รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

ผลของวิธีการทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)

Effect of Drying Method on Antioxidant Activities of Spirulina (*Spirulina platensis*)

โครงการย่อยภายใต้ชุดโครงการ : ระบบการผลิตสัตว์น้ำที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่ออาหารปลอดภัยและเพิ่มมูลค่าทรัพยากรสัตว์น้ำ

โดย

วิจิตรา แดงปรก

ทองลา ภูคำวงศ์

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2557

รหัสโครงการวิจัย มจ.1-56-023.8

รายงานผลการวิจัย

เรื่อง ผลของวิธีการทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)

Effect of Drying Method on Antioxidant Activities of Spirulina (*Spirulina platensis*)

โครงการย่อยภายใต้ชุดโครงการ : ระบบการผลิตสัตว์น้ำที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่ออาหารปลอดภัยและเพิ่มมูลค่าทรัพยากรสัตว์น้ำ

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2556

จำนวน 250,800.00 บาท

หัวหน้าโครงการ นางวิจิตรา แดงปรก

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

31 มีนาคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง ผลของวิธีการทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2556 ซึ่งคณะผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่และนักศึกษาสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการได้เป็นอย่างดี

วิจิตรา แดงปรก
ทองลา ภูคำวงศ์
ผู้วิจัย

ผลของวิธีการทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)

Effect of Drying Method on Antioxidant Activities of Spirulina (*Spirulina platensis*)

วิจิตรา แดงปรก

Wichittra Daengprok

ทองลา ภูคำวงศ์

Thongla Pukumvong

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงผลของการถนอมรักษาอาหารโดยวิธีการทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา วิธีการทำแห้งในการวิจัยนี้มีด้วยกัน 5 วิธี ได้แก่ การทำแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน การทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ให้สาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่ได้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7.0 ซึ่งสอดคล้องตาม มผช. 542/2549 เรื่อง สาหร่ายสไปรูลินาแห้ง ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่ได้ทั้ง 5 ตัวอย่างกับสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่มีจำหน่ายในทางการค้า 2 ตัวอย่าง ได้แก่ สาหร่ายสไปรูลินายี่ห้อ A และยี่ห้อ B พบว่าวิธีการทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศทำให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่ทำแห้งโดยวิธีอื่นและที่จำหน่ายในทางการค้า ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 10.30 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิก/น้ำหนักแห้ง 1 กรัม รองลงมาเป็นวิธีการทำแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์และวิธีการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนโดยมีค่าเท่ากับ 8.17 และ 7.74 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิก/น้ำหนักแห้ง 1 กรัม ส่วนสาหร่ายสไปรูลินาที่จำหน่ายในทางการค้า ยี่ห้อ A และยี่ห้อ B มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าเท่ากับ 1.33 และ 0.96 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิก/น้ำหนักแห้ง 1 กรัม ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยดูจากความสามารถในการจับอนุมูลอิสระ DPPH มีความสอดคล้องกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

คำสำคัญ: สไปรูลินา ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน การทำแห้ง อนุมูลอิสระ

Abstract

This research aims to study the effect of preserving food by different drying methods on antioxidant activities of spirulina. The five different drying methods were employed in this study, i.e., solar drying, hot air oven drying, vacuum oven drying, spray drying and freeze drying. The algae, Spirulina was dried until the moisture contents did not exceed 7.0 percent in accordance with TCPS 542/2549 of dried Spirulina powder. The antioxidant activities of five dried spirulina samples were compared with two samples of commercially-available dried spirulina powder, namely brand A and brand B. It was found that dried spirulina powder with vacuum oven drying had the highest total polyphenolics contents of 10.30 mg GAE/g dry weight when compared with others ($p \leq 0.05$) followed by the samples with solar drying and hot air oven with a value equal to 8.17 and 7.74 mg GAE/g dry weight, respectively. In addition, the samples of brand A and brand B had the relatively low total polyphenolics contents i.e. 1.33 and 0.96 mg GAE/g dried sample, respectively. The antioxidant activity as indicated by DPPH inhibition had a positive relationship to total polyphenolics content.

Key words: spirulina, *Spirulina platensis*, antioxidant capacity, drying, free radical

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ค
สารบัญภาพผนวก	ง
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	21
ผลการวิจัย	26
วิจารณ์ผลการวิจัย	33
สรุปผลการวิจัย	36
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก	41

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)	11
ตารางที่ 2	คุณภาพของสาหร่ายสไปรูลินาสด	27
ตารางที่ 3	สภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมสำหรับสาหร่ายสไปรูลินา	27
ตารางที่ 4	ปริมาณความชื้นและค่า water activity ในสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง	29
ตารางที่ 5	ค่าสีตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผง	30
ตารางที่ 6	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในตัวอย่างสาหร่ายทางการค้า และสาหร่ายผง	31
ตารางที่ 7	ความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ DPPH ของตัวอย่างสาหร่ายทางการค้าและสาหร่ายผง	32
ตารางที่ 8	หลักเกณฑ์การให้คะแนน (ข้อ 8.1.4)	46

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1	โครมาโตแกรมของสารประกอบฟีนอลิกจากสารสกัดสาหร่ายสไปรูลินา	10
ภาพที่ 2	ตัวอย่างสาหร่ายผง	48

คำนำ

ปัจจุบันผู้คนมีวิถีชีวิตที่รีบเร่ง ไม่มีเวลาที่จะดูแลตนเองในเรื่องของอาหารการกินให้มีคุณค่าทางโภชนาการได้ครบถ้วนทุกมื้อเต็มไป นอกจากนี้การดำรงชีวิตที่เต็มไปด้วยความเครียดและต้องเผชิญกับมลพิษต่างๆ อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรคเรื้อรังต่างๆ ดังนั้นสำหรับบุคคลบางคนจึงมีความต้องการผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร (dietary supplement) เพื่อช่วยเสริมสร้างสุขภาพให้แข็งแรง ปราศจากโรคภัยไข้เจ็บต่างๆ ท่ามกลางผลิตภัณฑ์เสริมอาหารจำนวนมากมายที่วางจำหน่ายในท้องตลาด ผลิตภัณฑ์สาหร่ายสไปรูลินาเป็นผลิตภัณฑ์ตัวหนึ่งที่ได้รับความสนใจจากผู้บริโภคเป็นอย่างมาก ส่วนใหญ่จะผ่านการทำแห้ง แล้วทำให้อยู่รูปเม็ดยา (tablet) หรือบรรจุแคปซูลจำหน่าย โดยมีทั้งที่ผลิตในประเทศไทยและที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

สาหร่ายสไปรูลินาหรือสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*) เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่มีขนาดเล็กมาก จัดเป็นพวกไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) มีโปรตีนสูงถึงร้อยละ 70 ของน้ำหนักแห้ง เป็นแหล่งที่ดีของกรดไขมันชนิดแกมม่า-ลิโนเลนิก (γ-linolanic acid, GLA) วิตามิน ได้แก่ ไบโอติน กรดแพนโทธีนิก กรดโฟลิก อิโนซิทอล ไนอะซิน ไพริดอกซิน ไรโบฟลาวิน ไธอะมีน วิตามินอี และแร่ธาตุ เช่น แคลเซียม เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีข้อมูลว่าสาหร่ายสไปรูลินามีสมบัติในการต้านออกซิเดชันอีกด้วย ซึ่งสมบัติในการต้านออกซิเดชันของอาหารมีความสัมพันธ์กับการช่วยรักษาหรือป้องกันโรคเรื้อรังต่างๆ ได้หลายชนิด เช่น ช่วยลดคอเลสเทอรอลในเลือด ช่วยป้องกันการเกิดโรคเบาหวานและโรคมะเร็ง เป็นต้น ช่วยเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกันโรคของร่างกาย และช่วยเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่ดีในลำไส้พวกแบคทีเรียกรดแลคติก (lactic acid bacteria) นอกจากนี้สาหร่ายสไปรูลินายังมีผนังเซลล์บาง แตกต่างจากสาหร่ายชนิดอื่น ทำให้ร่างกายสามารถย่อยและดูดซึมสารต่างๆ จากสาหร่ายสไปรูลินาไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายอีกด้วย

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของการทำแห้งต่อคุณภาพและความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาอบแห้งที่ได้ยังมีอยู่น้อยมาก ดังนั้นงานทดลองนี้จึงได้มุ่งศึกษาความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับผู้บริโภคในการพิจารณาเลือกซื้อและทางหน่วยงานภาครัฐและเอกชน รวมถึงผู้ผลิตสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการปรับปรุงมาตรฐานของสาหร่ายสไปรูลินาต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา

2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาอบแห้งในระหว่างการเก็บรักษา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลทางวิชาการสำหรับผู้บริโภค หน่วยงานภาครัฐและเอกชน รวมถึงผู้ผลิต

2. สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการปรับปรุงมาตรฐานของสาหร่ายสไปรูลินาอบแห้งต่อไป เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและตรงตามความต้องการของผู้บริโภค

การตรวจเอกสาร

1. สาหร่ายสไปรูลินา (spirulina)

สาหร่ายสไปรูลินาเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue green algae) ขนาดเล็กมาก ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องมองด้วยกล้องจุลทรรศน์ เป็นไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างพืชสีเขียวและแบคทีเรีย (Anbarasan *et al*., 2011) จัดอยู่ใน Phylum: Cyanophyta Class: Cyanophyceae Order: Oscillatoriales Family: Oscillatoriaceae Genus: Spirulina มีหลาย Species เช่น platensis และ maxima เป็นต้น ที่นิยมเลี้ยงในประเทศไทยเป็น platensis (*Spirulina platensis*) (สุภัทร์, 2546) ผนังเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลินามีความอ่อนนุ่ม ประกอบด้วยน้ำตาลเชิงซ้อนและโปรตีนทำให้ร่างกายสามารถย่อยได้ง่าย แตกต่างจากสาหร่ายชนิดอื่นที่ร่างกายย่อยได้ยาก เพราะมีผนังเซลล์ที่เหนียวจากพวกเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบ (Anbarasan *et al*., 2011) นอกจากนี้ยังไม่มีเมือกหุ้มเมมเบรนซึ่งเป็นข้อดีทำให้ไม่มีจุลินทรีย์ชนิดอื่นมาเกาะ พบกรดนิวคลีอิกกระจายอยู่ทั่วไปในไซโตพลาสซึม มี gas vacuole ทำให้สามารถลอยตัวได้ดี (สุภัทร์, 2546)

สาหร่ายสไปรูลินาสามารถสังเคราะห์แสงได้จึงเจริญได้อย่างรวดเร็วในบริเวณน้ำตื้นที่แสงแดดส่องได้ทั่วถึง ตามธรรมชาติพบได้ตามแหล่งน้ำกร่อยที่มีความเป็นเบสและความเค็มค่อนข้างสูง สามารถเจริญได้ทั้งในน้ำสะอาดและน้ำทิ้งหรือน้ำเสียจากโรงงาน จึงมีการนำสาหร่ายสไปรูลินาไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ด้วย (สุภัทร์, 2546)

1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลผลิต (productivity) ของสาหร่ายสไปรูลินา

ปริมาณผลผลิตมีความสำคัญในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1.1.1 ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของน้ำที่ใช้เลี้ยง

การรักษาค่าความเป็นกรด-เบสให้เหมาะสมในการเลี้ยงมีความสำคัญต่อการผลิตสาหร่ายเชิงการค้ามาก เนื่องจากต้องรักษาค่าความเป็นกรด-เบสให้สูง ซึ่งทำได้โดยการเติมคาร์บอเนตลงไป แต่ต้องเติมในระดับที่ไม่มีผลเสียต่อการเจริญ การที่มีค่าความเป็นกรด-เบสสูงจะทำให้ลดการปนเปื้อนจากสาหร่ายชนิดอื่นๆ เช่น Chorella เป็นต้น ในบ่อที่ทำการเลี้ยง พบว่าอัตราผลผลิตไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นเป็น 9.0-10.5 ถ้าที่ค่าความเป็นกรด-เบสมากกว่า 10.5 จะทำให้ผลผลิตลดลง (Richmond and Grobbelaar, 1986)

1.1.2 ความเข้มแสง (light intensity)

เมื่อเลี้ยงสาหร่ายในที่มีความเข้มแสงคงที่ตลอดเวลา พบว่าที่ความเข้มแสงสูงขึ้นจะได้ปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาแน่นของเซลล์มากขึ้น เซลล์จะบังแสงกันเอง ยิ่งความหนาแน่นสูงขึ้น การบังแสงกันเองของเซลล์ยิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้จำนวนเซลล์ที่ไม่สัมผัสแสงมากขึ้น การเจริญถูกจำกัดด้วยปริมาณแสง การสังเคราะห์แสงขึ้นกับปริมาณเฉลี่ยของแสงที่เซลล์แต่ละเซลล์ได้รับ พบว่าในฤดูหนาวและต้นฤดูใบไม้ผลิ อัตราการเจริญของเซลล์จะช้ากว่าในฤดูร้อน ซึ่งจะมีอัตราการเจริญที่ดีกว่าและมีการเพิ่มผลผลิตอย่างรวดเร็ว

1.1.3 อุณหภูมิ

พบว่าสาหร่ายมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา อุณหภูมิภายในเซลล์ของสาหร่ายเท่ากับอุณหภูมิของน้ำหรือสารละลายอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่าย นอกจากมีผลรวมต่อปฏิกิริยาแล้ว อุณหภูมิยังมีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม ความต้องการอาหารและส่วนประกอบของสาหร่าย โดยเฉพาะส่วนของโปรตีนและไขมัน ซึ่งเป็นผลโดยตรงต่อสาหร่าย นอกจากนี้อาจส่งผลต่อเนื่องไปยังกระบวนการที่ควบคุมเกี่ยวกับเมตาบอลิซึม โดยเฉพาะเอนไซม์ที่ควบคุมการผ่านเข้าออกของสารของเซลล์และส่วนประกอบของเซลล์ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นในลักษณะของเอ็กโพเนนเชียล (exponential) จนถึงจุดที่เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม

