บทที่ 2
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

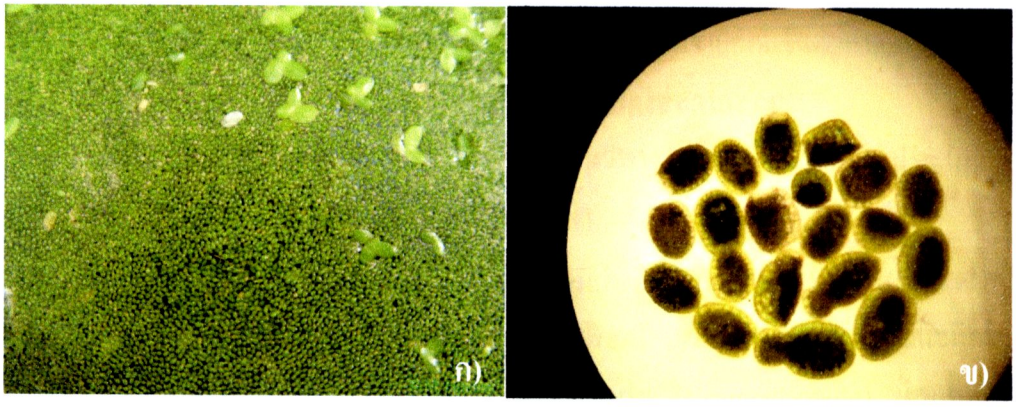
เนื่องจากอาหารมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อสุขภาพ รวมทั้งกระแสการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ ซึ่งนิยมบริโภคอาหารจากพืช โดยพืชเป็นแหล่งวิตามิน เกลือแร่ เส้นใยสูง ไขมันต่ำ และมีสารพฤกษเคมี (phytochemicals) เช่น เบต้าแคโรทีน และสารประกอบฟีนอลิค เป็นต้น (Bunea and others 2008) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชัน สามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระโดยตรง เป็นการกำจัดอนุมูลอิสระให้หมดไปหรือหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ไม่ให้ดำเนินต่อ (โอภา วัชระคุปต์ และคณะ 2549) การบริโภคไข่น้ำจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากไข่น้ำเป็นแหล่งโปรตีน แร่ธาตุ และวิตามิน (กองโภชนาการ 2535)

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไข่น้ำ

ไข่น้ำมีชื่อวิทยาศาสตร์ *Wolffia arrhiza* (Linn) Horkel ex Wimm. หรือ *Wolffia globosa* (Roxb.) Hartog & Plas. อยู่ในวงศ์ Lemnaceae สกุล *Wolffia* มีชื่อสามัญคือ Water meal หรือ Swamp algae นอกจากนี้ไข่น้ำยังมีชื่อท้องถิ่นซึ่งเรียกแตกต่างกันไป เช่น ผำ (ภาคเหนือ) ไข่ผำ (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) และไข่น้ำ (ภาคกลาง)

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไข่น้ำ (สุชาดา ศรีเพ็ญ 2542)

ไข่น้ำเป็นพืชลอยน้ำที่มีดอกขนาดเล็กมากที่สุดในโลก มีลักษณะเป็นเม็ดรี สีเขียวเป็นมันวาว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-1.5 มิลลิเมตร (ภาพที่ 1) ไข่น้ำจัดเป็นพืช ไม่มีราก เรียกว่า ทัลลัส (thallus) ซึ่งประกอบด้วยเซลล์พาเรนคิมา (parenchyma) เป็นส่วนใหญ่ มีช่องอากาศแทรกอยู่ระหว่างเซลล์จึงทำให้เห็นคล้ายฟองน้ำ ช่วยให้ไข่น้ำสามารถลอยตัวอยู่ที่ผิวน้ำได้ ไม่มีเนื้อเยื่อที่ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและอาหาร มีช่องให้อากาศผ่านเข้าออกได้อยู่ทางด้านบนของทัลลัส ไข่น้ำมีดอกขนาดเล็กมากเกิดในถุงตรงขอบทัลลัส ไม่มีกลีบดอกและไม่มีกลีบเลี้ยง ประกอบด้วย ดอกตัวผู้ 1 ดอก ซึ่งมีแต่เพียงเกสรตัวผู้ที่มีอับเกสร 1 ช่อง ส่วนดอกตัวเมียมี 1 ดอก ซึ่งมีแต่เพียงรังไข่ที่มีไข่อ่อนเพียง 1 ใบ และมีเมล็ดขนาดเล็กมาก ไข่น้ำจะลอยอยู่บนผิวน้ำหรือปริ่มน้ำ เจริญได้ดีในช่วงเดือนตุลาคมถึงมกราคม พบทั่วไปตามแหล่งน้ำธรรมชาติ ที่มีลักษณะน้ำนิ่งและน้ำต้องใส แสงสว่างส่องถึง



ภาพที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของไข่น้ำ ก) ลักษณะไข่น้ำภายนอก และ ข) ภาพขยายของไข่น้ำ
ที่มา : ก) Kate (2009)
ข) คลังปัญญาไทย (2552)

ไข่น้ำขยายพันธุ์ 2 แบบ ได้แก่ 1) การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ เนื่องจากไข่น้ำเป็นพืชมีดอกขนาดเล็กที่สุด การสืบพันธุ์จึงอาศัยการถ่ายละอองเรณูของเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมีย หลังจากการปฏิสนธิแล้วไซโกตจะเจริญเป็นเม็ดสีเขียวต่อไป 2) การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ โดยวิธีการแตกหน่อ ซึ่งเฉลี่ยแล้วไข่น้ำจะแตกหน่อใหม่ทุก ๆ 5 วัน

2.1.2 ประโยชน์และคุณค่าทางโภชนาการของไข่น้ำ

ไข่น้ำเป็นพืชชนิดเดียวในวงศ์แหนที่นำมารับประทานเป็นอาหารของมนุษย์ได้ (สุชาดา ศรีเพ็ญ 2542) ส่วนใหญ่มีการนำไข่น้ำมาใช้ประโยชน์เป็นอาหารสัตว์ และในชนบทของภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้นำเอาไข่น้ำมาบริโภคทั้งในรูปสดและนำมาประกอบเป็นอาหารประเภทผัด คั่ว แกงหรืออ่อม กองโภชนาการ (2535) ได้รายงานปริมาณสารอาหารในไข่น้ำ แสดงดังตารางที่ 1

อำพล พงษ์สุวรรณ และอารีย์ สิทธิมังค์ (2532) รายงานว่า การเพาะเลี้ยงไข่น้ำ 15-20 กรัมต่อตารางเมตร ในบ่อซีเมนต์ ใส่ปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยฟอสเฟต ใช้ระยะเวลานาน 2 สัปดาห์ สามารถให้ผลผลิต 800-1,000 กรัมต่อตารางเมตร และสามารถเพาะได้ตลอดทั้งปี ซึ่งการใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ใช้เป็นอาหารสัตว์ โดยไข่น้ำแห้งความชื้นร้อยละ 20.22 มีโปรตีนร้อยละ 17.88 ไขมันร้อยละ 0.80 เถ้าร้อยละ 23.50 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 38.20 ศิริภาวี ศรีเจริญ และคณะ (2544) รายงานว่า การเพาะเลี้ยงไข่น้ำในบ่อซีเมนต์ ใส่มูลสุกร มูลโค และมูลไก่ โดยไข่น้ำแห้งความชื้นร้อยละ 5.18 มีโปรตีนร้อยละ 20.32 ไขมันร้อยละ 4.80 เถ้าร้อยละ 17.21 และเส้นใยร้อยละ 11.82 (ตารางที่ 2) จะเห็นได้ว่า ไข่น้ำมีองค์ประกอบเคมีพื้นฐานที่มีคุณค่าทางโภชนาการ

อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของไข่น้ำอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารอาหาร สภาพแสง และฤดูกาล เนื่องจากไข่น้ำสดมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 95 มีลักษณะเนื้อสัมผัสกรุบ แต่มีข้อจำกัด คือ อายุการเก็บรักษาสั้นเพราะผนังเซลล์บางมีผลให้เซลล์แตกได้ง่าย อำพรรณ ชัยกุลเสรีวัฒน์ และปิยมาภรณ์ เอมเสม (2550) พบว่า การผลิตโยเกิร์ตเสริมไข่น้ำ โดยใช้อัตราส่วนของไข่น้ำ 1 กรัมต่อน้ำนม 100 มิลลิลิตร ได้รับการยอมรับในการประเมินทางประสาทสัมผัสที่ระดับคะแนนสูงสุดเป็น 6.33 และสามารถเก็บรักษาได้นาน 2 สัปดาห์

ตารางที่ 1 ปริมาณสารอาหารในไข่น้ำ 100 กรัม (น้ำหนักสด)

องค์ประกอบ	ปริมาณ
พลังงาน (กิโลแคลอรี่)	8.99
โปรตีน*	0.60
ไขมัน*	0.10
คาร์โบไฮเดรต*	1.20
แคลเซียม**	59.00
ฟอสฟอรัส**	25.00
เหล็ก**	6.60
วิตามินบี 1**	0.03
วิตามินบี 2**	0.09
ไนอาซีน**	0.40
วิตามินซี**	11.00
เบต้าแคโรทีน (RE)	64.16

* กรัม /100 กรัม (น้ำหนักสด)

** มิลลิกรัม /100 กรัม (น้ำหนักสด)

RE คือ ไมโครกรัมเทียบหน่วยเรตินอล (1 RE = 6 ไมโครกรัม เบต้าแคโรทีน)

ที่มา : กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (2535)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีพื้นฐานของไข่น้ำแห้ง

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (% น้ำหนักแห้ง)	
ความชื้น	5.18*	20.22**
โปรตีน	20.32	17.88
ไขมัน	4.80	0.80
คาร์โบไฮเดรต	-	38.20
เส้นใย	11.81	-
เถ้า	17.21	23.50

- หมายถึง ไม่ได้วิเคราะห์

ที่มา : * ศิริภาวี ศรีเจริญ และคณะ (2544)

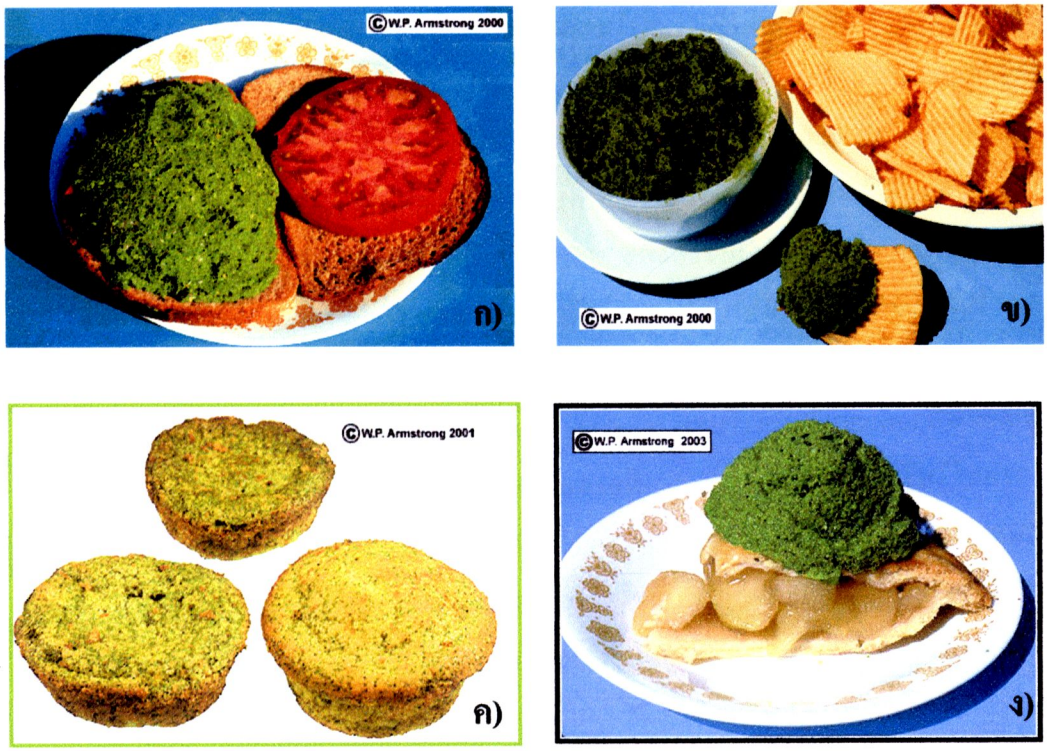
** อำพล พงษ์สุวรรณ และอารีย์ สิทธิมังค์ (2532)

2.1.3 การบริโภคไข่น้ำ

ไข่น้ำมีการบริโภคในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ โดยนำไข่น้ำมาประกอบอาหาร เช่น แกงคั่วไข่น้ำปลาหลดย่าง และแกงคั่วไข่น้ำกับหมู แสดงดังภาพที่ 2 นอกจากนี้ไข่น้ำยังนำมาทำเป็นเมนูอาหารหวาน Armstrong (2009) นำไข่น้ำมาทำเป็นเมนูอาหารว่างและขนม เช่น แซนวิชหน้าไข่น้ำ ซอสจิ้ม (dip) ไข่น้ำ มัฟฟินไข่น้ำ และพายแอปเปิ้ลหน้าไข่น้ำ แสดงดังภาพที่ 3

