

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กล้วยน้ำว้า

กล้วยน้ำว้า [Musa (ABB group) “Kluai Numwa”] มีชื่ออื่น ๆ คือกล้วยใต้ (เชียงใหม่ และ เชียงราย) กล้วยตานีอ่อน (อุบลราชธานี) กล้วยมะลิอ่อน (จันทบุรี) กล้วยอ่อน (ชัยภูมิ) ชื่อสามัญ Pisang Awak กล้วยน้ำว้ามีลำต้นเทียมสูงไม่เกิน 3.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 15 เซนติเมตร กาบลำต้น ด้านนอกสีเขียวอ่อน มีประคำเล็กน้อย ด้านในสีเขียวอ่อน ก้านใบมีร่องค่อนข้างแคบ เส้น กลางใบสีเขียว ก้านช่อดอกไม่มีขน ใบประดับรูปไข่ค่อนข้างป้อมม้วนขึ้นปลายป้าน ด้านบนสีแดง อมม่วงมีนวล ด้านล่างสีแดงเข้ม เครือหนึ่งมี 7-10 หวี หวีหนึ่งมี 10-16 ผล ผลกว้าง 3-4 เซนติเมตร ยาว 11-13 เซนติเมตร มีเหลี่ยมก้านผลยาว เปลือกหนา เมื่อสุกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอมน้ำตาลเนื้อมีสีขาว รสหวาน ที่แกนกลางหรือเรียกว่าไส้กลาง มีสีเหลือง ชมพู หรือขาว ซึ่งทำให้แบ่งออกได้เป็นกล้วยน้ำว้าเหลือง กล้วยน้ำว้าแดง และกล้วยน้ำว้าขาว กล้วยน้ำว้าปลูกได้ทั่วไปในประเทศไทย (เบญจมาศ, 2545)

### 2.2 คุณค่าเชิงสุขภาพของกล้วยน้ำว้า

ในกล้วยน้ำว้าดิบและสุกจะมีปริมาณวิตามินเอ 483 และ 375 IU ต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่มีปริมาณวิตามินซีเท่ากับ 31 และ 14 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ (เบญจมาศ, 2545) นอกจากนี้กล้วยน้ำว้ายังเป็นแหล่งของสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งมีสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชัน กล้วยน้ำว้าทั้งดิบและสุกจะมีปริมาณฟีนอลทั้งหมดประมาณ 48-198 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด โดยจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะความสุกของกล้วยน้ำว้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติการต้านออกซิเดชันมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน สอดคล้องกับปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลทั้งหมดที่ลดลงด้วย (ชูลิกร, 2549) วิตามินเอในกล้วยน้ำว้าจะอยู่ในรูปของเบต้า-แคโรทีน ซึ่งมีสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันเช่นเดียวกับวิตามินซี และสารประกอบฟีนอลิก และเป็นที่ยอมรับกันแล้วว่าสารต้านออกซิเดชันมีส่วนสำคัญต่อการลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคเรื้อรังต่างๆ เช่น โรคหัวใจ โรคความดันโลหิตสูง โรคหลอดเลือด โรคมะเร็ง โรคต่อกระจก เป็นต้น (Bravo, 1998)

### 2.3 อนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ คือ กลุ่มของสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอกที่ยังไม่ได้จับคู่ มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง อิเล็กตรอน ดังนั้นจึงมีความว่องไวสูงในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลในเซลล์ของร่างกาย อนุมูลอิสระส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จะเกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของออกซิเจนไปยังโมเลกุลของน้ำ โดยส่วนใหญ่เกิดเป็นอนุพันธ์ของออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา (reactive oxygen species, ROS) ซึ่งสารกลุ่มนี้ได้แก่ อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical, OH<sup>•</sup>) ซูเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน (superoxide anion, O<sub>2</sub><sup>•-</sup>), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) กรดไฮโปคลอรัส (hypochlorous, HOCl) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีกลุ่มของสารที่เรียกว่าอนุพันธ์ของไนโตรเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา (reactive nitrogen species, RNS) ที่สำคัญได้แก่ ไนตริกออกไซด์ (nitric oxide, NO<sup>•</sup>) และ เปอร์ออกไซด์ไนไตรท์ (peroxynitrite, ONOO<sup>•</sup>) ทั้งกลุ่มของ ROS และ RNS จัดเป็นแหล่งของอนุมูลอิสระที่สำคัญของร่างกาย (วัลยา และพัชรี, 2542) อนุมูลอิสระเกิดได้ทั้งจากภายในร่างกายและภายนอก ร่างกาย เช่น เกิดที่ไมโทคอนเดรีย ไมโครโซม เพอร์ออกซิโซม โดยเกิดจากระบบการขนส่งอิเล็กตรอน การเกิด เมตาบอลิซึม ฟาโกไซโตซิส หรือเกิดจากสารเคมี รังสี ยาบางชนิด และความร้อน (Punchard and Kelly, 1996) สภาวะ oxidative stress คือสภาวะที่ร่างกายไม่สามารถควบคุมและป้องกันปริมาณของอนุมูลอิสระให้อยู่ในระดับที่ปกติที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายได้ โดยอนุมูลอิสระที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น การเกิดออกซิเดชันของไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และกรดนิวคลีอิก การสร้างพันธะโควาเลนต์กับโปรตีน เป็นต้น และพบว่าอนุมูลอิสระก่อให้เกิดสภาวะทางพยาธิสภาพในโรคสำคัญบางโรค ได้แก่ มะเร็ง โรคหัวใจไขมันอุดตันในเส้นเลือด ไช้ออกเสบ ต้อกระจก เป็นต้น (วัลยา และพัชรี, 2542)

### 2.4 สารต้านออกซิเดชัน (Antioxidant)

สารต้านออกซิเดชัน คือสารที่ทำหน้าที่ต่อต้านหรือยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในที่นี้หมายถึง สารที่สามารถยับยั้งและควบคุมอนุมูลอิสระไม่ให้ไปกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (วัลยา และพัชรี, 2542) สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่พบในธรรมชาติมี 4 ประเภท (Frankel and Meyer, 2000) ได้แก่

2.4.1 สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันในกลุ่มของเอนไซม์ที่สร้างได้ในเซลล์ร่างกาย ได้แก่ คาตาเลส (catalase) ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเตส (superoxide dismutase) และกลูตาไธโอนเปอร์ออกซิเดส (glutathione peroxidase) เป็นต้น

2.4.2 สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันในกลุ่มของวิตามิน ได้แก่ วิตามินอี ในถั่ว ธัญพืช รำ ข้าวกล้อง งา และวิตามินซีในผลไม้ ผักสด เป็นต้น

