ผลของวิธีการทำแห้งต่อสมบัติการต้านออกซิเดชัน ของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)

EFFECT OF DRYING METHOD ON ANTIOXIDANT ACTIVITY OF *Spirulina platensis*

เจนจิรา ผลโภคกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2558

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

ชื่อเรื่อง

ผลของวิธีการทำแห้งต่อสมบัติการต้านออกซิเดชัน

ของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)

โดย

เจนจิรา ผลโภคกุล

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....วิจิตรา แดงปรก.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา แดงปรก)

วันที่...1..... เดือน...ก.ค.....พ.ศ. ..2558.....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ หวังเจริญ)

วันที่.....1... เดือน...ก.ค.....พ.ศ. ..2558.....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล ถิรบุญยานนท์)

วันที่.....1.....เดือน...ก.ค.....พ.ศ. 2558.....

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร .....วิจิตรา แดงปรก.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา แดงปรก)

วันที่.....1.....เดือน...ก.ค.....พ.ศ. 2558.....

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาตุพงศ์ วาฤทธิ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....1.... เดือน.....ก.ค.....พ.ศ. .2558.....

ชื่อเรื่อง ผลของวิธีการทำแห้งต่อสมบัติการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)

ชื่อผู้เขียน นางสาวเจนจิรา ผลโภคกุล

ชื่อปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา แดงปรก

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาผงที่ทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางเคมี และทางกายภาพ และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (ด้วยวิธี DPPH assay, ABTS assay และ FRAP assay) ของสาหร่ายสไปรูลินาผงในระหว่างการเก็บรักษา โดยวิธีการทำแห้งที่ใช้คือ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง เปรียบเทียบกับตัวอย่างทางการค้า 2 ยี่ห้อ (A และ B) พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาสด (คำนวณในฐานแห้ง) มีความชื้นร้อยละ 88.17±0.65 ค่ากิจกรรมของน้ำ 0.991±0.00 ปริมาณโปรตีนร้อยละ 64.04±2.80 และเถ้าร้อยละ 9.09±0.37 หลังจากทำแห้งสาหร่ายสดพบว่าสาหร่ายผงมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 2.83-8.11 ค่ากิจกรรมของน้ำอยู่ในช่วง 0.147–0.428 ค่าสีของสาหร่ายสไปรูลินาผงที่ผ่านการทำแห้งแต่ละวิธีมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) สาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง มีปริมาณโปรตีนสูงสุดคือร้อยละ 89.04±1.52 ลักษณะผนังเซลล์ของสาหร่ายที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อนจะถูกทำลายมากกว่าตัวอย่างอื่นๆ จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า ตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อนมีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงสุด และเมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาผงในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าปริมาณความชื้น และค่ากิจกรรมของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่าง สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่าสี (L*, a*, b*) พบว่าในตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ A และ B มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของค่า L*, a*, b* ที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนมีค่าสีค่อนข้าง

คงที่ ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน มีค่าลดลงในระหว่างการเก็บรักษา ตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศจะยังคงมีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงที่สุด แต่เมื่อทำการหาอัตราเร็วในการลดลงของความสามารถในการต้านออกซิเดชัน พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศและตู้อบลมร้อนมี มีอัตราการลดลงเร็วกว่าตัวอย่างทางการค้าทั้ง 2 ยี่ห้อ และเมื่อทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาผง พบว่าการทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์มีต้นทุนในการผลิตต่อกรัมน้ำหนักแห้งน้อยที่สุด รองลงมาคือ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง โดยมีต้นทุนที่ใช้ในการผลิต (บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) เท่ากับ 927, 1,236, 3,092, 1,477 และ 8,574 ตามลำดับ

Title	Effect of Drying Method on Antioxidant Activity of *Spirulina platensis*
Author	Miss Jenjira Pholpokakul
Degree of	Master of Science Program in Food Science and Technology
Advisory Committee Chairperson	Associate Professor Dr. Wichittra Daengprok