ในการเลี้ยงสาหร่ายในระดับใหญ่พบว่า เมื่อความหนาแน่นของสาหร่ายเพิ่มขึ้น ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสาหร่ายลดลง ทั้งนี้ที่ความหนาแน่นของสาหร่ายสูง ปริมาณแสงเป็นเครื่องจำกัดมากกว่า

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของสาหร่ายสไปรูลินาอยู่ในช่วง 32-40 องศาเซลเซียส ดังนั้นควรเก็บเกี่ยวชีวมวลในตอนเย็นจึงได้ผลผลิตสูง ถ้าเก็บเกี่ยวชีวมวลในตอนเช้าซึ่งเซลล์ยังไม่ได้ทำการสังเคราะห์แสง เพื่อเพิ่มผลผลิตจะได้ผลผลิตต่ำ เนื่องจากมีการสูญเสียชีวมวลไปในตอนกลางคืน

1.1.4 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

ในระบบการบำบัดน้ำเสีย ออกซิเจนที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายจะถูกจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์นำไปใช้ ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการเลี้ยงสาหร่ายในบ่อบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากพบว่าถ้าสาหร่ายอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูงพร้อมๆ กับการโดนแสง จะทำสาหร่ายตายได้ เนื่องจากเกิดโฟโตออกซิเดชัน (photo-oxidation)

1.1.5 ผลของการกวน

การออกแบบการกวนให้มีประสิทธิภาพมีความสำคัญมากต่อการเจริญและผลผลิต

ที่ได้ การกวนมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เซลล์สาหร่ายได้รับแสงทั่วถึงและเพียงพอ โดยป้องกันไม่ให้เซลล์สาหร่ายจมลงก้นบ่อ อย่างไรก็ตามแรงที่ใช้ในการกวนควรเหมาะสม เนื่องจากถ้าความเร็วในการกวนมากเกินไปจะทำให้เกิดฟองอากาศ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อการเจริญ การกวนควรกวนแบบปั่นป่วน (turbulent) เพื่อชักนำให้เกิดการแลกเปลี่ยนตำแหน่งของเซลล์สาหร่ายที่ขึ้นมารับแสง ทำให้เซลล์สาหร่ายภายในบ่อได้รับแสงอย่างทั่วถึง

1.2 ความปลอดภัยในการบริโภคสาหร่ายสไปรูลินา

ได้มีการนำสาหร่ายสไปรูลินามาใช้เป็นอาหารเสริมสุขภาพสำหรับประเทศที่พัฒนาแล้ว ในปริมาณ 3-20 กรัมต่อวัน พบว่ามีผลกระทบหรือทำให้เกิดอาการแพ้น้อยมาก จากการทดลองของประเทศญี่ปุ่น โดยทดลองกับหนูจำนวนมาก พบว่าสาหร่ายไม่ทำให้หนูทดลองเกิดอาการผิดปกติแบบเฉียบพลันหรือเกิดโรคเรื้อรัง และไม่มีผลเสียต่อระบบสืบพันธุ์ของหนูทดลอง ดังนั้นสาหร่ายสไปรูลินาสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนที่ปลอดภัยได้

ในปี ค.ศ. 1980 The U.N. Industrial Development Organization (UNIDO) ได้สนับสนุนงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของสาหร่ายสไปรูลินาในหนูทดลอง โดยให้หนูทดลองได้รับอาหารที่ประกอบด้วยสาหร่ายสไปรูลินาร้อยละ 10-35 ของอาหารทั้งหมด พบว่าไม่ทำให้เกิดความผิดปกติขึ้นในสายพันธุ์ทั้งในรุ่นที่สองหรือสามของการสืบพันธุ์ ลูกที่เกิดมีความสมบูรณ์ดี ไม่มีปัญหากับการไหลของน้ำนมแม่และการคลอด ไม่พบการเกิดมะเร็ง ไม่มีผลกระทบจากโลหะหนัก กรดนิวคลีอิก ยาฆ่าแมลงหรือแบคทีเรีย สรุปว่าสาหร่ายสไปรูลินามีความปลอดภัยสำหรับการใช้เป็นอาหารของมนุษย์

อย่างไรก็ตามพบว่าเหตุผลสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้การบริโภคสาหร่ายยังคงมีข้อจำกัดอยู่คือในสาหร่ายมีกรดนิวคลีอิก โดยพบว่าในสาหร่ายสไปรูลินาประกอบด้วยกรดนิวคลีอิกพวกกรดดีออกซีนิวคลีอิกและกรดไรโบนิวคลีอิก (deoxynucleic acid และ ribonucleic acid, DNA และ RNA) ประมาณร้อยละ 4 โดยกรดนิวคลีอิกมีพิวรีน (purine) เป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเมตาโบไลซ์ในร่างกายจะทำให้เกิดกรดยูริก ซึ่งปริมาณกรดยูริกในเลือดที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดผลึกของโมโนโซเดียมยูเรท และสะสมที่เนื้อเยื่อต่างๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคเก๊าท์ (gout) ไตทำงานหนักขึ้นและอาจทำให้เกิดนิ่วในทางเดินปัสสาวะได้ นอกจากนี้ยังข้อมูลใหม่ๆ ที่พบว่ากรดยูริกในเลือดที่สูงเกินไปมีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคหัวใจขาดเลือดอีกด้วย

ดังนั้นจึงไม่ควรบริโภคสาหร่ายสไปรูลินาในระดับที่สูงเกินไป เพราะอาจเกิดผลเสียดังกล่าวได้ โรคเก๊าท์มักเกิดกับคนที่มีอายุมากกว่า 30 ปีและมักเกิดในผู้ชายมากกว่าผู้หญิง โดยทั่วไปผู้ชายมีระดับยูริกในเลือดสูงกว่าผู้หญิง โดยมีค่า 5.1 ± 0.9 และน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตรในผู้ชายและผู้หญิง ตามลำดับ มีคำแนะนำว่าปริมาณกรดยูริกในเลือดสำหรับประชากร

กลุ่มเสี่ยงควรต่ำกว่า 6 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ในแต่ละวันควรได้รับกรดนิวคลีอิกจากอาหารทุกชนิดไม่เกิน 4 กรัมต่อวัน โดยให้เป็นจากโปรตีนเซลล์เดียว (single cell protein, SCP) ซึ่งหมายความรวมถึงสาหร่าย ไม่เกิน 2 กรัมต่อวัน

กล่าวโดยสรุปคือในแต่ละวันควรรับประทานสาหร่ายไม่เกิน 30-50 กรัม ถือว่ายังคงอยู่ในระดับที่ปลอดภัยจากการมีกรดยูริกในเลือดสูงเกินไป (สุภัทร์, 2546; Barron *et al.,* 2008)

1.3 องค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสไปรูลินา

สาหร่ายสไปรูลินามีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 50-70 ลิปิดร้อยละ 5-6 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันจำเป็น ได้แก่ กรดโอเลอิก กรดลิโนเลอิก กรดแกมมาลิโนเลนิก กรดพาล์มิติก และกรดพาล์มิโตเลอิก เป็นต้น มีกรดอะมิโนครบถ้วนและสมดุล ร่างกายสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดี โดยมีค่า net protein utilization (NPU) สูงถึงร้อยละ 62 (สมศักดิ์, 2547; Anbarasan *et al*., 2011) อุดมด้วยวิตามิน เช่น วิตามินบี1 วิตามินบี2 วิตามินบี3 วิตามินบี6 วิตามินบี12 วิตามินซี วิตามินอีและเบต้า-แคโรทีน (สมชาย, 2539)

นอกจากนี้ยังมีรงควัตถุหรือเม็ดสี (pigment) อีกหลายชนิดที่มีบทบาททางด้านสีของสาหร่ายและยังมีประโยชน์ต่อสุขภาพอีกด้วย ดังนี้

1.3.1 รงควัตถุ

ในสาหร่ายสไปรูลินาประกอบด้วยรงควัตถุสีน้ำเงินหรือไฟโคซัยยานิน (phycocyanin) รงควัตถุสีเขียวหรือคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) และเบต้า-แคโรทีน (β-carotene)

1.3.1.1 ไฟโคซัยยานิน (phycocyanin)

ไฟโคซัยยานินเป็นรงควัตถุสีน้ำเงินที่สามารถละลายน้ำได้ ประกอบด้วย ซี-ไฟโคซัยยานินร้อยละ 1.65-4.02 แอลโลไฟโคซัยยานิน (allophycocyanin) ร้อยละ 2.53-6.11 และ อาร์-ไฟโคซัยยานินร้อยละ 5.75-12.35 สามารถยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็งชนิด Ehrlich Ascites Carcinoma Cells (EACC) ได้ โดยไฟโคซัยยานินไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์มะเร็งทำให้เกิดความเสียหายของเซลล์มะเร็งดังกล่าว และไปช่วยเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ 2 ชนิดที่ช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกันของร่างกาย ได้แก่ เอนไซม์แลคเตทดีไฮโดรจีเนส (lactate dehydrogenase, LDH) และเอนไซม์กลูตาไธโอน เอส-ทรานส์เฟอเรส (glutathione S-transferase, GST) (El-Baky, 2003) นอกจากนี้ยังพบว่าไฟโคซัยยานินมีสมบัติต้านออกซิเดชัน ต้านไวรัส และต้านการอักเสบอีกด้วย (Romay *et al*., 1998; Belay, 2002) ส่วน Liu *et al.* (2000) พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาสามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายมนุษย์และสัตว์ทดลอง ส่งผลให้สาหร่ายสไปรูลินาสามารถป้องกันโรคได้หลายชนิด

องค์ประกอบของน้ำที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินามีผลต่อปริมาณโปรตีน รวมถึงปริมาณไฟโคซัยยานิน โดยพบว่าถ้าในน้ำที่ใช้เลี้ยงมีไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณไฟโคซัยยานินเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.08 เป็น 22.3 และมีโปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้นจาก 29.7 เป็น 86.1 มิลลิกรัมต่อกรัม (El-Baky, 2003)

1.3.1.2 คลอโรฟิลล์ (chlorophyll)

เป็นรงควัตถุสีเขียว มีแร่ธาตุแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง มีบทบาทสำคัญในการสร้างภูมิต้านทานให้กับร่างกาย พบว่าคลอโรฟิลล์สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย สามารถยับยั้งโรคเหงือกอักเสบ (สมศักดิ์, 2547) คลอโรฟิลล์ยังมีผลต่อการทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจโดยทำให้การหดตัวของกล้ามเนื้อหัวใจดีขึ้น มีระยะการคลายตัวนานขึ้น (เจียมจิตต์, 2531) คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุที่สาหร่ายสไปรูลินามีมากเป็นอันดับสอง รองจากซี-ไฟโคไซยานิน

ในกระบวนการแปรรูปอาหาร คลอโรฟิลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ถ้าเกิดการสูญเสียแมกนีเซียมอิออนจะทำให้สีเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวคล้ำถึงสีน้ำตาล ซึ่งอาจอยู่ในรูปของฟีโอไฟติน (pheophytin) หรือฟีโอฟอร์ไบด์ (pheophorbide) แต่ถ้าเกิดการสูญเสียส่วนของหมู่ไฟทอลจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของคลอโรฟิลไลด์ (chlorophyllide) ซึ่งยังคงเป็นสีเขียว (Healey, 1982)

1.3.1.3 เบต้า-แคโรทีน (β-carotene)

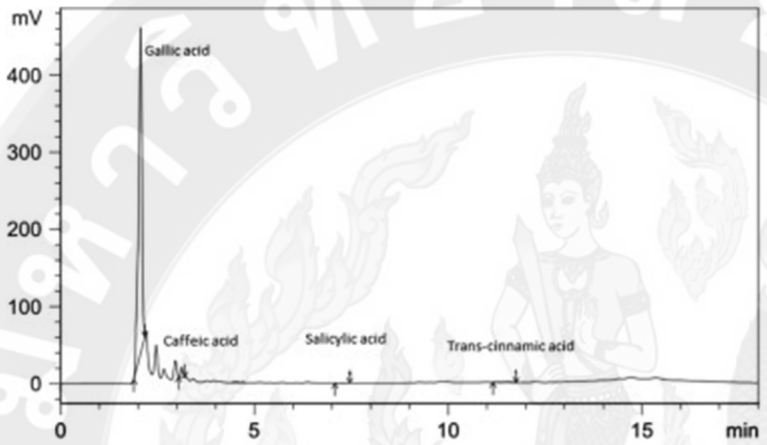
เป็นรงควัตถุสีส้ม-แดง ที่พบได้เฉพาะในพืช ร่างกายสามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ตามต้องการ สาหร่ายสไปรูลินาเป็นอาหารที่มีเบต้า-แคโรทีนสูง พบว่าเบต้า-แคโรทีนสามารถจับกับอนุมูลอิสระได้ เบต้า-แคโรทีนสามารถป้องกันโรคมะเร็ง สามารถลดขนาดและจำนวนก้อนเนื้องอกในหนูทดลองได้ (สมชาย, 2539)

1.3.2 สารประกอบฟีนอลิก (phenolics compounds)

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารประเภท secondary metabolites ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง พบว่าเป็นสารที่สามารถช่วยต้านออกซิเดชันได้ ซึ่งสมบัติในการต้านออกซิเดชันมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการป้องกันโรคเรื้อรังต่างๆ ได้ เช่น โรคหัวใจ โรคมะเร็ง โรคเบาหวานและโรคความดันโลหิตสูง เป็นต้น ความสามารถในการต้านออกซิเดชันขึ้นกับปริมาณ พบว่าถ้ามีมากจะมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้มาก

Pagnussatt *et al.* (2013) วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดเมทานอลของสาหร่ายสไปรูลินาด้วยวิธีการวิเคราะห์ 2 วิธี ได้แก่ วิธี Folin-Ciocalteau spectophotometric และวิธี High Performance Liquid Chromatography (HPLC) พบว่าวิธี HPLC จะสามารถพบสารประกอบฟีนอกลิกได้สูงกว่าวิธี Folin-Ciocalteau spectrophotometry โดยได้

