลดลงเป็นเหตุทำให้ Driving force ในการเคลื่อนที่ของน้ำจากผิวหน้าผลิตภัณฑ์ลดลง พื้นที่ผิวหรือขนาดของผลิตภัณฑ์ที่จะทำการอบแห้ง เป็นปัจจัยที่บ่งบอกว่าการอบแห้งจะเร็วหรือช้า การตัดผลิตภัณฑ์ให้เป็นชิ้นเล็กๆ จะเป็นการลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของน้ำในผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น น้ำจึงเคลื่อนที่ออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย โครงสร้างของเซลล์ มีผลต่ออัตราการอบแห้งเช่นกัน เนื่องจากน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะอยู่ภายในเซลล์ แต่ก็ยังมีน้ำบางส่วนที่อยู่ระหว่างเซลล์ซึ่งกำจัดได้ง่ายกว่าน้ำที่อยู่ภายในเซลล์ ดังนั้นทำให้โครงสร้างของเซลล์แตก จะทำให้การอบแห้งทำได้ง่ายขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการทำให้เซลล์แตกอาจมีผลต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับ

2.5 ผลของกระบวนการผลิตต่อปริมาณสารพฤษเคมีในผักและผลไม้

สารพฤษเคมีแต่ละชนิดที่พบในผักและผลไม้มีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน เช่น ความสามารถในการละลายน้ำและไขมัน ความสามารถในการทนความร้อนและกระบวนการทางกลที่เกิดจากกระบวนการผลิต โดยขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้ วิธีการให้ความร้อนและระยะเวลาที่ให้ความร้อน ดังนั้นกระบวนการต่าง ๆ เช่น การหั่น การต้ม การลวก และการอบแห้งย่อมส่งผลต่อปริมาณสารพฤษเคมีได้เช่นเดียวกัน การหั่นเป็นกระบวนการขั้นต้นก่อนกระบวนการอื่นต่อไป กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ทำให้เซลล์พืชเกิดการฉีกขาดซึ่งส่งผลให้เกิดการลดลงของสารพฤษเคมีในผักและผลไม้ได้ Song และ Thornalley (2007) รายงานว่าปริมาณกลูโคซิโนเลตทั้งหมดในกะหล่ำปลีหั่นฝอยที่วางไว้ในอุณหภูมิห้อง (12-22 °C) เป็นเวลา 6 ชั่วโมงลดลงถึง 75%

การลวกเป็นกระบวนการที่สำคัญก่อนการนำไปประกอบอาหาร การแช่เย็นและการอบแห้ง เพื่อทำลายเอนไซม์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลและทำให้เวลาอบแห้งลดลง (Obob, 2005) การลวกทำให้ปริมาณกลูโคซิโนเลตในผักและผลไม้ลดลง เนื่องจากเกิดการสลายจากความร้อนและสูญเสียไปกับน้ำที่ใช้ลวก Ismail และคณะ (2004) ศึกษาผลของการลวกและการต้มต่อปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านสารอนุมูลอิสระในคะน้า ผักขม กะหล่ำปลีและหัวหอม จากการศึกษพบว่า ผักทุกชนิดที่ผ่านการต้มและการลวกมีปริมาณฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านสารอนุมูลอิสระน้อยกว่าผักที่ไม่ผ่านการต้มและลวก เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกสามารถละลายในน้ำได้และไม่ทนต่อความร้อน Ismail และ Lee (2005) รายงานว่าการลวกผักกะหล่ำปลี

โดยใช้เวลาในการลวกมากขึ้นส่งผลให้เกิดการเสื่อมสลายของสารประกอบฟีนอลิกและการลดลงของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากขึ้น นอกจากนี้ Wennberg และคณะ (2006) รายงานว่าผักกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกน้ำเดือด 5 นาทีมีปริมาณกลูโคซิโนเลตลดลง 50-74% Song และ Thornally (2007) รายงานว่า การต้มกะหล่ำปลีทำให้เกิดการสูญเสียกะหล่ำมากกว่าการนึ่งและการใช้ไมโครเวฟ เนื่องจากเกิดการสูญเสียไปกับน้ำที่ใช้ในการต้ม

การอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีได้เช่นกัน Mrkic และคณะ (2006) ได้ศึกษาอุณหภูมิการอบแห้ง (50-100 °C) ต่อสารประกอบฟีนอลิกและวิตามินซีในบรอกโคลี พบว่า เกิดการเสื่อมสลายของสารประกอบฟีนอลิกและวิตามินซีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น Katsube และคณะ (2008) รายงานว่า การอบแห้งแบบหม้อนึ่งที่อุณหภูมิสูงทำให้สารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลง นอกจากนี้ Mrkic และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงของอินโดลกลูโคซิเลต (indole glucosinolates) ในบร็อคโคลี ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณกลูโคซิโนเลตลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น

บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของกระบวนการเตรียมตัวอย่างเบื้องต้นและการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงสารพฤษเคมี โดยมีรายละเอียดวัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

กาบใบนอกของกะหล่ำปลี (*Brassica oleracea* L. var. capitata)

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เอทานอล ความเข้มข้น 95% (V/V) (บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี)
2. กรดไฮโดรคลอริก (บริษัท BHD ประเทศอังกฤษ)
3. กรดบอริก (บริษัท Riedel-de ประเทศเยอรมัน)
4. กรดซัลฟูริก (บริษัท BHD ประเทศอังกฤษ)
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี)
6. โซเดียมคาร์บอเนต (บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี)
7. เมทิลเรด (บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน)
8. เมทิลบลู (บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา)
9. เอนไซม์โปรตีเอส (บริษัท Sigma ประเทศสหรัฐอเมริกา)
10. เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (บริษัท Sigma ประเทศสหรัฐอเมริกา)
11. เอนไซม์แอลฟา อะไมเลส (บริษัท Sigma ประเทศสหรัฐอเมริกา)
12. กรดเมตาฟอสฟอริก (บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี)
13. ไดคลอโรมีเทน (บริษัท Lab scan ประเทศไทย)
14. อะซีโตนไนไตร์ คุณภาพระดับ HPLC (บริษัท Lab scan ประเทศไทย)
15. น้ำ คุณภาพระดับ HPLC (สิทธิพร แอสโซซิเอต จำกัด ประเทศไทย)
16. เมทานอล คุณภาพระดับ HPLC (บริษัท Lab scan ประเทศไทย)
17. สาร Folin-Ciocalteu (บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี)

18. กรดคลิโนเลอิก (บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา)
19. butylated hydroxytoluene
20. DEAE-Sephadex A-25 (บริษัท Sigma ประเทศสหรัฐอเมริกา)
21. Hydrogen peroxide (บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี)
22. Guaiacol (บริษัท Acros ประเทศเบลเยียม)
23. Catechol (บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา)
24. Polyvinylpyrrolidone (PVPP) (บริษัท Acros ประเทศเบลเยียม)
25. ไพริดีน (บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี)
26. กรดอะซิดิก (บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี)
27. ลีคอะซิเตด (บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา)
28. แบเรียมอะซิเตด (บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา)

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ 2 ตำแหน่ง (บริษัท Sartorius รุ่น BA4100S ประเทศเยอรมัน)
2. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ 4 ตำแหน่ง (บริษัท Mettler Toledo รุ่น AG204 ประเทศสวิสเซอร์แลนด์)
3. ตู้อบลมร้อน (บริษัท Termaks รุ่น TS8136 ประเทศนอร์เวย์)
4. ตู้ดูดควัน (Fume cupboard) (บริษัท Major Lab ประเทศสหรัฐอเมริกา)
5. โถดูดความชื้น (Desiccators)
6. เทอร์โมคัปเปิล ชนิด T
7. เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)
8. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (บริษัท Schoott รุ่น CG 841)
9. เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (บริษัท New Brunswick Scientific รุ่น Innova 4230 ประเทศสหรัฐอเมริกา)
10. เครื่องเหวี่ยงแยกสารแบบควบคุมอุณหภูมิ (refrigerated centrifuge) (บริษัท Hitachi รุ่น CR21 ประเทศญี่ปุ่น)
11. เครื่องผสม (vortex mixer) (บริษัท Scientific Industries Inc ประเทศสหรัฐอเมริกา)

12. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-spectrophotometer) (บริษัท Hirayama ประเทศญี่ปุ่น)
13. อุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ นาฬิกาจับเวลา เขียง มีด ฯลฯ

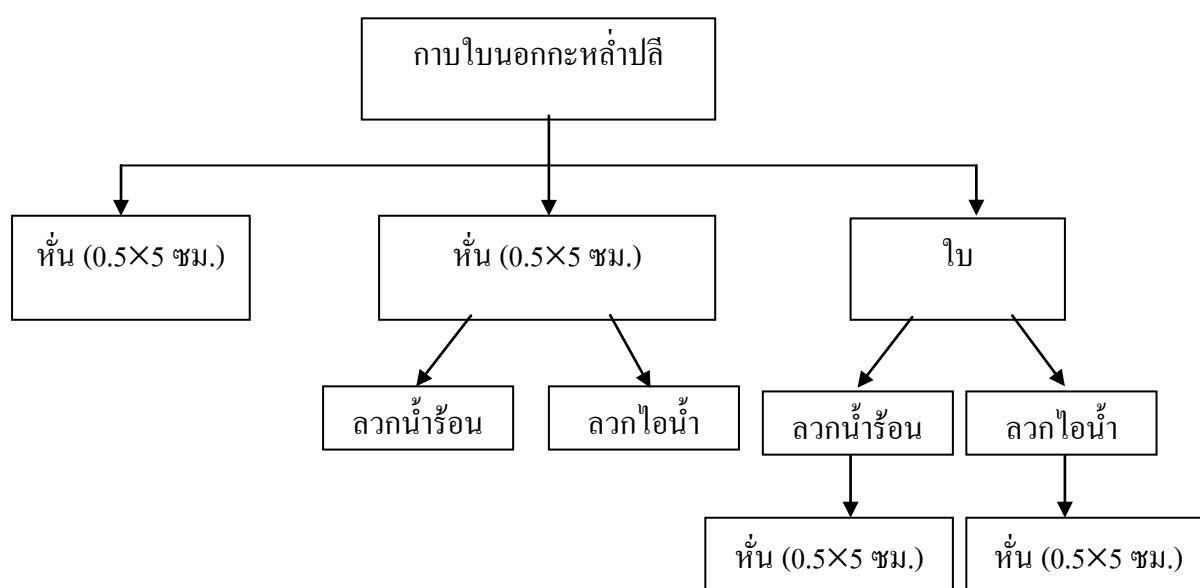
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การศึกษาองค์ประกอบหลักทางเคมีและสารพฤษเคมีในกาบใบกะหล่ำปลี

นำกาบใบกะหล่ำปลี (*Brassica oleracea* L. var. capitata) มาล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำไปวางบนตะแกรงเพื่อสะเด็ดน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทางเคมีและสารพฤษเคมี

3.4.2 การศึกษาผลของการเตรียมเบื้องต้นก่อนการอบแห้งต่อปริมาณสารพฤษเคมี

ศึกษาผลของการเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นต่อคุณภาพของกาบใบนอกของกะหล่ำปลีที่ผ่านการเตรียมเบื้องต้น โดยขั้นตอนของการเตรียมเบื้องต้นแสดงดังรูปที่ 1 คือการหั่นใบกะหล่ำปลีขนาด 0.5×5 ซม. ก่อนการลวกด้วยน้ำร้อนและไอน้ำและการลวกใบกะหล่ำปลีก่อนการลวกด้วยน้ำร้อนและไอน้ำก่อนการหั่น โดยมีกะหล่ำปลีหั่นฝอยขนาด 0.5×5 ซม. ที่ไม่ผ่านการลวกเป็นตัวอย่างควบคุม จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างเบื้องต้นมาอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 80°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ได้มีการรายงานโดย Nilnakara และคณะ (2009) ว่าเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตโยอาหารผงจากกาบใบนอกของกะหล่ำปลีแล้วนำไปวิเคราะห์สารพฤษเคมีเพื่อหาวิธีการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสม



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้น

การหาเวลาที่ใช้ในการลวก

เวลาที่ใช้ในการลวกพิจารณาจากเวลาในการลวกที่ทำให้เอนไซม์เปอร้ออกซิเดสซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลหมดไป โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ดัดแปลงจาก Fukumoto และคณะ (2002)

นำกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกด้วยน้ำและไอน้ำที่เวลาต่างๆ จำนวนตัวอย่างละ 15 กรัม ปั่นกับสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ pH 6.2 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่แช่เย็นพร้อมกับโพลิไวนิลโพลิไพลิดอน (polyvinylpolypyrrolidone หรือ PVPP) 2.25 กรัม เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นกรองด้วยผ้ากรองแล้วแยกเหวี่ยงด้วยความเร็ว $15,000 \times g$ ที่อุณหภูมิ 4°C นาน 10 นาที กรองส่วนใสด้วยกระดาษกรอง (Whatman เบอร์ 4) แล้วนำส่วนใสที่ได้ (ซึ่งมีเอนไซม์ละลายอยู่) วัดกิจกรรมเอนไซม์เปอร้ออกซิเดสและโพลิฟีนอลออกซิเดส ต่อไป

นำสารสกัดเอนไซม์ปริมาตร 0.25 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นของ guaiacol 0.4% และไฮโดรเจนเปอร้ออกไซด์ 0.04% (โดยมีสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ pH 6.2 เป็นตัวทำละลาย) 2.5 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้น ทุก 2 วินาที เป็นเวลา 30 วินาที นำความชันของกราฟที่เขียนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและเวลามาคำนวณกิจกรรมของเอนไซม์ ดังสมการ

$$\text{กิจกรรมของเอนไซม์ (unit)} = \frac{\text{ความชัน (Abs./นาที)}}{0.1 \text{ (Abs./นาที)}} \quad (3.1)$$

โดยกิจกรรมของเอนไซม์ 1 unit หมายถึงปริมาณเอนไซม์ที่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไป 0.1 หน่วยต่อ นาที จากนั้นคำนวณหากิจกรรมของเอนไซม์ (percent of remaining activity) โดยคำนวณจากกิจกรรมของเอนไซม์ในกะหล่ำปลีที่ลวกที่เวลาต่างๆ หารด้วยกิจกรรมของเอนไซม์ในกะหล่ำปลีสด แล้วคำนวณเป็น % ดังสมการ 3.2

$$\text{กิจกรรมเอนไซม์ที่วัดได้ (\%)} = \frac{\text{กิจกรรมเอนไซม์ในกะหล่ำปลีที่ลวกเวลาต่างๆ}}{\text{กิจกรรมเอนไซม์ในกะหล่ำปลีสด (unit)}} \quad (3.2)$$

3.4.3 การศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งต่อสารพฤกษเคมี

นำกะหล่ำปลีที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมจากการศึกษาในข้อ 4.2 บรรจุลงในถาดปริมาณ 200 กรัม ต่อถาด จำนวน 2 ถาด แล้วนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C จนกระทั่งความชื้นของตัวอย่างต่ำกว่า 9% (ฐานเปียก) หรือ 9.9% (ฐานแห้ง) (Larauri, 1999) ทำการสุมตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารพฤกษเคมีในระหว่างการอบแห้ง

นำกะหล่ำปลีที่มีความชื้นต่ำกว่า 9% (ฐานเปียก) หรือ 9.9% (ฐานแห้ง) มาลดขนาดอนุภาคให้อยู่ในช่วง 125-450 ไมโครเมตรเพื่อทำเป็นอาหารผง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารพฤกษเคมี

3.4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis)

ทำการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น ไขมัน โปรตีน เถ้า อาหาร และ คาร์โบไฮเดรต โดยวิธี AOAC (2000)

3.4.5 การวิเคราะห์ปริมาณอาหาร

วิเคราะห์ปริมาณอาหารทั้งหมด อาหารที่ไม่ละลายน้ำ และอาหารที่ละลายในน้ำได้ ด้วยวิธี เอนไซม์ติก-กราวิเมตริก (Enzymatic-gravimetric method) ตามวิธี AOAC 991.43 (AOAC, 2000) อธิบายรายละเอียดพอสังเขปได้ดังนี้ ทำการย่อยแบ่งของตัวอย่างแห้งด้วยเอนไซม์เอนไซม์แอลฟา อะไมเลส (α -amylase) หลังจากนั้น ย่อยโปรตีนและสตา์รซ์ในตัวอย่างด้วยเอนไซม์โปรตีเอส (Protease) และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase) ตามลำดับ จากนั้นกรองและล้างน้ำกลั่นส่วนที่ไม่ผ่านการกรองคืออาหารที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนที่ผ่านการกรองรวมทั้งน้ำที่ใช้ล้างจะมีอาหารที่ละลายน้ำผสมอยู่ นำส่วนที่ผ่านการกรองซึ่งรวมกับน้ำที่ใช้ล้างมาเติมด้วยเอทานอล 95% (V/V) ที่อุณหภูมิ 60 °C โดยใช้ปริมาตรของเอทานอลเป็น 4 เท่าของส่วนที่ผ่านการกรองรวมกับน้ำนั้นเพื่อตกตะกอนอาหารที่ละลายน้ำได้ จากนั้นนำไปกรองและล้างด้วยเอทานอล 78% และ 95% (V/V) และอะซีโตน ตามลำดับ กากที่ได้จากการกรองทั้งส่วนที่เป็นอาหารที่ไม่ละลายน้ำและละลายน้ำจะถูกล้างน้ำหนักหลังนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C นำกากส่วนที่กรองได้ไปหาโปรตีนด้วยวิธี Kjeldahl และหาเถ้า ด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 525 °C (AOAC, 2000) และทำแบบ

ลงค์เพื่อคำนวณปริมาณใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำและละลายน้ำ โดยคำนวณปริมาณใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ และใยอาหารที่ละลายน้ำจากสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$\% \text{ใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ}, \% \text{ใยอาหารที่ละลายน้ำ} = \frac{((\text{น้ำหนักของกาก-โปรตีน-เถ้า}) - \text{แบลลงค์}) \times 100}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง}} \quad (3.3)$$

$$\% \text{ใยอาหารทั้งหมด} = \% \text{ใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ} + \% \text{ใยอาหารที่ละลายน้ำ} \quad (3.4)$$

3.4.6 การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิก

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิก วิเคราะห์ตามวิธี Folin-Ciocalteu โดยเติมสารละลายผสมระหว่างอะซีโตน และน้ำในอัตราส่วน 1:1 (V/V) ปริมาตร 50 มิลลิลิตรลงในตัวอย่าง 5 กรัม จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า แบบควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °C ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm เป็นเวลา 15 ชั่วโมง กรองสารละลายตัวอย่างด้วย กระดาษกรอง (Whatman) เบอร์ 1 และปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยสารละลายผสมระหว่างอะซีโตน และน้ำ

เติมสารละลายตัวอย่าง 50 ไมโครลิตรลงในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 20 กรัม/มิลลิลิตร 0.75 มิลลิลิตร สาร Folin-Ciocalteu 250 ไมโครลิตร และน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตร จากนั้นทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร เปรียบเทียบปริมาณด้วยสารละลายมาตรฐานของกรดแกลลิก ซึ่งจะรายงานผลในหน่วย มิลลิกรัมเมื่อเทียบกับกรดแกลลิก (มิลลิกรัม gallic acid equivalent, มิลลิกรัม GAE) ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

3.4.7 การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซี

วิธีการสกัดวิตามินซีวิเคราะห์ตามวิธีใน AOAC (2000) โดยนำกากใบนอทะเล่ 1 กรัมมาสกัดด้วย กรด เมตาฟอสฟอริก 3% (W/V) จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง (Whatman) เบอร์ 2 และนำไปกรองด้วย Syringe filter รูกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร อีกครั้งเพื่อเตรียมไว้วิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีด้วยเครื่อง HPLC

การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีด้วยเครื่อง HPLC ใช้สภาวะตามคู่มือของคอลัมน์ Atlantis (C₁₈) ที่ใช้ในการทดลอง โดยปริมาตรสารที่ใช้สำหรับวิเคราะห์คือ 10 ไมโครลิตร อัตราการไหลของสารคือ 1 มิลลิเมตรต่อ นาที ใช้ดีเทคเตอร์แบบแสง UV ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 254 นาโนเมตร อุณหภูมิคอลัมน์ขณะที่ทำการวิเคราะห์คือ 30 °C ตัวทำละลายเคลื่อนที่เป็นกรดเมตาฟอสฟอริก 0.8% (W/V)

3.4.8 การวิเคราะห์เบต้าแคโรทีน

ปริมาณเบต้าแคโรทีนวิเคราะห์ตามวิธีของ Kurilich และคณะ (1999) โดยนำตัวอย่าง 1 กรัมบดด้วยเครื่องบดเป็นเวลา 1 นาที นำตัวอย่างใส่ในหลอดทดลองแล้วเติมบิวทิลไฮดรอกซีโทลูอิน (butylated hydroxytoluene) 1 กรัมและเอทานอลปริมาตร 10 มิลลิตร จากนั้นนำหลอดทดลองไปไว้ใน water bath เป็นเวลา 15 นาทีแล้วเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 80% (W/V) 180 ไมโครลิตร นำหลอดทดลองไว้ใน water bath ต่อไปอีก 30 นาทีแล้วนำหลอดทดลองจุ่มลงในน้ำเย็นทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยา เติมน้ำสารละลายผสมระหว่างเฮกเซนและโทลูอินในอัตราส่วน 10:8 ปริมาตร 2.5 มิลลิตรและน้ำปราศจากไอออน (deionize water) 2.5 มิลลิตร ผสมสารทั้งหมดให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex-mixer เป็นเวลา 20 วินาทีแล้วนำไปเหวี่ยงแยกชั้นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2100 rpm เป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิ 25°C นำสารที่แยกชั้นด้านบนทิ้งไปจากนั้นเติมน้ำสารละลายผสมระหว่างเฮกเซนและโทลูอินและน้ำปราศจากไอออน และหมุนเหวี่ยงเช่นเดิมอีก 2 ครั้ง นำสารสกัดที่รวมกันแล้วไประเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยที่อุณหภูมิ 50 °C จากนั้นละลายเบต้าแคโรทีนที่สกัดได้ด้วยอะซิโตนไนไตร 2 มิลลิตรและกรองด้วย Syringe filter รูกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตรเพื่อเตรียมไว้วิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยเครื่อง HPLC

การวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยเครื่อง HPLC ใช้สภาวะตามคู่มือของคอลัมน์ Symmetry (C₁₈) ที่ใช้ในการทดลอง โดยปริมาตรสารที่ใช้สำหรับวิเคราะห์คือ 10 ไมโครลิตร อัตราการไหลของสารคือ 1.5 มิลลิเมตรต่อ นาที ใช้ดีเทคเตอร์แบบแสง UV ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 450 นาโนเมตร อุณหภูมิคอลัมน์ขณะที่ทำการวิเคราะห์คือ 30 °C ตัวทำละลายเคลื่อนที่เป็นเมทานอลและน้ำในอัตราส่วน 90:10

3.4.9 การวิเคราะห์วิตามินอี

วิธีการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการการวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีน แต่ความยาวคลื่นของ UV ดีเทคเตอร์ เป็น 290 นาโนเมตร

3.4.10 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

3.4.10.1 การสกัดตัวอย่าง

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระวิเคราะห์ตามวิธีจาก Reddy และคณะ (2005) โดยเติมเอทานอลความเข้มข้น 90% ลงในตัวอย่างตัวอย่าง 10 กรัม จากนั้นนำไปแช่ด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง (Whatman) เบอร์ 1 แล้วนำกากที่เหลือจากการกรองไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 คืนแล้วนำไปสกัดด้วยเอทานอล 90% อีกครั้ง นำสารตัวอย่างสกัดทั้งสองครั้งรวมกันแล้วนำไปเพิ่มความเข้มข้นของสารตัวอย่างสกัดด้วยเครื่องระเหย (Rotary evaporator) เก็บสารตัวอย่างสกัดในขวดสีชา ที่อุณหภูมิ -4 °C

3.4.10.2 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH•

นำสารตัวอย่างสกัด 0.5 มิลลิลิตรเติมลงในสารละลายของ DPPH• ในเมทานอล (ความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมล) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ผสมสารทั้งสองด้วยเครื่อง vortex-mixer เป็นเวลา 30 วินาทีแล้วทิ้งไว้ที่มีดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร และวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างควบคุมโดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง คำนวณฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดังสมการ

$$\text{ร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ} = \left[\frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงตัวอย่างควบคุม} - \text{ค่าการดูดกลืนแสงตัวอย่าง}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงตัวอย่าง}} \right] \times 100$$

3.4.10.3 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี β -carotene bleaching

นำกรดลิโนเลอิก 40 มิลลิกรัมและ Tween 400 กรัมเติมลงในสารละลายเบต้าแคโรทีน (2 กรัม/คลอโรฟอร์ม 20 มิลลิลิตร) 2 มิลลิลิตร จากนั้นระเหยคลอโรฟอร์มด้วยก๊าซไนโตรเจนแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำอิมัลชัน

ออกซิเจนเป็น 100 มิลลิลิตรแล้วดูดสารละลายที่เตรียมไว้ลงในหลอดทดลองที่มีสารตัวอย่างสกัด 3 มิลลิลิตร ผสมสารด้วยเครื่อง vortex-mixer เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร จากนั้นนำหลอดทดลองไปให้ความร้อนด้วย water bath อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงอีกครั้ง วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างควบคุมโดยใช้เอทานอลแทนตัวอย่าง ค่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระคำนวณได้ดังสมการ

$$\% \text{การต้านอนุมูลอิสระ} = \left[1 - \frac{A_s^0 - A_s^{120}}{A_c^0 - A_c^{120}} \right] \times 100$$

โดยที่ A_s^0 และ A_s^{120} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่เวลา 0 และ 120 ตามลำดับ

A_c^0 และ A_c^{120} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างควบคุม ที่เวลา 0 และ 120 ตามลำดับ

3.4.11 การวิเคราะห์กลูโคซิโนเลตทั้งหมด

วิเคราะห์ปริมาณกลูโคซิโนเลตทั้งหมดวิเคราะห์ตามวิธีของ Declercq และ Daun (1989) โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.4.11.1 การสกัด

นำตัวอย่างจำนวน 1 กรัมใส่ลงในหลอดทดลองแล้ววางไว้ใน water bath ที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเติมน้ำเดือด 4 มิลลิลิตร ปิดฝาและผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex-mixer เป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไปวางไว้ใน water bath ที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 3 นาที หลังจากที่ทำให้เย็นด้วยน้ำเย็นนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบ 600×g เป็นเวลา 15 นาที เก็บส่วนที่เป็นของเหลวไว้และนำส่วนที่เป็นกากไปสกัดด้วยน้ำเดือด 4 มิลลิลิตรและนำไปหมุนเหวี่ยงอีกครั้ง จากนั้นเติมเบเรียม/ลิด อะซิเตด ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ปริมาตร 150 ไมโครลิตรลงในสารละลายสกัดที่รวมกันแล้วปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร

3.4.11.2 การเตรียมคอลัมน์ sephadex pyridine-acetate

นำ DEAE-Sephadex A-25 จำนวน 25 กรัม ใส่ลงใน syringe ขนาด 15×8 มิลลิเมตร เติมน้ำปราศจากไอออนลงไปแล้วกำจัดอากาศออกโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาทีแล้วทิ้งไว้ข้ามคืน ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ DEAE-Sephadex A-25 พองตัว จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ 5 มิลลิลิตร

ผ่าน syringe จากนั้นผ่านน้ำปราศจากไอออน (deionize water) 10 มิลลิลิตรลงไป จากนั้นเปลี่ยน DEAE-Sephadex A-25 ให้อยู่ในรูปไพรีดิน-อะซิเตต โดยผ่านสารละลายไพรีดิน-อะซิเตต ความเข้มข้น 5 โมลาร์ 5 มิลลิลิตรและตามด้วยน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร แล้วเติมสารสกัดที่เตรียมไว้ในข้อ 4.2.6.1 ปริมาตร 4 มิลลิลิตรลงไป จากนั้นผ่านโพแทสเซียมอะซิเตตความเข้มข้น 3 โมลาร์ 4.75 มิลลิลิตร 2 ครั้งโดยเก็บสารละลายส่วนนี้ไว้ปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร

3.4.11.3 การวิเคราะห์ปริมาณกลูโคซิโนเลตทั้งหมด

นำสารละลายสกัดในข้อ 4.4.11.2 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 70% ปริมาตร 7 มิลลิลิตรและสารละลายไทมอลความเข้มข้น 1% (W/V) 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex-mixer แล้วนำหลอดทดลองวางไว้ใน water bath ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากทำให้หลอดทดลองเย็นโดยการแช่น้ำผสมสารละลายให้เข้ากันอีกครั้งแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 505 นาโนเมตร เปรียบเทียบปริมาณด้วยสารละลายมาตรฐานของซินิกรินซึ่งจะรายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง 100 กรัม

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทดลอง 2 ซ้ำ และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรม SPSS® (version 17) (SPSS Inc., Chicago, IL)

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การศึกษาองค์ประกอบหลักทางเคมีและสารพฤกษเคมีในกาบใบกะหล่ำปลี

องค์ประกอบหลักทางเคมีในกาบใบกะหล่ำปลีแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของกาบใบนอกกะหล่ำปลีพบว่า กาบใบนอกกะหล่ำปลีมีไขมัน เถ้าและโปรตีนปริมาณต่ำแต่มีใยอาหารปริมาณสูง Nilnakara และคณะ (2009) พบว่าใบนอกกะหล่ำปลีมีไขมัน โปรตีน และเถ้า เท่ากับ 0.97 กรัม/100 กรัม 19.48 กรัม/100 กรัม และ 7.82 กรัม/100 กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบดังกล่าวกับงานวิจัยนี้ พบว่ามีปริมาณไขมัน โปรตีน และเถ้าใกล้เคียงกัน Jongaroontaprangsee และคณะ (2007) รายงานว่ากาบใบนอกกะหล่ำปลีมีใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber) เท่ากับ 40.33 กรัม/100 กรัม ฐานแห้ง ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณสารพฤกษเคมีในกาบใบกะหล่ำปลี จากการศึกษาพบว่า กลูโคซิโนเลตซึ่งมีฤทธิ์ต้านมะเร็งในกาบใบนอกกะหล่ำปลีมีปริมาณใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ คือ ในช่วง 1074-1690 ไมโครโมล/100 กรัม ฐานแห้ง (Cieřlik, Leszczyńska, Filipiak-Florkiewicz, Sikora, & Pisulewski, 2004; Wenberg และคณะ, 2006; Martinez-Villaluenga และคณะ, 2009) แต่ในการศึกษานี้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี เบต้าแคโรทีนและวิตามินอีสูงกว่าที่รายงานในการศึกษาของ Kurilich และคณะ (1999) และ Podsędek (2007) เนื่องจากส่วนของกะหล่ำที่ใช้ในการศึกษาแตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้ส่วนใบนอกกะหล่ำปลี ในขณะที่งานวิจัยอื่นใช้ใบด้านในซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการบริโภคทั่วไป Kalt (2005) รายงานว่าใบนอกกะหล่ำปลีมีสีเขียวเข้มกว่าใบด้านใน เนื่องจากใบนอกเป็นส่วนที่สัมผัสกับแสงแดด ส่งผลให้มีปริมาณสารประกอบที่มีสี เช่น คลอโรฟิลล์และเบต้าแคโรทีนสูง Vrchovská และคณะ (2006) พบว่า ใบนอกของกะหล่ำปลี tranchuda มีปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกและวิตามินซีสูงกว่าใบด้านใน จากผลการศึกษาแสดงว่าใบนอกกะหล่ำเป็นแหล่งของใยอาหารและสารพฤกษเคมีสูง ดังนั้นกาบใบนอกกะหล่ำปลีจึงสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตใยอาหารผง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลขององค์ประกอบของกาบใบนอกของกะหล่ำปลี

องค์ประกอบ	ปริมาณสาร (ฐานแห้ง)	หน่วย
ไขมัน	1.02 ± 0.11	กรัม/100 กรัม
โปรตีน	18.43 ± 0.63	กรัม/100 กรัม
เถ้า	9.02 ± 0.90	กรัม/100 กรัม
คาร์โบไฮเดรต	30.64 ± 0.99	กรัม/100 กรัม
ใยอาหารทั้งหมด (TDF)	40.89 ± 2.25	กรัม/100 กรัม
ใยอาหารไม่ละลายน้ำ (IDF)	33.54 ± 1.44	กรัม/100 กรัม
ใยอาหารละลายน้ำ (SDF)	7.35 ± 0.81	กรัม/100 กรัม

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณสารพฤกษเคมีในกาบใบนอกกะหล่ำปลี

องค์ประกอบ	ปริมาณสาร (ฐานแห้ง)	หน่วย
กลูโคซิโนเลต	1583.22 ± 69.06	ไมโครกรัม/100 กรัม
สารประกอบฟีนอลิก	756.46 ± 53.04	กรัม/100 กรัม
วิตามินซี	660.10 ± 6.62	กรัม/100 กรัม
เบต้าแคโรทีน	9.83 ± 0.26	กรัม/100 กรัม
วิตามินอี	5.65 ± 0.19	กรัม/100 กรัม
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ		
- วัดโดยวิธี DPPH	81.36 ± 2.13	%
- วัดโดยวิธี β -carotene bleaching	80.33 ± 1.87	%