2.4.3 สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันในกลุ่มของแร่ธาตุ เช่น ซีลีเนียม และสังกะสี ซึ่งทำหน้าที่เป็นโคแฟกเตอร์ (co-factors) ของเอนไซม์ต้านออกซิเดชัน

2.4.4 สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันในกลุ่มของสารเคมีจากพืช (phytochemicals) เป็นสารเคมีจากพืชที่ไม่ใช่วิตามินและสารอาหาร เช่น แครโรทีน (carotene) ไลโคปีน (lycopene) แซนโทฟิลล์ (xanthophyll) แทนนิน (tannin) ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) และสารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) อื่นๆ เป็นต้น

## 2.5 สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds)

สารประกอบฟีนอลิก หรือ โพลีฟีนอล (polyphenols) เป็นสารในกลุ่ม secondary metabolite ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในกระบวนการเจริญเติบโต และการขยายพันธุ์ของพืชแต่ละชนิด โดยทั่วไปมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) มากกว่าหรือเท่ากับ 1 หมู่เกาะกับวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) สารประกอบฟีนอลิกที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่า 1 หมู่ นิยมเรียกว่า สารประกอบโพลีฟีนอล (polyphenol) โดยส่วนใหญ่สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารที่ละลายน้ำ มักพบรวมอยู่กับน้ำตาลในรูปไกลโคไซด์ (glycosides) โดยน้ำตาลดังกล่าวอาจจะเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharides) น้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharides) หรือ โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharides) ก็ได้ แต่น้ำตาลที่พบมากที่สุดเป็นโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลิก คือ กลูโคส (glucose) ส่วนน้ำตาลชนิดอื่นที่พบได้แก่ กาแลคโตส (galactose) แรมโนส (rhamnose) ไซโลส (xylose) อะราบิโนส (arabinose) และอนุพันธ์ของน้ำตาลเหล่านี้ เช่น กรดกลูโคโรนิก (glucuronic acid) กรดกาแลคทูโรนิก (galacturonic acid) และอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าอาจมีการรวมตัวกันระหว่างสารประกอบฟีนอลิกกับสารประกอบฟีนอลิกด้วยกันเอง หรือสารประกอบฟีนอลิกกับสารประกอบอื่น ๆ เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acids) กรดอินทรีย์ (organic acids) เอมีน (amines) และไขมัน (Bravo, 1998) การสร้างสารประกอบฟีนอลิกของพืชจะมีทั้งปัจจัยทางด้านพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีการเพาะปลูก ระดับความสูงกระบวนการแปรรูป หรือแม้แต่วิธีการเก็บรักษาก็ล้วนแต่มีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งสิ้น สารประกอบฟีนอลิกแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) และนอนฟลาโวนอยด์ (non-flavonoids) (Burns และคณะ, 2000) ฟลาโวนอยด์มี 12 กลุ่มย่อย ได้แก่ ฟลาโวน (flavone) ไอโซฟลาโวน (isoflavone) ฟลาโวนอล (flavonol) ฟลาโวนอน (flavonone) ฟลาวาโนนอล (flavanonol) ฟลาวานอล (flavanol) ลูโคแอนโทไซยานิน (lucoanthocyanin) แอนโทไซยานิน (anthocyanin) ชาลโคน (chalcone) ไดไฮโดรชาลโคน (dihydrochalcone) ออโรน (aurone) และแซนโทน (xanthone) นอนฟลาโวนอยด์ ที่สำคัญได้แก่ กรดฟีนอลิก (phenolic acid) ตัวอย่างของกรดฟีนอลิกที่พบมากในผลไม้ทั่วไป คือ กรดแกลลิก (gallic acid) กรดโปรโตแคเทคิควิก (protocatechuic acid) กรดวานิลลิก (vanillic acid) กรดพาราความาริก (p-coumaric acid) กรดเฟอร์ูลิก (ferulic acid) เป็นต้น

นอกจากนี้ นอนฟลาโวนอยด์ ชนิดอื่น ๆ ได้แก่ ไฮดรอกซีซินนามต (hydroxycinnamate) สติล-บิเนส (stibinase) ความคงตัวของสารประกอบโพลีฟีนอลทั้งหมดในการเป็นสารต้านออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบฟีนอล ซึ่งได้แก่ (วิวัฒน์,2545)

### 1. ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)

เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในแต่ละตำแหน่งของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีบทบาทต่อสมบัติของการเป็นสารต้านออกซิเดชัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด - ด่างซึ่งจะมีผลทำให้หมู่ไฮดรอกซิลเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงน่าจะมีผลต่อสมบัติการเป็นสารต้านออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลด้วยเช่นกัน

### 2. อุณหภูมิ

อุณหภูมิสูงในระหว่างกระบวนการแปรรูปจะมีผลทำให้สารประกอบฟีนอลโมเลกุลเล็กๆ ระเหยกลายเป็นไอได้ ในขณะที่ฟลาโวนอยด์ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลที่มีโครงสร้างแบบ C6 - C3 - C6 โดยมีลักษณะเป็นวงแหวน 3 วงต่อกัน จะเกิดการแตกของวงแหวน C และสลายตัวต่อไป โดยวงแหวน B จะเปลี่ยนเป็นกรดคาร์บอกซิลิก และวงแหวน A จะเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอกซีอัลดีไฮด์ตามลำดับ และระเหยไปพร้อมกับไอน้ำ

### 3. แสง

แสงแดดเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เร่งการสลายตัวหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบฟีนอล เช่น หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 5 ในโมเลกุลของแอนโทไซยานินจะสามารถเรืองแสงและไวต่อการสลายตัวเมื่อโดนแสงแดด นอกจากนี้แสงแดดยังเป็นปัจจัยเร่งให้เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนให้เกิดเร็วขึ้นด้วย

### 4. เอนไซม์

ในสภาพที่มีเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenoloxidase) อยู่ด้วยจะเป็นการเร่งการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลบางชนิดให้เกิดได้เร็วขึ้น แต่อัตราเร่งปฏิกิริยาจะแตกต่างกันออกไป เช่น โพลีฟีนอลออกซิเดส สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของ (-) - epicatechin ได้ดีกว่า (+) - catechin

### 5. การรวมตัวกับโมเลกุลอื่นๆ

สารประกอบฟีนอลสามารถเกิดการรวมตัวกับโมเลกุลอื่นๆ เช่น โปรตีน โพลีแซคคาไรด์อัลคาลอยด์และแอนโทไซยานินได้ง่าย และปฏิกิริยาอาจจะเป็นแบบสามารถผันกลับได้หรือไม่ได้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา เช่น ออกซิเจน ไอออนโลหะ เอนไซม์และกรด เป็นต้น ซึ่งจะเป็นตัวการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยา เช่น ทำให้สารประกอบในภาวะสมดุลรวมตัวกันและตกตะกอนแยกออกมา หรือเกิดพันธะโควาเลนต์รวมตัวกันเป็นสารใหม่ทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถผันกลับได้ หากปรากฏการณ์เหล่านี้มีผลทำให้สารประกอบฟีนอลมีการเปลี่ยนแปลงของ