ปริมาณสารประกอบฟีนอกลิกได้เท่ากับ 780 และ 700 ไมโครกรัม/กรัม จากวิธี HPLC ทำให้ทราบว่าชนิดของสารประกอบฟีนอลิกที่พบส่วนใหญ่ในสาหร่ายสไปรูลินาเป็นกรดแกลลิก โดยมีในปริมาณ 728 ไมโครกรัม/กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 93.33 ของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด รองลงมาเป็นกรดคาเฟอิกในปริมาณ 42 ไมโครกรัม/กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 5.38 ของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด



ภาพที่ 1 โครมาโตแกรมของสารประกอบฟีนอลิกจากสารสกัดสาหร่ายสไปรูลินา
ที่มา Pagnussatt *et al.* (2013)

องค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสไปรูลินาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น จีโนไทป์ (genotype) อายุ แหล่งน้ำ และองค์ประกอบของน้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงสาหร่าย เป็นต้น (Ruengjitchawalya et al., 2002)

1.4 บทบาทของสาหร่ายสไปรูลินาต่อร่างกาย

มีงานทดลองหลายชิ้นที่สนับสนุนบทบาทของสาหร่ายสไปรูลินาต่อการส่งเสริมสุขภาพของร่างกาย นอกเหนือจากคุณค่าทางโภชนาการตามปกติ ตัวอย่างเช่น สาหร่ายสไปรูลินาและสารสกัดสาหร่ายสไปรูลินาช่วยส่งเสริมการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน ช่วยต้านออกซิเดชัน ต้านมะเร็ง และต้านไวรัสของร่างกาย (Belay, 2002) สารสาหร่ายเกลียวทองที่สกัดด้วยแอลกอฮอล์ของสามารถยับยั้งการออกซิเดชันของลิปิดได้ดีกว่าแอลฟา-โทโคฟีรอล บีเอชเอ และเบต้า-แคโรทีน (Manoj *et al*., 1992) ส่วนสารสกัดสาหร่ายเกลียวทองที่สกัดด้วยน้ำมีความสามารถในการยับยั้งการออกซิเดชันของลิปิดได้ดีกว่ากรดแกลลิคและกรดคลอโรเจนิก (Romay *et al*., 1998)

Anbarasan *et al.* (2011) นำสารสกัดสาหร่ายสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่สกัดด้วยเอทานอล ที่สาหร่ายสไปรูลินาผ่านทำแห้งโดยการตากแดด (sun drying) มาทำการทดสอบความสามารถในการต้านออกซิเดชันแบบ *in vitro* เพื่อดูกลไกการต้านออกซิเดชันทางด้านความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) และไนตริกออกไซด์ พบว่าสารสกัดสาหร่ายสไปรูลินาสามารถกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH และไนตริกออกไซด์ได้ดี โดยความเข้มข้นของสารสกัดที่สูงขึ้นจะสามารถกำจัดอนุมูลอิสระได้ดีขึ้น ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)	ร้อยละของการยับยั้ง	
		DPPH	NO
สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)	25	10.30	1.84
สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)	50	16.97	3.69
สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)	75	17.27	9.72
สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)	100	27.88	20.27
Ascorbic acid	200	87.57	94.97

หมายเหตุ DPPH = 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, NO = nitric oxide

ที่มา Anbarasan *et al*. (2011)

2. สาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

ปัจจุบันสาหร่ายสไปรูลินาแห้งได้รับความนิยมบริโภคมากขึ้น ทั้งเพื่อจุดประสงค์ทางด้านคุณค่าทางโภชนาการและที่นอกเหนือจากคุณค่างทางโภชนาการ การทำแห้งสาหร่ายเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

2.1 การทำแห้ง

การทำแห้ง (drying) เป็นกระบวนการแปรรูปที่ช่วยในการถนอมรักษาอาหารให้เก็บได้ยาวนาน การทำแห้งเป็นการลดความชื้นหรือปริมาณน้ำอิสระในอาหาร เป็นการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียของอาหาร และช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอาหารได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้การทำแห้งอาจมีผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในอาหารได้ด้วย

2.1.1 วัตถุประสงค์ของการทำแห้งอาหาร มีดังนี้

2.1.1.1 ยืดอายุการเก็บรักษา การทำแห้งเป็นการลดปริมาณน้ำในอาหาร เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทุกชนิด เช่น รา ยีสต์ แบคทีเรียที่เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือชะลอปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งทางเคมีและทางชีวเคมีซึ่งมีน้ำเป็นส่วนร่วมและเป็นเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย

2.1.1.2 ทำให้อาหารปลอดภัย การลดปริมาณน้ำในอาหาร โดยการทำแห้ง ทำให้อาหารมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ (water activity, a_w) น้อยกว่า 0.6 ซึ่งเป็นระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค รวมทั้งยับยั้งการสร้างสารพิษของเชื้อรา เช่น อะฟลาทอกซิน เป็นต้น

2.1.1.3 เพื่อทำให้อาหารมีน้ำหนักเบา ลดปริมาตร ทำให้สะดวกต่อการขนส่ง การบริโภค หรือการนำไปเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปต่อเนื่องด้วยวิธีอื่น

2.1.1.4 สร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เป็นทางเลือกของผู้บริโภคมากขึ้น

2.2 วิธีการทำแห้ง

การทำแห้งสาหร่ายสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

2.2.1 การทำแห้ง โดยการตากแดด (sun drying)

การอบแห้งด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อยมาก แต่มีข้อเสียหลายอย่าง เช่น ต้องขึ้นกับสภาพอากาศ และอาจเกิดการเสียหายจากแสงแดดที่มากเกินไป หรือเกิดการเน่าเสียก่อนที่จะแห้ง การอบแห้งโดยแสงแดดมักใช้กับสาหร่ายสไปรูลินาที่จะนำมาเป็นอาหารสัตว์ โดยการแผ่สาหร่ายบนแผ่นพลาสติกใสในถาด แล้วนำไปตากแดด ซึ่งใช้เวลาหลายวัน

2.2.2 การอบแห้งด้วยพลังงานจากแสงอาทิตย์ (solar drying)

เป็นการอบแห้งด้วยวิธีที่ง่าย สามารถทำได้โดยใช้ไม้ทำเป็นกล่อง ภายในทาสีดำ และปิดด้วยกระจกหนา 2 มิลลิเมตร จะทำให้ได้อุณหภูมิภายในประมาณ 60-65 องศาเซลเซียส

2.2.3 การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying)

เป็นการอบแห้งโดยให้สาหร่ายสัมผัสกับพื้นผิวโลหะที่ร้อนโดยตรง ทำให้ความชื้นในสาหร่ายระเหยไป เครื่องมือนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งโลหะเดี่ยวหรือคู่ ภายในกลวงและมีไอน้ำร้อนไหลวนเวียนอยู่ ลูกกลิ้งจะถูกตรึงให้หมุนรอบแกนในแนวนอนด้วยความเร็วที่สามารถปรับได้ตามต้องการ มีเครื่องป้อนสาหร่ายให้เป็นชั้นบางๆ บนผิวลูกกลิ้งและมีใบมีดติดอยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งบนลูกกลิ้ง ปกติราว ½ - ¾ ของรอบจากจุดป้อนเพื่อคอยขูดแผ่นสาหร่ายแห้งออกจากผิวของลูกกลิ้ง จัดเป็นเครื่องทำแห้งที่มีอัตราการทำแห้งสูงมาก มักใช้อุณหภูมิสูงกว่า 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2-30 วินาที

2.2.4 การอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying)

เป็นการอบแห้งโดยให้สาหร่ายเหลวจะถูกฉีดพ่นฝอยไปในกระแสลมร้อนเป็น

ฝอยเล็กๆ ขนาด 10-200 ไมครอน ทำให้มีพื้นที่ผิวมาเพื่อสัมผัสกับลมร้อนสูง ทำให้อัตราการทำแห้งเร็วมาก ความชื้นในสาหร่ายระเหยอย่างรวดเร็ว และสาหร่ายแขวนลอยอยู่ในลมร้อนในช่วง 1-10 วินาทีเท่านั้น จึงไม่ทำให้สาหร่ายเกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อนและสามารถลดความชื้นในสาหร่ายให้เหลือร้อยละ 5-10

2.2.5 การอบแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze drying)

เป็นการอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่อง โดยต้องทำให้อาหารแข็งตัวก่อน แล้วจึงทำแห้งด้วยการระเหิดที่อุณหภูมิต่ำและมีความดันสุญญากาศสูงพอ โดยน้ำในอาหารจะระเหิดเป็นไอน้ำออกไป วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถรักษาสภาพของสาหร่ายได้เกือบเหมือนเดิม แต่เสียค่าใช้จ่ายสูง และเสียเวลานาน นอกจากนี้มีข้อจำกัดทางด้านเทคนิคเมื่อต้องการผลิตจำนวนมาก จึงไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

สำหรับวิธีการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินาในทางการค้ามีการทำกันหลายแบบ แตกต่างกันไปตามผู้ผลิตแต่ละราย ได้แก่

วิธีการทำแห้งของโครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา ทำโดยการนำสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการกรองด้วยผ้ากรองสาหร่ายมาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำไปบดละเอียด บรรจุในถุงฟอยล์ และส่งไปห้องบรรจุแคปซูลต่อไป (ณัฐภาสและคณะ, ม.ป.ป.)

วิธีการทำแห้งบุญสมฟาร์มซึ่งตั้งอยู่ที่อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ ได้ทำการอบแห้งสาหร่ายสไปรูลินาในตู้อบ โดยควบคุมอุณหภูมิการอบที่ 70 $\pm$ 5 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบประมาณ 8-12 ชั่วโมง (นิรนาม, ม.ป.ป.)

2.3 กฎหมายหรือข้อบังคับ

ในประเทศสหรัฐอเมริกา สาหร่ายสไปรูลินาได้รับการรับรองจากองค์การอาหารและยาว่าเป็นส่วนผสมที่จัดเป็น GRAS (Generally Recognised as Safe) ซึ่งมีความปลอดภัยในการบริโภคและสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในอาหาร เช่น ขนมที่เป็นแท่งสี่เหลี่ยม (bar) เช่น ซีเรียลบาร์, เครื่องดื่มผงพร้อมชงเสริมคุณค่าทางโภชนาการ (powdered nutrition drink mixes) และเป็นเครื่องปรุงสำหรับน้ำสลัดและพาสต้า โดยใช้ในปริมาณ 0.5-3 กรัมต่อหน่วยบริโภค และไม่จัดว่าเป็นยา (สุภัทร์, 2546)

สำหรับในประเทศไทย ปัจจุบันสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) ได้กำหนดให้สาหร่ายสไปรูลินาเป็นอาหารที่มีวัตถุประสงค์พิเศษ ซึ่งผู้ผลิตหรือผู้นำเข้าต้องขึ้นทะเบียนตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 238) พ.ศ. 2544 เรื่อง อาหารมีวัตถุประสงค์พิเศษ อาหารมีวัตถุประสงค์พิเศษ หมายความว่า อาหารที่ผลิตขึ้นโดยมีกรรมวิธี สูตรหรือส่วนประกอบเฉพาะ

เพื่อใช้ตามความต้องการพิเศษอันเนื่องมาจากสภาวะทางฟิสิกส์ หรือสรีรวิทยา หรือความเจ็บป่วย หรือความผิดปกติของร่างกาย โดยมีลักษณะ รปรู่าง หรือชนิดและปริมาณของส่วนประกอบแตกต่างไปจากอาหารชนิดเดียวกันที่ใช้โดยปกติอย่างเห็นได้ชัด โดยได้แบ่งอาหารมีวัตถุประสงค์พิเศษออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

(1) อาหารที่ใช้สำหรับผู้ป่วยเฉพาะโรค หรือผู้ที่มีสภาพผิดปกติทางร่างกาย

(2) อาหารที่ใช้สำหรับบุคคลผู้มีวัตถุประสงค์ในการบริโภคอาหารเป็นพิเศษ เช่น อาหารสำหรับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนักตัว อาหารสำหรับผู้สงอายุ อาหารสำหรับสตรีมีครรภ์ เป็นต้น

นอกจากนี้ทางสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยังได้มีการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่องสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง (มผช. 542/2549) ซึ่งครอบคลุมสาหร่ายสไปรูลินาที่ทำให้แห้งและบดเป็นผง อาจบรรจุในซองเยื่อกระดาษ บรรจุในภาชนะบรรจุ ใช้สำหรับชงเป็นเครื่องดื่ม (รายละเอียดดังในภาคผนวก ก.)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น อาจทำให้เกิดการสลายตัวของรงควัตถุได้มากยิ่งขึ้น อาทิเช่น การอบแห้งเปลือกทับทิมที่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสีแดง (a*) และปริมาณแอนโทไซยานินจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ฤทธิชัยและคณะ, 2554)

Bennion (1980) ศึกษาสาหร่ายสไปรูลินาอบแห้งเพื่อนำมาใช้เป็นอาหารเสริมชนิดอัดเม็ดจากกระบวนการอบแห้งโดยแสงแดด และกระบวนการอบแห้งแบบฉีดพ่นฝอย โดยมีสภาวะการอบแห้งสำหรับการอบแห้งแบบฉีดพ่นฝอยที่อุณหภูมิการอบแห้ง 180 องศาเซลเซียส อัตราการระเหย 25-30 กิโลกรัม/ชั่วโมง สาหร่ายสไปรูลินาผงที่ผลิตได้มีองค์ประกอบดังนี้คือ มีปริมาณความชื้นร้อยละ 10 ปริมาณเถ้าร้อยละ 9 ปริมาณเส้นใยหยาบ (crude fiber) ร้อยละ 3 โปรตีนร้อยละ 60 ไขมันร้อยละ 7 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 12.5 สาหร่ายสไปรูลินาที่ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยน้อยกว่า 44 ไมครอน สามารถผลิตเป็นแบบอัดเม็ดได้ดีกว่าที่ผลิตจากกระบวนการอบแห้งโดยแสงแดด ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางมีขนาดระหว่าง 50-250 ไมครอน