4.2 การศึกษาผลของการเตรียมเบื้องต้นก่อนการอบแห้งต่อปริมาณสารพฤกษเคมี

เวลาที่ใช้ในการลวกกะหล่ำปลีหั่นฝอยและใบกะหล่ำด้วยน้ำร้อน (95°C) และไอน้ำพิจารณาได้จากกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทนต่อการถูกทำลายด้วยความร้อนและเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการผลิต จากตารางที่ 4.3 แสดงกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสหลังจากการลวกด้วยน้ำร้อนและไอน้ำที่เวลาต่างๆ พบว่าการลวกกะหล่ำปลีหั่นฝอยและใบกะหล่ำปลีด้วยน้ำร้อนเป็นเวลา 2 นาทีและไอน้ำเป็นเวลา 1 นาที สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการลวกกะหล่ำปลีหั่นฝอยและใบกะหล่ำปลีด้วยน้ำร้อนและไอน้ำจึงเท่ากับ 2 และ 1 นาทีตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในกะหล่ำปลีหลังการลวก

เวลาการลวก (นาท)	กิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส			
	กะหล่ำปลีหั่นฝอย		ใบกะหล่ำปลี	
	ลวกด้วยน้ำร้อน	ลวกด้วยไอน้ำ	ลวกด้วยน้ำร้อน	ลวกด้วยไอน้ำ
0.5	59.87 ± 1.82	13.93 ± 0.93	53.28 ± 1.12	20.08 ± 0.52
1	29.91 ± 0.98	-	32.79 ± 0.74	-
1.5	6.56 ± 1.10	-	12.09 ± 0.83	-
2	-	-	-	-

ผลของขั้นตอนในการเตรียมวัตถุดิบและวิธีการลวกต่อปริมาณสารพฤกษเคมีต่อสารพิษเคมีของกะหล่ำปลีหั่นฝอยและใบกะหล่ำปลีแสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าสารพิษเคมีในกะหล่ำปลีหั่นฝอยและใบกะหล่ำปลีก่อนการลวกนั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้วิธีลวกยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารพิษเคมี โดยพบว่าการลวกใบกะหล่ำปลีและกะหล่ำปลีหั่นฝอยด้วยน้ำร้อนทำให้ กลูโคซิโนเลต ฟีนอลิกทั้งหมด และวิตามินซี ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีการสูญเสีย กลูโคซิโนเลต ฟีนอลิกทั้งหมด และวิตามินซีเพียงเล็กน้อยหลังการลวกด้วยไอน้ำ เนื่องจากสารพิษเคมีดังกล่าวมีสมบัติที่สามารถละลายน้ำได้ จึงเกิดการสูญเสียไปกับน้ำลวก นอกจากนี้การลวกทำให้สารพิษเคมีสลายตัวจากความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยความร้อนช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการลวกซึ่งเวลาที่ใช้ในการลวกน้ำร้อนมากกว่าการใช้ไอน้ำดังนั้นสารพิษเคมีจึงสลายตัวได้มากกว่า ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Volden และคณะ (2008) ซึ่งรายงานว่าการลวกกะหล่ำปลีด้วยน้ำร้อนส่งผลให้สารประกอบฟีนอลิกและวิตามินซีลดลง 43% และ 48% ในขณะที่การใช้ไอน้ำไม่ทำให้เกิดการสูญเสียสารประกอบฟีนอลิกและสูญเสียวิตามินซีเพียง 11% นอกจากนี้การศึกษาพบว่า สารพิษเคมีกลุ่มที่ละลายน้ำได้ในใบกะหล่ำปลีหลังจากการลวกน้ำร้อนมีปริมาณสูงกว่าในกะหล่ำปลีหั่นฝอย เนื่องจากการหั่นกะหล่ำปลีทำให้

เกิดการฉีกขาดของเซลล์พืช จึงทำให้สารพฤษเคมีที่มีอยู่ในเซลล์พืชออกจากเซลล์และละลายไปกับน้ำ ลวกได้ง่ายขึ้น ออกซิเจนก็สามารถผ่านเข้าไปในเซลล์พืชทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม การเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นและวิธีการลวกไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเบต้าแคโรทีนและวิตามินอี อาจเนื่องมาจากเบต้าแคโรทีนและวิตามินอีเป็นสารพฤษเคมีละลายในไขมันจึงไม่เกิดการสูญเสียไปกับน้ำ ลวก และเบต้าแคโรทีนและวิตามินอีสามารถทนทานต่อความร้อนได้มากกว่าฟีนอลิกและวิตามินซี (Khachik และคณะ, 1992)

ส่วนผลการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ β -carotene bleaching ในกะหล่ำปลีหลังการเตรียมเบื้องต้นและวิธีการลวกต่างๆ พบว่า ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในกะหล่ำปลีหั่นฝอยและใบกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกและที่ผ่านการลวกด้วยไอน้ำที่วิเคราะห์ทั้งสองวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วน ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในกะหล่ำปลีหั่นฝอยและใบกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกน้ำร้อนมีค่าลดลง ซึ่งแนวโน้มนี้ สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในกะหล่ำปลีหลังผ่านการเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้น ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระส่วนใหญ่มาจากสารฟีนอลิก

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของการเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นและวิธีการลวกต่อสารพฤกษเคมีในกะหล่ำปลี

กะหล่ำปลี	วิธีลวก	กลูโคซิโนเลต (ไมโครโมล/100 กรัม)	ฟีนอลิกทั้งหมด (กรัม/100 กรัม)	วิตามินซี (กรัม/100 กรัม)	เบต้าแคโรทีน (กรัม/100 กรัม)	วิตามินอี (กรัม/100 กรัม)	ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ	
							DPPPH (%)	β-carotene bleaching (%)
หั่นฝอย	ไม่ลวก	1481.91 ± 85.41 ^{cd}	755.91 ± 47.83 ^b	639.55 ± 21.21 ^{cd}	9.44 ± 0.13 ^a	5.45 ± 0.09 ^a	82.94 ± 1.52 ^b	79.20 ± 2.12 ^b
หั่นฝอย	น้ำร้อน	784.51 ± 52.06 ^a	426.74 ± 22.66 ^a	432.89 ± 14.58 ^a	9.33 ± 0.39 ^a	5.57 ± 0.53 ^a	76.52 ± 0.46 ^a	74.86 ± 1.44 ^a
หั่นฝอย	ไอน้ำ	1368.62 ± 62.93 ^{bc}	672.83 ± 38.55 ^b	565.12 ± 14.73 ^b	9.46 ± 0.47 ^a	5.42 ± 0.37 ^a	79.05 ± 0.83 ^b	77.88 ± 0.65 ^b
ใบ	ไม่ลวก	1583.22 ± 69.06 ^d	756.46 ± 53.04 ^b	660.10 ± 6.62 ^d	9.83 ± 0.26 ^a	5.65 ± 0.19 ^a	81.36 ± 2.13 ^b	80.33 ± 1.87 ^b
ใบ	น้ำร้อน	1267.62 ± 38.69 ^b	505.06 ± 43.51 ^a	511.84 ± 17.80 ^b	9.78 ± 0.16 ^a	5.36 ± 0.42 ^a	76.68 ± 1.18 ^a	75.42 ± 0.81 ^{ab}
ใบ	ไอน้ำ	1595.62 ± 42.17 ^d	719.70 ± 15.85 ^b	628.66 ± 13.64 ^c	9.71 ± 0.43 ^a	5.46 ± 0.43 ^a	80.82 ± 1.25 ^b	78.38 ± 0.56 ^b

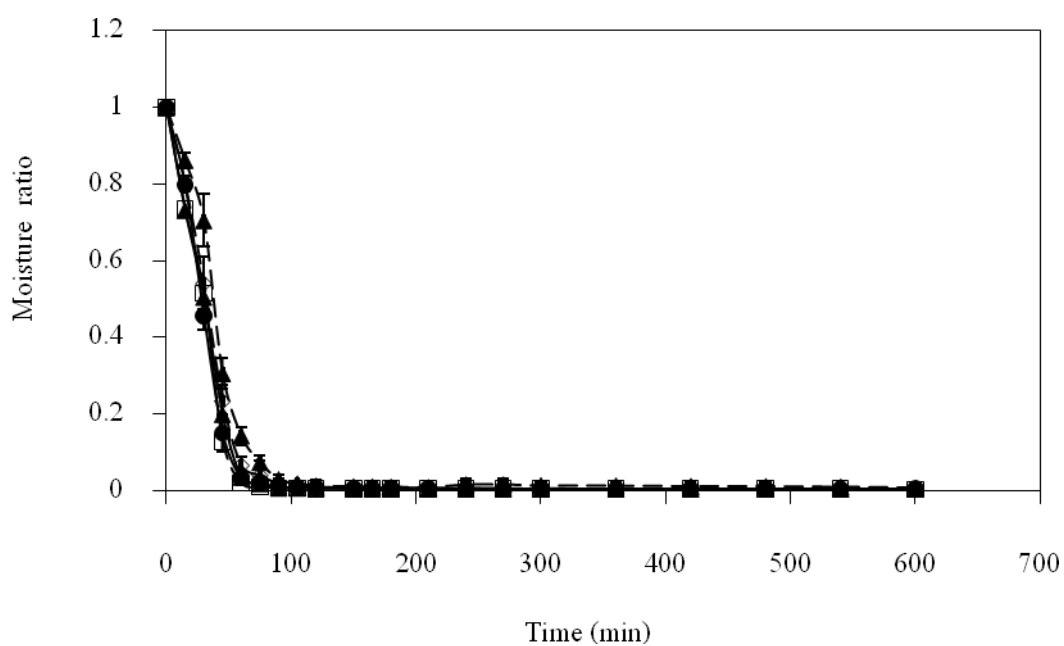
a,b,c,d ภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$

ตารางที่ 4.5 แสดงความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสมดุลของกะหล่ำปลีที่ผ่านกระบวนการเตรียมเบื้องต้นและวิธีการลวกต่างๆ ได้แก่กะหล่ำปลีที่หั่นก่อนการลวกด้วยน้ำร้อนและไอน้ำและกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกด้วยน้ำร้อนและไอน้ำก่อนการหั่นพบว่า กะหล่ำปลีสดมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 7.55 ± 0.932 กรัม/กรัม (ฐานแห้ง) ส่วนกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกด้วยน้ำร้อนและไอน้ำมีความชื้นเริ่มต้นมากกว่ากะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกโดยมีความชื้นอยู่ในช่วง 10.20–10.43 กรัม/กรัม (ฐานแห้ง)

รูปที่ 4.1 แสดงจลนพลศาสตร์การอบแห้งของกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวก กะหล่ำปลีที่ผ่านการหั่นก่อนการลวกด้วยน้ำร้อนและไอน้ำและกะหล่ำปลีที่ลวกด้วยน้ำร้อนและไอน้ำก่อนการหั่น ที่อุณหภูมิ 80°C พบว่าอัตราการอบแห้งกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกมีค่าต่ำกว่ากะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกด้วยน้ำร้อนและไอน้ำเล็กน้อย เนื่องจากการลวกทำให้โครงสร้างของเซลล์พืชนิ่มลง จึงทำให้น้ำสามารถระเหยออกจากเซลล์พืชได้เร็วขึ้น นอกจากนี้การศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งกะหล่ำปลีที่ผ่านการหั่นก่อนการลวกด้วยน้ำและไอน้ำสูงกว่ากะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกด้วยน้ำและไอน้ำก่อนการหั่น เนื่องจากการหั่นทำให้เซลล์พืชเกิดการแตกหัก ดังนั้นทำให้สารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ซึ่งอยู่ในเซลล์พืช เช่น เพคติน เกิดการสูญเสียในระหว่างการลวก ซึ่งการที่เซลล์พืชสูญเสียเพคตินทำให้เซลล์พืชอ่อนนุ่มขึ้นส่งผลให้น้ำระเหยออกจากเซลล์พืชได้ง่ายขึ้น (Dutta, Chaudhuri, & Chakraborty, 2006)