โครงสร้างไป จะทำให้สารประกอบฟีนอลมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างไป จะทำให้สารประกอบฟีนอลสูญเสียสมบัติในการเป็นสารต้านออกซิเดชันไปได้

## 2.6 วิตามินซี (นิชียา, 2549)

วิตามินซี หรือกรดแอสคอร์บิก เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลเฮกโซส ละลายได้ดีในน้ำ จึงถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย และกระจายตัวไปตามเนื้อเยื่อต่างๆทั่วร่างกาย พบมากที่ต่อมอะดรีนาลและต่อมพิทูอิทารี ร่างกายต้องการวิตามินซีประมาณวันละ 50 มิลลิกรัม วิตามินซีทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันและเกี่ยวข้องในกระบวนการสร้างโปรตีน คอลลาเจน ดังนั้นถ้าร่างกายได้รับวิตามินซีไม่เพียงพอจะทำให้การสังเคราะห์โปรตีนคอลลาเจนผิดปกติมีผลต่อความแข็งแรงของหลอดเลือดต่างๆทั่วร่างกาย โดยเฉพาะเส้นเลือดฝอยจะเปราะและแตกได้ง่าย ดังนั้นเมื่อขาดวิตามินซีจึงเป็นโรคเลือดออกตามไรฟัน

วิตามินซีเป็นรีดิวซิงเอเจนต์อย่างแรง (strong reducing agent) มีความคงตัวต่ำ สลายตัวง่ายเมื่อถูกแสง อากาศ และความร้อน โลหะหนัก เช่น ทองแดง ไอออนและเหล็ก ไอออน จะเร่งการสลายตัวของวิตามินซีให้เกิดเร็วขึ้น วิตามินซีที่อยู่ในรูป L-ascorbic acid จะมีคุณค่าทางชีวภาพ แต่ถ้าเป็น D-ascorbic acid จะไม่มีคุณค่าทางชีวภาพหรือไม่มีประโยชน์ต่อร่างกาย นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์อีกหลายชนิดที่เร่งการสลายตัวของวิตามินซีได้ เช่น แอสคอร์บิกแอกซิไดออกซิเดส (ascorbic acid oxidase) ฟีนอลเลส (phenolase) ไซโทโครมออกซิเดส (cytochrom) และเพอร์ออกซิเดส (peroxidase) เอนไซม์แอสคอร์บิกแอกซิไดออกซิเดสเร่งการสลายตัวของวิตามินซีโดยตรง แต่เอนไซม์ 3 ชนิดหลังเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของวิตามินซีทางอ้อม เช่น เอนไซม์ไซโทโครมออกซิเดส จะออกซิไดส์ไซโทโครมรีดิวซ์ (reduced form) เป็นไซโทโครมรูปออกซิไดส์ (oxidized form) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อกับวิตามินซีได้ หรือเอนไซม์ฟีนอลเลสจะเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมโน-และไดไฮดรอกซี-ฟีนอลเป็นควิโนน ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับวิตามินซีทำให้ปริมาณวิตามินซีลดลง

อย่างไรก็ตาม เอนไซม์เหล่านี้พบมากในผักผลไม้สด ซึ่งจะเร่งการสลายตัวของวิตามินซีในผักและผลไม้สดได้เมื่อเนื้อเยื่อของผลไม้สดเกิดการเสียหายเนื่องจากการปอก หั่น หรือรอยชำในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้จะมีการทำลายเอนไซม์เหล่านี้โดยใช้ความร้อน ซึ่งทำได้โดยการลวกผักและผลไม้ในน้ำร้อน หรืออบไอน้ำในระยะเวลาสั้นๆก่อน จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้ การลวกผักโดยใช้น้ำร้อนจะมีการสูญเสียวิตามินซีมากกว่าการใช้ไอน้ำ นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับขนาดชิ้นของผักและผลไม้ที่หั่นด้วย ตัวอย่างเช่น แครรอตที่หั่นเป็นชิ้นเล็กๆเมื่อผ่านการลวกแล้วจะสูญเสียวิตามินซี 32-50 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อหั่นชิ้นใหญ่จะสูญเสียวิตามินซี 22-33 เปอร์เซ็นต์

## 2.7 วิตามินเอ (นิธิยา, 2549)

วิตามินเอเป็นอนุพันธ์แอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งในอาหารพบมากในรูปเอสเทอร์ของกรดไขมัน วิตามินเอมีสีเหลืองอ่อน ทนกรดและด่าง แต่ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับอากาศและมีออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ถูกทำลายได้ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตหรือแสงอาทิตย์ และจะถูกทำลายเมื่อละลายอยู่ในน้ำมันที่เกิดการหืน เนื่องจากมีเพอร์ออกไซด์เกิดขึ้น

วิตามินเอ พบเฉพาะในสัตว์เท่านั้น ซึ่งอยู่ในรูปเรตินอล (retinol) เรตินอลเอสเทอร์ (retinol ester) เรตินาล (retinal) และกรดเรติโนอิก (retinoic acid) อาหารที่มีวิตามินเอมากที่สุด คือ น้ำมันตับปลา โดยเฉพาะปลาคอดและปลาทูน่านอกจากนี้ยังพบวิตามินเอมากในตับของสัตว์ต่างๆ ไข่แดง น้ำมัน และผลิตภัณฑ์นม อาหารที่ได้จากพืชไม่มีวิตามินเอ แต่มีสารประกอบแคโรทีนอยด์ที่ละลายได้ในไขมัน และน้ำมันเช่นเดียวกัน สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นวิตามินเอได้ที่ผนังลำไส้เล็ก ตับ และไต จึงเรียกแคโรทีนอยด์ว่าเป็น โปรวิตามินเอ (provitamin A) แคโรทีนอยด์พบมากในพืชผักที่มีสีเขียวและสีเหลือง และผลไม้ที่มีสีเหลืองหรือสีส้มแดง ซึ่งการบริโภคแครอท หรือฟักทองต้องผัดด้วยน้ำมัน จึงจะทำให้ร่างกายดูดซึมแคโรทีนอยด์ได้ดี