ภาพที่ 2 ตัวอย่างอาหารจากไข่น้ำ ก) แกงคั่วไข่น้ำปลาหลดย่าง และ ข) แกงคั่วไข่น้ำกับหมู

ที่มา : มรดกล้านนา (2552)



ภาพที่ 3 ตัวอย่างขนมจากไข่น้ำ ก) แซนวิชหน้าไข่น้ำ ข) ซอสจิ้มไข่น้ำ ค) มัฟฟินไข่น้ำ และ ง) พายแอปเปิ้ลหน้าไข่น้ำ

ที่มา : Armstrong (2009)

จะเห็นได้ว่าไข่น้ำประกอบด้วย โปรตีน เส้นใย แร่ธาตุ วิตามิน และเบต้าแคโรทีน ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะปริมาณคลอโรฟิลล์ เบต้าแคโรทีน ไรโบฟลาวิน สารฟีนอลิค กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน และเส้นใย

2.2 รงควัตถุ (pigment)

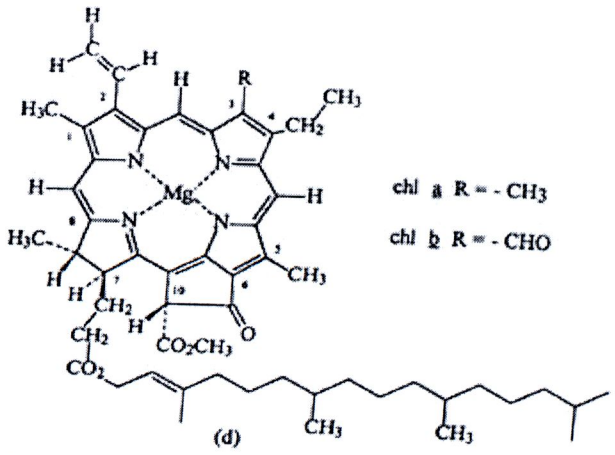
ผักและผลไม้มีสีที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับรงควัตถุที่มีอยู่ภายในเซลล์ โดยรงควัตถุสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม คือ คลอโรฟิลล์ให้สีเขียว แคโรทีนอยด์ให้สีในช่วงสีเหลืองถึงสีแดง แอนโธ-ไซยานินให้สีในช่วงสีแดงถึงสีม่วง และเบตาเลนให้สีในช่วงสีม่วงถึงสีแดง พืชผักมีการบริโภคในรูปของผักสดและผักแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ผักดอง ผักบรรจุกระป๋อง ผักแช่เยือกแข็ง ผักทำแห้ง และผักปรุงสุก รงควัตถุสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษา สีเป็นลักษณะปรากฏที่มีความสำคัญมาก เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพและมีอิทธิพลต่อ

การเลือกซื้อของผู้บริโภค (Gross 1991) ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงรงควัตถุในกลุ่มคลอโรฟิลล์ และเบต้าแคโรทีน

2.2.1 คลอโรฟิลล์ (chlorophyll)

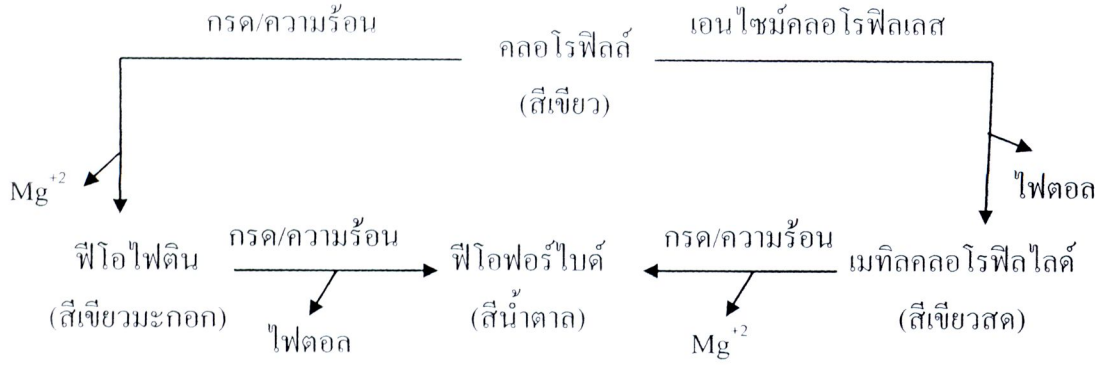
คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุสีเขียวที่พบในพืชสีเขียวทุกชนิด พบในคลอโรพลาสต์ ทำหน้าที่สำคัญในการสังเคราะห์แสงของพืช คลอโรฟิลล์มีหลายชนิด เช่น คลอโรฟิลล์ชนิดเอ บี ซี และดี คลอโรฟิลล์ที่พบในพืชทั่วไปเป็นคลอโรฟิลล์ชนิดเอและบี

โครงสร้างของคลอโรฟิลล์ (ภาพที่ 4) ประกอบด้วย วงไพโรล (pyrrole ring) 4 วง เชื่อมกันแต่ละหน่วยด้วยเมไธน์คาร์บอน (methine carbon, -CH=) เกิดเป็นโมเลกุลใหญ่ที่แบนราบ เรียกว่า วงพอร์ไฟริน (porphyrin ring) มีอะตอมของแมกนีเซียม (Mg) อยู่ตรงกลาง ยึดติดกับไนโตรเจนอะตอม 2 ตัวโดยพันธะโควาเลนท์ (covalent bonds) ส่วนไนโตรเจนอีก 2 ตัวใช้อิเล็กตรอนร่วมกับแมกนีเซียมเกิดเป็นพันธะโคออดิเนทโควาเลนท์ (coordinate covalent bonds) คลอโรฟิลล์จึงประกอบด้วยพันธะคู่แบบคอนจูเกต (conjugated double bond) 11 พันธะ สามารถดูดกลืนแสงสเปกตรัมช่วงที่สายตามองเห็นได้ และคลอโรฟิลล์เป็นเอสเทอร์โดยกรดโพรพิโอนิก (propionic acid) โดยที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 7 ถูกเอสเทอริไฟต์ด้วยไฟทอล ซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มแอลกอฮอล์ ได้เป็นไฟทิล (phytyl) ซึ่งทำให้คลอโรฟิลล์มีคุณสมบัติละลายในไขมัน (liposoluble) คลอโรฟิลล์เอต่างจากคลอโรฟิล์บี คือ คลอโรฟิลล์เอดูดกลืนแสงสีน้ำเงินและสีเขียว โดยคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 3 ในคลอโรฟิลล์เอจะเป็นหมู่เมธิล (methyl group) ส่วนคลอโรฟิลล์บีดูดกลืนแสงสีเหลืองและสีเขียว โดยคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 3 ในคลอโรฟิลล์บีจะเป็นหมู่ฟอร์มิล (formyl group) คลอโรฟิลล์มีคุณสมบัติไวต่อแสง ความร้อน และออกซิเจน (Gross 1991)



ภาพที่ 4 โครงสร้างของคลอโรฟิลล์

ที่มา : Von Elbe and Schwartz (1996)

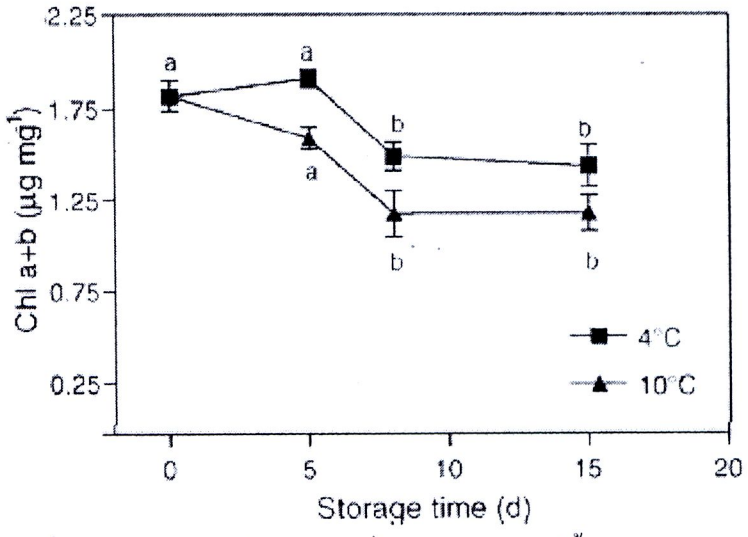


ภาพที่ 5 การสลายตัวของคลอโรฟิลล์
ที่มา : นิธิยา รัตนาปนนท์ (2545)

การสูญเสียสีเขียวเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล การสลายไปของรงควัตถุในกลุ่มคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ และอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพ (senescence) (Ferrante and others 2004) โดยกระบวนการแปรรูปพืชผักที่มีสีเขียวด้วยความร้อน เช่น การต้ม จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยาฟีโอไฟทิไนเซชัน (pheophytinization) ซึ่งแมกนีเซียมถูกแทนที่ด้วยอะตอมไฮโดรเจน ทำให้คลอโรฟิลล์เปลี่ยนเป็นฟีโอไฟติน (pheophytin) ซึ่งมีสีเขียวมะกอก และคลอโรฟิลล์เปลี่ยนเป็นคลอโรฟิลล์ไลด์ ได้โดยอาศัยเอนไซม์คลอโรฟิลเลส เกิดการสูญเสียหมู่ไฟทอลออกไปจากโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ทำให้คลอโรฟิลล์ไลด์ละลายน้ำได้ดีกว่าคลอโรฟิลล์ (ภาพที่ 5) นอกจากการต้มแล้ว กระบวนการอบแห้ง การแช่เยือกแข็ง และการเก็บรักษา มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผักได้ ขึ้นกับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการ รวมทั้งชนิดของภาชนะบรรจุและสภาวะการเก็บรักษา (นิธิยา รัตนาปนนท์ 2545)

ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่วิเคราะห์ได้ขึ้นกับสารทำละลายและวิธีการที่ใช้ในการสกัด ด้วย Simon and Helliwell (1998) ศึกษาการสกัดและการหาปริมาณคลอโรฟิลล์จากสาหร่ายสีเขียว โดยศึกษาชนิดของตัวทำละลาย 2 ชนิด คือ เมธานอล และอะซิโตน และวิธีการในการสกัด 4 วิธี คือ การใช้คลื่นเสียงจากแท่งกำเนิด (probe sonication) การใช้อ่างคลื่นเสียง (bath sonication) การทำลายเนื้อเยื่อด้วยการบด (tissue grinding) และการทำลายเนื้อเยื่อด้วยโกร่ง (maceration by mortar and pestle) พบว่า การใช้เมธานอลเป็นตัวทำละลายและการใช้คลื่นเสียงจากแท่งกำเนิดให้ประสิทธิภาพในการสกัดคลอโรฟิลล์ดีกว่าวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.01$) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเมธานอลจะให้ประสิทธิภาพในการสกัดที่ดีกว่าอะซิโตน แต่เมธานอลที่ตกค้างมีความเป็นพิษต่อมนุษย์มากกว่าอะซิโตน

ผลของอุณหภูมิ เวลา และบรรจุภัณฑ์ในการเก็บรักษาก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอโรฟิลล์ได้เช่นกัน Ferrante and Maggiore (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิ (4°ซ และ 10°ซ) และเวลา (5, 8 และ 15 วัน) ในการเก็บรักษาผักกาดหอม (*Valeriana locusta*) พบว่า ผักกาดหอมที่เก็บรักษาที่ 4 และ 10°ซ นาน 5 วัน มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลงไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลงเฉลี่ยประมาณร้อยละ 13 แต่เมื่อเวลาในการเก็บรักษานานขึ้นเป็น 8 วัน ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในผักกาดหอมที่เก็บรักษาที่ 4°ซ และ 10°ซ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) โดยมีปริมาณลดลงเป็นร้อยละ 22 และร้อยละ 35 ตามลำดับ (ภาพที่ 6)

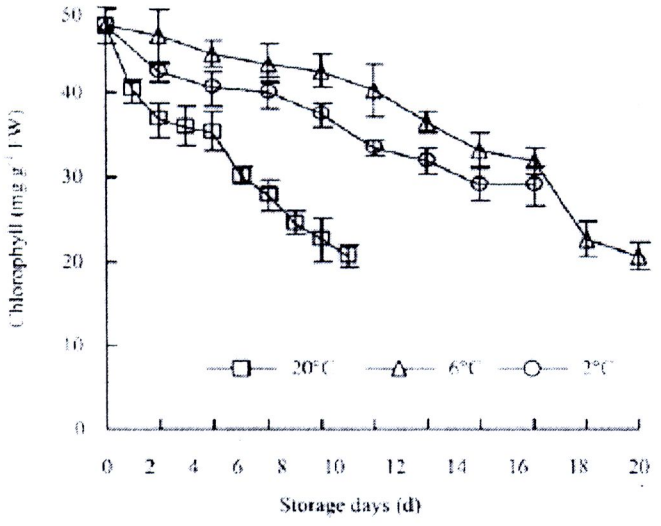


ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและระยะเวลาการเก็บรักษาในผักกาดหอม