2.5 ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

นักวิจัยเพิ่งให้ความสนใจสมบัติต้านออกซิเดชันของสไปรูไลนาและสารสกัดเมื่อไม่นานมานี้ งานวิจัยเกี่ยวกับความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินายังมีไม่มากนัก สารต้านออกซิเดชันหลักที่พบในสาหร่ายคือไฟโคซัยยานินซึ่งเป็นไฟโคบิลิโปรตีน (phycobiliproteins) ชนิดหนึ่ง

กลไกต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาสามารถเกิดได้โดยการจับกับอนุมูลอิสระและการยับยั้งการออกซิเดชันของลิปิด (lipid peroxidation) นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่ายสไปรูลินา

สามารถยับยั้งความเสียหายที่เกิดจากการออกซิเดชันของร่างกาย (oxidative damage) ไม่ว่าจะเกิดจากยา โลหะ การออกกำลังกาย จากปฏิกิริยาไนโตรเซชันและสารพิษในตับ รวมทั้งความเสียหายจากการออกซิเดชันของเซลล์สมองได้อีกด้วย

Manoj *et al.* (1992) ทำการทดลองแบบ *in vitro* พบว่าสารสกัดสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่สกัดด้วยแอลกอฮอล์หรือน้ำสามารถยับยั้งการออกซิเดชันของลิปิดได้ดี

Miranda *et al.* (1998) ทดลอง *in vitro* พบว่าสารสกัดสาหร่าย *Spirulina maxima* ที่สกัดด้วยเมทานอลสามารถยับยั้งการออกซิเดชันของลิปิดในสมองหนูได้ โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 180 ไมโครกรัม

Romay *et al.* (1998) ทดลอง *in vitro* พบว่าไฟโคซัยยานินสามารถจับกับอนุมูลไฮดรอกซิลและอนุมูลอัลคอกซิลได้ มีค่า IC_{50} = 0.91 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และ 0.76 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ และสามารถยับยั้งการออกซิเดชันของลิปิดจากไมโครโซมอลของตับได้ด้วย มีค่า IC_{50} = 12 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ซี-ไฟโคซัยยานินมีความสามารถในการต้านอนุมูลอัลคอกซิลเทียบเท่ากับโทรล็อกซ์ และมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลไฮดรอกซิลและอนุมูลไดเมธิลไฮดรอกซิลไม่แตกต่างกัน

Romay *et al.* (2000) ทดลอง *in vitro* พบว่าไฟโคซัยยานินยับยั้งสารที่สร้างอนุมูลอิสระพวก2,2'-azobis (2-amidinopropane) dihydrochloride ซึ่งทำให้เกิดการแตกสลายของเซลล์เม็ดเลือดแดง (erythrocyte) ของมนุษย์ได้ดีกว่าโทรล็อกซ์และกรดแอสคอร์บิก 16 และ 20 เท่า ตามลำดับ

Hirata *et al.* (2000) ทดลอง *in vitro* ไฟโคซัยยาโนบิลิน (เป็นองค์ประกอบของไฟโคซัยยานิน) มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันดีกว่าแอลฟาโทโคฟีรอล ซีแซนทินและกรดคาเฟอิก

Bhat and Madyastha (2000) *in vitro* ไฟโคซัยยานินมีความสามารถในการจับกับอนุมูลเปอร์ออกซีได้เช่นเดียวกับกรดยูริก โดยมีค่า rate constant ratio เท่ากับ 1.54 และ 3.5 ตามลำดับ ไฟโคซัยยานินช่วยป้องกันความเสียหายของระบบประสาทและสมองได้ โดยไฟโคซัยยานินช่วยจับกับอนุมูลอิสระและป้องกันการออกซิเดชัน สาหร่ายสไปรูลินาจึงอาจช่วยรักษาโรคพวกโรคอัลไซเมอร์ โรคพาร์กินสันและโรคฮันติงตันได้

El-Baky *et al.* (2009) พบว่าความสามารถในการจับอนุมูลอิสระของสาหร่ายขึ้นกับปริมาณพอลิฟีนอล โดยยิ่งมากจะยิ่งมีความสามารถในการจับอนุมูลอิสระมาก ปริมาณพอลิฟีนอลในสาหร่ายขึ้นกับชนิดของสาหร่าย องค์ประกอบของอาหาร ตัวอย่างเช่น การเติมโซเดียมไนเตรตและ/หรือ เฟนิลอะลานีนในอาหารเลี้ยงสาหร่าย ช่วยเพิ่มปริมาณพอลิฟีนอลในสาหร่าย *Spirulina maxima* ได้ โดยได้สาหร่ายที่มีปริมาณพอลิฟีนอลทั้งหมดเท่ากับ 4.51-16.96 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักแห้ง 1 กรัม

สำหรับในสาหร่าย *Chlorella vulgaris* มีปริมาณฟีนอลิกเท่ากับ 0.97-3.69 mg GAE/g of dry cell (Li *et al*., 2007; Hajimahmoodi *et al*., 2010)

Chaiklahan *et al.* (2013) ศึกษาปริมาณพอลิฟีนอลทั้งหมดและความสามารถในการจับอนุมูลอิสระ DPPH ในสารกัดสาหร่าย พบว่ามีปริมาณพอลิฟีนอลทั้งหมด 45 mg GAE/g of dry sample และมีความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับร้อยละ 31.0

2.6 ผลของการทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

ข้อมูลงานวิจัยผลของการทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินามีน้อยมาก อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยผลของการทำแห้งต่อสารสำคัญและความสามารถในการต้านออกซิเดชันของอาหารอยู่บ้าง ไม่มากนัก ดังนี้

ความร้อนไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของซี-ไฟโคซัยยานินที่สกัดจากสาหร่ายสไปรูลินาสดและสาหร่ายสไปรูลินาที่ได้จากการทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย (Hirata *et al*., 2002)

ในทางตรงกันข้ามพบว่าการอบแห้งมีผลให้ความสามารถในการต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ในตระกูลกระเพรา (*Lamiaceae*) ได้แก่ โรสแมรี่ ออริกาโน มาจอแรม เสจ เบซิล และไธม์ พบว่าการทำแห้งมีผลให้มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงกว่าพืชสดเมื่อคำนวณค่าเป็นร้อยละของน้ำหนักแห้งเหมือนกัน เนื่องจากการทำแห้งทำให้เซลล์พืชเกิดลักษณะแห้งกรอบ ช่วยให้การปลดปล่อยสารต้านออกซิเดชันออกมาจากเซลล์พืชเกิดได้ดียิ่งขึ้น (Hossain *et al*., 2010)

Wu *et al.* (2013) พบว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส ดีกว่าการทำแห้งแบบ สุญญากาศที่ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.09 MPa และ air drying โดยการทำแห้งแบบเยือกแข็ง ทำให้ได้เห็ดแห้งที่มีสมบัติต้านออกซิเดชันสูงที่สุด เห็ดที่ใช้ทดลองเป็นเห็ดกระดุมบราซิล (*Agaricus blazei* Murrill) และสมบัติต้านออกซิเดชันที่ตรวจ ได้แก่ การดูวามสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระพวกอนุมูลไฮดรอกซิล อนุมูล DPPH และอนุมูล ABTS โดยการทำแห้งแบบ air drying มีสมบัติต้านออกซิเดชันต่ำที่สุด สมบัติการต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้น การทำแห้งแบบ freeze drying ยังทำให้ร้อยละของสารที่สกัดได้มีค่าสูงที่สุดด้วย

Ma *et al*. (2013) ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารพอลิแซคคาไรด์สกัดจากเห็ดหิ้งไซบีเรียหรือชากา (*Inonotus obliquus*) วิธีการทำแห้งที่ศึกษามี 3 วิธีคือ การทำแห้งแบบเยือกแข็งที่ -50 องศาเซลเซียส การทำแห้งแบบสุญญากาศที่ 50 องศาเซลเซียส และการทำแห้งด้วยลมร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส พบว่าการทำแห้งแบบเยือกแข็งดีที่สุดต่อสมบัติต้านออกซิเดชันที่ศึกษา ได้แก่ ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH, ความสามารถ

ในการรีดิวซ์ธาตุเหล็ก (ferric reducing power) และความสามารถในการยับยั้งการออกซิเดชันของลิปิด

3. การออกซิเดชัน

การออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับออกซิเจนที่มีความจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และพลังงานแก่ร่างกาย แต่ในเวลาเดียวกันจะเกิดสารอื่นที่ร่างกายไม่ต้องการด้วย เช่น สารซูเพอร์ออกไซด์ ออกซิเจนที่มีฤทธิ์แรงทางเคมี เป็นต้น ที่เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่าเป็น อนุมูลอิสระ (free radical) อนุมูลอิสระจะไปแย่งอิเล็คตรอนของโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียง และเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ตัวอย่างเช่น เมื่ออนุมูลอิสระรวมกับโมเลกุลไขมันในเซลล์เยื่อบุไต โมเลกุลของไขมันนั้นจะกลายเป็นโมเลกุลที่สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนอื่น ๆ เกิดเป็นอนุมูลไขมันเปอร์ออกไซด์ ในเวลาเดียวกันอนุมูลที่อยู่ใกล้เคียงก็ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในรูปแบบเดียวกันอย่างต่อเนื่อง จนในที่สุดทำให้เซลล์ของไตถูกทำลายอย่างถาวร (พิสิฐ, 2547)

โรคที่มีความเกี่ยวข้องกับอนุมูลออกซิเจน ได้แก่ โรคหลอดเลือดแดงแข็ง โรคแทรกซ้อนโรคเบาหวาน มะเร็ง การอักเสบ การบาดเจ็บซ้ำซ้อน ความแก่ โรคตา และโรคอื่น ๆ สารในอาหารที่มีฤทธิ์ในการต้านออกซิเจน ได้แก่ วิตามินและแร่ธาตุบางชนิด สารประกอบฟีนอลิกที่พบในพืชชนิดต่าง ๆ เช่น สารประกอบฟลาโวนอยด์ เบต้า-แคโรทีน เป็นต้น

3.1 สารต้านออกซิเดชัน

สารต้านออกซิเดชันหรือแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) หมายถึงสารที่มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น ทำหน้าที่ลดหรือยับยั้งปฏิกิริยาที่จะก่อให้เกิดออกซิเจนหรือสารเพอร์ออกไซด์ หรือหมายถึงสารในอาหารที่มีผลในการลด reactive oxygen species (ROS) หรือ reactive nitrogen species (RNS) ในร่างกาย (Huang et al., 2005) ได้แก่ อนุมูลเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อนุมูลไฮดรอกซิล กรดไฮโปคลอรัส อนุมูลเพอร์ออกซิล ซิงเกลตออกซิเจนและพอร์ออกซิลไนไตรท์ (Sanchez-Moreno, 2002)

3.2 หลักการวัดสมบัติต้านออกซิเดชัน

3.2.1 วิธีการที่วัดการแลกเปลี่ยนอะตอมไฮโดรเจน

Huang *et al.* (2005) ได้กล่าวว่าวิธีนี้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดการแข่งขันระหว่างสารต้านออกซิเดชันกับสารตั้งต้นของปฏิกิริยา โดยจะมีการกระตุ้นสารประกอบอะโซ (azo) ด้วยความร้อนเพื่อให้เกิดการสลายตัวกลายเป็นอนุมูลเพอร์ออกซิลเพื่อเป็นตัวแทนอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ

วิธีการในกลุ่มนี้ ได้แก่ วิธี oxygen radical absorbance capacity (ORAC) assay และ total radical trapping antioxidant parameter (TRAP) assay ซึ่งวิธีการในกลุ่มนี้จะวัดปริมาณอะตอมไฮโดรเจนที่มีการแลกเปลี่ยน โดยจะวัดการเรืองแสงของสารฟลูออเรสเซนต์ที่ลดลงเมื่อเกิดการออกซิเดชัน เมื่อระบบมีสารต้านออกซิเดชัน สารต้านออกซิเดชันจะไปแย่งจับสารเรืองแสง ส่งผลให้ความเข้มสารฟลูออเรสเซนซ์ลดลงด้วยความเร็วที่ช้าลง ส่วนกลไกในการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันมี 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นเริ่มต้น (initiation) ขั้นตอนต่อเนื่อง (propagation) ขั้นยับยั้ง (inhibition)และขั้นสิ้นสุด (termination)

วิธีการนี้จำเป็นต้องใช้สารตัวแทนเพื่อเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา โดยสารต้านออกซิเดชันจะแย่งกันทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น ในระบบการทดลองจะประกอบด้วยสารกลุ่มอะโซเพื่อผลิตอนุมูลอิสระ (AAPH) เพื่อติดตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (สารฟลูออเรสซีน) และสารต้านออกซิเดชัน โดย AAPH จะถูกให้ความร้อนเพื่อสร้างอนุมูลเพอร์ออกซิล โดยสารต้านออกซิเดชันทำปฏิกิริยาจนหมดแล้ว สารฟลูออเรสซีนจึงเข้าทำปฏิกิริยาต่อ การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์จึงค่อยๆ ลดลง

Prior *et al.* (2005) ศึกษาวิธีการวัดสมบัติต้านออกซิเดชัน โดยอาศัยหลักการลดลงของแสงฟลูออเรสเซนซ์ โดยเมื่อฟลูออเรสซีนทำปฏิกิริยากับอนุมูลเปอร์ออกซิลแล้ว ความเข้มของแสงจะลดลง หากในระบบมีปริมาณสารต้านออกซิเดชันน้อยจะทำให้ความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าปริมาณสารต้านออกซิเดชันมาก ความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนซ์จะลดลงช้า เนื่องจากอนุมูลอิสระจะต้องทำปฏิกิริยากับสารต้านออกซิเดชันจนหมดก่อนแล้วจึงทำปฏิกิริยากับฟลูออเรสซีน วิธีนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง และสามารถใช้ได้ทั้งการวัดสมบัติของสารต้านออกซิเดชันในพืชและระบบร่างกาย