แคโรทีนอยด์ที่พบในธรรมชาติมีหลายชนิด ได้แก่ แอลฟา-แคโรทีน บีต้า-แคโรทีน และแกมมา-แคโรทีน แคโรทีนชนิดที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมากที่สุดคือ บีต้า-แคโรทีน ซึ่งนอกจากจะเป็นโปรวิตามินเอแล้วยังทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันให้แก่ร่างกาย ช่วยทำลายอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกาย จึงเป็นสารที่ช่วยชะลอความแก่และยังป้องกันการเกิดมะเร็งได้

ในกระบวนการแปรรูปอาหาร หรือระหว่างการเก็บรักษา วิตามินเอและแคโรทีนถูกทำลายได้ ปริมาณ 5 - 40 เปอร์เซ็นต์ ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนและอุณหภูมิสูง วิตามินเอจะถูกทำลายโดยปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน และการแตกสลายโมเลกุล (fragmentation) แต่ในสภาวะที่มีออกซิเจน วิตามินเอและแคโรทีนจะถูกทำลายโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation) อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับความดันย่อย (partial pressure) ของออกซิเจน อุณหภูมิ และ  $a_w$  ของอาหาร วิตามินเอยังสลายตัวได้ง่ายในน้ำมันแร่ (mineral oil) แต่จะคงตัวในสภาวะที่เป็นด่าง และภาวะที่ใช้แปรรูปอาหารตามปกติ เช่นการพาสเจอร์ไรเซชันน้ำมันจะไม่สูญเสียวิตามินเอและแคโรทีน แต่จะสูญเสียเมื่อสัมผัสกับแสง ดังนั้นการใช้ภาชนะบรรจุสำหรับน้ำมันที่ทึบแสงจะช่วยรักษาปริมาณวิตามินเอได้

แคโรทีนอยด์มาจากชื่อของแคโรท เนื่องจากพบแคโรทีนอยด์มากในแคโรท สีของแคโรทีนอยด์จะผันแปรไปตามจำนวนของพันธะคู่ (conjugated double bond) ในโมเลกุล ถ้ามีพันธะคู่มากจะทำให้มีสีแดงเข้มขึ้น จำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ที่น้อยที่สุดมี 7 อัน ซึ่งจะให้สีเหลือง พันธะคู่อาจอยู่ในรูป *cis* หรือ *trans* ก็ได้ แต่แคโรทีนอยด์ที่พบในอาหารส่วนใหญ่อยู่ในรูป *all-trans* อาจพบ *cis* บ้างเป็น *mono-cis* หรือ *di-cis* แต่น้อยมาก แคโรทีนอยด์ที่มีโครงสร้างอยู่ในรูป *all-trans* จะมีสีเข้ม ถ้ามีจำนวนพันธะคู่ที่อยู่ในรูป *cis* เพิ่มมากขึ้นสีจะจางลง ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนจาก *trans* เป็น *cis* คือ แสง ความร้อน และกรด เมื่ออาหารได้รับอุณหภูมิสูงจะเกิด *trans-cis* isomerization ได้ หากอยู่ในรูป *cis* มากขึ้นจะทำให้ vitamin A activity ลดลง แคโรทีนอยด์ยังสลายตัวได้ง่ายเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเฉพาะเมื่อละลายอยู่ในน้ำมัน จึงถูกทำลายได้ง่ายเมื่อเกิดการออกซิเดชัน

แคโรทีนอยด์ที่พบในอาหารมีความสำคัญต่อร่างกายเพราะสามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ (provitamin A) โดยเฉพาะบีต้า-แคโรทีน 1 โมเลกุล สามารถสลายตัวได้เป็นวิตามินเอ 2 โมเลกุล แต่แกมมา-แคโรทีน ซึ่งมีวงแหวน 1 อัน เมื่อสลายตัวได้วิตามินเอเพียง 1 โมเลกุลเท่านั้น แคโรทีนอยด์พบมากในอาหารประเภทผักและผลไม้ จึงนิยมวิเคราะห์หาปริมาณบีตา-แคโรทีนในผักผลไม้ เพื่อใช้เป็นแหล่งของวิตามินเอ ซึ่งบีตา-แคโรทีนยังมีความสามารถเป็นสารต้านออกซิเดชันได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ (<150 torr O<sub>2</sub>) และอาจเป็น pro-oxidant ในสภาวะที่มีออกซิเจนสูง และเมื่อทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชัน บีตา-แคโรทีนจะจับกับออกซิเจนอะตอม (singlet oxygen) หมูไฮดรอกซิล อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ และทำปฏิกิริยากับอนุมูลเพอร์ออกไซด์ (peroxy radical, ROO<sup>•</sup>) ได้เป็น ROO-β-carotene หากบีตา-แคโรทีนทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชัน จะเปลี่ยนเป็นวิตามินเอน้อยลง ส่วนเรตินอลและเรติเอสเทอร์ก็สามารถจับอนุมูลอิสระได้บ้าง (นิธิยา, 2549)

## 2.8 กล้วยแผ่นบางทอดกรอบ (banana chips)

กล้วยแผ่นบางทอดกรอบ (banana chips หรือ banana crisps) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายกับมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ (potato chips) โดยใช้กล้วยดิบเป็นวัตถุดิบ นำมาผานเป็นแผ่นบาง ผึ่งให้แห้ง จากนั้นนำมาทอดน้ำมันท่วม (Crowther, 1979) ในประเทศไทยนิยมใช้กล้วยน้ำว้าหรือกล้วยหักมุก (Musa (ABB group) “Kluai Hak Muk”) และปัจจุบันมีการใช้กล้วยหอมด้วย หลังจากทอดแล้วนิยมฉาบด้วยน้ำตาลเรียกว่า กล้วยฉาบ (เบญจมาศ, 2545) หรือปรุงรสด้วยเกลือ หรือสารปรุงแต่งกลิ่นรสอื่นๆ กรรมวิธีการผลิตกล้วยทอดกรอบในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทยนั้น โดยมากจะมีกระบวนการแปรรูปที่

คล้ายคลึงกันคือ นำกล้วยมาปลอกเปลือก ล้างให้สะอาด หั่นเป็นชิ้นบางและทอด แต่อาจมีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยในรายละเอียดของแต่ละวิธีการแปรรูป โดยสามารถสรุปขั้นตอนหลักๆของการแปรรูปกล้วยแผ่นบางทอดกรอบ ดังนี้ (มณฑาทิพย์และคณะ, 2548)

2.8.1 ปลอกเปลือกกล้วย โดยกรีดตามแนวยาวของผลกล้วยโดยรอบ หรือนำกล้วยมาล้างก่อน เพื่อความสะดวกในการปลอกเปลือกและดึงเปลือกออก จากนั้นแช่ด้วยสารละลายเกลือหรือสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ หรืออาจแช่ในน้ำส้มสายชูที่เจือจางเพื่อป้องกันการเกิดสีน้ำตาล