ABSTRACT

The objectives of this research were to study the effect of drying methods on chemical properties, physical properties, antioxidant activity, changes of chemical properties, physical properties and antioxidant activity, (DPPH assay, ABTS assay and FRAP assay) of dried *Spirulina* (*Spirulina platensis*) during storage. Samples were subjected to solar drying, hot air drying, vacuum drying, spray drying and freeze drying compared with commercial brand A and brand B. The results (calculation by dry basis) showed fresh *Spirulina* had moisture contents 88.17±0.65%, water activity 0.991±0.00, protein 64.04±2.80% and ash 9.09±0.37%. Dried *Spirulina* of all samples had moisture contents 2.83-8.11%, water activity 0.417-0.428 and colour value of all samples was significant ($p<0.05$). Freeze drying gave the highest content of protein 89.04±1.52%. Characteristics of *Spirulina* cells of Solar drying, hot air drying and vacuum drying are destroyed. Samples of vacuum drying and hot air drying gave the highest total polyphenol contents and antioxidant activity, study of changes of chemical properties, physical properties and antioxidant activity of dried *Spirulina* during storage showed moisture and water activity increased in all sample. The changes of colour value (L*, a*, b*) of commercial (brand A and brand B) had increased but colour value of hot air drying and vacuum drying was constant. All drying methods tended to decreas total polyphenol contents and antioxidant activity. It was found that the vacuum drying had the highest of both total polyphenol contents and antioxidant activity compared to other samples. But, when calculated percent reduction of antioxidant activity it was found that the percent reduction of vacuum drying and hot air drying have a higher reduction than the 2 commercial samples (brand A and brand B). In the production costs it was found that solar drying had lower costs than hot air drying, spray drying, vacuum drying and freeze drying with 927, 1,236, 3,092, 1,477 and 8,574, respectively (Baht / kg dry weight).

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา แดงปรก ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ และขั้นตอนต่างๆ ในการทำวิจัย รวมทั้งให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ จนกระทั่งงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ หวังเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล ถิรบุญยานนท์ กรรมการที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา และคำชี้แนะตลอดมาจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวรรณ ถาวรชินสมบัติ ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และความรู้เพิ่มเติมจากการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณอำไพ จากบริษัท ศิริเรืองอำไพ จำกัด ที่ได้อำนวยความสะดวกและสถานที่ในการทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณทุนศิษย์ก้นกุฏิ จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ได้สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษาสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ รวมถึงนักศึกษา และเจ้าหน้าที่คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ นายคุ้น ผลโภคกุล คุณแม่ นางอุไรศรี ผลโภคกุล รวมถึงบุคคลในครอบครัวข้าพเจ้าที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษา ให้กำลังใจ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านตลอดมา และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีมาตลอดการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา

เจนจิรา ผลโภคกุล

กรกฎาคม 2558

สารบัญ

หน้า

สารบัญตาราง

สารบัญภาพ

สารบัญตารางผนวก

สารบัญภาพผนวก

บทที่ 1
บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การทำแห้งหรือการดึงน้ำออกจากอาหาร เป็นวิธีการถนอมอาหาร (food preservation) ที่นิยมใช้มานาน เป็นการลดความชื้น ของอาหารด้วยการระเหยน้ำ ด้วยการอบแห้ง การทอด หรือการระเหิดน้ำส่วนใหญ่ในอาหารออก ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยการลดค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity) ที่มีผลยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และการทำงานของเอนไซม์ แต่ผลของการทำแห้งนี้จะมีผลต่ออาหาร คือ ผลต่อโปรตีน คาร์โบไฮเดรท ไขมัน วิตามิน รงควัตถุ (pigment) ในอาหาร เนื้อสัมผัสของอาหาร สารให้กลิ่นรส เชื้อจุลินทรีย์ และเอนไซม์ ดังนั้นการทำแห้งจึงอาจส่งผลดีหรือเสียแก่อาหารหรือผลิตภัณฑ์ได้

ปัจจุบันมนุษย์เริ่มหันมาสนใจผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีสังเคราะห์ในการบำบัดโรค การรับประทานเป็นอาหารหรืออาหารเสริมเพื่อเป็นผลดีต่อสุขภาพ ซึ่งสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ได้รับความสนใจมากในแง่ของการใช้ประโยชน์ในการเป็นอาหารเสริม เนื่องจากสาหร่ายสไปรูลินามีปริมาณโปรตีนต่อน้ำหนักแห้งสูงถึงร้อยละ 50-70 นอกจากสาหร่ายชนิดนี้จะอุดมไปด้วยโปรตีนแล้วยังประกอบไปด้วยสารอาหารอื่นๆ อีกมากมาย ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต วิตามิน แร่ธาตุ กรดไขมันไม่อิ่มตัว กรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย และซัลโฟลิปิดในกลุ่ม sulfoquinovosyl diacylglycerol รวมทั้งมีรงควัตถุ ที่มีคุณค่าหลายชนิด รงควัตถุที่สำคัญของสาหร่ายสไปรูลินา ได้แก่ บีตา-แคโรทีน (β-carotene) คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) และ ซี-ไฟโคไซยานิน (C-phycocyanin)