3.2.1.1 วิธี ORAC

วิธี ORAC นี้เป็นการรวมกันระหว่างการหาค่าเวลาในการยับยั้งอนุมูลอิสระและปริมาณการยับยั้งอนุมูลอิสระ ในขณะที่วิธีการอื่นมักหาค่าเวลาในการยับยั้งเมื่อกำหนดปริมาณการยับยั้งอนุมูลอิสระหรือหาปริมาณในการยับยั้งอนุมูลอิสระเมื่อกำหนดระยะเวลา หลักการโดยย่อของวิธี ORAC คือนำตัวอย่างหรือตัวควบคุมหรือสารมาตรฐานผสมกับสารฟลูออเรสซีน แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส แล้วเติม AAPH เพื่อเริ่มปฏิกิริยา วัดความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร ความยาวคลื่นกระตุ้นที่ 525 นาโนเมตรและความยาวคลื่นทะลุผ่าน (emission) ที่ 525 นาโนเมตร เป็นเวลา 35 นาทีโดยประมาณ และตั้งอุณหภูมิภายในเครื่องที่ 37 องศาเซลเซียส โดยในการทดลองใช้สาร Trolox (วิตามินอีสังเคราะห์) ความเข้มข้น 4-5 ระดับ เป็นสารมาตรฐาน นำผลที่ได้มาคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ (area under curve,

AUC) แล้วคำนวณเป็นค่าพื้นที่ใต้กราฟสุทธิ นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของ Trolox กับพื้นที่ใต้กราฟ

การวัดค่าด้วยวิธี ORAC นี้ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดีขึ้นควรใช้ปิเปตชนิดหลายช่อง (multichannel pipette) เพื่อใช้เวลาในการเตรียมตัวอย่างลงในไมโครเพลตให้สั้นที่สุด ควบคู่กับเครื่องอ่านค่าพร้อมถาดชนิด 96 หรือ 48 หลุม (96- or 48-well microtiterplate) นอกจากนี้วิธีนี้ยังค่อนข้างไวต่ออุณหภูมิ จึงต้องควบคุมอุณหภูมิทั้งภายในเครื่องและของบัฟเฟอร์ที่นำมาใช้ให้อยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาละลายสาร AAPH สิ่งสำคัญอีกเรื่องหนึ่งคือในการทดลองแต่ละครั้งไม่ควรใช้เวลาเกิน 1 ชั่วโมง เนื่องจากสารจะหมดประสิทธิภาพ

3.2.1.2 วิธี TRAP

เป็นวิธีที่ใช้หลักการเดียวกับวิธี ORAC คือใช้สาร AAPH ในการผลิตอนุมูลเพอร์ออกซิล ผลที่ได้เปรียบเทียบกับ Trolox และใช้สารฟลูออเรสซีนเป็นสารเรืองแสงเช่นเดียวกัน แต่แตกต่างกันตรงที่วิธี ORAC ตรวจติดตามความเข้มของแสงที่ลดลงเมื่อวัดด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงฟลูออเรสเซนซ์โดยเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟ ในขณะที่วิธี TRAP ตรวจติดตามปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาโดยดูที่เวลาการเกิดปฏิกิริยาเป็นหลัก ผลที่ได้คำนวณออกมาเป็นค่าไมโครโมลของอนุมูลเพอร์ออกซิลที่ถูกจับไว้ต่อพลาสมา 1 ลิตร แต่วิธีการนี้มีปัญหาเนื่องจากมีจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยาหลายจุด ซึ่งอาจทำให้เกิดความสับสนในการทดลองได้

3.2.2 วิธีการที่วัดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเดี่ยว

วิธีการนี้จะวัดความสามารถของสารต้านออกซิเดชันในปฏิกิริยาการรับของตัวรับอิเล็กตรอน ปฏิกิริยานี้จะมีการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน โดยการเปลี่ยนสีจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารต้านออกซิเดชัน คือถ้าสารต้านออกซิเดชันมีความเข้มข้นมาก สีของสารละลายก็จะลดลงเร็วขึ้น วิธีการในกลุ่มนี้ ได้แก่ total phenol assay by Folin-Ciocalteau reagent (FCR), 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging capacity assay, Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) assay และ ferric ion reducing antioxidant power (FRAP) assay

3.2.2.1 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging capacity assay

วิธีนี้จะวัดความสามารถในการยับยั้ง DPPH โดย DPPH เป็นสารอนุมูลไนโตรเจนที่ค่อนข้างคงตัว โดยขณะเริ่มต้นการทดลองจะให้สารสีเข้ม เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้น สารจะมีสีซีดจางลง ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ตามระยะเวลาที่กำหนด หากในระบบมีปริมาณสารต้านออกซิเดชันมาก สีของสารละลายก็จะลดลงเร็ว ค่าที่ได้

สามารถแสดงได้หลายรูปแบบ ได้แก่ แสดงเป็นร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระ (% radical scavenging activity) ค่าความเข้มข้นของสารสกัดที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50 จากปริมาณอนุมูลอิสระเริ่มต้น (IC_{50}) หรือค่าความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (antiradical efficiency, AE)

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย มีความแม่นยำ ใช้เวลาน้อยและใช้เครื่องมือแค่เครื่องวัดการดูดกลืนแสงเท่านั้น เหมาะสำหรับวัดสมบัติต้านออกซิเดชันในน้ำผักและน้ำผลไม้ หรือในสารสกัดผักและผลไม้ แต่ไม่เหมาะสำหรับการวัดสมบัติต้านออกซิเดชันในพลาสมา เนื่องจากสาร DPPH ต้องละลายในเมทานอล จึงส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของโปรตีน (Sanchez-Moreno, 2002)

วิธีการวัดสมบัติต้านออกซิเดชันในกลุ่มนี้ เช่น ค่า DPPH, TEAC และ FRAP โดยจะมีความสัมพันธ์ดีมาก (R^2 > 0.99) กับการวัดปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด เนื่องจากกลไกในการเกิดปฏิกิริยาเป็นกลไกเดียวกัน (Huang et al., 2005) แต่ในบางกรณีสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิดมีที่ประสิทธิภาพดี วัดผลได้รวดเร็วเมื่อวัดโดยวิธีอื่น อาจให้ผลที่ไม่ดีหรือให้ผลการยับยั้งช้าเมื่อวัดด้วยวิธีนี้ เนื่องจากเป็นวิธีการวัดด้วยกลไกที่แตกต่างกัน

3.2.2.2 Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) assay หรือ ABTS assay

วิธีนี้เป็นวิธีการวัดความเข้มข้นของโทรล็อกซ์ที่ทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันต่อ 0.1 มิลลิโมลาร์ของสารตั้งต้นที่ยับยั้งอนุมูลอิสระพวก ABTS (ABTS radical cation, $ABTS^{\cdot+}$) โดยสาร ABTS ในสภาวะปกติจะดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 342 นาโนเมตร เมื่อถูกกระตุ้นให้ผลิตอนุมูลอิสระ จะเปลี่ยนมาดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 414 นาโนเมตร หลักการของวิธีนี้คือวัดความสามารถของสารต้านออกซิเดชันในการยับยั้งอนุมูลเพอร์ออกซิลของ ABTS วัดได้จากการลดลงของความเข้มของสีในสารละลาย

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

- สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ซื้อจากฟาร์มเพาะเลี้ยงสาหร่ายใน อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ นำตัวอย่างสาหร่ายสดที่ได้ไปล้างทำความสะอาดและกรองแล้ว ไปทำการเก็บรักษาโดยการแช่เยือกแข็งที่ -18 องศาเซลเซียส

สารเคมี

- Kjeltabs (FOSS Analytical, Sweden)
- กรดซัลฟุริก (H_2SO_4, J.T. Baker, Thailand)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH A.R. Grade, RCI Labscan, Thailand)
- โบรโมเครีซอลกรีน (bromocresol green, MERCK, Germany)
- (methyl red, BDH, England)
- กรดบอริค (boric acid A.R. Grade, MERCK, Germany)
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl A.R. Grade, MERCK, Germany)
- โซเดียมคาร์บอเนต (anhydrous Na_2CO_3 A.R. Grade, QReC, New Zealand)
- เฮกเซน (hexane A.R. Grade, RCI Labscan, Thailand)
- เมธานอล (methanol, Labscan)
- 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH, Sigma)
- Folin-Ciocalteau reagent (Merck)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

- ผ้าไหมกรองสาหร่าย ขนาด 120 เมช
- อุปกรณ์งานครัวต่างๆ ได้แก่ กล่องใส่อาหาร ถุงร้อนใสขนาดต่างๆ
- เครื่องปั่น (blender, Panasonic, MX-J210GN, PRC)
- เตาไมโครเวฟ (Sumsung, MW73V, Thailand)
- ไมโครปิเปต (Micropipette, Gilson, USA)
- จานอลูมิเนียม (moisture can)
- ถ้วยกระเบื้อง (crucible) ขนาด 30 มิลลิลิตร
- ลูกยางดูดสาร

- Thimble (Whatman Cellulose Extraction 26 × 60 mm., England)
- Extraction cup
- หลอดทดลองขนาด 20 ml. พร้อมฝาปิด (PYREX, Germany)
- ที่วางหลอดทดลองขนาด (test tube rack)60 ช่อง
- ขวดดูแรน (Duran) ขนาด 250 ml. (PYREX, Germany)
- บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 60, 100, 250 และ 600 มิลลิลิตร (PYREX, Germany)
- แท่งแก้วคนสาร
- ช้อนตักสาร
- กระบอกตวงขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- หลอดย่อยตัวอย่าง (Digestion tube)
- ขวดสีชา และขวดแก้วสำหรับใส่สารเคมี
- กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)
- เครื่องเขย่า (orbital shaker)
- เตาเผาเถ้า (muffle furnace, CARBOLITE ELF 11/14, England)
- เดสิคเคเตอร์(desiccator, Glaswerk Wertheim, Germany)
- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (SARTORIUS LA2035, Germany)
- เครื่องย่อยตัวอย่าง (Tecator Digestor 2012, Sweden)
- เครื่องสกัดไขมัน Soxhtec (Tecator Soxtex System HT 1043 Extraction Unit, Sweden)
- เครื่องวัดค่าสี (tristimulus colorimeter, Juki 801, Japan)
- เครื่องวัดค่า water activity (Aqua Lab, USA)
- เครื่องระเหยแบบหมุน (rotary evaporator)

วิธีการวิจัย

1. ศึกษาคุณภาพของสาหร่ายสไปรูลินาสด

ทำการศึกษาคุณภาพของสาหร่ายสไปรูลินาสด ดังนี้

1.1 ปริมาณความชื้น ทำตามวิธี AOAC (2000) โดยการอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ คำนวณปริมาณความชื้นจากน้ำหนักของตัวอย่างที่หายไป

1.2 ปริมาณโปรตีน ทำตามวิธี AOAC (2000) โดยใช้วิธี Kjeldahl's method คำนวณปริมาณโปรตีนโดยนำปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด × 6.25

1.3 ปริมาณเถ้า ทำตามวิธี AOAC (2000) โดยการนำตัวอย่างไปเผาเถ้าที่ 550 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง

1.4 ค่าสี โดยการนำตัวอย่างไปวัดด้วยเครื่องวัดค่าสี รายงานค่าออกมาเป็นค่า L*' a*, และ b* โดยค่า L* หมายถึงค่าความสว่าง ค่า a* หมายถึงค่าสีแดง และค่า b* หมายถึงค่าสีเหลือง

2. ศึกษาสภาวะในการทำแห้งที่เหมาะสม

ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินาโดยวิธีการดังนี้

2.1 การทำแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ (solar drying)

นำตัวอย่าเกลี่ยบางๆ บนถาดโลหะ (อลูมิเนียม) ที่รองด้วยแผ่นพลาสติก แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป

2.2 การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (hot air drying)

นำตัวอย่าเกลี่ยบางๆ บนถาดโลหะ (อลูมิเนียม) ที่รองด้วยแผ่นพลาสติก แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนต่อไป

2.3 การทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ (vacuum drying)

นำตัวอย่างมาเกลี่ยในภาชนะ (กล่องพลาสติก) ให้มีความหนาประมาณ ½ นิ้ว ปิดด้วยแผ่นฟอยล์ที่มีการเจาะรูเพื่อให้ไอน้ำสามารถระเหยได้สะดวกและป้องกันการฟุ้งกระจายของตัวอย่าง แล้วนำเข้าเครื่องทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศต่อไป

2.4 การทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย (spray drying)

นำตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาสดมาผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ก่อนที่จะทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย

2.5 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying)

นำตัวอย่างมาเกลี่ยในภาชนะ (กล่องพลาสติก) ให้มีความหนาประมาณ ½ นิ้ว ทำการแช่เยือกแข็งอย่างน้อย 1 คืน ปิดด้วยพาราฟิล์มที่มีการเจาะรูเพื่อให้ไอน้ำสามารถระเหิดได้สะดวกและป้องกันการฟุ้งกระจายของตัวอย่าง แล้วนำเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งต่อไป

นำตัวอย่างอบแห้งที่ได้ทุกตัวอย่าง มาทำการปั่นให้เป็นผงด้วยเครื่องปั่น แล้วนำไปตรวจวัด

ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000) โดยทุกวิธีจะต้องได้สาหร่ายสไปรูลินาอบแห้งที่มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 เพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่องสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง (มผช. 1229/2549)

3. การวิเคราะห์คุณภาพและความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาอบแห้ง

นำสาหร่ายสไปรูลินาอบแห้งที่ได้มาทำการวิเคราะห์คุณภาพและความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่

3.1.1 ปริมาณความชื้น (moisture content) ทำตามวิธี AOAC (2000) โดยการอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ คำนวณปริมาณความชื้นจากน้ำหนักของตัวอย่างที่หายไป

3.1.2 ค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity) โดยการวัดด้วยเครื่องวัดค่ากิจกรรมของน้ำ

3.1.3 ค่าสี (color value) โดยการนำตัวอย่างไปวัดด้วยเครื่องวัดค่าสี รายงานค่าออกมาเป็นค่า L*’ a*, และ b* โดยค่า L* หมายถึงค่าความสว่าง ค่า a* หมายถึงค่าสีแดง และค่า b* หมายถึงค่าสีเหลือง