2.8.2 นำกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการแช่สารละลายมาล้างให้สะอาด ทิ้งให้สะเด็ดน้ำ ผานกล้วยตามยาวของผล หรือฝานเป็นชิ้นบางตามขวางหนาประมาณ 0.2-0.5 เซนติเมตร ผึ่งกล้วยเพื่อลดความชื้น โดยผึ่งบนตะแกรง หรือนำมาอบในถาดพลาสติกเพื่อเป็นการปรับความชื้นให้กล้วยแต่ละชิ้นมีความชื้นใกล้เคียงกัน ในบางกรณีอาจนำมาทอดเลยโดยไม่ต้องผ่านการผึ่งให้แห้งก่อนก็ได้

2.8.3 นำกล้วยที่ได้มาทอดโดยตั้งกระทะใส่น้ำมันร้อน นำกล้วยลงทอดจนกล้วยมีลักษณะพองเหลืองจึงตักขึ้นให้สะเด็ดน้ำมัน โดยมีการกำหนดระดับของอุณหภูมิของน้ำมันและเวลาที่ใช้ทอด เช่น 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เป็นต้น

2.8.4 นำกล้วยที่ผ่านการทอดแล้วมาผึ่งให้สะเด็ดน้ำมัน โดยหลังจากนั้นอาจมีการนำมาอบที่อุณหภูมิประมาณ 50-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15-30 นาที เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบเพิ่มขึ้น ในการแปรรูปกล้วยทอดกรอบนั้น ได้มีการกำหนดมาตรฐานของชุมชน (มพช.111/2556) ทางด้านคุณลักษณะ ไว้ดังนี้

- 1) ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องมีรูปทรงและขนาดใกล้เคียงกัน อาจแตกหักได้บ้าง
- 2) สีต้องมีสีเป็นไปตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้ อาจมีสีคล้ำได้บ้างแต่ต้องไม่ไหม้เกรียม
- 3) กลิ่นรสต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้ ปราศจากกลิ่นอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับ กลิ่นหืน
- 4) ลักษณะเนื้อสัมผัส ต้องกรอบ ไม่แข็งกระด้าง
- 5) ความชื้น ต้องไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก
- 6) ค่าเปอร์ออกไซด์ต้องไม่เกิน 30 มิลลิกรัมสมมูลเปอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อกิโลกรัม

จากข้อมูลงานวิจัยที่รายงาน โดย รามราช (2550) พบว่ากรรมวิธีผลิตกล้วยแผ่นบางทอดกรอบจากกล้วยน้ำว้าดิบซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ คือ การนึ่ง การหั่นเป็นชิ้นบาง การเก็บในถาดพลาสติก และการทอด มีผลทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณสารประกอบฟีนอลิกคิดเป็น 28, 57, 73, 98 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากเริ่มต้น ซึ่งส่งผลให้การลดลงของสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH เกิดขึ้นในลักษณะที่

สอดคล้องกันคือ 33, 65, 96, 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเป็นสารที่มีคุณค่าเชิงสุขภาพในกล้วยน้ำว้าถูกทำลายไปเกือบหมดหลังจากการทอด ดังนั้นการศึกษาเพื่อหาวิธีการในการแปรรูปที่เหมาะสม ซึ่งยังสามารถคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งด้านคุณภาพทางเคมีกายภาพและคุณภาพทางโภชนาการ จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ

## 2.9 การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

การทอดในระบบสุญญากาศอาศัยหลักการที่ว่า จุดเดือดของน้ำมันจะลดลงที่ความดันต่ำ ซึ่งจุดเดือดของน้ำมันอาจลดลงจาก 180 องศาเซลเซียส เหลือเพียง 60 – 70 องศาเซลเซียส โดยในกระบวนการจะมีการดึงความดันออกทำให้ในกระบวนการทอดมีความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศปกติ อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 6.65 กิโลปาสกาล ซึ่งการทอดในระบบสุญญากาศนี้มีข้อดีคือ ช่วยลดปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับในผลิตภัณฑ์ รักษาคุณภาพของสีและกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ คงคุณภาพของน้ำมันที่ใช้ทอดไว้ได้นาน รวมทั้งสามารถลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ ปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคการทอดในระบบสุญญากาศมาใช้ในการทอดผักและผลไม้ชนิดต่างๆ เครื่องทอดในระบบสุญญากาศส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย หม้อทอดสุญญากาศ บั๊มสุญญากาศ ชุดควบคุม และระบบควบคุม (วิล, 2547; Da Silva และ Moreira, 2008; Perez-Tinoco และคณะ; 2008 ;Shyu และ Hwang, 2001) สำหรับแผนผังของเครื่องทอดสุญญากาศที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังภาพที่ 2.1 ซึ่งรายละเอียดของส่วนประกอบมีดังนี้

1) แผงควบคุมระบบไฟฟ้า ใช้ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าให้แก่ ตัวทำความร้อน (Heater) ของหม้อทอดและบั๊มสุญญากาศ

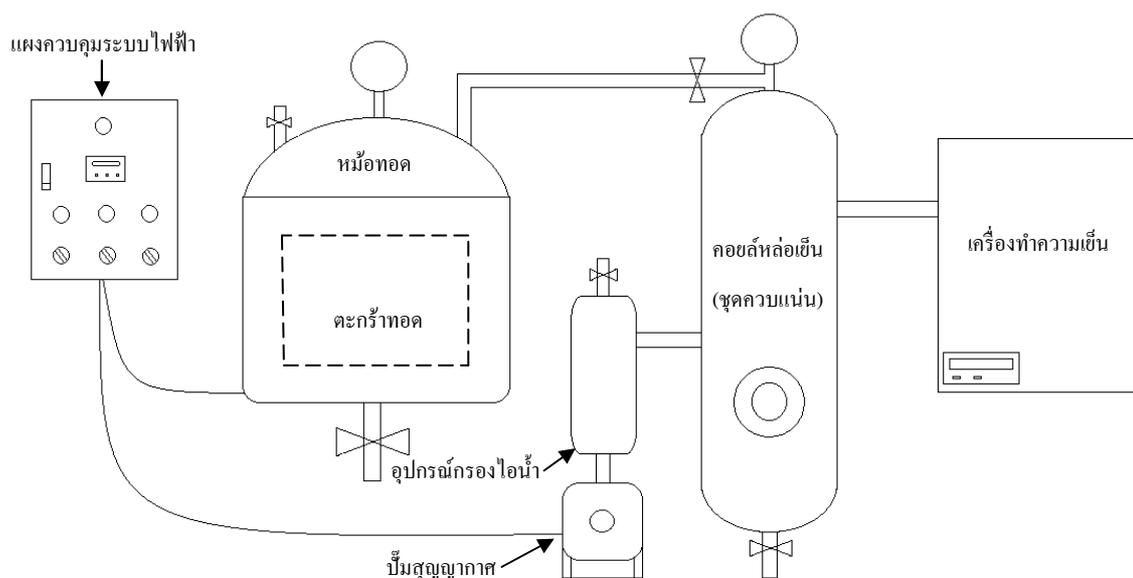
2) หม้อทอด ใช้ในการทอดในระบบสุญญากาศ ภายในประกอบด้วยตัวทำความร้อน เพื่อใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมัน และตะกร้าที่ใช้สำหรับทอด บนฝาหม้อจะมีเกจ (gauge) ใช้สำหรับวัดความดันในการทอด