ตารางที่ 4.5 ความชื้นของกะหล่ำปลีก่อนและหลังการอบแห้ง

ตัวอย่าง	ความชื้นเริ่มต้น (กรัม/กรัม, ฐานแห้ง)	ความชื้นสมดุล (กรัม/กรัม, ฐานแห้ง)
ไม่ลวก	7.55 ± 0.932	0.05 ± 0.0
ลวกด้วยน้ำร้อนก่อนการหั่น	10.20 ± 0.226	0.03 ± 0.01
ลวกด้วยไอน้ำก่อนการหั่น	10.43 ± 0.940	0.05 ± 0.02
หั่นก่อนการลวกด้วยน้ำร้อน	10.37 ± 0.905	0.04 ± 0.01
หั่นก่อนการลวกด้วยไอน้ำ	10.40 ± 0.184	0.05 ± 0.01



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราความชื้นต่อเวลาที่อุณหภูมิ 80 °C ของกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวก (◆) กะหล่ำปลีที่ผ่านการหั่นก่อนการลวกด้วยน้ำร้อน (□) และลวกด้วยไอน้ำ (▲) และกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกด้วยน้ำร้อน (◇) และลวกด้วยไอน้ำก่อนการหั่น (●)

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณของสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในใยอาหารผงของกะหล่ำปลีที่ผ่านการเตรียมเบื้องต้นและการลวกวิธีต่างๆ ซึ่งการทดลองพบว่า ใยอาหารที่ผลิตจากกาบใบนอกของกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกไอน้ำก่อนการหั่นมีปริมาณคงเหลือของสาร กลูโคซิโนเลต ฟีนอลิกทั้งหมด วิตามินซีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด ส่วนปริมาณของเบต้าแคโรทีนและวิตามินอีมีมากกว่าในใยอาหารผงที่ผลิตจากกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกแต่มีปริมาณไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกะหล่ำปลีที่ผ่านการเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นและการลวกด้วยน้ำร้อน การลวกกะหล่ำปลีด้วยไอน้ำก่อนการหั่นสามารถรักษาสารกลูโคซิโนเลต ฟีนอลิกทั้งหมดและวิตามินซีได้ดีกว่า เนื่องจากการลวกกะหล่ำปลีด้วยไอน้ำลดการสูญเสียของกลูโคซิโนเลต ฟีนอลิกทั้งหมดและวิตามินซีไปกับน้ำที่ใช้ในการลวกและสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังนั้นในระหว่างการอบแห้งสารพฤกษเคมีในใยอาหารผงที่ผลิตจากกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกจึงมีปริมาณสารพฤกษเคมีน้อยกว่า นอกจากนี้การหั่นกะหล่ำปลีทำให้เซลล์ของพืชเกิดการฉีกขาด ดังนั้นการหั่นกะหล่ำปลีหลังจากการลวกสามารถลดการสูญเสียของกลูโคซิโนเลต ฟีนอลิกทั้งหมดและวิตามินซีที่เกิดจากการสลายตัวเนื่องจากความร้อน แสงและออกซิเจนได้

นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ผลการศึกษพบว่า ใยอาหารผงที่ผลิตจากกาบใบนอกกะหล่ำปลีผ่านการลวกไอน้ำก่อนการหั่นมีปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด ดังนั้นการลวกกาบใบนอกกะหล่ำปลีด้วยไอน้ำก่อนการหั่นจึงเป็นขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบที่เหมาะสมเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตใยอาหารผง

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในโยอาหารผงของกะหล่ำปลีที่ผ่านการเตรียมเบื้องต้นและการลวกวิธีต่างๆ

ตัวอย่าง	กลูโคซิโนเลต (ไมโครโมล/100 กรัม)	ฟีนอลิก ทั้งหมด (กรัม/100 กรัม)	วิตามินซี (กรัม/100 กรัม)	เบต้าแคโรทีน (กรัม/100 กรัม)	วิตามินอี (กรัม/100 กรัม)	ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ	
						DPPPH (%)	β-carotene bleaching (%)
ไม่ลวก	1087.45 ± 12.17 ^c	283.31 ± 6.45 ^b	288.43 ± 7.98 ^c	3.93 ± 0.08 ^a	0.22 ± 0.01 ^a	54.09 ± 0.02 ^a	47.80 ± 0.58 ^a
หั่นก่อนการลวกน้ำร้อน	680.54 ± 13.47 ^a	259.28 ± 4.71 ^a	176.70 ± 6.40 ^a	4.99 ± 0.08 ^b	0.38 ± 0.03 ^b	54.37 ± 0.50 ^b	50.33 ± 0.28 ^b
หั่นก่อนการลวกไอน้ำ	1042.18 ± 15.01 ^c	303.99 ± 3.13 ^c	265.79 ± 21.38 ^{bc}	4.77 ± 0.18 ^b	0.35 ± 0.03 ^b	55.29 ± 0.04 ^b	52.20 ± 0.06 ^b
ลวกน้ำร้อนก่อนการหั่น	881.14 ± 6.02 ^b	272.33 ± 6.20 ^b	255.46 ± 3.84 ^b	4.80 ± 0.02 ^b	0.35 ± 0.01 ^b	55.12 ± 0.58 ^b	53.12 ± 0.78 ^b
ลวกไอน้ำก่อนการหั่น	1170.58 ± 5.99 ^d	313.27 ± 3.16 ^c	330.72 ± 16.03 ^c	4.88 ± 0.06 ^b	0.35 ± 0.02 ^b	55.66 ± 0.19 ^c	54.14 ± 1.18 ^c

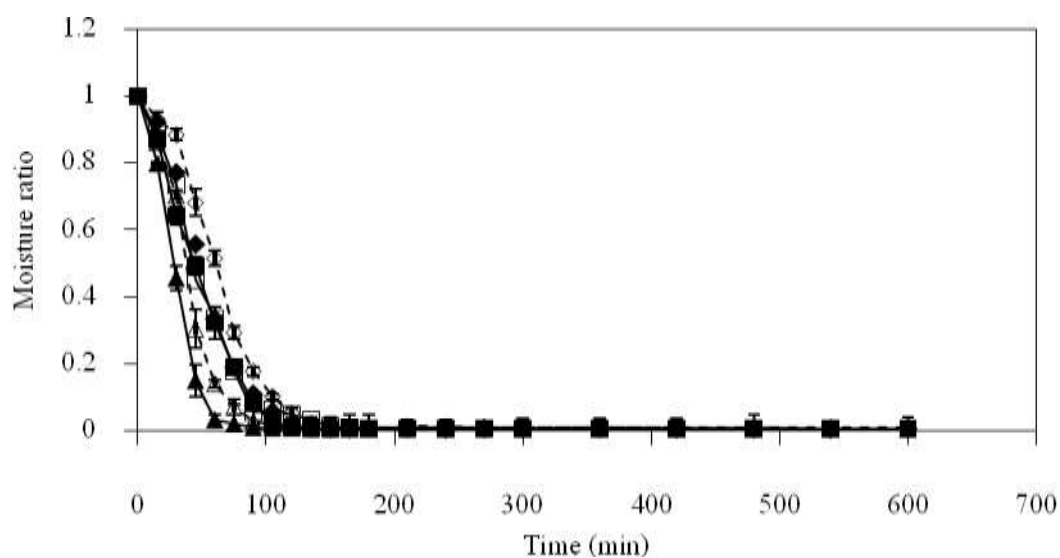
^{a,b,c,d} ภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$

4.3 การศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งที่มีต่อสารพฤษเคมี

รูปที่ 4.2 แสดงจลนพลศาสตร์การอบแห้งกะหล่ำปลีที่ผ่านและไม่ผ่านการลวกด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 70 และ 80 °C ผลการศึกษาพบว่า ความชื้นของกะหล่ำปลีลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 100 นาทีแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นความชื้นค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ และคงที่ในที่สุด การลดลงของปริมาณความชื้นของกะหล่ำปลีเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากช่วงแรกของการอบแห้งมีความแตกต่างของปริมาณความชื้นภายในบรรยากาศมาก น้ำที่ระเหยในช่วงนี้เป็นน้ำในชั้นผิวอย่างที่เคยเกาะกันอย่างหลวมๆ รวมถึงน้ำส่วนเกินที่เคยอยู่ที่ผิวหน้าของกะหล่ำปลีทำให้ระเหยออกไปได้ง่าย หลังจากนั้นปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆ และคงที่ในที่สุด เนื่องจากความชื้นที่เหลือเป็นความชื้นสมดุลของกะหล่ำปลีที่สภาวะการอบแห้งนั้นๆ ที่ไม่สามารถจะกำจัดออกไปให้หมดได้ เส้นกราฟจึงคงที่ในที่สุด

นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นมีผลให้ความชื้นของกะหล่ำปลีลดลงจนเข้าสู่ความชื้นสมดุลเร็วขึ้น เนื่องจากว่า การใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยได้มากและทำให้อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง จึงเป็นการเพิ่ม Driving force สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น เมื่อพิจารณาที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน พบว่า กะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกมีอัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนสูงกว่ากะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวก โดยเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.7 แสดงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งโยอาหารผงเพื่อให้ได้ให้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมสำหรับโยอาหารผงทางการค้า โดยความชื้นของโยอาหารผงควรต่ำกว่า 0.1 กรัม/กรัมฐานแห้ง (Larrauri, 1999) ซึ่งจากการทดลองพบว่า โยอาหารมีความชื้นที่อยู่ในช่วง 0.039-0.087 กรัม/กรัมฐานแห้ง และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกน้อยกว่ากะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวก

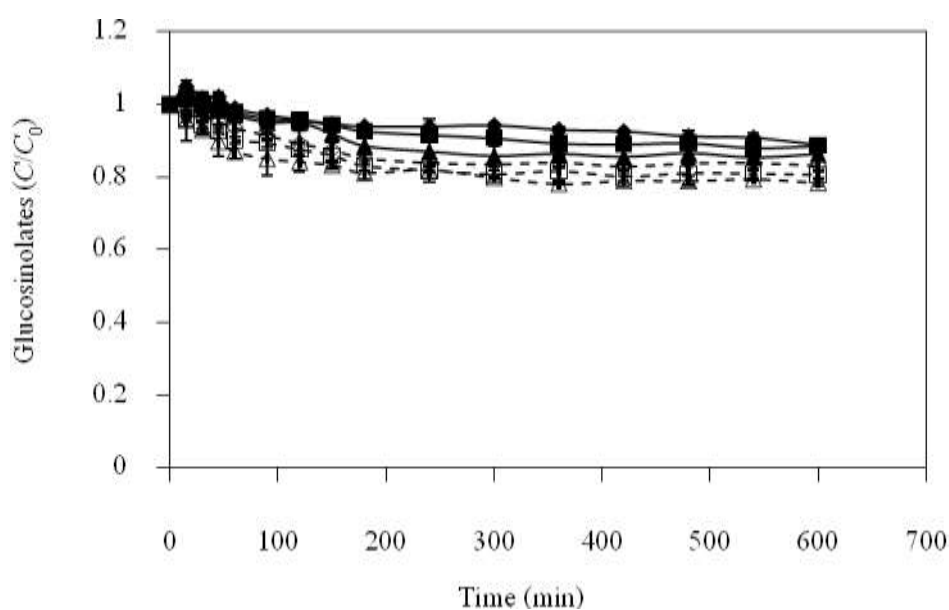


รูปที่ 4.2 กราฟการอบแห้งกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C (◇) 70 °C (□) และ 80 °C (△) และกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกด้วยไอน้ำก่อนการแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C (◆) 70 °C (■) และ 80 °C (▲)