3.1.4 ปริมาณพอลิฟีนอลทั้งหมด

โดยวิธี Folin-Ciocalteau (Singelton *et al*., 1999) โดยนำตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินามา 1 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นจำนวน 20 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันดี แล้วทำการเซ็นตริฟิวจ์ นำส่วนใส จำนวน 1 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดสอบ เติมสารละลาย Folin-Ciocalteau 0.5 มิลลิลิตร ผสมด้วยเครื่อง vortex mixer วางไว้ 5 นาที เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 20 จำนวน 2 มิลลิลิตร บ่มนาน 15 นาทีที่อุณหภูมิห้อง เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เซ็นตริฟิวจ์ที่ 4000 g นาน 5 นาที เพื่อแยกเอาตะกอนออกไป นำส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 725 นาโนเมตร เปรียบเทียบค่าที่ได้กับกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก รายงานค่าเป็นมิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักแห้ง 1 กรัม

3.1.5 การวัดความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ $DPPH^{\cdot}$

ทำตามวิธีของ Shimada *et al*. (1992) โดยนำตัวอย่างจำนวน 100 ไมโครลิตร ไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ DPPH เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ จำนวน 2.9 มิลลิลิตร เก็บไว้ที่มืดนาน 30 นาที แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร สำหรับตัวอย่างควบคุมใช้เมธานอลแทนตัวอย่าง

ค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงแสดงว่ามีความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระได้มากขึ้น คำนวณ

$$\%inhibition = (A_{control}-A_{sample}) \times 100/A_{control}$$

4. การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

วางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT (Duncan's Multiple Range Test) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

ผลการวิจัย

คุณภาพของสาหร่ายสไปรูลินาสด

สาหร่ายสไปรูลินาสดมีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้ ความชื้น โปรตีนและเถ้าร้อยละ 88.84, 7.03 และ 1.03 ของน้ำหนัก ตามลำดับ มีค่า water activity เท่ากับ 0.991 การที่สาหร่ายสไปรูลินาสดมีความชื้นและค่า water activity ที่สูง แสดงว่ามีปริมาณน้ำอิสระสูง ซึ่งจะเกิดการเน่าเสียทั้งจากแบคทีเรียและปฏิกิริยาทางเคมีได้ง่าย ดังนั้นถ้าหากว่าต้องการจะเก็บรักษาให้นานขึ้นจะต้องใช้เทคโนโลยีการถนอมอาหาร เช่น การแช่เย็น การแช่เยือกแข็งและการทำแห้ง เป็นต้น

สาหร่ายสไปรูลินาที่มีจำหน่ายในทางการค้าส่วนใหญ่มีจุดประสงค์เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร (dietary supplement) มักผ่านกระบวนการถนอมรักษาโดยการทำแห้ง และวางจำหน่ายในรูปของเม็ดยาหรือแคปซูล

สีของสาหร่ายสไปรูลินาสด มีค่า L*, a* และ b* เท่ากับ 18.06, -6.06 และ 12.08 ตามลำดับ ค่า L* เป็นค่าความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100 โดยค่า 100 หมายถึงตัวอย่างมีสีขาว ส่วนค่า 0 หมายถึงตัวอย่างมีสีดำ ค่า a* เป็นค่าที่แสดงค่าสีแดง-เขียว โดยตัวอย่างที่มีค่า + แสดงว่ามีสีแดง และตัวอย่างที่มีค่า – แสดงว่ามีสีเขียว และค่ายิ่งมาก ยิ่งแสดงว่าตัวอย่างมี สีแดง/สีเขียว เข้มมากขึ้น ค่า b* เป็นค่าที่แสดงค่าสีน้ำเงิน-เหลือง โดยตัวอย่างที่มีค่า + แสดงว่ามีสีน้ำเงิน และตัวอย่างที่มีค่า – แสดงว่ามีสีเหลือง และค่ายิ่งมาก ยิ่งแสดงว่าตัวอย่างมีสีน้ำเงิน/สีเหลือง เข้มมากขึ้น จากการมองด้วยสายตาพบว่าสาหร่ายสไปรูลินามีสีเขียวเข้ม ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดค่าสี (colorimeter) โดยจะเห็นได้จากการที่มีค่า a* เป็นลบ กล่าวคือ -6.06 และมีค่าความสว่างน้อย คือ 18.06

ตารางที่ 2 คุณภาพของสาหร่ายสไปรูลินาสด

คุณภาพ	สาหร่ายสไปรูลินาสด*
ความชื้น (ร้อยละ)	88.84
โปรตีน (ร้อยละ)	7.03
เถ้า (ร้อยละ)	1.03
ค่า water activity	0.991
ค่าสี	
L*	18.06
a*	-6.06
b*	12.08

* เป็นค่าเฉลี่ยจากการทำ 3 ซ้ำ

สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินา

จากศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินาโดยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ การทำแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน การทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ การทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย (spray drying) และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) เพื่อให้ได้สาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 ซึ่งสอดคล้องตามมาตรฐาน มผช. 542/2549 สาหร่ายสไปรูลินาแห้ง จากการทดลองได้สภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมดังตาราง

ตารางที่ 3 สภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมสำหรับสาหร่ายสไปรูลินา

วิธีการทำแห้ง	สภาวะที่เหมาะสม
ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ (SD)	- ทำการอบแห้งเป็นเวลา 3 วัน
ตู้อบลมร้อน (HAD)	- ทำที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 2 วัน แล้วเพิ่มเป็น 70 องศาเซลเซียส นาน 2 วัน
ตู้อบสุญญากาศ (VD)	- ทำที่ 70 องศาเซลเซียส นาน 4 วัน
การทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย (SPD)	- ใช้อุณหภูมิขาเข้า 210 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของตัวอย่าง 11 กิโลกรัม/ชั่วโมง
การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD)	- ทำที่ -26 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน

ผลการวิเคราะห์คุณภาพของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

การทำแห้งเป็นการดึงน้ำออกจากอาหาร ทำให้มีผลต่อความชื้น อายุการเก็บรักษาอาหาร นอกจากนี้ยังมีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอีกด้วย วิธีการทำแห้งมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีสภาวะในการทำแห้งที่แตกต่างกันไป Arslan and Ozcan (2011) กล่าวว่าสภาวะในการทำแห้งมีผลต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชัน เนื่องจากการทำแห้งมีผลต่อองค์ประกอบที่มีอยู่ในอาหาร ซึ่งองค์ประกอบบางชนิดจะลดลง เช่น กรดแอสคอร์บิก (วิตามินซี) เป็นต้น องค์ประกอบบางชนิดจะเพิ่มขึ้น เช่น ปริมาณกรดฟีนอลิกอิสระ เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวมีผลทั้งต่อคุณภาพ เช่น สี ความชื้นและค่า a_w เป็นต้น รวมทั้งปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านออกซิเดชัน เช่น ความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ ความสามารถในการจับกับโลหะและความสามารถในการเป็นสารรีดิวซ์ เป็นต้น ของสาหร่ายที่ได้ด้วย

เมื่อนำตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธีต่างๆ มาทำการิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ ความชื้น ค่าสี (L* a* b*) ค่า a_w และปริมาณพอลิฟีนอลทั้งหมด เปรียบเทียบกับตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งทางการค้า 2 ยี่ห้อ (ยี่ห้อ A และ B) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4, 5 และ 6

ความชื้นและค่า a_w

จากการวิเคราะห์ความชื้นพบว่าตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งทางการค้ายี่ห้อ A มีความชื้นร้อยละ 8.11 ± 0.06 ตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งทางการค้ายี่ห้อ B มีความชื้นร้อยละ 6.92 ± 0.10 และสำหรับความชื้นของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 5 วิธี คือ การทำแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน การทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอยและการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จะมีความชื้นที่แตกต่างกันโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 6.15 ± 0.34, 6.90 ± 0.05, 5.77 ± 0.82, 2.83 ± 0.11และ 3.61 ± 1.38 ตามลำดับ โดยทุกตัวอย่างที่ทำแห้งในการทดลองนี้มีค่าความชื้นที่สอดคล้องกับมาตรฐานตามประกาศสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ฉบับที่ 542 (พ.ศ. 2549) เรื่อง สาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง ที่ได้กำหนดปริมาณความชื้นของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งให้มีค่าไม่เกินร้อยละ 7 ในขณะที่ตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาที่จำหน่ายในทางการค้ายี่ห้อ A มีความชื้นสูงเกินไป

ค่า a_w ของสาหร่ายทุกตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจะเห็นว่าทุกตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นค่า a_w ที่เหมาะสมสำหรับอาหารแห้ง

ตารางที่ 4 ปริมาณความชื้นและค่า water activity ในสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

สาหร่ายสไปรูลินาแห้ง	ความชื้น (ร้อยละ)	water activity
ยี่ห้อ A	8.11 ± 0.06^{a}	0.428 ± 0.00^{a}
ยี่ห้อ B	6.92 ± 0.10^{ab}	0.387 ± 0.00^{b}
โดยวิธี SD	6.15 ± 0.34^{b}	0.342 ± 0.03^{bc}
โดยวิธี HAD	6.90 ± 0.05^{ab}	0.356 ± 0.02^{c}
โดยวิธี VD	5.77 ± 0.82^{b}	0.300 ± 0.05^{d}
โดยวิธี SPD	2.83 ± 0.11^{c}	0.221 ± 0.02^{e}
โดยวิธี FD	3.61 ± 1.38^{c}	0.147 ± 0.03^{f}

* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรยกขึ้นที่แตกต่างกัน ^{abc} แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ค่าสี (*L*, a*, b**)

ตัวอย่างสาหร่ายที่ผ่านการทำแห้งในแต่ละวิธีจะให้สีของตัวอย่างที่แตกต่างกัน โดยมีค่า L* a* และ b* อยู่ในช่วง 20.29 ถึง 31.64, -9.65 ถึง 6.24 และ 5.86 ถึง 18.70 ตามลำดับ สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A และยี่ห้อ B สาหร่ายที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธี spray dry และ freeze dry จะมีสีของผงสาหร่ายเป็นสีเขียวแต่ในตัวอย่าง solar dry, hot air dry และ vacuum dry สาหร่ายผงจะมีสีน้ำตาลเหลือง หรือน้ำตาลแดง ดังภาพที่ 5 และเมื่อนำตัวอย่างสาหร่ายผงไปวัดค่าสีในระบบ CIE (*L*, a*, b**) จะพบว่าตัวอย่าง freeze dry และ spray dry จะให้ลักษณะเป็นสีเขียวมากกว่าตัวอย่างอื่น ๆ

ตารางที่ 5 ค่าสีตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผง

สาหร่ายสไปรูลินาแห้ง	*L**	*a**	*b**
ยี่ห้อ A	31.64 ± 1.18[a]	-9.65 ± 1.15[c]	8.74 ± 1.36[b]
ยี่ห้อ B	22.99 ± 0.63[d]	-5.00 ± 1.84[b]	5.86 ± 0.28[b]
โดยวิธี SD	30.90 ± 1.57[ab]	6.24 ± 0.98[a]	18.70 ± 2.21[a]
โดยวิธี HAD	30.44 ± 1.47[abc]	4.84 ± 0.99[a]	18.65 ± 2.43[a]
โดยวิธี VD	27.34 ± 1.18[c]	4.45 ± 1.32[a]	15.83 ± 1.65[a]
โดยวิธี SPD	20.29 ± 0.19[d]	-3.21 ± 0.62[b]	10.02 ± 0.43[b]
โดยวิธี FD	28.03 ± 0.54[bc]	-2.53 ± 0.52[b]	10.72 ± 0.74[b]

* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรยกขึ้นที่แตกต่างกัน [abc] แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

สาหร่ายทางการค้าทั้ง 2 ชนิดรวมถึงสาหร่ายที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธี spray dry และ freeze dry จะมีสีของสารละลายที่มีความเป็นสีเขียวมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งวิธีอื่น และในตัวอย่างทางการค้าที่ 2 จะพบว่าสารละลายมีสีฟ้า-น้ำเงิน และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธี solar dry, hot air dry และ vacuum dry สารละลายจะมีสีน้ำตาลเหลือง หรือน้ำตาลแดง

สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

สาหร่ายสไปรูลินาอบแห้งที่ทำแห้งโดยวิธีที่ต่างกันมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 1.77-10.30 mg GAE/g dry weight ส่วนตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาที่จำหน่ายในทางการค้ายี่ห้อ A และยี่ห้อ B มีค่าเท่ากับ 1.33 และ 0.96 mg GAE/g dry weight ตามลำดับ

การทำแห้งแบบใช้ตู้อบสุญญากาศมีค่ามากที่สุด รองลงมาเป็นการทำแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และใช้ตู้อบลมร้อน และมีค่าสูงกว่าสาหร่ายที่จำหน่ายในทางการค้า ($p<0.05$)

ตารางที่ 6 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในตัวอย่างสาหร่ายทางการค้า และสาหร่ายผง

สาหร่ายสไปรูลินาแห้ง	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g dry weight)
ยี่ห้อ A	1.33 ± 0.05^{cd}
ยี่ห้อ B	0.96 ± 0.07^{d}
โดยวิธี SD	8.17 ± 0.29^{b}
โดยวิธี HAD	7.74 ± 0.62^{b}
โดยวิธี VD	10.30 ± 0.85^{a}
โดยวิธี SPD	1.96 ± 0.24^{c}
โดยวิธี FD	1.77 ± 0.30^{cd}

* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรยกขึ้นที่แตกต่างกัน ^{abc} แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ความสามารถในการจับกับอนุมุลอิสระ DPPH

เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่เท่ากันคือ 300 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ DPPH ของสาหร่ายแสดงดังตารางที่ 7 สาหร่ายสไปรูลินาอบแห้งที่ทำแห้งโดยวิธีที่ต่างกันมีความสามารถในการจับกับอนุมุลอิสระ DPPH อยู่ในช่วงร้อยละ 0.870-54.203 ส่วนตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาที่จำหน่ายในทางการค้ายี่ห้อ A และยี่ห้อ B มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.594 และ 6.667 ตามลำดับ