3) ชุดควบคุม ประกอบด้วยคอยล์หล่อเย็นและเครื่องทำความเย็น ใช้ในการควบแน่นน้ำที่ระเหยออกจากอาหาร เพื่อไม่ให้ น้ำเข้าสู่บั๊มสุญญากาศ โดยน้ำเย็นจากเครื่องทำความเย็น จะทำหน้าที่ในการหล่อเย็น ซึ่งน้ำเย็นจะไหลวนอยู่ในคอยล์หล่อเย็นจากบนลงล่าง และมีวาล์วปิด – เปิดอยู่ด้านล่างเพื่อใช้ระบายน้ำที่ได้จากการควบแน่น

4) อุปกรณ์กรองไอน้ำ ภายในจะบรรจุไปด้วยใยแก้ว เพื่อกรองไม่ให้ไอน้ำสามารถผ่านไปยังปั๊มสุญญากาศได้

5) ปั๊มสุญญากาศ ใช้ในการลดความดันของเครื่องทอด

หลักการการทำงานของเครื่องทอดสุญญากาศที่ใช้ในการทดลอง เมื่อเปิดสวิทช์ที่ควบคุมตัวทำความร้อนของหม้อทอดที่แผงควบคุมระบบไฟฟ้า ไฟฟ้าจะถูกจ่ายให้แก่ตัวทำความร้อนของหม้อทอด เพื่อให้ไขมันในหม้อร้อนขึ้นตามอุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นบรรจุอาหารลงยังตะกร้าทอด และจุ่มลงไปยังหม้อทอด ปิดฝาหม้อ เปิดสวิทช์ปั๊มสุญญากาศที่แผงควบคุมไฟฟ้า เพื่อให้ปั๊มทำงานและจากนั้นความดันภายในหม้อทอดจะลดลงเรื่อยๆจนถึงระดับที่ต้องการ ในระหว่างการทอดจะมีไอน้ำที่ระเหยออกมาจากชิ้นอาหาร ซึ่งจะถูกลดความดันที่คอยล์หล่อเย็น เมื่อครบเวลาที่กำหนดในการทอดจึงนำตัวอย่างออกมาสลัดน้ำมันด้วยเครื่องสลัดน้ำมัน (ขั้นตอนในการใช้เครื่องแสดงใน ภาคผนวก ก)



ภาพที่ 2.1 แผนผังเครื่องทอดสุญญากาศที่ใช้ในการทดลอง

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการทอดภายใต้สุญญากาศ

งานวิจัยของปิยะทิพย์ (2550) ศึกษาผลของการเตรียมเบื้องต้น ได้แก่ การแช่แข็ง และการลดความชื้นก่อนทอดและความสูงที่ระดับต่าง ๆ กันต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมแวนทอดภายใต้สุญญากาศโดยทอดที่ความดัน 60 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาอยู่ในช่วง 6 – 22 นาที ตามความเหมาะสมของแต่ละตัวอย่าง โดยวัดความชื้นที่เหมาะสมหลังจากการทอด ให้อยู่

ในช่วง 3-4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเปียก พบว่าการลดความชื้นก่อนทอดนั้น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งมากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างแช่แข็งและตัวอย่างควบคุม (ไม่ผ่านการแช่แข็งหรืออบแห้ง) เนื่องจากการอบแห้งทำให้เกิดการสูญเสียน้ำจึงทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นกล้วย ดังนั้นกล้วยหอมที่ระดับความสุก 4 (จากระดับความสุกมาตรฐาน 8 ระดับ) ที่ผ่านการแช่แข็ง จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตกล้วยแผ่นบางทอดกรอบที่สุด เนื่องจากสามารถลดการดูดซับน้ำมัน และให้ลักษณะทางเนื้อสัมผัสที่กรอบมากกว่าสภาวะอื่นๆ

Garayo และ Moreira (2002) ศึกษาผลอุณหภูมิของน้ำมัน และระดับการลดความดันต่อการหดตัว การดูดซับน้ำมัน และคุณภาพทางเคมีกายภาพบางประการของมันฝรั่งแผ่นบางทอดกรอบ (potato chips) ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ พบว่าอุณหภูมิและระดับการลดความดันมีผลต่อการหดตัว การดูดซับน้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมันฝรั่งที่ทอดในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงกว่าและที่ระดับความเป็นสุญญากาศน้อยกว่าจะมีการหดตัวน้อยกว่าตัวอย่างที่ทอดในน้ำมันอุณหภูมิต่ำ และความเป็นสุญญากาศสูง แต่ปัจจัยดังกล่าวไม่มีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามความแข็งของผลิตภัณฑ์จะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและระดับความเป็นสุญญากาศลดลง นอกจากนี้มันฝรั่งที่ทอดในสภาวะสุญญากาศ (3.115 กิโลปาสกาล 144 องศาเซลเซียส) จะมีการหดตัวสูงกว่า แต่มีความแข็งน้อยกว่าและสีอ่อนกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทอดด้วยวิธีปกติ (165 องศาเซลเซียส)

Mariscal และ Bouchon (2008) ทดลองเปรียบเทียบ การดูดซับน้ำมัน และการเปลี่ยนแปลงสีของแอปเปิ้ลแผ่นบางที่ผ่านการทอดภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศปกติและภายใต้สภาวะสุญญากาศ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีการดูดซับน้ำมันและการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าการทอดภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศปกติ นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบตัวอย่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่มีการลดความชื้นของชิ้นแอปเปิ้ลก่อนการทอด ด้วยการใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ความชื้นก่อนทอดที่ 64 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการลดความชื้นของชิ้นแอปเปิ้ลก่อนการทอดสามารถลดการดูดซับน้ำมันลงได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการทอดภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศปกติ

Perez-Tinoco และคณะ (2008) ศึกษาผลของการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพและทางโภชนาการของสับประรดแผ่นบาง (pineapple chips) พบว่าความชื้น  $a_w$  ค่าสี ( $L^*$ ,  $C^*$ ,  $H^*$ ) และปริมาณวิตามินซี มีค่าลดลง แต่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทอดเพิ่มขึ้น การทอดชิ้นสับประรดที่อุณหภูมิ 112 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6.9 นาที ภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดัน  $24 \pm 2$  กิโลปาสคา จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีเหลืองทอง ( $L^* \geq 60$ ,

$C^* \geq 50$ ,  $H^* \geq 80$ )  $a_w$  ต่ำกว่า 0.29 มีความชื้นประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ความแข็งน้อยกว่า 4 นิวตัน มีปริมาณน้ำมันประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง มีปริมาณวิตามินซีและสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 90 และ 150 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักเปียกตามลำดับ และมีสมบัติการต้านออกซิเดชัน ด้วยวิธี ORAC (oxygen radical absorbance capacity) 22 ไมโครโมลสมมูลย์ของโทรลอกซ์ ต่อกรัม น้ำหนักเปียก

Da Silva และ Moreira. (2008) ทดลองใช้วิธีการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศกับผักและผลไม้ คือ มันเทศ ถั่วแขก มะม่วง และมันฝรั่ง ที่อุณหภูมิ 120 – 130 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการทอดแบบปกติที่ 160 – 165 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในถั่วแขก มะม่วง และมันเทศ ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ทอดด้วยวิธีปกติ 18, 19 และ 51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยรวมดีกว่าตัวอย่างที่ทอดด้วยวิธีปกติอย่างเห็นได้ชัด และปริมาณไขมันในมันเทศและถั่วแขกที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่ทอดด้วยวิธีปกติ 24 และ 26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่มันฝรั่งและมะม่วงจะมีปริมาณไขมันสูงกว่า 6 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งกลไกของการดูดซับน้ำมันภายใต้สุญญากาศยังคงไม่ชัดเจน

Troncoso และคณะ (2009) ได้กล่าวถึงกลไกการดูดซับน้ำมันหลังกระบวนการทอดเสร็จสิ้นแล้ว ได้ดังนี้ คือ การดูดซับน้ำมันของอาหารทอด ส่วนมากเกิดขึ้นในช่วงการเย็นตัวของอาหารภายหลังการทอด เนื่องจากความแตกต่างของความดันบริเวณรูพรุนเล็กๆ ที่ผิวหน้าของอาหารมีอยู่สูง และความแตกต่างของความดันนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการนำอาหารขึ้นจากหม้อทอดภายหลังการทอดทำให้อุณหภูมิของอาหารลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อิอน้ำที่อยู่บริเวณรูพรุนที่ผิวหน้าของอาหารเกิดการควบแน่น บริเวณรูพรุนจึงเกิดเป็นภาวะสุญญากาศ (vacuum effect) เมื่อความดันบรรยากาศภายนอกมีค่าสูงกว่าจึงมีผลให้ผลึกคั้นน้ำมันที่ค้างอยู่บริเวณผิวหน้าของอาหารเข้าสู่รูพรุนของอาหารอย่างรวดเร็ว

## 2.11 การใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ในการลดการดูดซับน้ำมันของอาหารทอด

ไฮโดรคอลลอยด์หรือสารไฮโดรฟิลิกคอลลอยด์หมายถึง สารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์กัม (polysaccharide gums) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายยาวและมีน้ำหนักโมเลกุลสูงในโมเลกุลอาจประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ชนิดเดียวกันทั้งหมด เป็นโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ หรือประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์หลายชนิด เป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ คำว่า กัม (gums) เป็นภาษาอียิปต์ หมายถึงสารที่มีลักษณะข้นเหนียว (sticky substance) ดังนั้นเมื่อพอลิแซ็กคาไรด์กัมละลายหรือกระจายตัวอยู่ในน้ำจะให้สารละลายที่มีความข้นหนืดสูงหรือมีลักษณะเป็นเจล ในอุตสาหกรรมอาหารจึงนำเอาพอลิ

แซ็กคาไรด์กัม ไปใช้ประโยชน์เป็นสารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) สารเพิ่มความข้นหนืด (thickener) สารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) สารที่ทำให้เกิดเจล สารที่ใช้เคลือบเพื่อลดการดูดซับน้ำมัน และอื่นๆอีกมากมาย (นิธิยา, 2549)

Singthong และ Thongkaew (2009) ศึกษาผลของการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ อัลจินเนต คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) และแพคติน ต่อการดูดซับน้ำมันของกล้วยแผ่นบางทอดกรอบ โดยการนำชิ้นกล้วยน้ำว้ามาลวกในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 0.25, 0.5 และ 0.75 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำมาแช่สารละลายไฮโดรคอลลอยด์ ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร พบว่าแพคตินที่ระดับความเข้มข้น 1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ร่วมกับการลวกชิ้นกล้วยด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร และ CMC ที่ระดับความเข้มข้น 1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ร่วมกับการลวกชิ้นกล้วยด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.25 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร มีการดูดซับน้ำมันน้อยลงในปริมาณที่เท่ากัน แต่ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างที่แช่แพคตินสูงกว่าตัวอย่างที่แช่ CMC ดังนั้นในการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าแพคตินเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณการดูดซับน้ำมันได้ดีที่สุดในผลิตภัณฑ์กล้วยแผ่นบางทอดกรอบ ข้อมูลภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าการใช้แพคตินเคลือบกล้วยแผ่นบางทอดกรอบได้ผลดีในการป้องกันความเสียหายโครงสร้างระดับเซลล์ (cellular-structure) ของเนื้อเยื่อกล้วยระหว่างการทอด