อาหารเสริมจากสาหร่ายสไปรูลินามักจะผ่านกระบวนการทำแห้งเพื่อนำมาใช้ในการทำเป็นอาหารเสริมสำหรับมนุษย์ อาหารสัตว์ ผสมในอาหาร เช่น ไอศกรีม ใช้เป็นสีผสมในเครื่องสำอาง (Vonshak, 1993) เป็นต้น แต่การศึกษาและวิจัยในเรื่องของผลของการทำแห้งในแต่ละวิธีที่มีผลต่อสาหร่ายสไปรูลินา ในการออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และสมบัติในการต้านออกซิเดชันยังมีน้อยมาก งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อ ศึกษาผลของการทำแห้ง 5 วิธี คือ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง ต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ในระหว่างการเก็บรักษาของสาหร่ายสไปรูลินาผงที่ได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาผง

2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาในระหว่างการเก็บรักษา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

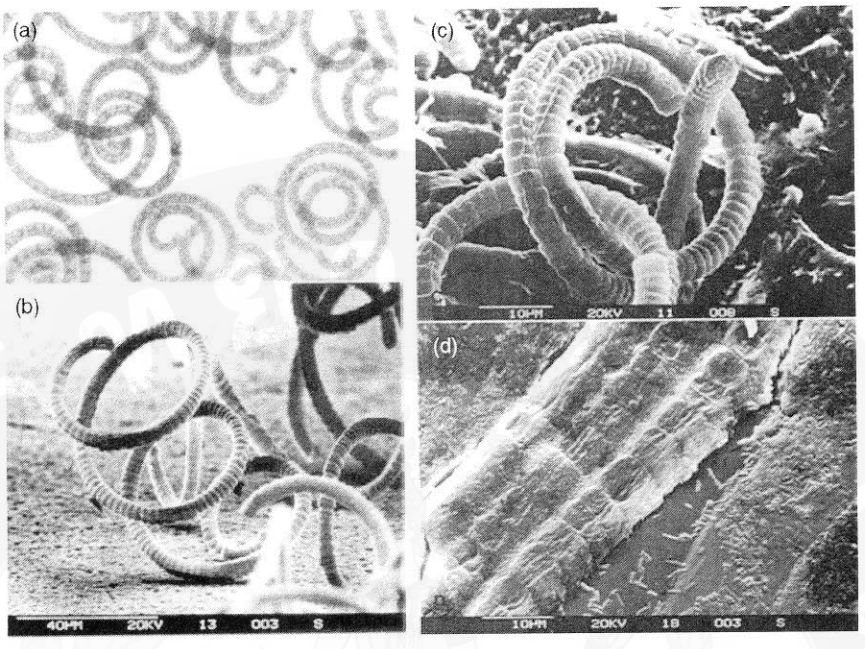
ทราบถึงวิธีการทำแห้งที่เหมาะสม และแนวทางในการเก็บรักษาของสาหร่ายสไปรูลินาผงที่ได้

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*)

สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina*) มีความหมายว่า "เกลียว" หรือ "เกลียวเล็ก" (กาญจนภาชน์, 2527) เนื่องจากมีลักษณะเป็นเส้น (filament) ที่ขดกันเป็นเกลียว คล้ายลวดสปริง มีผนังบางๆ กั้นอยู่ในสาย ดังแสดงในภาพ 1 เซลล์จะเคลื่อนที่แบบควงสว่าน พบได้ทั้งในแหล่งน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม เป็นสาหร่ายเซลล์เดียว (สุมลวรรณ, 2542) สาหร่ายชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green หรือ *Cyanobacterium*) เป็นสิ่งมีชีวิตประเภทโปรแคริโอต คือ ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส (ยุวดี, 2548) ผนังเซลล์เป็นผนังหลายชั้นประกอบด้วยสารมิวโคโปรตีนและเพคติน ชั้นนอกเป็นสารพอลิแซคคาไรด์ มีแวคคิวโอลขนาดใหญ่ ทำให้ลอยน้ำได้ กรดนิวคลีอิกกระจายอยู่ทั่วเซลล์ (Venkataraman, 1983) ตัวเซลล์ของสาหร่ายชนิดนี้ไม่ได้ปกคลุมด้วยเยื่อเมือกเหมือนสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินทั่วไป ทำให้ผิวของเซลล์ไม่มีจุลินทรีย์มาเกาะ จึงมีความสามารถในการต้านทานจุลินทรีย์ได้สูง และยังทนต่อรังสีอุลตราไวโอเลตสูง สาหร่ายชนิดนี้มีเยื่อหุ้มเซลล์เป็นสารพวกพอลิแซคคาไรด์สามารถย่อยได้ง่าย ซึ่งต่างกับพืชชั้นสูงหรือสาหร่ายสีเขียว เช่น สาหร่าย คลอเรลลา (*Chlorella* spp.) ใน Division Chlorophyta ที่มีผนังเซลล์เป็นเซลลูโลสซึ่งยากแก่การย่อย (ยุวดี และคณะ, 2535)โดยสายพันธุ์ที่นิยมนำมาบริโภคเป็นอาหารมนุษย์ คือ *Spirulina platensis* และ *Spirulina maxina*