การทำแห้งแบบใช้ตู้อบสุญญากาศมีความสามารถในการจับกับอนุมุลอิสระ DPPH มากที่สุด รองลงมาเป็นการทำแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และใช้ตู้อบลมร้อน และมีค่าสูงกว่าสาหร่ายที่จำหน่ายในทางการค้า ($p<0.05$) ซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ตารางที่ 7 ความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ DPPH ของตัวอย่างสาหร่ายทางการค้า และสาหร่ายผง

สาหร่ายสไปรูลินาแห้ง	ความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ DPPH (ร้อยละ)
ยี่ห้อ A	1.594
ยี่ห้อ B	6.667
โดยวิธี SD	48.551
โดยวิธี HAD	40.580
โดยวิธี VD	54.203
โดยวิธี SPD	0.870
โดยวิธี FD	-1.739

* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรยกขึ้นที่แตกต่างกัน ^{abc} แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

วิจารณ์ผลการวิจัย

คุณภาพของสาหร่ายสไปรูลินาสด

การที่สาหร่ายสไปรูลินาสดมีความชื้นและค่า water activity ที่สูง แสดงว่าจะเกิดการเน่าเสียได้ง่าย ถ้าหากว่าจะเก็บรักษาให้นานขึ้นจะต้องใช้เทคโนโลยีการถนอมอาหาร เช่น การแช่เย็น การแช่เยือกแข็งและการทำแห้ง เป็นต้น ซึ่งสาหร่ายสไปรูลินาที่มีจำหน่ายในทางการค้าส่วนใหญ่มีจุดประสงค์เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร (dietary supplement) มักผ่านกระบวนการถนอมรักษาโดยการทำแห้ง

ค่า L* เป็นค่าความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100 โดยค่า 100 หมายถึงตัวอย่างมีสีขาว ส่วนค่า 0 หมายถึงตัวอย่างมีสีดำ ค่า a* เป็นค่าที่แสดงค่าสีแดง-เขียว โดยตัวอย่างที่มีค่า + แสดงว่ามีสีแดง และตัวอย่างที่มีค่า – แสดงว่ามีสีเขียว และค่ายิ่งมาก ยิ่งแสดงว่าตัวอย่างมีสีแดง/สีเขียว เข้มมากขึ้น ค่า b* เป็นค่าที่แสดงค่าสีน้ำเงิน-เหลือง โดยตัวอย่างที่มีค่า + แสดงว่ามีสีน้ำเงิน และตัวอย่างที่มีค่า – แสดงว่ามีสีเหลือง และค่ายิ่งมาก ยิ่งแสดงว่าตัวอย่างมีสีน้ำเงิน/สีเหลือง เข้มมากขึ้น จากการมองด้วยสายตาพบว่าสาหร่ายสไปรูลินามีสีเขียวเข้ม ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดค่าสี (colorimeter) โดยจะเห็นได้จากการที่มีค่า a* เป็นลบ กล่าวคือ -6.06 และมีค่าความสว่างน้อย คือ 18.06

ผลการวิเคราะห์คุณภาพของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

การทำแห้งเป็นการดึงน้ำออกจากอาหาร ทำให้มีผลต่อความชื้น อายุการเก็บรักษาอาหาร นอกจากนี้ยังมีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอีกด้วย วิธีการทำแห้งมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีสภาวะในการทำแห้งที่แตกต่างกันไป Arslan and Ozcan (2011) กล่าวว่าสภาวะในการทำแห้งมีผลต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

เมื่อนำตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธีต่างๆ มาทำการิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ ความชื้น ค่าสี (L* a* b*) ค่า water activity และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด เปรียบเทียบกับตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งทางการค้า 2 ยี่ห้อ (ยี่ห้อ A และ B)

สาหร่ายทางการค้าทั้ง 2 ชนิดรวมถึงสาหร่ายที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธี spray dry และ freeze dry จะมีสีของสารละลายที่มีความเป็นสีเขียวมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งวิธีอื่น และใน

ตัวอย่างทางการค้าที่ 2 จะพบว่าสารละลายมีสีฟ้า-น้ำเงิน และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธี solar dry, hot air dry และ vacuum dry สารละลายจะมีสีน้ำตาลเหลือง หรือน้ำตาลแดง

สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total polyphenol content)

การทำแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงปานกลางคือที่ 70 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่ปราศจากอากาศ (ออกซิเจน) ทำให้สามารถรักษาสารประกอบฟีนอลิกไว้ได้ดีกว่าการทำแห้งโดยวิธีอื่นๆ

การทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอยเป็นการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงมาก คือที่ 210 องศาเซลเซียส ทำให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดต่ำกว่าวิธีอื่นๆ นอกจากนี้การทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอยยังเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง อาจสูงถึงร้อยละ 30 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง (Tiburcio *et al*., 2007)

วิธีการทำแห้งโดยการตากแดด ด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์และการใช้ตู้อบลมร้อนจัดเป็นการทำแห้งที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอยและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แต่ต้องทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมให้แน่นอนและคงที่ต่อไป เพื่อให้ได้สาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่มีคุณภาพและมีค่า bioavailability ที่ดี

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสาหร่ายสไปรูลินาตามงานทดลองของ Kepekci *et al.* (2013) มีค่าเท่ากับ 6.32$\pm$3.89 mg GAE/g และเมื่อเลี้ยงโดยการเพิ่มความเข้มของแสงเพื่อกระตุ้นการสร้างสารประกอบฟีนอลิกพบว่ามีค่าเท่ากับ 49.83$\pm$5.56 mg GAE/g ซึ่งเพิ่มขึ้นกว่าเดิมประมาณ 8 เท่า สำหรับงานวิจัยของ Pagnussatt *et al.* (2013) พบว่าในสาหร่ายสไปรูลินามีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 700 ไมโครกรัม/กรัม โดยวัดด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้

Wu *et al.* (2005) พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสาหร่ายสไปรูลินามีมากกว่าในสาหร่ายคลอเรลลา 5 เท่า โดยมีค่าเท่ากับ 6.86 $\pm$ 0.58 และ 1.44 $\pm$ 0.04 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแทนนิกต่อสาหร่ายแห้ง 1 กรัม

การทำแห้งโดยการตากแดด มีการถ่ายเทอากาศที่ดี ทำให้สามารถรักษาสมบัติต้านออกซิเดชันไว้ได้ดีกว่าการทำแห้งที่มีการถ่ายเทอากาศไม่ดี เช่น ทำแห้งในตู้อบลมร้อน และประกอบกับการใช้อุณหภูมิต่ำ (กล่าวคือ 50 องศาเซลเซียส) การทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เวลานาน จะทำให้สูญเสียความสามารถในการต้านออกซิเดชันไปได้มากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง เวลาสั้น เช่นในกรณีของการทำแห้ง red bell-pepper (พริกแดงหวาน) โดยใช้ตู้อบไมโครเวฟที่ 700 วัตต์จะสามารถรักษาความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้ดีกว่าการใช้ตู้อบไมโครเวฟที่ 210 วัตต์ ซึ่ง

ร้อนน้อยกว่าและใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่า โดยการประเมินจากค่า TEAC และ DPPH assay (Arslan and Ozcan, 2011) การทำแห้งผักใบเขียว (green leafy vegetable) ทำให้สมบัติต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้น (Oboh and Akindahunsi, 2004) การทำแห้งมีผลทำให้อาหารอบแห้งมีคุณภาพด้อยลง โดยเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยา caramelization และ Maillard การเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากเอนไซม์ การเสื่อมสลายของรงควัตถุและการออกซิเดชันของกรดแอสคอร์บิก (Arslan and Ozcan, 2011)

ความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ DPPH

ผลที่ได้จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่มีในตัวอย่าง มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ โดยตัวอย่างที่มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุด (ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ) จะมีความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ DPPH ได้ดีที่สุด พบว่าความสามารถในการต้านออกซิเดชันมีความสัมพันธ์ทางบวกกับปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Wu *et al*., 2003)

El-Baky *et al.* (2009) ได้ทำการทดลองพบว่าสารสกัดสาหร่าย *Spirulina maxima* สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH ได้ โดยความสามารถในการยับยั้งขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่มี โดยยิ่งมีมากจะยิ่งมีความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ DPPH ได้มาก ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ สาหร่ายสไปรูลินามีความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยกลไกการให้อิเล็คตรอนและไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระ ทำให้หยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) ของกระบวนการออกซิเดชันของลิปิด (Halliwell and Gutteridge, 1989; Ruberto et al., 2001)

สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัย

1. สาหร่ายสไปรูลินาสดมีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้ ความชื้น โปรตีนและเถ้าร้อยละ 88.84, 7.03 และ 1.03 ของน้ำหนัก ตามลำดับ มีค่า water activity เท่ากับ 0.991 สีของสาหร่ายสไปรูลินาสด มีค่า L*, a* และ b* เท่ากับ 18.06, -6.06 และ 12.08 ตามลำดับ

2. จากการวิเคราะห์ความชื้นพบว่าตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ A มีความชื้นร้อยละ 8.11 ± 0.06 ตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ B มีความชื้นร้อยละ 6.92 ± 0.10 และสำหรับความชื้นของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 5 วิธี คือ spray dry, freeze dry, solar dry, hot air dry และ vacuum dry จะมีความชื้นที่แตกต่างกันโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.83 ± 0.11, 3.61 ± 1.38, 6.15 ± 0.34, 6.90 ± 0.05 และ 5.77 ± 0.82 ตามลำดับ

3. ค่า water activity ของสาหร่ายทางการค้า และสาหร่ายที่ผ่านการทำแห้งจะมีค่าที่แตกต่างกันดังนี้ ในตัวอย่างสาหร่ายสดมีค่า water activity เท่ากับ 0.991 ± 0.00 และในตัวอย่างสาหร่ายทางการค้า และสาหร่ายที่ผ่านการอบแห้งพบว่ามีค่า water activity อยู่ในช่วง 0.147 - 0.428

4. ค่าสีของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธีต่างกัน มีค่า L* a* และ b* อยู่ในช่วง 20.29 ถึง 31.64, -9.65 ถึง 6.24 และ 5.86 ถึง 18.70 ตามลำดับ

5. ปริมาณพอลิฟีนอลทั้งหมดของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่ทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 1.77-10.30 mg GAE/g dry weight ส่วนตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาที่จำหน่ายในทางการค้ายี่ห้อ A และยี่ห้อ B มีค่าเท่ากับ 1.33 และ 0.96 mg GAE/g dry weight ตามลำดับ

6. ความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระ DPPH ของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่ทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ อยู่ในช่วงร้อยละ 0.870-54.203 ส่วนตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาที่จำหน่ายในทางการค้ายี่ห้อ A และยี่ห้อ B มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.594 และ 6.667 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีกับความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

เอกสารอ้างอิง

เจียมจิตต์ บุญสม. 2531. **ความลับของสาหร่ายเกลียวทอง ผลทางการรักษาโรคที่นายแพทย์ญี่ปุ่นค้นพบ**. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

ฤทธิชัย อัศวราชันต์, ภานาถ แสงเจริญรัตน์, สุเนตร สืบค้า, เทียรมณี มั่งมูลและดวงกมล จนใจ. 2554. จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยลมร้อนของเปลือกทับทิม. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย**. 17:27-34.

มผช. 542/2549. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่อง สาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง** . 5 น.

นิรนาม. ม.ป.ป. **คลังข้อมูลสุขภาพ.** http://www.boonsomfarm.com/info_keyfactor.html (20 กุมภาพันธ์ 2557)

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 238). 2544. เรื่อง **อาหารมีวัตถุประสงค์พิเศษ.**

ณัฐภาส ผู้พัฒน์, ลลิตา สุระรัตน์ชัย, รุจา สารคุณและพรกมล คำหาญ. ม.ป.ป. **การผลิตสาหร่ายเกลียวทอง (Commercial Spirulina Cultivation).** ค้นจาก http://www.rdi.ku.ac.th/kasetresearch52/01-celebrate/natpas/celebrate_00.html (20 กุมภาพันธ์ 2557)

พิสิฐ วงศ์วัฒนะ (ผู้แปล). 2547. **วิตามิน**. สำนักพิมพ์หมอชาวบ้าน กรุงเทพฯ. 608น.

สุภัทร์ ไชยกุล. 2546. รู้จักกับสาหร่ายสไปรูไลนา. **วารสารอาหารและยา.** 10 (3): 5-10.

สมชาย บุญสม. 2539. **สาหร่ายเกลียวทอง *Spirulina***. กรีนไดมอนด์, กรุงเทพฯ.

สมศักดิ์ วรคามิน. 2547. **สาหร่าย อาหารของอนาคต.** สามเจริญพานิชย์, กรุงเทพฯ.

Anbarasan, V., V.K. Kumar, P.S. Kumar and T. Venkatachalam. 2011. *In vitro* evaluation of antioxidant activity of blue green algae *Spirulina platensis*. **International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research**. 2(10): 2616-2618.

AOAC. 2000. **Official Method of Analysis**. Association of Official Analytical Chemist.

Arslan, D. and M.M. Ozcan. 2011. Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annum* L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content. **Food Bioprod Process**. 89: 504-513.

Barron, B.L., J. Vazquez-Sanchez and G. Chamorro-Cevallos. 2008. Toxicologic studies and antitoxic properties of *Spirulina*. pp. 27-44. *In* A. Belay and M.E. Gershwin. ***Spirulina* in Human Nutrition and Health.** CRC Press, New York.

Belay, A. 2002. The potential application of *Spirulina* (*Arthrospira*) as a nutritional and therapeutic supplement in health management. **J Am Nutra Assoc.** 5: 27-48.

Bennion, M. 1980. **The Science of Food**. AVI Publishing, New York.

Bhat, V.B. and K.M. Madyastha. 2000. C-phycocyanin: a potent peroxyl radical scavenger *in vivo* and *in vitro*. **Biochem Bioph Res Co**. 275 (1): 20-25.

Chaiklahan, R., N. Chirasuwan, P. Triratana and V. Loha. 2013. Polysaccharide extraction from *Spirulina* sp. and its antioxidant capacity. **Int J Biol Macro**. 58: 73-78.