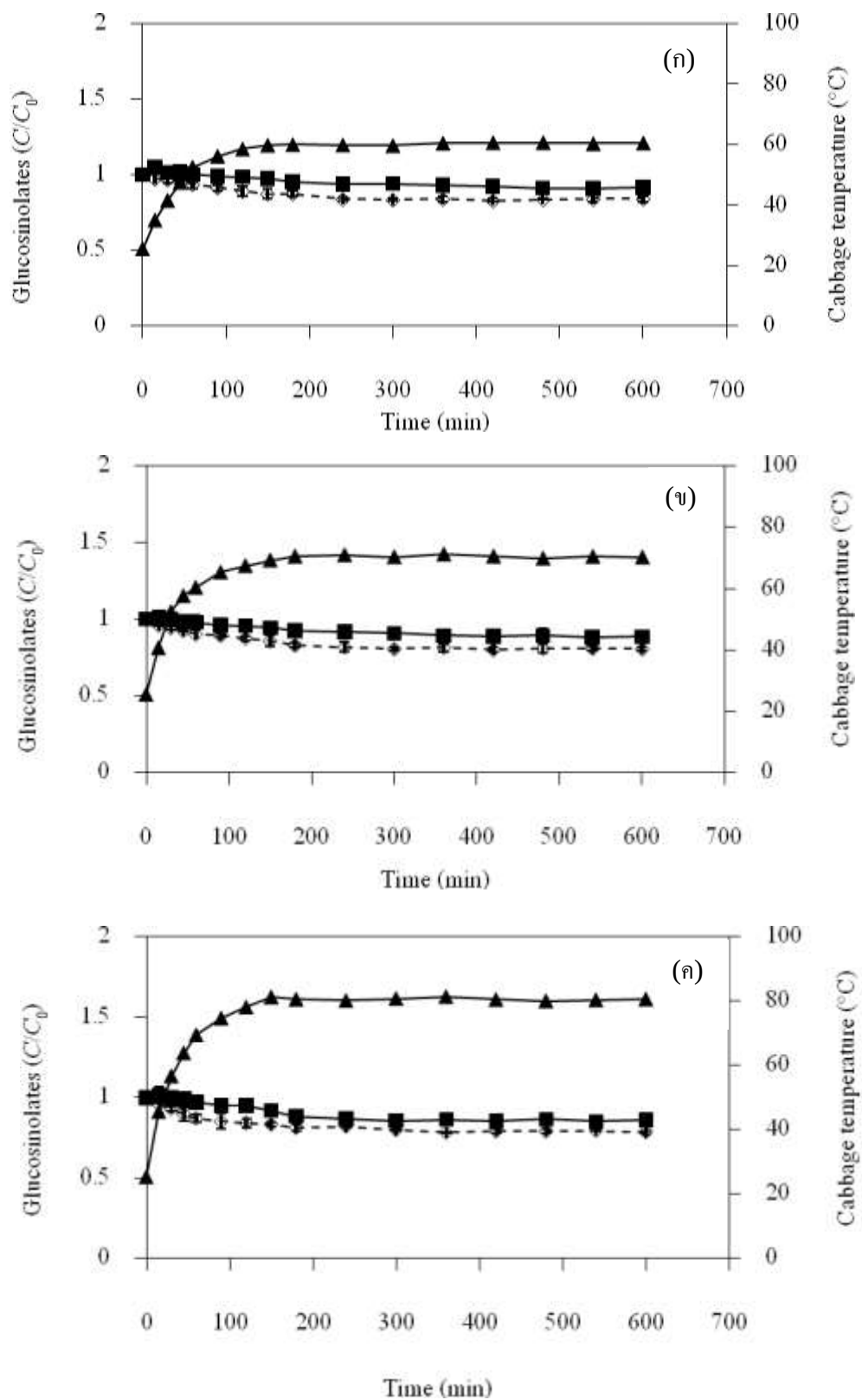
ตารางที่ 4.7 เวลาที่ใช้อบแห้งกะหล่ำปลีเพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 9.9% ฐานแห้ง และความชื้นสมดุลของกะหล่ำปลีที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลาอบแห้ง (นาที)	ความชื้นสมดุล (กรัม/กรัม, ฐานแห้ง)
ไม่ลวก	60	240	0.087 ± 0.043
	70	180	0.066 ± 0.010
	80	150	0.039 ± 0.010
ลวกด้วยไอน้ำ	60	180	0.074 ± 0.004
	70	150	0.076 ± 0.014
	80	120	0.050 ± 0.013

รูปที่ 4.3 แสดงผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงของกลูโคซิโนเลตในกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกด้วยด้วยไอน้ำก่อนการหั่นและไม่ผ่านการลวก พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณกลูโคซิโนเลตลดลงมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของการลวกต่อการลดลงของกลูโคซิโนเลตพบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้ง ปริมาณกลูโคซิโนเลตในกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกลดลงในขณะที่ปริมาณกลูโคซิโนเลตในกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกมีค่าคงที่ เนื่องจากการลวกสามารถทำลายเอนไซม์ไมโรซิเนสซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำให้กลูโคซิโนเลตเปลี่ยนไปเป็นสารอื่นๆ เช่น ไธโอไซยาเนต (thiocyanates) ไอโซไธโอไซยาเนต (isothiocyanates) อีพิไธโอไนไตร (epithionitrile) ไนไตร (nitrile) และออกซาไอไดน-ไธโอน (oxazolidine-thione) (Matusheski และคณะ, 2004) ดังนั้นการลดลงของกลูโคซิโนเลตในกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ไมโรซิเนส อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาการอบแห้งนานขึ้นปริมาณกลูโคซิโนเลตในกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกลดลง เมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของกลูโคซิโนเลตและอุณหภูมิกะหล่ำปลีพบว่า ปริมาณกลูโคซิโนเลตในกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกไอน้ำก่อนการหั่นเริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิกะหล่ำปลีอยู่ในช่วง 60-69 °C



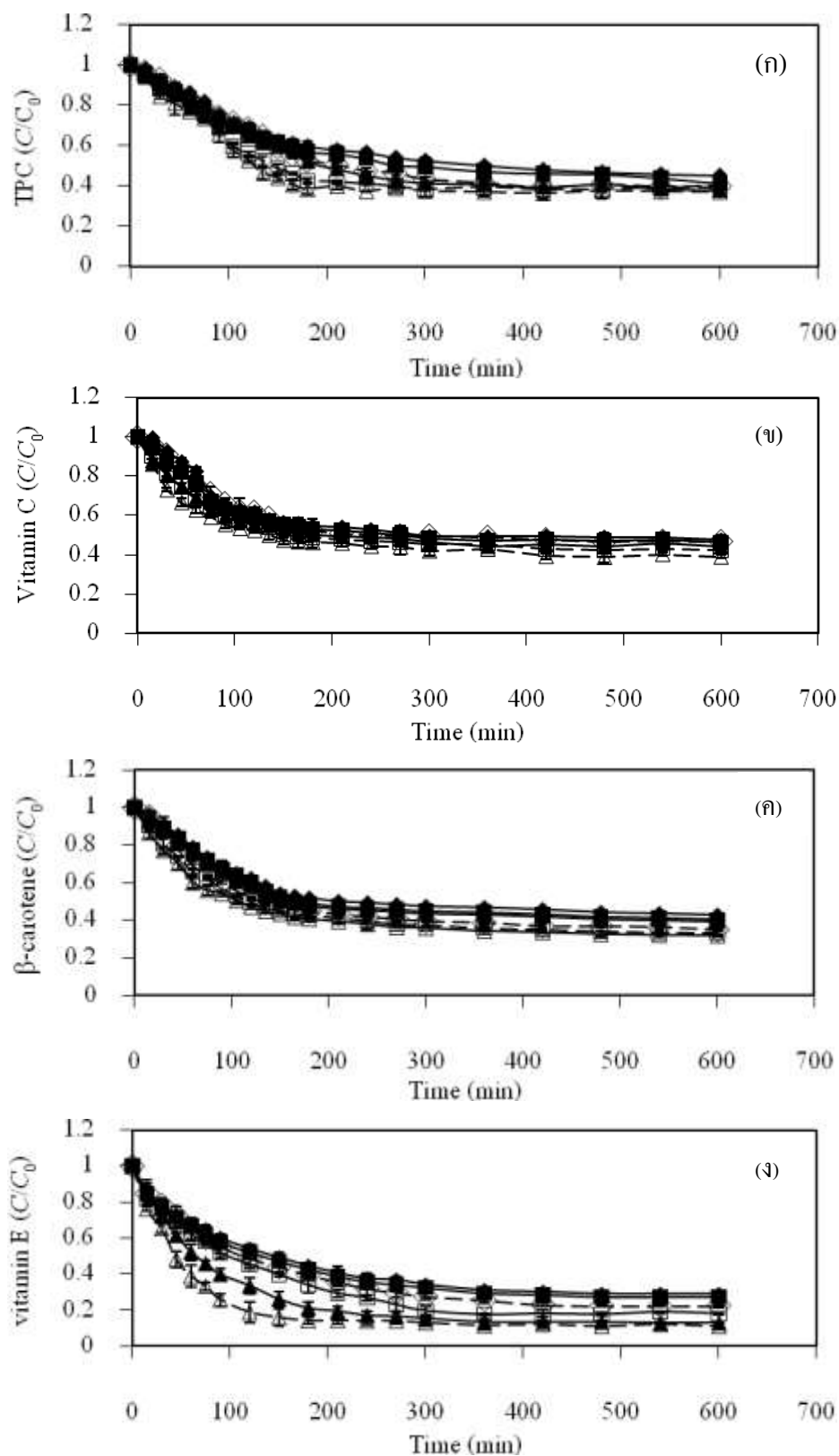
รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกลูโคซิโนเลตในกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C (◇) 70 °C (□) และ 80 °C (△) และผ่านการลวกด้วยไอน้ำก่อนการหั่นที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C (◆) 70 °C (■) และ 80 °C (▲)



รูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกลูโคซิโนเลตและอุณหภูมิกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวก (◇) และผ่านการลวกด้วยไอน้ำก่อนการหั่น (■) ที่อุณหภูมิอบแห้ง (ก) 60 °C (ข) 70 °C และ (ค) 80 °C