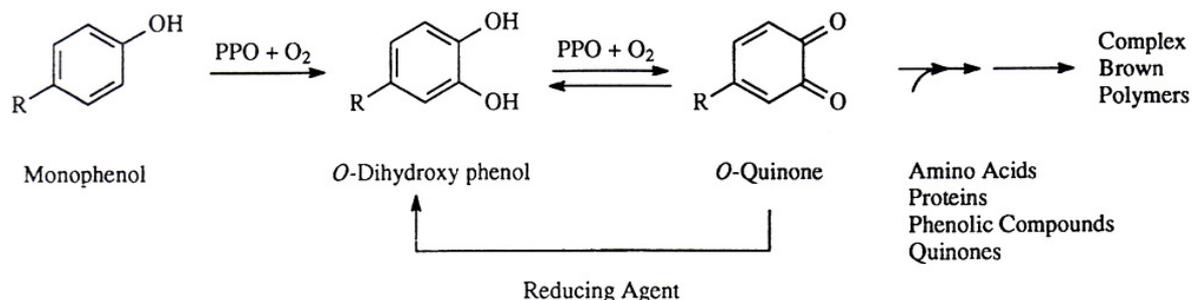
Sothornvit (2011) ศึกษาผลของการเคลือบฟิล์มรับประทานได้และขั้นตอนการสกัดน้ำมันต่อคุณภาพของกล้วยแผ่นบางทอดกรอบสุญญากาศ โดยใช้กล้วยหอมทองสุก ฝานบางหนา 0.3 - 0.4 เซนติเมตร จุ่มลงในสารละลายซูโครส 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก จากนั้นจุ่มลงในสารไฮโดรคอลลอยด์ คือ กวักัม และแซนแทนกัม ที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 10 นาที ในอัตราส่วน 15:1 ของน้ำหนักกล้วยต่อสารละลาย จากนั้นนำกล้วยออกจากสารละลาย และพักเป็นเวลา 30 วินาที ก่อนนำไปทอดที่อุณหภูมิ 89 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ที่ความดัน 2.66 กิโลปาสคาล์ โดยใช้กล้วย 10 กิโลกรัม และน้ำมัน 60 ลิตร ต่อการทอด 1 ครั้ง หลังจากทอดจึงทำการสกัดน้ำมันโดยใช้ความเร็วในการสกัดน้ำมันที่ 140 - 280 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากการทดลองพบว่าทั้งกวักัมและแซนแทนกัมสามารถลดการดูดซับน้ำมันได้ 25.22 และ 17.22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ นอกจากนี้การสกัดน้ำมันที่ความเร็วสูง สามารถลดการดูดซับน้ำมันได้ถึง 17.31 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม และการใช้ร่วมกันระหว่างกัวกัมกับการสกัดน้ำมันที่ความเร็วสูงสามารถลดการดูดซับน้ำมันได้ถึง 33.71 เปอร์เซ็นต์

Garmakhany และคณะ (2008) ศึกษาผลของสารไฮโดรคอลลอยด์ที่มีต่อการดูดซับน้ำมันและคุณลักษณะบางประการในมันฝรั่งทอด โดยนำชิ้นมันฝรั่งจุ่มลงในสารไฮโดรคอลลอยด์ แต่ละชนิด ได้แก่ CMC ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ CMC ที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ แชนแทนกัม ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ แชนแทนกัม ที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ กัวกัมที่ความเข้มข้น 0.3 เปอร์เซ็นต์ กัวกัมที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ ทรากาแคนท์ (tragacanth) ที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ และทรากาแคนท์ที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปทอดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที ที่ความดันบรรยากาศปกติ พบว่าสารที่ทำให้มันฝรั่งดูดซับน้ำมันได้น้อยที่สุดคือ CMC 1 เปอร์เซ็นต์ แชนแทนกัม 0.5 เปอร์เซ็นต์ กัวกัม 0.3 เปอร์เซ็นต์ และ แชนแทนกัม 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีปริมาณน้ำมันทั้งหมดอยู่ที่ 21.2, 21.7, 22.4 และ 24.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างควบคุม (ไม่มีการเคลือบสารไฮโดรคอลลอยด์) มีปริมาณน้ำมันทั้งหมดอยู่ที่ 49.4 เปอร์เซ็นต์ และจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสของสารแต่ละชนิดที่ใช้เคลือบมันฝรั่งทอดพบว่า CMC 1 เปอร์เซ็นต์ กัวกัม 0.3 เปอร์เซ็นต์ และทรากาแคนท์ 2 เปอร์เซ็นต์ ได้คะแนนด้านรสชาติทีุ่ดเหมือนกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ ทรากาแคนท์ 2 เปอร์เซ็นต์ CMC 0.5 เปอร์เซ็นต์ และ CMC 1 เปอร์เซ็นต์ ได้คะแนนด้านเนื้อสัมผัสทีุ่ดเหมือนกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

## 2.12 การลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง

การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง จะเกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อพืช เมื่อเซลล์พืชถูกทำลายทำให้เกิดปฏิกิริยาของสารประกอบ โมโนฟีนอลที่อยู่ในเซลล์พืช สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศและเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันได้เป็น ออร์โท-ไดฟีนอล (o-diphenol) สารนี้จะถูกออกซิไดส์ต่อไปให้เป็น ออร์โท-ควิโนน (o-quinone) ควิโนนที่เกิดที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO นี้ จะรวมตัวกันและเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งกับสารประกอบฟีนอลอื่นๆหรือกับกรดอะมิโนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

ที่มา : Branen และคณะ, 2002

pH ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอนไซม์ PPO อยู่ในช่วง 5 -7 ซึ่งเอนไซม์นี้ไม่คงตัวเมื่อได้รับความร้อน และสามารถยับยั้งการเร่งการเกิดปฏิกิริยานี้ได้ด้วยการใช้ กรด แอสไคด์ กรดฟีนอลิก ซัลไฟต์ คีเลติงเอเจนต์ รีดิวซิงเอเจนต์ เช่น กรดแอสคอร์บิก และซีสเตอีน (Larry Branen และคณะ, 2002)

Muanmai และคณะ (2007) ศึกษาผลของการใช้สารต้านการเกิดสีน้ำตาลในกล้วยทอดสุญญากาศ โดยแช่ชิ้นกล้วยน้ำว้าในสารละลายชนิดต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 3 นาที และทอดด้วยความดัน 70 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ  $92 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง พบว่าแคลเซียมคลอไรด์และซีสเตอีนให้ผลการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ดีที่สุด รองลงมาคือ กรดทาร์ทาริก กรดฟออมิก กรดออกซาลิก กรดแอสคอร์บิก และกรดซิตริก ตามลำดับ

Danyen และคณะ (2008) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกรดแอสคอร์บิกและแคลเซียมคลอไรด์ในการลดการเกิดสีน้ำตาลในกล้วยดิบผ่านเป็นชิ้น ในการทดลองใช้กล้วยหอมผ่านเป็นชิ้นความหนา 8 มิลลิเมตร จุ่มลงสารละลาย  $18 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนักชิ้นกล้วยต่อสารละลาย จากการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ของค่าความสว่าง และค่าเฉดสีแดง มีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างกรดแอสคอร์บิกและแคลเซียมคลอไรด์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ค่าพารามิเตอร์สีเหล่านี้เป็นผลมาจากกรดแอสคอร์บิกเป็นส่วนใหญ่ การเกิดสีน้ำตาลและการสูญเสียความแน่นเนื้อ จะมีผลชัดเจนเมื่อใช้แคลเซียมคลอไรด์ 4 เปอร์เซ็นต์เพียงอย่างเดียวและจะลดลงเมื่อเพิ่มกรดแอสคอร์บิก 2 เปอร์เซ็นต์