ภาพ 1 ลักษณะเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) เมื่อมองด้วยกล้องจุลทรรศน์

หมายเหตุ (ภาพ a) Optical microscopy (ภาพ b) Scanning electron micrograph (ภาพ c) Scanning electron micrograph of trichome (ภาพ d) Scanning electron micrograph of non axenic

ที่มา: Gershwin and Belay (2008)

การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายสไปรูลินา

ปัจจุบันสาหร่ายสไปรูลินาเป็นที่รู้จักกันมากขึ้น ปกติจะใช้เป็นอาหารแต่ในปัจจุบันมีการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาในระดับอุตสาหกรรมหลายแห่งทั่วโลก หากผลผลิตที่ได้มีคุณภาพต่ำก็จะนำมาทำเป็นอาหารสัตว์ แต่หากผลผลิตที่ได้มีคุณภาพสูงก็จะนำมาใช้เป็นอาหารเสริมสุขภาพแก่มนุษย์ นอกเหนือจากการเป็นอาหารเสริมสุขภาพแล้วยังใช้ผลิตสารเคมีอื่นๆ เช่น การสกัดโปรตีนที่มีรงควัตถุสีน้ำเงิน คือ ไฟโคไซยานิน นำมาใช้เป็นสีผสมอาหารในไอศกรีม และในเครื่องสำอาง เป็นต้น การใช้สาหร่ายสไปรูลินาเป็นส่วนผสมของเครื่องสำอางที่ช่วยลบรอยเหี่ยวย่นของผิวหน้า และยังมีแนวโน้มในการใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากสาหร่ายชนิดนี้มีคุณค่าทางอาหารสูงและยังช่วยกระตุ้นอัตราการเจริญ อัตราการรอด อีกทั้งสารไฟโคไซยานิน และพอลิแซคคาไรด์บางชนิดในสาหร่ายสไปรูลินายังช่วยกระตุ้นภูมิคุ้มกันในลูกกุ้งได้ (จงกล, 2552)

ประโยชน์ทางด้านโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลินา

ปัจจุบันมีการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสาหร่ายสไปรูลินาเป็นอาหารเพื่อสุขภาพหรือเป็นอาหารที่อุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหารสูง และมีครบถ้วนทั้ง สารต้านออกซิเดชัน บีตา-แคโรทีน กรดไขมันโอเมก้า-3 ใยอาหาร แร่ธาตุ วิตามิน ได้แก่ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินบี 3 วิตามินบี 6 วิตามินบี 12 วิตามินเอ และ วิตามินเค กรดไขมันจำเป็น รงควัตถุต่างๆ กรดอะมิโนที่จำเป็น รวมถึงสารชีวโมเลกุลที่มีคุณค่าหลายชนิด (มณชัย และ สาโรจน์, 2554) ดังแสดงในตาราง 1 ในสาหร่ายสไปรูลินามีกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่หลายพันธะ (Polyunsaturated fatty acid, PUFA) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย โดยเฉพาะกรดแกมม่า-ลิโนเลนิค หรือ GLA (Gamma Linolenic Acid) รงควัตถุที่สำคัญของสาหร่ายสไปรูลินา ได้แก่ บีตา-แครอทีน (β-carotene) คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) และ ซี-ไฟโคไซยานิน (C-phycocyanin) ชนิดและปริมาณของรงควัตถุดังกล่าวในผลิตภัณฑ์สาหร่ายสไปรูลินา ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สายพันธุ์ การเพาะเลี้ยง และกรรมวิธีการแปรรูปเป็นต้น (สินีนาฎ, 2550)