ที่มา : Ferrante and Maggiore (2007)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

Yan and others (2009) ศึกษาการเก็บรักษายอดมันเทศ (sweet potato leaf stalks) ในถาดพลาสติก ปิดหุ้มด้วยฟิล์มพอลีเอทธิลีน ที่อุณหภูมิ 20, 6 และ 2°ซ พบว่า ยอดมันเทศเก็บที่อุณหภูมิ 20°ซ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลงมากที่สุด คือร้อยละ 57 ในวันที่ 9 ของการเก็บรักษา รองลงมาคือ ยอดมันเทศเก็บที่อุณหภูมิ 2 และ 6°ซ ตามลำดับ โดยมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดค่อย ๆ ลดลง (ภาพที่ 7) ซึ่งการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์เกิดจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสูญเสียสีเขียวซึ่งมาพร้อมกับการเกิดสีเหลือง เช่นเดียวกับ ผักโขม ใบปอ และผักชีฝรั่ง เป็นต้น นอกจากนี้ความเครียดเนื่องจากการทำให้เย็น (chilling stress) ช่วยเร่งการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ ซึ่งการสูญเสียสีเขียวอาจเกิดจากกระบวนการเสื่อมสลาย (senescence process) ของพืชตามธรรมชาติ ทำให้ใบผักมีสีเหลือง (Ferrante and others 2004)

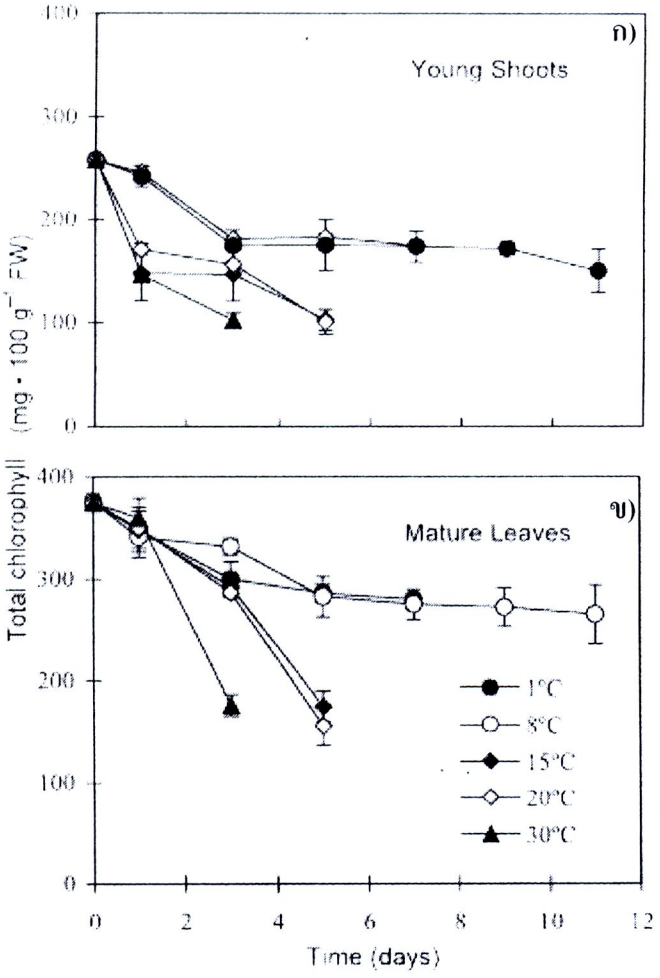


ภาพที่ 7 ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดของยอดมันเทศ ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20, 6 และ 2°ซ

ที่มา : Yan and others (2009)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 12 ส.ค. 2556
เลขทะเบียน 208856
เลขเรียกหนังสือ

Tulio-Jr and others (2002) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษา 5 ระดับ คือ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1, 8, 15, 20 และ 30°ซ ต่ออายุการเก็บเกี่ยวของใบปอ (jute leaves) 2 ระดับ คือ 30 วัน (young shoots) และ 45 วัน (mature leaves) โดยบรรจุใบปอจำนวน 15 ยอด (ยาว 25 ซม.) ในถุงพอลีเอทธิลีน (LDPE) ปิดผนึก แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ใบปอที่มีอายุในการเก็บเกี่ยว 30 วัน มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลงร้อยละ 60-61 ในวันที่ 5 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15°ซ หรือ 20°ซ และใบปอที่มีอายุในการเก็บเกี่ยว 45 วัน มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลงร้อยละ 53-58 ในวันที่ 5 ของการเก็บที่อุณหภูมิ 15°ซ หรือ 20°ซ และวันที่ 3 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30°ซ ส่วนใบปอที่มีอายุในการเก็บเกี่ยว 30 วัน มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลงร้อยละ 32-33 ในวันที่ 7 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1°ซ หรือ 8°ซ และใบปอที่มีอายุในการเก็บเกี่ยว 45 วัน มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลงร้อยละ 25-26 ในวันที่ 7 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1°ซ หรือ 8°ซ (ภาพที่ 8) โดยได้อธิบายว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลง เกิดจากคลอโรฟิลล์สลายเป็นคลอโรฟิลล์ไลด์เนื่องจากเอนไซม์คลอโรฟิลเลส ซึ่งปกติคลอโรฟิลล์ไลด์มีสีเขียวแต่เมื่อเก็บนานขึ้นผักเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอาจเนื่องมาจากคลอโรฟิลล์ไลด์สูญสลายไปเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงไม่มีสี นั่นแสดงว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลงเป็นผลมาจากกิจกรรมของเอนไซม์คลอโรฟิลเลสเพิ่มขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของคลอโรฟิลล์ไลด์ (Yamauchi and others 1997) ซึ่งเอนไซม์คลอโรฟิลเลสพบในเนื้อเยื่อห่อหุ้มของคลอโรพลาสต์ โดยเอนไซม์คลอโรฟิลเลสสามารถเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ได้ก็ต่อเมื่อเนื้อเยื่อถูกทำลาย ดังนั้นกิจกรรมของเอนไซม์คลอโรฟิลเลสจึงมีความสัมพันธ์กับการแตกของเนื้อเยื่อ (Ferrante and others 2004)

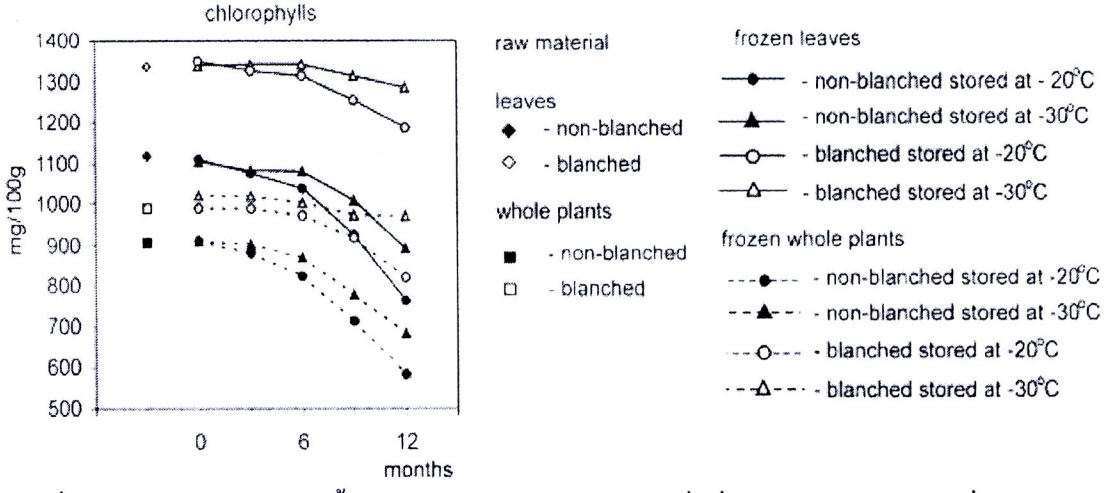


ภาพที่ 8 ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ก) ใบปออายุ 30 วัน และ ข) ใบปออายุ 45 วัน ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1, 8, 15, 20 และ 30°ซ

ที่มา : Tulio-Jr and others (2002)

Lisiewska and others (2004) ศึกษาปัจจัยของชนิดวัตถุดิบ (ใบ และต้น) การลวก (95°ซ นาน 30 วินาทีสำหรับใบ และ 3 นาทีสำหรับต้น) ก่อนแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิการแช่เยือกแข็ง (-20 และ –30°ซ) และระยะเวลาในการเก็บรักษานาน 1 ปี ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดใน ผักชีฝรั่ง (ภาพที่ 9) พบว่า ใบและต้นผักชีฝรั่งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด 144 และ 86 มก./100 ก. น้ำหนักสด ตามลำดับ ใบและต้นผักชีฝรั่งที่ไม่ผ่านและผ่านการลวกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) อย่างไรก็ตามการลวกทำให้องค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ลดลง แล้วน้ำที่ใช้ลวกจะเข้าไปแทนที่อากาศที่แทรกอยู่ภายในเซลล์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในเนื้อเยื่อพืชลดลง และมีผลในการลดกิจกรรมของเอนไซม์ เนื่องจากความร้อนจะยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ที่มีผลต่อการสลายตัวของคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ นอกจากนี้การลวกมีผลในการทำลายโปรตีนที่จับตัวกับ

คลอโรฟิลล์ ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง และปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบและต้นผักชีฝรั่งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20°ซ ไม่แตกต่างจากที่อุณหภูมิ –30°ซ ($p>0.05$) และเมื่อเก็บรักษาใบและต้นผักชีฝรั่งแช่เยือกแข็ง นาน 1 ปี พบว่า ใบและต้นผักชีฝรั่งที่ผ่านการลวกก่อนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -30°ซ ไม่มีผลต่อการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ขณะที่ใบและต้นผักชีฝรั่งที่ผ่านการลวกก่อนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20°ซ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลงร้อยละ 9 และ 15 ตามลำดับ ส่วนใบและต้นผักชีฝรั่งที่ไม่ผ่านการลวกก่อนการแช่เยือกแข็ง หลังผ่านการเก็บรักษานาน 9 เดือน พบว่า ผักชีฝรั่งที่ไม่ผ่านการลวกก่อนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 และ -30°ซ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลงร้อยละ 10-13 และ 17-20 ตามลำดับ โดยต้นผักชีฝรั่งสูญเสียมากกว่าใบผักชีฝรั่ง ส่วนผักชีฝรั่งที่เก็บรักษานาน 12 เดือน มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลงร้อยละ 20 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผักชีฝรั่งที่ผ่านการลวกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดคงเหลือสูงกว่าที่ไม่ผ่านการลวก ซึ่งอายุการเก็บของผักชีฝรั่งแช่เยือกแข็ง คือ 12 เดือน และการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -30°ซ มีแนวโน้มว่ามีการคงเหลือของปริมาณคลอโรฟิลล์ที่อุณหภูมิ -20°ซ



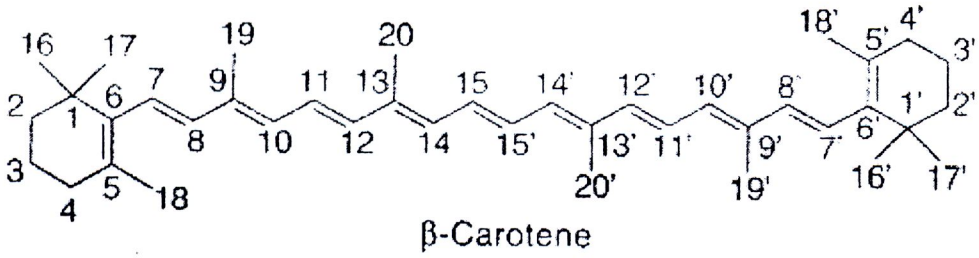
ภาพที่ 9 ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในใบและต้นของผักชีฝรั่งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20°ซ และ -30°ซ ระหว่างการเก็บรักษานาน 12 เดือน

ที่มา : Lisiewska and others (2004)

Negi and Roy (2000) จึงได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในผักทำแห้ง พบว่า วิธีการที่เหมาะสมคือการทำแห้งที่อุณหภูมิ 32°ซ ซึ่งทำให้คลอโรฟิลล์ทั้งหมดของผัก savoy beet, amaranth และ fenugreek ลดลงจาก 13.1, 8.9 และ 15.7 มก./ก. เป็น 9.0, 4.2 และ 7.0 มก./ก. ตามลำดับ โดยมีการสูญเสียน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการตากแดด การผึ่งในร่ม การทำแห้งในตู้อบแสงอาทิตย์ และการทำแห้งในตู้อบแบบตู้ที่อุณหภูมิ 65°ซ ปริมาณของคลอโรฟิลล์ที่คงเหลือ จึงขึ้นกับอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำแห้ง

2.2.2 เบต้าแคโรทีน (betacarotene)