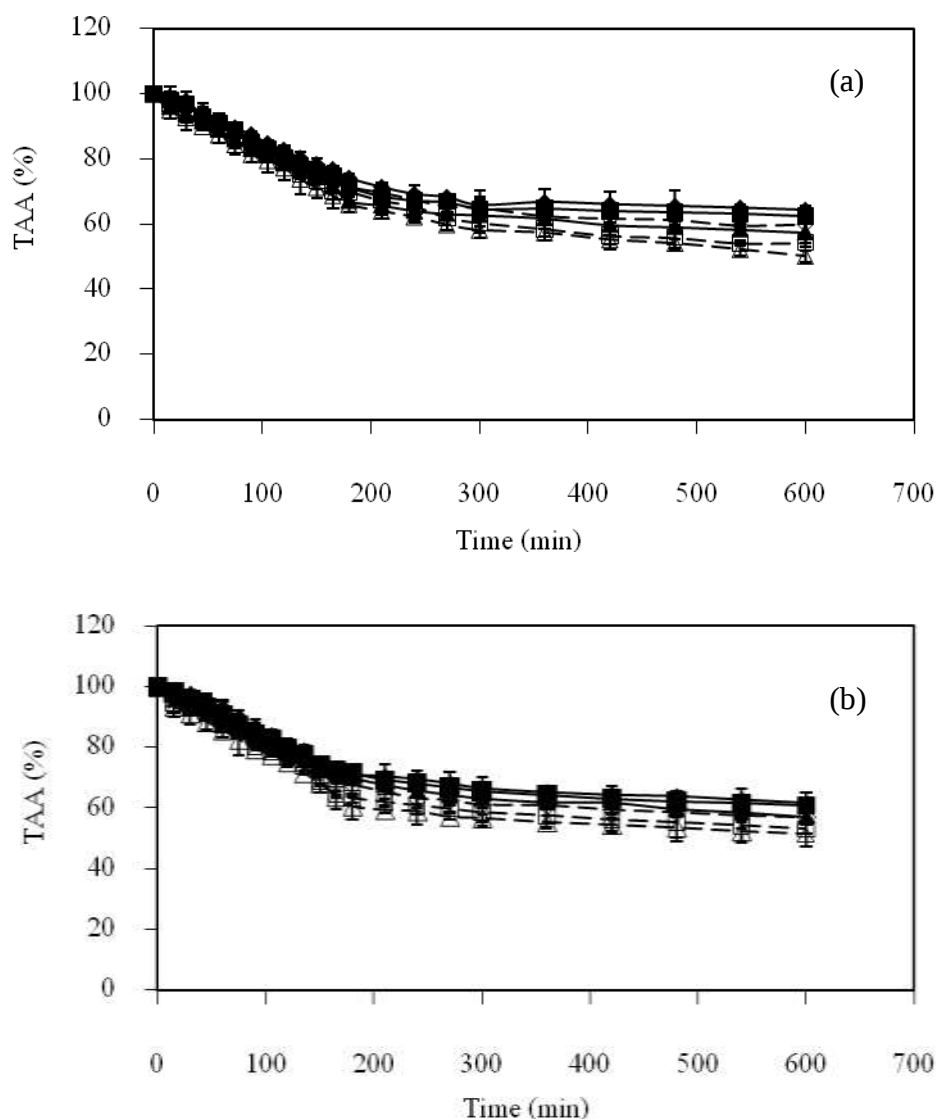
รูปที่ 4.5 แสดงผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงของสารต้านอนุมูลอิสระในกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกด้วยดัวยไอน้ำก่อนการหั่นและไม่ผ่านการลวก พบว่า ปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี เบต้าแคโรทีน และวิตามินอี ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระหว่างการอบแห้ง นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นทำให้เกิดการลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระมากขึ้น เนื่องจากการสลายตัวจากความร้อน Kuljarachanan และคณะ (2008) รายงานว่า การใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิกและวิตามินซีในเปลือกมะนาวมากขึ้น Scalar และ Crapiste (2008) พบว่า อัตราการลดลงของวิตามินซีและเบต้าแคโรทีนในพริกหยวกสีแดงสูงขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของการลวกต่อปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระพบว่า สารต้านอนุมูลอิสระในกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกมีอัตราการลดลงมากกว่ากะหล่ำปลีที่ผ่านการลวก เนื่องจากว่า การลวกสามารถทำลายเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการทำลายของสารต้านอนุมูลอิสระ โดยพิจารณาจากการศึกษาเวลาในการลวกซึ่งเป็นเวลาที่ทำลายเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลิกไปเป็นสารอื่น นอกจากนี้เอนไซม์แอสคอร์เบทออกซิเดส สามารถถูกทำลายที่อุณหภูมิ 65 °C ที่เวลา 4 นาที (Nishiba และ Suda, 1998) ดังนั้นการลดลงของสารประกอบฟีนอลิกและวิตามินซีในกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกมีสาเหตุหลักมาจากการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ส่วนการลดลงของปริมาณเบต้าแคโรทีนและวิตามินอีมีสาเหตุมาจากทั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์และจากความร้อน เนื่องจากเอนไซม์ไลพอกซีจีเนสซึ่งเป็นเอนไซม์ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของแคโรทีนอยด์และวิตามินอีถูกทำลายไปเพียงบางส่วน โดยมีการศึกษาพบว่า เอนไซม์ไลพอกซีจีเนสจะถูกทำลายทั้งหมดโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 10 นาที (Nishiba และ Suda, 1998) ดังนั้นเอนไซม์ที่เหลืออยู่หลังการลวกจึงเป็นสาเหตุของการลดลงของเบต้าแคโรทีนและวิตามินอีด้วย



รูปที่ 4.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ (ก) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (ข) วิตามินซี (ค) เบต้าแคโรทีน และ (ง) วิตามินอีในกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C ($\diamond$) 70 °C ($\square$) และ 80 °C ($\triangle$) และผ่านการลวกด้วยไอน้ำก่อนการหั่นที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C ($\blacklozenge$) 70 °C ($\blacksquare$) และ 80 °C ($\blacktriangle$)

การลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระในระหว่างการอบแห้งส่งผลให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลงเช่นกัน โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.6 โดยมีแนวโน้มการลดลงของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ β -carotene bleaching เหมือนกัน



รูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่วิเคราะห์ด้วยวิธี (a) DPPH และ (b) β -carotene bleaching ในกะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C (◇) 70 °C (□) และ 80 °C (△) และผ่านการลวกด้วยไอน้ำก่อนการแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C (◆) 70 °C (■) และ 80 °C (▲)

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในโยอาหารผงที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C พบว่า โยอาหารผงที่ผ่านกระบวนการผลิตต่างๆ ยังคงมีกลูโคซิโนเลตในปริมาณสูง ส่วนสารประกอบฟีนอลิก วิตามินซีและเบต้าแคโรทีนในโยอาหารผงมีปริมาณน้อยกว่า 65% ในขณะที่วิตามินอีมีน้อยกว่า 37% อย่างไรก็ตามการลวกกะหล่ำปลีก่อนการอบแห้งช่วยรักษาปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระในระหว่างการอบแห้งได้ดีกว่ากะหล่ำปลีที่ไม่ผ่านการลวก แม้ว่าการอบแห้งส่งผลให้เกิดการลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระแต่โยอาหารผงยังคงมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ค่อนข้างสูงคือ ประมาณ 70-79% เมื่อพิจารณาจากผลการศึกษาพบว่า การอบแห้งกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกไอน้ำก่อนการหั่น ที่อุณหภูมิ 80 °C มีปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด จึงเป็นสภาวะการผลิตโยอาหารผงที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในใบอาหารผงของกะหล่ำปลีที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	กลูโคซิโนเลต (ไมโครโมล/100 กรัม)	ฟีนอลิก (กรัม/100 กรัม)	วิตามินซี (กรัม/100 กรัม)	เบต้าแคโรทีน (กรัม/100 กรัม)	วิตามินอี (กรัม/100 กรัม)	ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (%)	
							DPPH	β-carotene bleaching
ไม่ลวก	60	1245.24 ± 11.13 ^a	47.19 ± 4.28 ^b	50.27 ± 1.68 ^b	41.82 ± 1.00 ^a	31.88 ± 3.58 ^b	71.36 ± 2.57 ^b	71.71 ± 1.31 ^b
	70	1229.82 ± 13.35 ^a	42.42 ± 1.11 ^a	48.65 ± 2.40 ^b	42.75 ± 2.41 ^a	33.75 ± 4.01 ^b	69.96 ± 2.73 ^a	68.95 ± 2.59 ^{ab}
	80	1235.16 ± 31.54 ^a	44.11 ± 2.41 ^{ab}	42.87 ± 0.43 ^a	43.32 ± 1.32 ^a	15.71 ± 4.16 ^a	71.27 ± 3.53 ^b	66.00 ± 0.47 ^a
ลวก	60	1391.58 ± 32.19 ^b	59.77 ± 1.13 ^c	54.99 ± 4.41 ^d	51.86 ± 1.34 ^b	36.84 ± 0.81 ^c	74.12 ± 1.27 ^c	74.00 ± 3.53 ^c
	70	1398.60 ± 27.78 ^b	61.46 ± 1.90 ^{cd}	55.50 ± 1.89 ^d	52.21 ± 1.01 ^b	37.12 ± 2.36 ^c	76.04 ± 3.20 ^{cd}	77.15 ± 1.93 ^d
	80	1407.99 ± 22.43 ^b	64.65 ± 0.43 ^d	55.88 ± 2.62 ^d	57.83 ± 1.32 ^b	33.50 ± 4.38 ^b	78.79 ± 1.53 ^d	77.98 ± 0.94 ^d

^{a,b,c,d} ภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองแสดงว่า กาบใบนอกกะหล่ำปลีจัดเป็นวัตถุดิบที่ดีในการนำมาผลิตเป็นโยเกิร์ตอาหารผงเพื่อเป็นอาหารเสริมสุขภาพ ผลของการเตรียมตัวอย่างเบื้องต้นซึ่งได้แก่ การหั่นและการลวกต่อปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในกาบใบนอกกะหล่ำปลีพบว่า การลวกใบกะหล่ำปลีและกะหล่ำปลีหั่นฝอยด้วยน้ำร้อนทำให้ กลูโคซิโนเลต สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และวิตามินซี และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลงแต่การลวกด้วยไอน้ำไม่ทำให้เกิดการสูญเสีย กลูโคซิโนเลต ฟีนอลิกทั้งหมด และวิตามินซี นอกจากนี้การเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นและวิธีการลวกไม่ส่งผลต่อเบต้าแคโรทีนและวิตามินอีอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาปริมาณสารพฤกษเคมีในโยเกิร์ตอาหารผงที่ผลิตจากกาบใบนอกกะหล่ำปลีที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างและวิธีการลวกต่างๆ พบว่า โยเกิร์ตอาหารผงที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างเบื้องต้นด้วยวิธีการลวกไอน้ำก่อนการหั่นมีปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด ดังนั้นการลวกกาบใบนอกกะหล่ำปลีก่อนการหั่นจึงเป็นขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบที่เหมาะสมเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตโยเกิร์ตอาหารผง

สำหรับผลการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C ต่อการเปลี่ยนแปลงของสารพฤกษเคมีพบว่า การใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นทำให้ปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งอุณหภูมิสูงทำให้เวลาที่ใช้การอบแห้งกะหล่ำปลีเพื่อให้ความชื้นตามที่ต้องการน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C สามารถรักษาระดับปริมาณสารพฤกษเคมีในโยเกิร์ตอาหารผงได้สูงที่สุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากผลการศึกษพบว่า การอบแห้งกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกไอน้ำก่อนการหั่น ที่อุณหภูมิ 80 °C มีปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด จึงเป็นสภาวะการผลิตโยเกิร์ตอาหารผงที่เหมาะสมที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในระหว่างกระบวนการผลิตพบว่า มีการสูญเสียสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนมาก ดังนั้นจึงควร

ศึกษาผลของวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงของสารพฤกษเคมี เพื่อให้ใยอาหารผงยังคงมีปริมาณพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- กฤติกา นรจิตร์ (2548). *คุณสมบัติจากสารสกัดจากพืชวงศ์ขิง*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 18-23.
- จรรยา วัฒนทวีกุล (2545). โยอาหารเพื่อสุขภาพ. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 159, 28-31.
- นวลศรี รักริยะธรรม และ อัญชนา เจนวิถีสุข (2545). *แอนติออกซิเดนท์: สารต้านมะเร็งในผัก-สมุนไพรไทย*. นพบุรีการพิมพ์, เชียงใหม่, 281 หน้า.
- นิธิยา รัตนานนท์ (2545). *เคมีอาหาร*. โอ.เอส. พรินติ้ง เฮาส์, 370-374.
- ปาริชาติ สักท้านุ (2541). *คุณค่าอาหารเส้นใยป้องกันบำบัดสรรพโรค*. สำนักพิมพ์รวมธรรมส์, กรุงเทพฯ, 120 หน้า.
- ประทุม พุทธิวิช และ พิมพ์ภรณ์ ไตรณรงค์สกุล (2540). โยอาหาร สารที่ไม่มีคุณค่าแต่น่าสนใจ. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 145, 26-29.
- วิไล รัสาดทอง (2543). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัลพับลิเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ, 273-278.
- อรชุน เลียววัฒนะผล (2541). *ต้านโรคมะเร็งด้วยเบต้าแคโรทีน*. สำนักพิมพ์รวมธรรมส์, กทมฯ, 125 หน้า.
- Abeyasinghe, D. C., Li, X., Sun, C., Zhang, W., Zhou, C., & Chen, K. (2007). Bioactive compounds and antioxidant capacities in different edible tissues of citrus fruit of four species. *Food Chemistry*, 104, 1338-1344.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2000). *Official methods of analysis* (15th ed.), The Association of Official Analytical Chemists: Washington D.C.
- Ball, G. F. (2006). *Vitamin in Foods: Analysis, Bioavailability, and Stability*, CRC press, New York; USA.
- Cartea, M. E. and Velasco, P. (2008). Glucosinolates in *Brassica* Foods: Bioavailability in Food and Significance for Human Health. *Phytochemical Review*, 7, 213-219.
- Ciska, E., & Pathak, D. R. (2004). Glucosinolate derivatives in stored fermented cabbage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 7938-7943.

- Chen, S., & Andreasson, E. (2001). Update on Glucosinolate Metabolism and Transport. *Plant Physiology Biochemistry*, 39, 743-758.
- Chantaro, P., Devahastin, S., Chiewchan, N. (2008). Production of antioxidant high dietary fiber powder from carrot peels. *LWT-Food Science and Technology*, 41, 1987-1994.
- Decoteau, D. R. (2000). *Vegetable Crop*, Science Publishers, Inc., USA.
- Davey, M. W., Montagu, M. V., Inzé D., Sanmartin, M., Kanellis, A., Smirnoff, N., Benzie, I. J. J., Strain, J. J., Favell, D., & Fletcher, J. (2000). Plant L-ascorbic acid: Chemistry, function, metabolism, bioavailability and effects of processing, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 825–860.
- DeClercq, D. R., & Daun, J. K. (1989). Determination of the total glucosinolate content in canola by reaction with thymol and sulfuric acid, *Journal of American Oil Chemist's Society*, 66, 788-791.
- Dutta, D., Chaudhuri, U. R., & Chakraborty, R. (2006). Effect of thermal treatment on the β -carotene content, colour and textural properties of pumpkin. *Journal of Food Science and Technology*, 43, 607-611.
- Ghosh, S. P., & Madhavi, D. L. (1999). Handbook of vegetable science and technology, Salunkhe, D. K. and Kadam, S. S. (Eds.), Marcel Dekker, New York.
- Higdon, J. V., Delage, B., Williams, D. E., & Dashwood, R. H. (2007). Cruciferous Vegetables and Human Cancer Risk: Epidemiologic Evidence and Mechanistic Basis. *Pharmacological Research*, 55, 224-236.
- Heldman, D. R., & Singh, R. P. (2001). *Introduction to Food Engineering*. Academic Press, London.
- Ismail, A., Marjan, Z. M., & Foong, C. W. (2004). Total antioxidant activity and phenolic content in selected vegetables. *Food Chemistry*, 87, 581-586.
- Ismail, A., & Lee, Y. W. (2005). Effect of different blanching times on antioxidant properties in selected cruciferous vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 2314-2320.

- Jones, R. B., Faragher, J. D., & Winkler, S. (2006). A review of the influence of postharvest treatments on quality and glucosinolate content in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) heads. *Postharvest Biology and Technology*, *41*, 1-8.
- Jongaroontaprangsee, S., Tritrong, W., Chokanaporn, W., Methacanon, P., Devahastin, S., & Chiewchan, N. (2007). Effects of drying temperature and particle size on hydration properties of dietary fiber powder from lime and cabbage by-products. *International Journal of Food Properties*, *10*, 887-897.
- Katsube, T., Tsurunaga, Y., Sugiyama, Y., Furuno, T., & Yamasaki, Y. (2009). Effect of air-drying temperature on antioxidant capacity and stability of polyphenolic compounds in mulberry (*Morus alba* L.) leaves. *Food Chemistry*, *113*, 964-969.
- Kushad, M. M., Brown, A. F., Kurilich, A. C., Juvik, J. A., Klein, B. P., Wallig, M. A., & Jeffery, E. H. (1999). Variation of glucosinolates in vegetable crops of *Brassica oleracea*. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, *47*, 1541-1548.
- Kurilich, A. C., Tsau, G. J., Brown, A., Howard, L., Klein, B. P., Jeffery, E. H., Kushad, M., Walling, M. A., & Juvik, J. A. (1999). Carotene, tocopherol and ascorbate contents in subspecies of *Brassica oleracea*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *47*, 1576-1581.
- Lario, Y., Sendra, E., García-Pérez, J., Fuentes, C., Sayas-Barberá, E., Fernández-López, J., & Pérez-Alvarez, J. A. (2004). Preparation of high dietary fiber powder from lemon juice by-products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *5*, 113-117.
- Liang, H., Yuan, Q. P., Dong, H. R., & Liu, Y. M. (2006). Determination of sulforaphane in broccoli and cabbage by high-performance liquid chromatography. *Journal of Food Composition and Analysis*, *19*, 473-476.
- Larrauri, J. A. (1999). New approaches in the preparation of high dietary fiber powders from fruit by-products. *Trends in Food Science and Technology*, *10*, 3-8.
- Mrkić, V., Cocci, E., Rosa, M. D., & Sacchetti, G. (2006). Effect of drying conditions on bioactive compounds and antioxidant activity of broccoli (*Brassica oleracea* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *86*, 1559-1566.

- Mrkić, V., Redovnikovic, I., R., Jolic, M. J., Delonga, K., & Dragovic-Uzelac, V. (2010). Effect of drying conditions on indole glucosinolate level in broccoli. *Acta Alimentaria*, 39, 167-174.
- Moser, U., & Bendich, A. (1991). Vitamin C. In Machlin, J. (Ed.). *Handbook of vitamins* (pp. 204-216). Marcel Dekker, INC., New York and Basel: USA.
- Nilnakara, S., Chiewchan, N., & Devahastin, S. (2009). Production of antioxidant dietary fiber powder from cabbage outer leaves. *Food and Bioprocess Processing*, 87, 301-307.
- Nishiba, Y., & Suda, I. (1998). Degradation of vitamin E, vitamin C, and lutein in soybean homogenate: A comparison of normal soybean and lipoxygenase-lacking (triple-null) soybean. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 3708-3712.
- Pokorny, J., Yanishlieva, N., & Gordon, M. (2001). Antioxidants in food: Practical applications. In *Antioxidants and antitumour properties*; Johnson, I. T., Ed.; CRC Press: Boca Raton, 100-119.
- Podsędek, A. (2007). Natural antioxidants and antioxidant capacity of *Brassica* vegetables: A review. *LWT-Food Science and Technology*, 40, 1-11.
- Raghavendra, S. N., Ramachandra, Swamy, N. K., Rastogi, S. R., Raghavarao, K. S. M. S., Kumar, S., & Tharanathan, R. N. (2006). Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: a source of dietary fiber. *Journal of Food Engineering*, 72, 281-286.
- Rao A.V., Rao L.G. (2007). Carotenoids and human health. *Pharmacological Research*, 55, 207-16.
- Rosa E. A. S. (1997). Glucosinolates from flower buds of Portuguese Brassica crops. *Phytochemistry*, 44, 1415-1419.
- Setiawan, B., Sulaeman, A., Giraud, D. W. and Driskell, J. A. (2001). Carotenoid content of selected Indonesian fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19, 169-176.
- Song, L. & Thornalley, P. J. (2007). Effect of storage, processing and cooking on glucosinolate content of *Brassica* vegetable. *Food and Chemical Toxicology*, 45, 216-224.
- Singh, J., Upadhyay, A. K., Bahadur, A., Singh, B., Singh, K. P., & Rai, M. (2006). Antioxidant phytochemicals in cabbage (*Brassica oleracea* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae*, 108, 233-237.

- Thebaudin, Y. J., Lefebvre, A. C., Harrington, M., & Bourgeois, C. M. (1997). Dietary fiber: Nutritional and technological interest. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie-Food Science and Technology*, 8, 41-48.
- Ubando-Rivera, J., Nvarro-Ocaña, A., & Valdivia-López, M. A. (2005). Mexican lime peel comparative study on contents of dietary fiber and associated antioxidant activity. *Food Chemistry*, 89, 57-61.
- Volden, J., Borge, G. I. A., Hansen, M., Wicklund, T., & Bengtsson, G. B. (2008). Effect of thermal treatment on glucosinolates and antioxidant-related parameters in red cabbage (*Brassica oleracea* L. ssp. capitata f. rubra). *LWT-Food Science and Technology*, 43, 63-73.
- Wennberg, M., Ekvall, J., Olsson, K. and Nyman, M. (2006). Change in carbohydrate and glucosinolate composition in white cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata) during blanching and treatment with acetic Acid. *Food Chemistry*, 95, 226-236.
- Yu, L., Zhou, K., & Party, J. (2005). Antioxidant properties of cold-pressed black caraway, carrot, cranberry and hemp seed oils. *Food Chemistry*, 91, 723-729.
- Zhang, D., & Hamauzu, Y. (2004). Phenolics, ascorbic acid, carotenoids and antioxidant activity of broccoli and their changes during conventional and microwave cooking. *Food Chemistry*, 88, 53-59.
- Zulueta, A., Esteve, M. J., Frasquet, I., & Frígola, A. (2007). Vitamin C, vitamin A, phenolic compounds and total antioxidant capacity of new fruit juice and skim milk mixture beverages marketed in Spain. *Food Chemistry*, 103, 1365-1374.