El-Baky, H.H.A. 2003. Overproduction of phycocyanin pigment in blue green algae *Spirulina* sp. and its inhibitory effect on growth of Ehrlich Ascites carcinoma cells. **J Med Sci.** 34: 314-324.

El-Baky, H.H.A., F.K.El-Baz and G.S. El-Baroty. 2009. Production of phenolic compounds from *Spirulina maxima* microalgae and its protective effects. **Afr J Biotechnol**. 8(24): 7059-7067.

Hajimahmoodi, M., M.A. Faramarzi, N. Mohammadi, N. Soltani, M.R. Oveisi and N. Nafissi-Varcheh. 2010. Evaluation of antioxidant properties and total phenolic contents of some strains of microalgae**. J Appl Phycol**. 22: 771-776.

Halliwell, B. and J.M. Gutteridge. 1989. Free radicals, other reactive species and disease. pp.617-623. *In* **Free Radicals in Biology and Medicine**. Clarendon Press, Oxford.

Healey, F.P. 1982. **The Biology of Cyanobacteria**. Blackwell Scientific, Oxford.

Hirata, T., M. Tanaka, M. Ooike, T. Tsunomura and M. Sakaguchi. 2000. Antioxidant activities of phycocyanobilin prepared from *Spirulina platensis*. **J Appl Phycol.** 12: 435-439.

Hossain, M.B., C. Barry-Ryan, A.B. Martin-Diana and N.P. Brunton. 2010. Effect of drying method on the antioxidant capacity of six *Lamiaceae* herbs. **Food Chem**. 123: 85-91.

Huang, D., B. Ou and R.L. Prior. 2005. The chemistry behind antioxidant capacity assays. **J Agric Food Chem**. 53: 1841-1856.

Kepekci, R.A., S. Polat, A. Celik, N. Bayat and S.D. Saygiderger. 2013. Protective effect of *Spirulina platensis* enriched in phenolic compounds against hepatotoxicity induced by CCl_4. **Food Chem**. 141: 1972-1979.

Li , H.-B., K.-W. Cheng, C.-C. Wong, K.W. Fan, F. Chen and Y. Jiang. 2007. Evaluation of antioxidant capacity and total pheniolic content of different fraction of selected microalgae. **Food Chem**. 102: 771-776.

Liu, Y., X. Lizhi, N. Cheng, L. Lim and C. Zhang. 2000. Inhibitory effect of phycocyanin from *Spirulina platensis* on the growth of human leukemia K562 cells. **J Appl Phycol**. 12: 125-130.

Ma, L., H. Chen, W. Zhu and Z. Wang. 2013. Effect of different drying methods on physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharides extracted from mushroom *Inonotus obliquus*. **Food Res Int**.50(2): 633-640.

Manoj, G., L.V. Venktaraman and L. Srinivas. 1992. Antioxidant properties of Spirulina (*Spirulina platensis*). p.148-154. *In* C.V. Seshadri and N. Jeeji Bai (eds.) **Spirulina Etta National Symposium**. MCRC, India.

Miranda, M.S., R.G. Cintra, S.B.M. Barroz and J. Mancini-Fiho. 1998. Antioxidant activity of the microalgae *Spirulina maxima*. **Braz J Med Biol Res**. 31(8): 1075-1079.

Oboh and Akindahunsi, 2004. *Cited by* Arslan, D. and M.M. Ozcan. 2011. Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annum* L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content. **Food Bioprod Process**. 89: 504-513.

Pagnussatt, F.A., E.M.D. Ponte, J. Garda-Buffon and E. Badiale-Furlong. 2013. Inhibition of *Fusarium graminearum* growth and mycotoxin production by phenolic extract from *Spirulina* sp. **Pest Biochem Physiol**. 108: 21-26.

Prior, R.L., X. Wu and K. Schaich. 2005. Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplement. **J Agric Food Chem**. 53: 4290-4302.

Richmond, A. and J.U. Grobbelaar. 1986. Factors affecting the output rate of *Spirulina platensis* with reference to mass cultivation. **Biomass**. 10 (4): 253-264.

Romay, C., J. Armesto, D. Remirez, R. Gonzales, N. Ledon and I. Garcia. 1998. Antioxidant and anti-inflamatory properties of C-phycocyanin from blue green algae. **Inflamm Res**. 47: 36-41.

Romay, C. and R. Gonzalez. 2000. Phycocyanin is an antioxidant protector of human erythrocytes against lysis by peroxyl radicals. **J Pharm Pharmacol**. 52 (4): 367-368.

Ruberto, G., M.T. baratta, D.M. Biondi and V. Amico. 2001. Antioxidant activity of extracts of the marine algae genus Cystoseira in a micellar model system. **J Appl Physiol**. 13: 403-407.

Ruengjitchatchawalya, M., N. Chirasuwan, R. Chaiklahan, B. Bunnag and M.Tanticharoen. 2002. Photosynthetic characterization of a mutant of *Spirulina platensis*. **J Appl Phycol**. 14: 71-76.

Sanchez-Moreno, C. 2002. Review: Methods used to evaluate the free radical scavenging activity in foods and biological system. **Food Sci Technol Int**. 8: 121-137.

Singelton, V.L., R. Orthofer and R.R. Lamuela-Raventos. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrate and oxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. **Methods of Enzymology**. 299: 152-178.

Tiburcio, P.C., F.C.F. Galvez, L.J. Cruz and V.C. Gavino. 2007. Optimization of low-cost drying methods to minimize lipid peroxidation in *Spirulina platensis* grown in the Philippines. **J Appl Phycol**. 19: 719-726.

Wu, L.C., J.A.A. Ho, M.C. Shieh and I.W. Lu. 2005. Antioxidant and antiproliferative activities of spirulina and chlorella water extracts. **J Agric Food Chem.** 53: 4207-4212.

Wu, L.C., Y.C. Chen, J.A. Ho and C.S. Young. 2003. Inhibitory effect of red koji extracts on mushroom tyrosinase. **J Agric Food Chem**. 51: 4240-4246.

Wu, S., , F. Li, S.I. Jia, H. Ren, G. Gong, Y. Wang, Z. Lv, and Y. Liu. 2013. Drying effects on the antioxidant properties of polysaccharides obtained from *Agaricus blazei Murrill.* **Carbohyd Polym.** 103: 414-417.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

มผช. 552/2549

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

สาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ครอบคลุมสาหร่ายสไปรูไลนาที่ทำให้แห้งและบดเป็นผง อาจบรรจุในซองเยื่อกระดาษ บรรจุในภาชนะบรรจุ ใช้สำหรับชงเป็นเครื่องดื่ม

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 สาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำสาหร่ายสไปรูไลนาสดมาล้างให้สะอาด ทำให้แห้งโดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือแหล่งพลังงานอื่น แล้วบดเป็นผง

3. คุณลักษณะที่ต้องการ

3.1 ลักษณะทั่วไป

ต้องเป็นผง แห้ง ไม่จับตัวเป็นก้อน

3.2 สี

ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง

3.3 กลิ่นรส

ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์

3.4 การสกัดด้วยน้ำเดือด

ของเหลวที่ได้ต้องมีลักษณะที่ดีตามธรรมชาติของสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง เมื่อตรวจสอบโดยวิธีให้คะแนนตามข้อ 8.1 แล้ว ต้องได้คะแนนเฉลี่ยของแต่ละลักษณะจากผู้ตรวจสอบทุกคนไม่น้อยกว่า 3 คะแนน และไม่มีลักษณะใดได้ 1 คะแนนจากผู้ตรวจสอบคนใดคนหนึ่ง

3.5 สิ่งแปลกปลอม

ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์

3.6 การเจือสี

ต้องไม่พบการเจือสีใดๆ

3.7 ความชื้น

ต้องไม่เกินร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก

3.8 จุลินทรีย์

3.8.1 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องน้อยกว่า 1×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.8.2 ยีสต์และรา ต้องไม่พบในตัวอย่าง 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

4. สุขลักษณะ

4.1 สุขลักษณะในการทำสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง สถานประกอบการต้องได้รับอนุญาตจากกระทรวงสาธารณสุขและให้เป็นไปตามคำแนะนำตามภาคผนวก ก.

5. การบรรจุ

5.1 ให้บรรจุสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งในภาชนะบรรจุที่สะอาด ปิดได้สนิท และสามารถป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรกภายนอกได้

5.2 น้ำหนักสุทธิของสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งในแต่ละภาชนะบรรจุ ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก

6. เครื่องหมายและฉลาก

6.1 ที่ภาชนะบรรจสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งทุกหน่วย อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน

(1) ชื่อเรียกผลิตภัณฑ์ เช่น สาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง ผงสาหร่ายสไปรูไลนา

(2) ส่วนประกอบที่สำคัญ

(3) น้ำหนักสุทธิ

(4) วัน เดือน ปีที่ทำ และวัน เดือน ปีที่หมดอายุ หรือข้อความว่า “ควรบริโภคก่อน (วัน เดือน ปี)”

(5) ข้อแนะนำในการบริโภคและการเก็บรักษา

(6) ชื่อผู้ทำหรือสถานที่ทำ พร้อมสถานที่ตั้ง หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้นมผช. 552/2549

7. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

7.1 รุ่น ในที่นี้ หมายถึง สาหร่ายสไปรูไลนาแห้งที่ทำโดยกรรมวิธีเดียวกัน ในระยะเวลาเดียวกัน

7.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้

7.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบสิ่งแปลกปลอม การบรรจุ และเครื่องหมายและฉลาก ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน ๓ หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อตรวจสอบแล้ว ทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.5 ข้อ 5. และข้อ 6. จึงจะถือว่าสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบลักษณะทั่วไป สี กลิ่นรส และการสกัดด้วยน้ำเดือด ให้ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบตามข้ อ 7.2.1 แล้ว จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อตรวจสอบแล้ว ทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.1 ถึงข้อ 3.4 จึงจะถือว่าสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.3 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบการเจือสีและความชื้น ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เพื่อทำเป็นตัวอย่างรวม โดยมีน้ำหนักรวมไม่น้อยกว่า 200 กรัม กรณีตัวอย่างไม่พอให้ชักตัวอย่างเพิ่ม โดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันให้ได้ตัวอย่างที่มีน้ำหนักรวมตามที่กำหนด เมื่อตรวจสอบแล้ว ตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.6 และข้อ 3.7 จึงจะถือว่าสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.4 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบจุลินทรีย์ ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เพื่อทำเป็นตัวอย่างรวม โดยมีน้ำหนักรวมไม่น้อยกว่า 200 กรัม กรณีตัวอย่างไม่พอให้ชักตัวอย่างเพิ่ม โดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันให้ได้ตัวอย่างที่มีน้ำหนักรวมตามที่กำหนด เมื่อตรวจสอบแล้ว ตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.8 จึงจะถือว่าสา

หร่ายสไปรูไลนาแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.3 เกณฑ์ตัดสิน

ตัวอย่างสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งต้องเป็นไปตามข้อ 7.2.1 ข้อ 7.2.2 ข้อ 7.2.3 และข้อ 7.2.4 ทุกข้อ จึงจะถือว่าสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้

8. การทดสอบ

8.1 การทดสอบลักษณะทั่วไป สี กลิ่นรส และการสกัดด้วยน้ำเดือด

8.1.1 ให้แต่งตั้งคณะผู้ตรวจสอบ ประกอบด้วยผู้ที่มีความชำนาญในการตรวจสอบสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งอย่างน้อย ๕ คน แต่ละคนจะแยกกันตรวจและให้คะแนนโดยอิสระ

8.1.2 เทตัวอยางสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งลงในจานกระเบื้องสีขาว ตรวจสอบลักษณะทั่วไปและสีโดยการตรวจพินิจ

8.1.3 เทตัวอย่างสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งลงในภาชนะที่เหมาะสม เติมน้ำเดือดตามปริมาณที่ระบุไว้ที่ฉลาก ปิดฝาทิ้งไว้ ๖ นาที ตรวจสอบกลิ่นรสและการสกัดด้วยน้ำเดือดโดยการตรวจพินิจและชิม

8.1.4 หลักเกณฑ์การให้คะแนน ให้เป็นไปตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 หลักเกณฑ์การให้คะแนน (ข้อ 8.1.4)

ลักษณะที่ตรวจสอบ	เกณฑ์ที่กำหนด	ระดับการตัดสิน (คะแนน)			
		ดีมาก	ดี	พอใช้	ต้องปรับปรุง
ลักษณะทั่วไป	ต้องเป็นผง แห้ง ไม่จับตัวเป็นก้อน	4	3	2	1
สี	ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง	4	3	2	1
กลิ่นรส	ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์	4	3	2	1
การสกัดด้วยน้ำเดือด	ของเหลวที่ได้ต้องมีลักษณะที่ดีตามะรรมชิตของสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง	4	3	2	1

8.2 การทดสอบสิ่งแปลกปลอม ภาชนะบรรจุ เครื่องหมายและฉลาก

ให้ตรวจพินิจ

8.3 การทดสอบการเจือสี

เทตัวอย่างสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งประมาณ 0.5 กรัมถึง 1 กรัมลงบนกระดาษกรอง พับกระดาษกรองเข้าหากัน แล้วขยี้ เทตัวอย่างสาหร่ายสไปรูไลนาออกจากกระดาษกรองให้หมด พ่นน้ำบนกระดาษกรองพอเปียก ต้องไม่มีสีเกิดขึ้นเห็นได้ชัดเจน ยกเว้นสีตามธรรมชิตของส่วนประกอบที่ใช้บนกระดาษกรองนั้น

8.4 การทดสอบความชื้น

ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.5 การทดสอบจุลินทรีย์

ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือ BAM หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.6 การทดสอบน้ำหนักสุทธิ

ให้ใช้เครื่องชั่งที่เหมาะสม

ภาคผนวก ข.

รูปภาพ

หมายเหตุ SPD คือ spray dry, FD คือ freeze dry, SOD คือ solar dry, HAD คือ hot air dry และ VD คือ vacuum dry

ภาพที่ 2 ตัวอย่างสาหร่ายผง