เบต้าแคโรทีนเป็นรงควัตถุในกลุ่มแคโรทีนอยด์ โดยแคโรทีนอยด์มี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแคโรทีน เป็นแคโรทีนอยด์ที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน เช่น เบต้าแคโรทีน และไลโคพีน และกลุ่มแซนโธฟิลล์ เป็นแคโรทีนอยด์ที่ประกอบด้วยไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจน เช่น ซีแซนธิน และลูทีน ซึ่งแคโรทีนอยด์มีสีเหลือง ส้ม และแดง พบในพืช สาหร่าย แบคทีเรีย ฟังไจ และสัตว์



ภาพที่ 10 โครงสร้างเบต้าแคโรทีน

ที่มา : Hurst and Jeffrey (2002)

โครงสร้างเบต้าแคโรทีนประกอบด้วย หมู่ไอโซพรีนเชื่อมต่อกันเกิดคอนจูเกชันของพันธะคู่เป็นสายยาว (ภาพที่ 10) เบต้าแคโรทีนเป็นสารที่ไม่มีขั้วและไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในน้ำมันและตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น ปิโตรเลียมอีเธอร์ และเฮกเซน เบต้าแคโรทีนมี 2 ไอโซเมอร์ คือ all-*trans* isomers และ *cis*-isomer โดยเบต้าแคโรทีนมีคุณสมบัติเป็นสารตั้งต้นในการสร้างวิตามินเอ โดยร่างกายมนุษย์สามารถเปลี่ยนเบต้าแคโรทีนเป็นวิตามินเอได้ที่ลำไส้เล็ก โดยเอนไซม์ beta-carotene-15,15'-dioxygenase เปลี่ยน *trans*-beta-carotene เป็น retinol ได้ 2 โมเลกุลและเก็บไว้ที่ตับ และมีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันสามารถป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง โรคหัวใจ และชะลอความแก่ แหล่งเบต้าแคโรทีนที่สำคัญ ได้แก่ ผักใบเขียว ผักและผลไม้ที่มีสีส้มและเหลือง (Gross 1991)

การสูญเสียเบต้าแคโรทีนในอาหารส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากโมเลกุลของเบต้าแคโรทีนมีพันธะคู่จำนวนมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศได้ง่าย อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นกับแสง ความร้อน และการมีสารต้านออกซิเดชันอื่นๆ นอกจากนี้เบต้าแคโรทีนสูญเสียได้จากเอนไซม์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในผักและผลไม้ เช่น เปอร์ออกซิเดสและไลพอกซิจิเนส ซึ่งเป็นเอนไซม์เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบต้า-แคโรทีน (ชาญวิทย์ รัตนราศรี 2547) ปริมาณเบต้าแคโรทีนในผักชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณเบต้าแคโรทีนในผักชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัตถุดิบ	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม (น้ำหนักแห้ง)
แครอทแดง (red carrot)	6.80
มันสำปะหลัง (tapioca shoots)	5.70
ป่วยเล้งแดง (red spinach)	5.10
ใบสะระแหน่ (mint leaves)	4.80
ผักกาดขาว (Chinese cabbage)	3.00
ผักกาดเขียวปลี (Chinese mustard leaves)	2.90
ผักบุ้งจีน (swamp cabbage)	1.90
ฟักทองแดง (red pumpkin)	0.58
พริกชี้ฟ้าแดง (red chillies)	0.47
มะเขือเทศ (tomatoes)	0.37
ผักกาดหอม (lettuce)	0.10
สาหร่าย *Gracilaria changgi*[a]	5.20

ที่มา : Tee and Lim (1991)

[a] cited from Norziah and Ching (2000)

Chantaro and others (2008) ศึกษาผลของการลวกที่อุณหภูมิ 90°ซ นาน 1 นาที และการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°ซ จนมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 6-8 (น้ำหนักแห้ง) ต่อปริมาณเบต้าแคโรทีนในเปลือกแครอท พบว่า การลวกเปลือกแครอทที่อุณหภูมิ 90°ซ นาน 1 นาที มีผลให้ปริมาณเบต้าแคโรทีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เช่นเดียวกับการทำแห้งเปลือกแครอทสดที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°ซ ทำให้ปริมาณเบต้าแคโรทีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่อุณหภูมิในการทำแห้งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเบต้าแคโรทีนในแครอทที่ผ่านการลวกก่อนการทำแห้ง การทำแห้งที่อุณหภูมิ 60°ซ เกิดการสูญเสียเบต้าแคโรทีนมากที่สุด เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนาน แครอทสดที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 และ 80°ซ มีการลดลงของเบต้าแคโรทีนไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ในขณะที่เปลือกแครอทที่ผ่านการลวกและไม่ลวกเมื่อผ่านการทำแห้งมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเบต้าแคโรทีนไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$; ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ผลของการลวกและการทำแห้งต่อปริมาณเบต้าแคโรทีนในเปลือกแครอท

สภาวะการทำแห้ง	เวลา (ชม.)	ปริมาณเบต้าแคโรทีน (มิลลิกรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง)
เปลือกแครอทสด		
ไม่ทำแห้ง	-	20.45±0.51[d]
ทำแห้ง 60°ซ	12.5	8.81±0.58[a]
ทำแห้ง 70°ซ	10.0	12.08±0.21[b]
ทำแห้ง 80°ซ	7.5	10.97±1.31[ab]
เปลือกแครอทลวก		
ไม่ทำแห้ง	-	16.57±0.53[c]
ทำแห้ง 60°ซ	8.5	8.94±0.69[a]
ทำแห้ง 70°ซ	7.0	11.19±1.05[ab]
ทำแห้ง 80°ซ	5.5	11.11±0.62[ab]

[a,b]...ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายความว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ที่มา: Chantaro and others (2008)

Tein and others (1998) ศึกษาวิธีการทำแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสุญญากาศ (vacuum microwave drying) การทำแห้งด้วยลมร้อน (air drying) และการแช่เยือกแข็งระเหิดแห้ง (freeze drying) ต่อปริมาณเบต้าแคโรทีนในแครอทหั่นเป็นแผ่น พบว่า ขั้นตอนการลวกแครอทก่อนการทำแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเบต้าแคโรทีนอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ในขณะที่การทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°ซ มีผลทำให้ปริมาณของเบต้าแคโรทีนลดลงมากที่สุด คือ ร้อยละ 19.2 ($p \leq 0.05$) เนื่องจากความร้อนและออกซิเจนในระหว่างการทำแห้งมีผลเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบต้าแคโรทีน ส่วนการทำแห้งแครอทด้วยวิธีไมโครเวฟแบบสุญญากาศทำให้เบต้าแคโรทีนลดลงร้อยละ 3.2 ($p \leq 0.05$) เนื่องจากใช้เวลาสั้นในการทำแห้งและเป็นระบบสุญญากาศสามารถลดการสัมผัสของออกซิเจนกับตัวอย่าง ในขณะที่ปริมาณเบต้าแคโรทีนในแครอทสดและแครอทที่ผ่านการระเหิดแห้งไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$)

Bunea and others (2008) พบว่า ผักปวยเล้งสดมีปริมาณเบต้าแคโรทีน 31.5 มก./กก. น้ำหนักสด เมื่อผ่านลวกก่อนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°ซ เก็บรักษานาน 1 เดือน ปริมาณเบต้าแคโรทีนลดลงร้อยละ 15 หรือเป็น 30.7 มก./กก. ($p>0.05$) และผักปวยเล้งมีปริมาณเบต้า-แคโรทีนลดลงมากที่สุดร้อยละ 64 คือ ผักปวยเล้งที่ผ่านการแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°ซ นาน 1 วัน แล้วต้มในน้ำเดือด 10 นาที และผักปวยเล้งที่ผ่านการแช่เย็น 4°ซ นาน 3 วัน ซึ่งมีปริมาณเบต้าแคโรทีนลดลงเป็น 18.9 และ 24.9 มก./กก. ตามลำดับ ($p\leq0.05$) และจากการเปรียบเทียบวิธีการวัดปริมาณแคโรทีนอยด์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และเครื่อง HPLC พบว่า ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในผักปวยเล้งที่วัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ไม่แตกต่างจากเครื่อง HPLC ($p>0.05$)

Negi and Roy (2000) ได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งต่อปริมาณเบต้าแคโรทีนในผัก พบว่า วิธีการที่เหมาะสมคือการทำแห้งที่อุณหภูมิ 32°ซ ซึ่งทำให้เบต้าแคโรทีนในผัก savoy beet, amaranth และ fenugreek ลดลงจาก 84.1, 59.4 และ 36.3 มก./100 ก. เป็น 33.4, 28.8 และ 30.9 มก./100 ก. ตามลำดับ โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิ 32°ซ มีการสูญเสียเบต้าแคโรทีนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการตากแดด การผึ่งในร่ม การอบในตู้อบแสงอาทิตย์ และการอบในตู้อบแบบตู้ที่อุณหภูมิ 65°ซ

2.3 สารต้านออกซิเดชัน (Antioxidants)

สารต้านออกซิเดชันเป็นสารประกอบที่ทำหน้าที่ยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยสารต้านออกซิเดชันมีความสามารถในการให้อิเลคตรอนแก่อนุมูลอิสระ (free radical scavengers) ทำให้อนุมูลอิสระเสถียรและไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไป (โอภา วัชระคุปต์ และคณะ 2549) นอกจากนี้สารต้านออกซิเดชันยังอาจทำปฏิกิริยากับโลหะที่มีฤทธิ์กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นสารต้านออกซิเดชันทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระ ป้องกันไม่ให้อนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลต่างๆ ที่มีผลเสียต่อร่างกาย โดยบทบาทของสารต้านออกซิเดชันต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีดังนี้ (Adedapo and others 2008)

1. การลดลงของความเข้มข้นออกซิเจนในปริมาณที่จำกัด โดยสารต้านออกซิเดชันเข้าไปจับกับออกซิเจน หรือแทนที่ออกซิเจน

2. การป้องกันและยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ โดยทำให้อนุมูลอิสระเสถียรและเป็นการหยุดการก่อตัวใหม่ของอนุมูลอิสระ

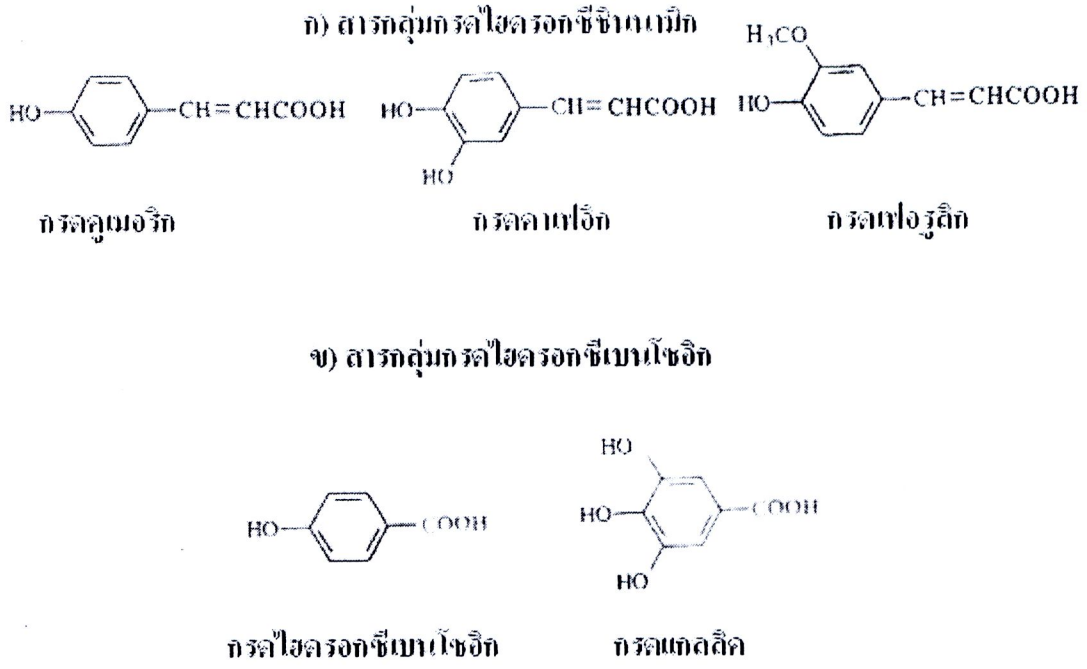
3. การจับกับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไอออนของโลหะหนัก เพื่อป้องกันการก่อตัวใหม่ของอนุมูลอิสระ

4. การแยกอนุมูลเปอร์ออกไซด์ออก เพื่อป้องกันไม่ให้ผันกลับมาเป็นอนุมูลอิสระ

สารต้านออกซิเดชันมีทั้งที่เป็นสารธรรมชาติและสารสังเคราะห์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงสารต้านออกซิเดชันธรรมชาติในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก

2.3.1 สารประกอบฟีนอลิค (phenolic compound)

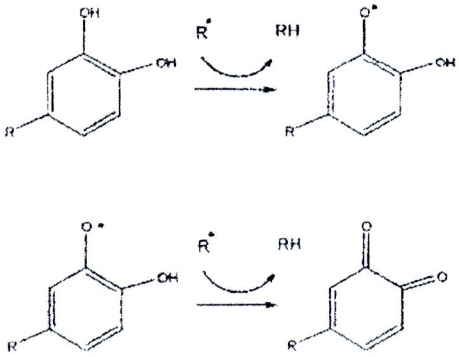
สารประกอบฟีนอลิคเป็นสารที่ได้จากกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืชมีบทบาทสำคัญในการต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส การต้านอับเสบ ต้านการแพ้ และมีคุณสมบัติในการละลายลิ่มเลือด รวมไปถึงมีกิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็ง โรคหัวใจ และสามารถลดความดันโลหิตจากฤทธิ์ขยายหลอดเลือด (โอภา วัชระคุปต์ และคณะ 2549) สารประกอบฟีนอลิคเป็นสารต้านออกซิเดชันธรรมชาติ เป็นสารกลุ่มใหญ่ที่พบมากในพืช ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ แอนโธไซยานิน และกรดฟีนอลิค พบทั่วไปในพืช ผัก และผลไม้ (Burnea and others 2008) โดยกรดฟีนอลิค แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) สารกลุ่มกรดไฮดรอกซี-ซินนามิก (hydroxycinnamic acid) เช่น กรดเฟอรูลิก กรดคาเฟอิก (พบในชาและกาแฟ) และกรดคูมาริก และ 2) สารกลุ่มกรดไฮดรอกซีเบนโซอิก เช่น กรดแกลลิก (พบในผักชี สะระแหน่) และกรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (ภาพที่ 11) ซึ่งโครงสร้างกรดฟีนอลิคประกอบด้วยวงอะโรมาติกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิลโดยมากเป็นสารที่มีขั้วละลายในตัวทำละลายประเภทแอลกอฮอล์ได้ดี



ภาพที่ 11 โครงสร้างทางเคมีของกรดฟีนอลิค ก) สารกลุ่มกรดไฮดรอกซีซินนามิก และ ข) สารกลุ่มกรดไฮดรอกซีเบนโซอิก

ที่มา : Pokorny and others (2001)

กลไกของสารประกอบฟีนอลิคในการเป็นสารต้านออกซิเดชันแสดงในภาพที่ 12 สารประกอบฟีนอลิคสามารถให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ ซึ่งทำให้อนุมูลอิสระเสถียร ในขณะที่โมเลกุลสารประกอบฟีนอลิคที่เสียอิเล็กตรอนไป เนื่องจากมีโครงสร้างวงแหวนที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่นสามารถเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทั่วทั้งโครงสร้าง (delocalization) ทำให้โมเลกุลคงความเสถียรไม่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ โดยความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ขึ้นกับจำนวนหมู่แทนที่ไฮดรอกซิลในโมเลกุล ซึ่งคุณสมบัติในการดึงอิเล็กตรอนของหมู่คาร์บอกซิลิกในกรดเบนโซอิก จะส่งผลให้ความสามารถในการให้ไฮโดรเจนของไฮดรอกซีเบนโซเอตน้อยลง ดังนั้นสารกลุ่มกรดไฮดรอกซีซินนามิกจึงมีคุณสมบัติในการต้านออกซิเดชันมากกว่าสารกลุ่มกรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (Pokorny and others 2001)



ภาพที่ 12 กลไกการต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิค
ที่มา : ระวิวรรณ แก้วอมตวงศ์ และทรงพร จึงมั่นคง (2549)

2.3.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมด

การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิค โดยวิธีการ Folin-Ciocalteu อาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบฟีนอลิค โดยสารละลาย Folin-Ciocalteu ในสภาวะที่เป็นด่าง จะให้สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินที่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้ โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ 756 นาโนเมตร แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานซึ่งอาจใช้กรดแทนนิค กรดแกลลิค หรือคาเทชิน เป็นสารมาตรฐานของสารประกอบฟีนอลิค การหาปริมาณฟีนอลิคทั้งหมดเป็นวิธีที่นิยมใช้เนื่องจากปริมาณฟีนอลิคทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับกิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน (ระวิวรรณ แก้วอมตวงศ์ และทรงพร จึงมั่นคง 2549)

2.3.2 กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน

กิจกรรมในการต้านออกซิเดชันในอาหาร จำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสม โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณา คือ ความเฉพาะเจาะจง ความคงตัว ความถูกต้องแม่นยำ ความยากง่ายในการวิเคราะห์ เครื่องมือที่ใช้ กลไกของปฏิกิริยาและจุดยุติ (ปรีชา บุญจูง และคณะ 2549) ซึ่งการวิเคราะห์กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน มีหลักการวิเคราะห์แบ่งเป็น 2 วิธี คือ 1) การวิเคราะห์จากการส่งผ่านอะตอมของไฮโดรเจน (Hydrogen atom transfer; HAT) เป็นการวัดความสามารถในการให้ไฮโดรเจนของสารต้านออกซิเดชัน โดยพิจารณาจากปฏิกิริยาการแข่งขันทางจลศาสตร์ระหว่างสารต้านออกซิเดชันกับสับสเทรตในสภาวะที่มีอนุมูลเปอร์ออกซิล ซึ่งเป็นอนุมูลที่มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดออกซิเดชันของไขมันในอาหารและระบบสิ่งมีชีวิต 2) การวิเคราะห์จากการส่งผ่านอิเล็กตรอนโดดเดี่ยว (Single electron transfer; SET) เป็นการวัดความสามารถของสารต้านออกซิเดชันจากการรีดักชันของอนุมูลอิสระ ซึ่งเมื่อถูกรีดิวซ์จะเปลี่ยนสี

โดยในวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงเฉพาะการวิเคราะห์กิจกรรมในการต้านออกซิเดชันด้วยหลักการส่งผ่านอิเล็กตรอนโดดเดี่ยว เป็นการวัดความสามารถของสารต้านออกซิเดชันในการส่งผ่านอิเล็กตรอนไปรีดิวซ์โลหะหรืออนุมูลอิสระ เมื่อโลหะหรืออนุมูลอิสระได้รับอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนสี เมื่อถึงจุดสิ้นสุดปฏิกิริยาจะหยุดการเปลี่ยนแปลงสี โดยระดับการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสัดส่วนกับความเข้มของสารต้านออกซิเดชัน เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารต้านออกซิเดชันจะได้กราฟเส้นตรง นิยมเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับโทรลอกซ์ (Trolox equivalence; TE) หรือกรดแกลลิค (Gallic acid equivalent; GAE) มีวิธีการที่ใช้ได้แก่ วิธี 2,2-azinobis (3-ethylbenzthiazoline-sulphonic acid)(ABTS) free radical decolorization assay, วิธี 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay และวิธี Ferric reducing antioxidant power assay (FRAP)

2.3.2.1 วิธี 2,2-azinobis (3-ethylbenzthiazoline-sulphonic acid; ABTS) free radical decolorization assay

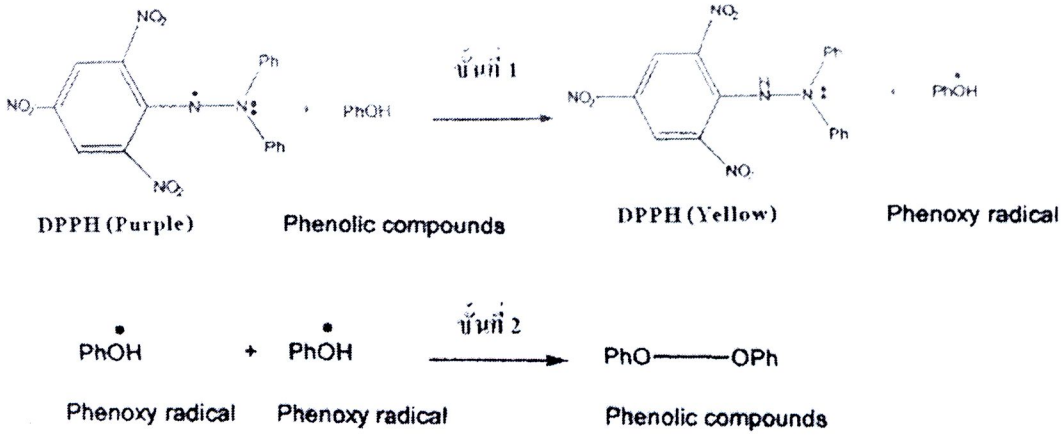
วิธีวิเคราะห์นี้ใช้หลักการที่สารต้านออกซิเดชันสามารถขจัดสารอนุมูล $ABTS^{\bullet+}$ ที่มีความคงตัว โดยสาร ABTS จะถูกออกซิไดซ์โดยโปตัสเซียมเปอร์ซัลเฟตเกิดเป็นอนุมูลที่มีประจุบวก $ABTS^{\bullet+}$ (2,2-azinobis (3-ethylbenzthiazoline-sulphonic acid) radical cation) ซึ่งมีสีฟ้า โดยอนุมูล $ABTS^{\bullet+}$ สามารถละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ ทำให้สามารถวิเคราะห์สารต้านออกซิเดชันที่ละลายในน้ำและไขมัน ดังนั้นเมื่อเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงไปจะทำให้มีสีลดลง ผลการวิเคราะห์สามารถคำนวณเป็นค่าคงที่สัมพันธ์กับสารต้านอนุมูลมาตรฐานโทรลอกซ์ จึงอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Trolox Equivalent Antioxidant Capacity (TEAC) โดยวัดการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตรในเวลาที่กำหนด โดยในการวิเคราะห์จะวัดค่าการดูดกลืนแสงของ $ABTS^{\bullet+}$ ที่ลดลงจากค่าควบคุมที่ไม่ได้เติมสารทดสอบ

ข้อดี คือ วิธีการวิเคราะห์ทำได้ง่าย อนุมูล $ABTS^{\bullet+}$ จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับสารต้านออกซิเดชันภายในเวลา 30 นาที (ปกติใช้เวลา 1 นาที) การวิเคราะห์ทำได้ในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่กว้าง ซึ่งอนุมูล $ABTS^{\bullet+}$ ละลายได้ทั้งในน้ำและสารทำละลายอินทรีย์ ใช้ในการวิเคราะห์หาความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารต่างๆ ทั้งที่เป็นสารที่ละลายน้ำ หรือสารที่ละลายในไขมัน

ข้อเสีย คือ ABTS ไม่ใช่สารตามธรรมชาติที่ก่อให้เกิดอนุมูลในเซลล์ร่างกาย เช่นเดียวกับ Fe^{3+}-TPTZ

2.3.2.2 วิธี 1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay

อนุมูล $DPPH^{\bullet}$ เป็นอนุมูลไนโตรเจนที่คงตัว แสดงสีม่วงโดยไม่ต้องทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดอนุมูลเหมือนกับอนุมูล $ABTS^{\bullet+}$ อนุมูล $DPPH^{\bullet}$ สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์โดยเฉพาะเอทานอล และสามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะสารต้านออกซิเดชันที่ละลายในน้ำ (Wojdylo and others 2007) การวิเคราะห์อาศัยหลักการวัดความสามารถในการรีดิวซ์ในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เป็นกลาง โดยใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์วัดการลดลงของสีม่วง โดย $DPPH^{\bullet}$ ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาหรือที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารต้านออกซิเดชันจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (visible wavelenght) โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร กลไกการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของสารฟีนอลิคแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 กลไกการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของสารประกอบฟีนอลิค
ที่มา : ระวิวรรณ แก้วอมตวงศ์ และทรงพร จึงมั่นคง (2549)

เมื่อสารประกอบฟีนอลิคที่มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการเป็นสารต้านออกซิเดชันแตกตัวให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูล DPPH$^{\bullet}$ จึงทำให้อนุมูล DPPH$^{\bullet}$ มีความเสถียรมากขึ้นและไม่เป็นอนุมูลอิสระอีกต่อไป และสีของสารละลายของ DPPH$^{\bullet}$ จะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเหลืองซีด (ขั้นที่ 1) ส่วน phenoxy radical ที่เกิดขึ้นจะจับกัน ทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเกิดอนุมูลอิสระยุติ (ขั้นที่ 2)

ข้อดี คือ วิธีการวิเคราะห์ทำได้ง่าย ใช้เครื่องมือที่มีทั่วไป นิยมใช้วิธีนี้เป็นวิธีเบื้องต้นในการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลของสารต้านออกซิเดชันจากธรรมชาติ

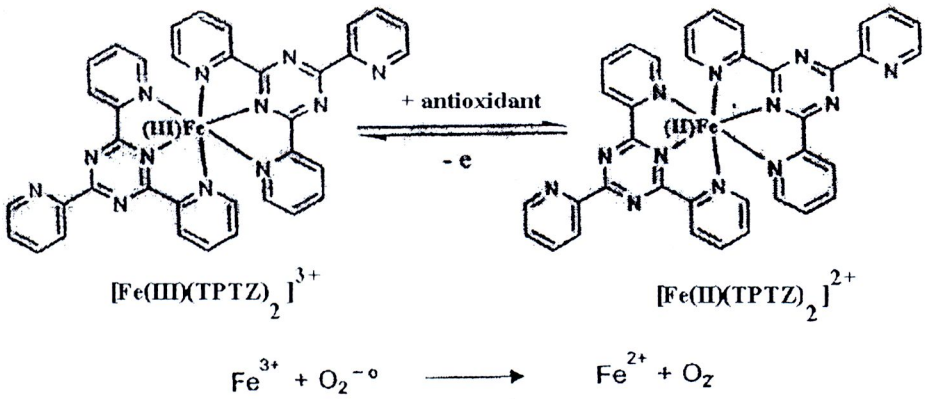
ข้อเสีย คือ อนุมูล DPPH$^{\bullet}$ มีความคงตัวไม่ไวต่อปฏิกิริยาเหมือนอนุมูลที่เกิดขึ้นในเซลล์หรือร่างกาย ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่สามารถแยกแยะและจัดอันดับอนุมูลที่มีความไวสูงได้ นอกจากนี้โครงสร้างทางเคมีของ DPPH$^{\bullet}$ มีอิเล็กตรอนโดดเดี่ยวของอนุมูลอิสระที่ถูกบดบังด้วยวงเบนซีน 3 วงและหมู่ไนโตร ทำให้สารต้านออกซิเดชันที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในการขจัดอนุมูลหรือเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าความเป็นจริง นอกจากนี้สารรีดิวซ์อื่นๆ สามารถทำให้สี DPPH$^{\bullet}$ จางลงได้เช่นกัน

2.3.2.3 วิธี Ferric reducing antioxidant power assay (FRAP)

FRAP เป็นวิธีการวิเคราะห์หาความสามารถของสารประกอบฟีนอลิคในตัวอย่างซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชัน และสามารถให้อิเล็คตรอนแก่อะตอมเหล็กจึงจัดเป็นสารรีดิวซ์ วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์ความสามารถของสารต้านออกซิเดชันในการรีดิวซ์สารประกอบเชิงซ้อนพวกเหล็ก Fe^{3+} -TPTZ (ferric tripyridyl triazine) ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนพวกเหล็ก Fe^{2+} -TPTZ ในสภาวะเป็นกรด ที่มีความเป็นกรด-ด่างที่ 3.6 เพื่อให้เหล็กละลายได้ (ภาพที่ 14) สาร Fe^{2+} -TPTZ มีสีน้ำเงินและดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร ดังนั้นวิธี FRAP สามารถใช้วัดภาวะรีดอกซ์ของเซลล์และเนื้อเยื่อได้ แต่ไม่สามารถวิเคราะห์สารต้านออกซิเดชันที่ขจัดอนุมูลอิสระโดยการให้อะตอมไฮโดรเจน (HAT) ได้ จึงได้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริง

ข้อดี คือ เป็นวิธีที่ง่าย ใช้เวลาน้อย (4-6 นาที) ไม่แพง และไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ

ข้อเสีย คือ กลไกของปฏิกิริยาที่วิเคราะห์ไม่เกี่ยวข้องกับกลไกในร่างกาย และได้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริง



ภาพที่ 14 การรีดิวซ์ของสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก Fe^{3+} -TPTZ ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กเฟอร์รัส Fe^{2+} -TPTZ

ที่มา : ศิริธร ศิริอมรพรรณ (2551)

2.3.2.4 ข้อแตกต่างระหว่างวิธีการวิเคราะห์กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน

สารต้านออกซิเดชันจำพวกเดียวกันที่มีโครงสร้างคล้ายกันจะทำปฏิกิริยาได้ทั้งในวิธี FRAP และวิธี ABTS แม้ว่าทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันในเรื่องค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยวิธี ABTS จะวิเคราะห์โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะเป็นกลาง ส่วนวิธี FRAP ทำปฏิกิริยาในสภาวะเป็นกรด เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดที่สภาวะเป็นกรด จึงเร่งการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน ทำให้ค่าที่ได้จากวิธี FRAP ต่ำกว่าวิธี ABTS เสมอ และค่าจากวิธี FRAP ส่วนใหญ่จะไม่สัมพันธ์กับค่าที่หาจากวิธีอื่น (ศิริธร ศิริอมรพรรณ 2551)

วิธี DPPH จะเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติการต้านออกซิเดชันของสารที่สามารถให้ไฮโดรเจนอะตอมหรือให้อิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระ $DPPH^{\bullet}$ ได้ ส่วนวิธี FRAP เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติการต้านออกซิเดชันของสารที่สามารถให้อิเล็กตรอนกับ Fe^{3+}-TPTZ ได้เท่านั้น

สารต้านออกซิเดชันจะเกิดปฏิกิริยากับ $ABTS^{\bullet+}$ ได้เร็วกว่า $DPPH^{\bullet}$ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์กิจกรรมในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ ABTS ถือเป็นวิธีที่ง่าย มีความน่าเชื่อถือ และเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน แต่หากอยู่ในรูปของอาหารซึ่งมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนอาจต้องพิจารณาเลือกวิธีอื่นๆ ที่เหมาะสม เนื่องจากกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันในอาหารขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติความมีขั้ว (polarity) คุณสมบัติการละลาย (solubility) และกิจกรรมการจับโลหะ (metal-chelating activity) เป็นต้น

ปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ขึ้นกับสารทำละลายที่ใช้ในการสกัด Kumar and others (2008) ศึกษาชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ในการสกัดสารฟีนอลิคทั้งหมดจากสาหร่าย *Kappaphycus alvarezii* (Doty) พบว่า สาหร่าย *Kappaphycus alvarezii* มีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดร้อยละ 0.68-2.05 และการสกัดสารฟีนอลิคทั้งหมดโดยใช้คลอโรฟอร์มต่อเมธานอล (2:1) ให้ประสิทธิภาพในการสกัดดีกว่าตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ (ตารางที่ 5) แต่คลอโรฟอร์มและเมธานอลเป็นอันตรายในการใช้งานมากกว่าเอธานอล

ตารางที่ 5 ปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดในสาหร่าย *Kappaphycus alvarezii* ที่สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ

ตัวทำละลาย	ปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมด (ร้อยละ)
Acetone	0.963 ± 0.058
n-Propanol	1.40 ± 0.040
Ethyl acetate	1.09 ± 0.597
n-Hexane	0.83 ± 0.048
Chloroform	0.68 ± 0.040
Methanol	1.79 ± 0.770
Ethanol	1.94 ± 0.029
Chloroform:methanol (2:1)	2.05 ± 0.038

ที่มา : Kumar and others (2007)

พิชญ์อร ไหมสุทธิสกุล (2545) ศึกษาการสกัดสารฟีนอลิคด้วยวิธี Folin-Ciocalteu reagent และการวิเคราะห์กิจกรรมในการต้านออกซิเดชันของอนุมูล DPPH ในใบติ้ว ใบกระโดน และใบผักหวานบ้าน โดยใช้ตัวทำละลาย คือ เอธานอล และแปรเวลาในการสกัดที่ 15 นาที, 30 นาที, 1 ชั่วโมง, 3 ชั่วโมง, 4.5 ชั่วโมง , 6 ชั่วโมง, 1 วัน, 2 วัน, 4 วัน และ 7 วัน แล้วระเหยแห้งภายใต้สุญญากาศที่ 50°ซ พบว่า เวลาในการสกัดมีผลต่อปริมาณสารที่สกัดได้ ปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมด และกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันของใบติ้ว ใบกระโดน และใบผักหวานบ้านอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยใบติ้วมีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดและกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้นในช่วง 6 ชั่วโมงแรกของการสกัด ใบกระโดนและใบผักหวานบ้านมีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดและกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้นในช่วง 4.5 ชั่วโมงของการสกัด ทั้งนี้ปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดและกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันมีค่าลดลงเมื่อทำการสกัดนานขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารฟีนอลิคและกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9122 และเวลาที่ดีที่สุดในการสกัดสารฟีนอลิคและกิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน คือ 4.5 ชั่วโมง

Zhou and Yu (2006) ศึกษาปริมาณสารฟีนอลิคในผักชนิดต่าง ๆ พบว่า ผักคะน้ามีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดสูงสุด รองลงมาคือรูบาร์บ ปวยเล้ง บรอคโคลี ถั่วเขียว มะเขือเทศ แครอท และมันฝรั่ง ตามลำดับ และกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันวิธี DPPH คะน้าใกล้เคียงกับบรอคโคลี แต่มากกว่ามะเขือเทศ รูบาร์บ ปวยเล้ง ถั่วเขียว แครอท และมันฝรั่ง ตามลำดับ (ตารางที่ 6) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.729

ตารางที่ 6 ปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมด และกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันในผักชนิดต่าง ๆ

ชนิดผัก	สารฟีนอลิคทั้งหมด (มก./ก. น้ำหนักแห้ง)	กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน วิธี DPPH (ร้อยละการยับยั้ง)
ปวยเล้ง (spinach)	9.3-13.0	45-52
บรอคโคลี (broccoli)	9.4-10.6	73-79
รูบาร์บ (rhubarb)	13.2	52
คะน้า (kale)	16.3-18.8	75-77
มะเขือเทศ (tomato)	2.9-5.0	40-87
แครอท (carrot)	1.2-1.6	23-37
มันฝรั่ง (potato)	0.9-2.6	13-38
ถั่วเขียว (green bean)	6.0-7.0	40

ที่มา : Zhou and Yu (2006)

Ismail and others (2004) ศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อปริมาณสารฟีนอลิค และกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันในคะน้า ปวยเล้ง กะหล่ำปลี ผักบุ้งจีน และหอมแดง (ตารางที่ 7) พบว่า การให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำเดือด นาน 1 นาที มีผลทำให้ปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมด และกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยหอมแดงสดและหอมแดงที่ผ่านการลวก มีกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันได้มากกว่าปวยเล้ง ผักบุ้งจีน กะหล่ำปลี และคะน้า ตามลำดับ ส่วนปวยเล้งมีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดสูงกว่าผักบุ้งจีน คะน้า หอมแดง และกะหล่ำปลี ตามลำดับ แม้ว่าปวยเล้งมีปริมาณสารฟีนอลิคมากที่สุด แต่มีกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันต่ำกว่าหอมแดง เนื่องจากหอมแดงมีสารประกอบฟีนอลิคกลุ่มฟลาโวนอยด์มาก ซึ่งฟลาโวนอยด์ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรดฟีนอลิค (Pokorny and others 2001) จึงมีกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันมากกว่าปวยเล้ง เนื่องจากปวยเล้งและผักบุ้งจีนประกอบด้วยสารต้านออกซิเดชันกลุ่มแอลฟาโทโคฟีรอล เบต้าแคโรทีน และกรดเฟอรูลิค (Ismail and others 2004)

ตารางที่ 7 ปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมด และกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันในผักชนิดต่าง ๆ

ชนิดผัก	สารฟีนอลิคทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกรัม)		กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน วิธี beta carotene bleaching (ร้อยละการยับยั้ง)	
	สด	ลวก	สด	ลวก
ปวยเล้ง (spinach)	71.67	61.68	66.40	61.90
คะน้า (kale)	36.89	32.51	50.20	45.90
หอมแดง (shallot)	25.28	21.87	69.10	68.50
ผักบุ้งจีน (swamp cabbage)	41.75	30.95	60.30	56.50
กะหล่ำปลี (cabbage)	11.07	8.86	59.30	53.40

ที่มา : Ismail and others (2004)

Chantaro and others (2008) ศึกษาผลของการลวกที่อุณหภูมิ 90°ซ นาน 1 นาที และการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°ซ จนมีความชื้นร้อยละ 6-8 (น้ำหนักแห้ง) ต่อปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดในเปลือกแครอท (ตารางที่ 8) พบว่า เปลือกแครอทสดมีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมด 1,371 มก./100ก. (น้ำหนักแห้ง) และมีกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันของเปลือกแครอทสดร้อยละ 94.67 หลังผ่านการลวกที่อุณหภูมิ 90°ซ นาน 1 นาที เปลือกแครอทมีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ขณะที่กิจกรรมในการต้านออกซิเดชันของเปลือกแครอทที่ผ่านการลวกไม่แตกต่างจากเปลือกแครอทสด ($p > 0.05$) การทำแห้งเปลือกแครอทมีผลทำให้ปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดและกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและปริมาณของสารฟีนอลิคทั้งหมดระหว่างกระบวนการทำแห้งหรือเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของสารฟีนอลิค

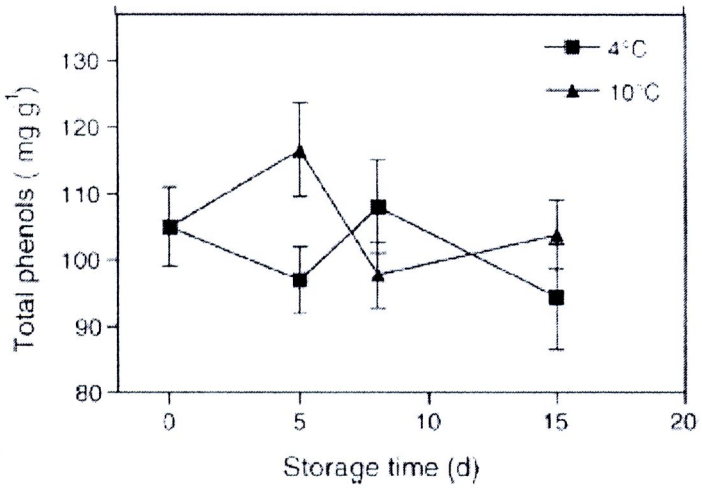
ตารางที่ 8 ผลของการลวกและการทำแห้งต่อปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดและกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันในเปลือกแครอท

สภาวะการทำแห้ง	เวลา (ชม.)	ปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมด (มก.GAE/100ก. น้ำหนักแห้ง)	กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน วิธี linoleic acid emulsion system (ร้อยละ)
เปลือกแครอทสด			
ไม่ทำแห้ง	-	1371±14^{c}	94.67±1.24^{c}
ทำแห้ง 60°ซ	12.5	1017±71^{ab}	87.58±1.85^{c}
ทำแห้ง 70°ซ	10.0	877±148^{ab}	77.66±0.42^{b}
ทำแห้ง 80°ซ	7.5	882±118^{ab}	72.13±2.07^{ab}
เปลือกแครอทลวก			
ไม่ทำแห้ง	-	1080±120^{b}	90.56±3.05^{c}
ทำแห้ง 60°ซ	8.5	919±50^{ab}	78.20±0.95^{b}
ทำแห้ง 70°ซ	7.0	875±82^{ab}	72.54±1.77^{ab}
ทำแห้ง 80°ซ	5.5	837±61^{a}	69.92±3.05^{a}

^{a,b}...ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายความว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ที่มา : Chantaro and others (2008)

Ferrante and Maggiore (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิ (4°ซ และ 10°ซ) และเวลา (5, 8 และ 15 วัน) ในการเก็บรักษาผักกาดหอม (*Valeriana locusta*) พบว่า ผักกาดหอมมีปริมาณฟีนอลิคทั้งหมดในผักกาดหอมที่เก็บรักษาที่ 4 และ 10°ซ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) เมื่อเก็บรักษานานมากกว่า 8 วัน ผักกาดหอมที่เก็บรักษาที่ 10°ซ มีปริมาณฟีนอลิคทั้งหมดเพิ่มขึ้น ขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°ซ มีปริมาณฟีนอลิคทั้งหมดลดลง อย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) หลังวันที่ 8 ของการเก็บรักษา (ภาพที่ 15)



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดและระยะเวลาการเก็บรักษาในผักกาดหอม

ที่มา : Ferrante and Maggiore (2007)

Bunea and others (2008) พบว่า ผักปวยเล้งสดมีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมด 2088.9 มก./กก. น้ำหนักสด เมื่อปวยเล้งผ่านการแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°ซ นาน 1 และ 3 วัน มีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดลดลง ($p \leq 0.05$) ร้อยละ 7.6 และร้อยละ 11.2 (1929.7 และ 1854.7 มก./กก.) ตามลำดับ เมื่อผักปวยเล้งผ่านลวกก่อนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°ซ เก็บรักษานาน 1 เดือน มีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดไม่แตกต่างจากผักปวยเล้งสด ($p>0.05$) และปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดลดลงมากที่สุดร้อยละ 50 ในผักปวยเล้งที่ผ่านลวกก่อนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°ซ เก็บรักษานาน 1 เดือน แล้วต้มในน้ำเดือด 10 นาที โดยมีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดลดลงเป็น 1067.4 มก./กก. การต้มอาจทำให้สารฟีนอลิคลดลง เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิคที่ถูกเก็บไว้ในเพกตินหรือเซลลูโลสสามารถละลายออกมาได้ การให้ความร้อนช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของสารฟีนอลิค แล้วเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบระหว่างการให้ความร้อน

Murcia and others (2009) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันวิธี ABTS ในผัก 25 ชนิด ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°ซ นาน 7 วัน และการแช่เยือกแข็งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°ซ นาน 8 เดือน และการบรรจุกระป๋องเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องนาน 8 เดือน พบว่า กระเทียมต้น บรอคโคลี และกะหล่ำดาว เมื่อผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°ซ นาน 7 วัน มีร้อยละการสูญเสียกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันมากที่สุด คือร้อยละ 47.3, 41.3 และร้อยละ 30.2 ตามลำดับ ส่วนผักที่เหลืออีก 22 ชนิด มีการสูญเสียกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันหลังผ่านการเก็บรักษาไม่แตกต่างจากวัตถุดิบสด ($p>0.05$) (ตารางที่ 9) ซึ่งสารประกอบฟีนอลิคในกลุ่มกรดฟีนอลิคสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษา

ตารางที่ 9 กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน และร้อยละการสูญเสียกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันในผัก 25 ชนิด

ชนิดผัก	กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน (TEAC; μmole)	การสูญเสียกิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน (ร้อยละ)				
	วัตถุดิบสด	เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°ซ	การแช่เยือกแข็งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°ซ		การบรรจุกระป๋องเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง	
		7 วัน	1 วัน	8 เดือน	1 วัน	8 เดือน
อาร์ติโชค	11.3±0.3[a]	0.5	0.6	0.2	0.5	0.9
หน่อไม้ฝรั่ง	11.5±0.2[a]	0.8	1.5	0.8	1.2	0.7
ถั่วปากอ้า	12.3±0.5[a]	0.2	1.0	0.3	2.5	1.2
บีท	11.4±0.1[a]	0.6	NS	NS	1.2	0.6
บรอคโคลี	11.5±0.2[a]	41.3	1.6	0.4	1.4	0.8
กะหล่ำดาว	9.2±1.5[ab]	30.2	2.1	0.4	2.6	0.9
แครอท	7.4±0.3[b]	0.5	NS	NS	2.0	2.1
กะหล่ำดอก	9.9±0.5[ab]	1.5	0.6	0.6	1.3	0.7
เซลารี	10.5±0.4[a]	0.9	NS	NS	1.3	2.1
ชิโครี	11.4±0.5[a]	1.1	NS	NS	NS	NS
แตงกวายาว	3.3±0.5[c]	0.9	NS	NS	NS	NS
มะเขือ	11.5±0.6[a]	1.4	NS	NS	NS	NS
เอ็นไดว์	6.2±0.5[b]	1.8	NS	NS	NS	NS
กระเทียม	12.5±0.2[a]	0.3	33.2	37.5	35.2	1.5
ถั่วเขียว	12.3±0.3[a]	0.4	0.8	0.6	0.9	0.9
กระเทียมต้น	9.7±0.7[ab]	47.3	NS	NS	18.2	1.0
ผักกาดหอม	9.5±0.6[ab]	0.6	NS	NS	NS	NS

ตารางที่ 9 กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน และร้อยละการสูญเสียกิจกรรมในการต้านออกซิเดชันในผัก 25 ชนิด (ต่อ)

ชนิดผัก	กิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน (TEAC; μmole)	การสูญเสียกิจกรรมในการต้านออกซิเดชัน (ร้อยละ)				
	วัตถุดิบสด	เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°ซ	การแช่เยือกแข็งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°ซ		การบรรจุกระป๋องเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง	
		7 วัน	1 วัน	8 เดือน	1 วัน	8 เดือน
ข้าวโพด	10.3±0.2[a]	1.2	1.2	4.1	27.1	2.5
หอมหัวใหญ่	10.2±0.4[a]	1.0	2.5	1.0	NS	NS
ถั่ว	12.3±0.1[a]	0.6	0.5	0.9	34.2	37.1
พริกหวาน	11.9±0.1[a]	0.8	NS	NS	NS	NS
หัวไชเท้า	9.9±0.2[ab]	1.4	NS	NS	NS	NS
ปวยเล้ง	11.9±0.3[a]	0.6	1.5	0.6	0.5	0.8
สวิสชาร์ด	11.5±0.5[a]	0.2	0.2	0.6	1.2	0.6
ซุกีนี	8.3±0.6[ab]	1.2	NS	NS	NS	NS

NS เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่พบในท้องตลาด

[a,b]...ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายความว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

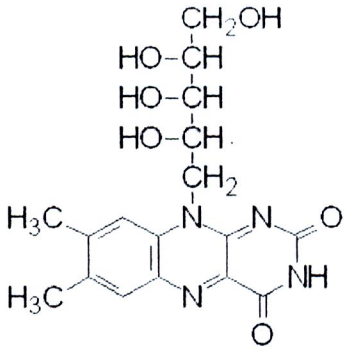
ที่มา : Murcia and others (2009)

Shih and others (2009) ศึกษาชนิดของมันเทศ (สีส้มและสีเหลือง) และกระบวนการทำแห้ง (การแช่เยือกแข็งระเหิดแห้ง (freeze-dry) การทำแห้งด้วยลมร้อน (hot air-dry) และการอัดพอง (extrusion)) ต่อปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมด พบว่า มันเทศสีส้มที่ผ่านการแช่เยือกแข็งระเหิดแห้ง มีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดสูงกว่ามันเทศสีเหลือง โดยกระบวนการทำแห้งมีผลต่อปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดในมันเทศสองชนิดแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) มันเทศสีเหลืองที่ผ่านการแช่เยือกแข็งระเหิดแห้งและการทำแห้งด้วยลมร้อน มีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ขณะที่มันเทศสีส้มที่ผ่านการแช่เยือกแข็งระเหิดแห้งมีปริมาณสารฟีนอลิคทั้งหมดมากกว่ามันเทศสีส้มที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน ($p \leq 0.05$) ซึ่งกระบวนการทำแห้งมีผลในการทำลาย

โครงสร้างเซลล์ของหัวมันเทศจึงสามารถสกัดสารฟีนอลิคออกมาได้ง่าย วิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนทำให้ปริมาณสารฟีนอลิคลดลงได้มากว่าการแช่เยือกแข็งระเหิดแห้ง การทำแห้งด้วยลมร้อนที่ใช้อุณหภูมิมากกว่า 60°ซ มีผลต่อการลดลงของปริมาณสารฟีนอลิคเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา oxidative condensation หรือการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารที่ไม่ทนความร้อน เช่น คาเทชิน

2.4 ไรโบฟลาวิน (Riboflavin)

ไรโบฟลาวิน มีลักษณะเป็นผลึกสีส้มเหลือง ละลายน้ำได้เล็กน้อย และเรืองแสงฟลูออเรสเซนส์สีเขียวเหลืองเข้ม แหล่งที่พบไรโบฟลาวิน คือ รำข้าว ตับ ไต หัวใจ จมูกข้าว ข้าวซ้อมมือ เนื้อสัตว์ ไข่ เนยแข็ง ถั่วเมล็ดแห้ง ผลไม้เปลือกแข็ง และผักใบเขียว การขาดไรโบฟลาวินในคนจะทำให้มุมปากแตกเป็นแผลอักเสบเกิดโรคปากนกกระจอก ไรโบฟลาวินมีการดูดซึมได้ดีที่ลำไส้เล็กส่วนต้น ไรโบฟลาวินในอาหารส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพ coenzyme ของ flavin mononucleotide (FMN) และ flavin adenine dinucleotide (FAD) จับอยู่กับโปรตีน โครงสร้างของไรโบฟลาวิน (ภาพที่ 16) ประกอบด้วยฟลาวิน (isoallxazine ring) ต่ออยู่กับสายโซ่ไรบิทิล (ribityl side chain) รวมเรียกว่า 7, 8 dimethyl-10-(1-D-ribityl) isoalloxazine หรือสารอนุพันธ์ของ isoalloxazine ที่มีสายข้างเป็นไรบิทอล (ribitol) (สมทรง เลขะกุล 2542)



ภาพที่ 16 โครงสร้างไรโบฟลาวิน

ที่มา : Michael (2010)

ไรโบฟลาวินทนต่อความร้อนในการหุงต้มและกรด แต่เกิดการสูญเสียได้เมื่ออาหารถูกปอกหรือตัด ถูกขัดสีหรือชะล้างในระหว่างการเตรียมอาหาร และสลายตัวค่อนข้างเร็วในสารละลายด่าง และจะสูญเสียเร็วมากเมื่อถูกแสงแดดหรือแสงอัลตราไวโอเลต การสลายตัวเกิดจากการแตกออกของไรบิทอล โดยวิธีทางโฟโตเคมีได้ลูมิฟลาวิน (lumiflavin) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติการเป็นวิตามิน (Basu and Dickerson 1996) ปริมาณไรโบฟลาวินที่พบในผักชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 10

Nisha and others (2005) ศึกษาการทำซุปข้นจากปวยเล้งโดยใช้ความร้อนในการเคี่ยวที่อุณหภูมิ (50-120°ซ) นาน 0-60 นาที และวิธีการทำซุปข้นจากผักปวยเล้ง 3 วิธี คือ open pan cook (อัตราการไหลของก๊าซ 15 มล./วินาที นาน 30 นาที), pressure cook (15 มล./วินาที นาน 15 นาที) และ ecoCooker (อัตราการไหลของก๊าซ 4.5 มล./วินาที นาน 30 นาที และ holding อีก 30 นาที) พบว่า ผักปวยเล้งสดมีปริมาณไรโบฟลาวิน 0.215 มก./100 ก. และจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°ซ นาน 60 นาที ทำให้ซุปผักปวยเล้งและสารละลายบริสุทธิ์ของไรโบฟลาวิน มีปริมาณไรโบฟลาวินลดลงร้อยละ 22.8 และร้อยละ 27.5 ตามลำดับ ซึ่งซุปผักปวยเล้งมีปริมาณไรโบฟลาวินคงเหลือมากว่าสารละลายบริสุทธิ์ของไรโบฟลาวิน และจากการศึกษาวิธีการทำซุปข้นจากผักปวยเล้ง 3 วิธี พบว่า open pan cook, pressure cook และ ecoCooker ทำให้ปริมาณไรโบฟลาวินในผักโขมลดลงเป็น 0.206, 0.205 และ 0.190 มก./100 ก. ตามลำดับ โดยปริมาณไรโบฟลาวินไม่แตกต่างจากผักโขมสด ($p>0.05$)

ตารางที่ 10 ปริมาณไรโบฟลาวินในผักชนิดต่าง ๆ

ชนิดผัก	ไรโบฟลาวิน (มก./100 ก. น้ำหนักสด)
ผักกาดหอม (lettuce leaves)	0.060
กะหล่ำปลีซาวอย (savoy cabbage)	0.034
ปวยเล้ง (spinach)	0.061
ร็อคเก็ตสลัด (rocket salad)	0.087
ใบโหระพา (basil)	0.167
เอ็นไดว์ (endive)	0.043
กะหล่ำดอก (cauliflower)	0.047

ที่มา : Cataldi and others (2003)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

Koksel and others (1999) ศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อข้าวบาร์เลย์ที่ไม่ขัดสี และเบอเกอร์จากข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านการขัดสี โดยใช้ข้าวบาร์เลย์ 3 สายพันธุ์ (Anadolu, Tokak และ Bulbul) และการให้ความร้อน 2 แบบ คือ การให้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศด้วยแผ่นให้ความร้อน (hot plate) และการให้ความร้อนด้วยความดันในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave) เปรียบเทียบกับข้าวบาร์เลย์ไม่ขัดสีและไม่ให้ความร้อน พบว่า ข้าวบาร์เลย์สายพันธุ์ Anadolu, Tokak และ Bulbul มีปริมาณไรโบฟลาวินไม่แตกต่างกัน 1.13, 1.17 และ 1.22 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง ($p>0.05$) การให้ความร้อนด้วยความดันในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อมีผลให้ปริมาณไรโบฟลาวินลดลงในข้าวบาร์เลย์ทั้ง 3 สายพันธุ์ ($p\leq0.05$) และการขัดสีข้าวบาร์เลย์มีผลต่อการลดลงของปริมาณไรโบ-ฟลาวิน ($p\leq0.05$) โดยการขัดสีมีผลทำให้ปริมาณไรโบฟลาวินลดลงมากกว่าการให้ความร้อน ขณะที่การให้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศแผ่นให้ความร้อนไม่มีผลต่อการลดลงของปริมาณไรโบฟลาวิน ($p>0.05$)

2.5 ใยอาหาร (Dietary fibre)

ใยอาหารประกอบด้วยโพลีแซคคาร์ไรด์ โอลิโกแซคคาร์ไรด์ และลิกนิน ไม่ถูกย่อยโดยน้ำย่อยในระบบทางเดินอาหารในร่างกายและไม่มีการดูดซึมของลำไส้ ทำให้ใยอาหารผ่านลงไปถึงลำไส้ใหญ่และถูกขับถ่ายออกมาพร้อมกับอุจจาระ ปริมาณใยอาหารช่วยให้ระบบขับถ่ายเป็นปกติ เนื่องจากใยอาหารเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของกากอาหารที่ร่างกายขับทิ้ง และใยอาหารมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำ ทำให้ปริมาณอุจจาระมากขึ้นและหนักขึ้น ส่งผลทำให้การขับถ่ายกากอาหารออกจากร่างกายเร็วขึ้น ทำให้สารก่อมะเร็งที่อาจปนอยู่ในอาหาร ไม่ถูกดูดซึมผ่านผนังทางเดินอาหารก่อนถึงลำไส้ใหญ่ จึงป้องกันการเกิดมะเร็งลำไส้ใหญ่ (colon cancer) ได้ และการบริโภคใยอาหารสามารถลดอุบัติการณ์ของการเกิดโรคท้องผูก โรคอ้วน และโรคเบาหวานได้ (Ortiz and others 2006) แหล่งที่พบใยอาหาร ได้แก่ รำข้าว ข้าวสาลี บาร์เลย์ ข้าวโพด ข้าวโอ๊ต ผลไม้ตระกูลส้ม องุ่น แอปเปิ้ล หัวบีท ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ถั่วเมล็ดกลม และทานตะวัน (Redondo-Cuenca and others 2008) ใยอาหารจากธัญพืชมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากกว่าใยอาหารจากผลไม้ อย่างไรก็ตามใยอาหารจากผลไม้มีคุณภาพดีกว่า เนื่องจากมีความสมดุลของปริมาณเส้นใยที่ละลายน้ำและเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ (Larrauri 1999) ตารางที่ 11 แสดงปริมาณเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ เส้นใยที่ละลายน้ำ และเส้นใยทั้งหมด ที่พบในผักชนิดต่าง ๆ (Li and others 2002) ดังนี้

ตารางที่ 11 ปริมาณเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ เส้นใยที่ละลายน้ำ และเส้นใยทั้งหมด ในผักชนิดต่าง ๆ (กรัม/ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง)

ชนิดวัตถุดิบ	เส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ	เส้นใยที่ละลายน้ำ	เส้นใยทั้งหมด
ผักโขม (spinach)	25.00	7.92	32.92
บรอคโคลี (broccoli)	28.07	4.04	32.11
กะหล่ำปลี (cabbage)	19.54	5.02	24.45
ผักกาดหอม (lettuce)	19.47	2.21	21.68
แครอท (carrot)	19.97	4.09	24.06
กะหล่ำดอก (cauliflower)	23.04	5.04	28.08
แตงกวา (cucumber)	21.36	4.55	25.91
หอมหัวใหญ่ (onion)	8.45	4.92	13.37
พริกชี้ฟ้า (pepper)	17.77	9.52	27.29

ที่มา : Li and others (2002)

Chantaro and others (2008) ศึกษาผลของการลวกที่อุณหภูมิ 90°ซ นาน 1 นาที และการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°ซ จนมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 6-8 (น้ำหนักแห้ง) ต่อปริมาณเส้นใยในเปลือกแครอทสด พบว่า เปลือกแครอทที่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิ 90°ซ นาน 1 นาที มีปริมาณเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ เส้นใยที่ละลายน้ำ และเส้นใยทั้งหมดสูงขึ้น (ตารางที่ 12) ทั้งนี้เนื่องจากการลวกทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ เช่น วิตามิน เกลือแร่ และน้ำตาลออกจากเซลล์พืช อย่างไรก็ตามการทำแห้งไม่มีผลต่อปริมาณเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ เส้นใยที่ละลายน้ำ และเส้นใยทั้งหมด เนื่องจากช่วงอุณหภูมิ 60-80°ซ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเส้นใย

Burnea and others (2008) อธิบายว่า องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเส้นใยขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัตถุดิบและขั้นตอนของกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยการลวกก่อนการทำแห้งช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ ในขณะเดียวกันการลวกอาจมีผลในการเพิ่มการสูญเสียของแข็งที่ละลายได้และทำให้โพรโทเพกติน (protopectin) เปลี่ยนเป็นเพกตินที่สามารถละลายน้ำได้ และการทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูง เป็นผลให้เส้นใยที่ละลายน้ำได้ลดลง

ตารางที่ 12 ปริมาณเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ เส้นใยที่ละลายน้ำ และเส้นใยทั้งหมด ในเปลือกแครอท (กรัม/ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง)

สภาวะการทำแห้ง	เส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ	เส้นใยที่ละลายน้ำ	เส้นใยทั้งหมด
เปลือกแครอทสด	33.55 ± 0.13[a]	10.42 ± 2.81[a]	45.47 ± 0.82[a]
ทำแห้ง 60°ซ	38.88 ± 3.57[a]	10.34 ± 0.06[a]	49.23 ± 3.51[a]
ทำแห้ง 70°ซ	38.26 ± 1.77[a]	10.02 ± 0.35[a]	48.28 ± 2.12[a]
ทำแห้ง 80°ซ	39.13 ± 0.74[a]	9.79 ± 0.34[a]	48.92 ± 1.08[a]
เปลือกแครอทลวก	52.16 ± 2.54[b]	18.28 ± 0.85[b]	69.85 ± 2.54[b]
ทำแห้ง 60°ซ	54.34 ± 1.08[b]	18.98 ± 2.51[b]	73.32 ± 1.44[b]
ทำแห้ง 70°ซ	49.93 ± 2.14[b]	19.67 ± 3.13[b]	69.60 ± 0.99[b]
ทำแห้ง 80°ซ	50.62 ± 2.04[b]	19.11 ± 1.24[b]	69.73 ± 0.81[b]

[a,b]...ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายความว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ที่มา : Chantaro and others (2008)

Schreiner and others (2003) ศึกษาการบรรจุผักกาดหอม (lettuce) โดยหุ้มฟิล์มโปรตีนที่ย่อยสลายได้ (biodegradable protein film) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 18°ซ พบว่า ผักกาดหอมมีปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำ (soluble pectin) และเพกตินทั้งหมด (total pectin) ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม แต่ผักกาดหอมมีปริมาณเพกตินที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble pectin) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) หลังการเก็บรักษานาน 4 วัน เนื่องจากผักกาดหอมที่หุ้มฟิล์มมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นแต่มีก๊าซออกซิเจนลดลง อาจนำไปสู่การยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์เพกโตไลติก (pectolytic enzyme) ซึ่งทำหน้าที่เร่งการสลายของผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลาย ฉะนั้นการบรรจุอาหารด้วยการหุ้มฟิล์มโปรตีนที่ย่อยสลายได้ไม่มีผลในการรักษาปริมาณเพกตินในผักกาดหอมได้

Shih and others (2009) ศึกษากระบวนการทำแห้ง (การแช่เยือกแข็งระเหิดแห้ง (freeze-dry) การทำแห้งด้วยลมร้อน (hot air-dry) และการอัดพอง (extrusion)) ต่อปริมาณเส้นใยที่ละลายน้ำได้ เส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ และเส้นใยทั้งหมดในมันเทศสีส้มและมันเทศสีเหลือง พบว่า การแช่เยือกแข็งระเหิดแห้ง และการทำแห้งด้วยลมร้อน มีปริมาณเส้นใยที่ละลายน้ำได้ เส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ และเส้นใยทั้งหมดไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) โดยปริมาณเส้นใยที่ละลายน้ำ และเส้นใย

ทั้งหมดของมันเทศที่ผ่านการอัดพองสูงกว่าการแช่เยือกแข็งระเหิดแห้ง และการทำแห้งด้วยลมร้อน ($p \leq 0.05$) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยที่ผ่านการอัดพองขึ้นกับชนิดวัตถุดิบและปัจจัยในการอัดพอง

Koksel and others (1999) ศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อปริมาณเบต้ากลูแคนในข้าวบาร์เลย์ที่ไม่ขัดสี และเบอเกอร์จากข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านการขัดสี โดยใช้ข้าวบาร์เลย์ 3 สายพันธุ์ (Anadolu, Tokak และ Bulbul) และการให้ความร้อน 2 แบบ คือ การให้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศด้วยแผ่นให้ความร้อน (hot plate) และการให้ความร้อนด้วยความดันในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave) เปรียบเทียบกับข้าวบาร์เลย์ไม่ขัดสีและไม่ให้ความร้อน พบว่า การให้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศด้วยด้วยแผ่นให้ความร้อนและการให้ความร้อนด้วยความดันในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อทำให้เบอเกอร์จากข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านการขัดสีมีปริมาณเบต้ากลูแคนเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) ขณะที่การให้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศด้วยแผ่นให้ความร้อนและการให้ความร้อนด้วยความดันในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อมีผลให้ปริมาณเบต้ากลูแคนในข้าวบาร์เลย์สายพันธุ์ Bulbul ลดลง ($p \leq 0.05$) ส่วนข้าวบาร์เลย์สายพันธุ์ Anadolu มีปริมาณเบต้ากลูแคนลดลงเฉพาะการให้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศด้วยแผ่นให้ความร้อน ($p \leq 0.05$) ซึ่งการลดลงของปริมาณเบต้ากลูแคนเกิดจากการละลายของเบต้ากลูแคนลงในน้ำ ดังนั้นปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการควรเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อปริมาณข้าว ส่วนข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านการขัดสีมีปริมาณเบต้ากลูแคนเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) ในข้าวบาร์เลย์ทั้ง 3 สายพันธุ์ เนื่องจากในรำข้าวบาร์เลย์มีปริมาณเบต้ากลูแคนเล็กน้อย ดังนั้นการทำเบอเกอร์ควรใช้ข้าวบาร์เลย์ที่ดี เพื่อคุณประโยชน์ที่จะได้รับจากการบริโภค เนื่องจากผลของปริมาณเส้นใยที่ละลายน้ำ เช่น เบต้ากลูแคน สามารถลดความเสี่ยงในการเป็นโรคหัวใจและโรคมะเร็ง