เมื่อเปรียบเทียบสาหร่ายสไปรูลินากับอาหารอื่นๆ พบว่าสาหร่ายสไปรูลินามีแคลเซียมมากกว่านมร้อยละ 300 สาหร่ายสไปรูลินามีธาตุเหล็กมากกว่าผักโขมร้อยละ 2300 สาหร่ายสไปรูลินามีบีตา-แคโรทีนมากกว่าแครอทร้อยละ 3900 สาหร่ายสไปรูลินามีโปรตีนมากกว่าเต้าหู้ร้อยละ 375 สาหร่ายสไปรูลินา 3 กรัมมีสารต้านออกซิเดชันและต้านการอักเสบมากกว่าการรับประทานผัก และเมื่อเปรียบเทียบระดับสารพฤกษเคมี สาหร่ายสไปรูลินามีศักยภาพมากกว่าบลูเบอร์รี่ 31 เท่า มากกว่าผักโขม 60 เท่า และมากกว่าแอปเปิ้ล 700 เท่า (Moorhead et al., 2006)

ตาราง 1 ข้อมูลทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลินาผง

องค์ประกอบ[a]	ต่อ 100 กรัม
สารอาหารหลัก	
พลังงาน	373
ปริมาณไขมันทั้งหมด	4.3 g
ไขมันอิ่มตัว	1.95 g
ไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน	1.93 g
ไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว	0.26 g
คอเลสเตอรอล	<0.1 mg
ปริมาณคาร์โบไฮเดรททั้งหมด	17.8 g
ใยอาหาร	7.7 g
น้ำตาล	1.3 g
แลคโตส	<0.1 g
โปรตีน[b]	63g
วิตามิน	
วิตามินเอ (100% β-carotene)[b]	352,000 IU
วิตามินเค	1090 mcg
วิตามินบี 1 (ไทอามิน)	0.5 mg
วิตามินบี 2 (ไรโบฟลาวิน)	4.53 mg
วิตามินบี 3 (ไนอะซิน)	14.9 mg
วิตามินบี 6 (ไพริดอกซาล)	0.96 mg
วิตามินบี 12	162 mcg
เกลือแร่	
แคลเซียม	468 mg
เหล็ก	87.4 mg
ฟอสฟอรัส	961 mg
ไอโอดีน	142 mcg
แมกนีเซียม	319 mg

ตาราง 1 (ต่อ)

องค์ประกอบ[a]	ต่อ 100 กรัม
สังกะสี	1.45 mg
ซีลีเนียม	25.5 mcg
ทองแดง	0.47 mg
แมงกานีส	3.26 mg
โครเมียม	<400 mcg
โพแทสเซียม	1,660 mg
โซเดียม	641 mg
สารธรรมชาติ (Phytonutrient)	
ไฟโคไซยานิน[b]	17.2%
คลอโรฟิลล์[b]	1.2%
เอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเตส (SOD)	531,000 IU
กรดแกมมาไลโนเลนิก (GLA)	1080 mg
แคโรทีนอยด์ทั้งหมด (mean)[b]	504 mg
เบต้าแคโรทีน (mean)[b]	211 mg
ซีแซนทีน	101 mg
กรดอะมิโนที่จำเป็น (mg)	
ฮีสทิดีน (Histidine)	1000
ไอโซลิวซีน (Isoleucine)	3500
ลิวซีน (Leucine)	5380
ไลซีน (Lysine)	2960
เมไทโอนีน (Methionine)	1170
ฟีนิลอะลานีน (Phenylalanine)	2750
ทรีโอนีน (Threonine)	2860
ทริปโตเฟน (Tryptophan)	1090
วาลีน (Valine)	3940

ตาราง 1 (ต่อ)

องค์ประกอบ[a]	ต่อ 100 กรัม
กรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น (mg)	
อะละนีน (Alanine)	4590
อาร์จีนีน (Arginine)	4310
กรดแอสปาติก (Aspartic acid)	5990
ซีสเทอีน (Cystein)	590
กรดกลูตามิก (Glutamic acid)	9130
ไกลซีน (Glycine)	3130
โพรลีน (Proline)	2380
ซีรีน (Serine)	2760
ไทโรซีน (Tyrosine)	2500

หมายเหตุ: [a] ข้อมูลทั่วไป

[b] ข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ

ที่มา : Gershwin and Belay (2008)

ประโยชน์ทางด้านการแพทย์ของสาหร่ายสไปรูลินา

สาหร่ายสไปรูลินานอกจากจะเป็นที่รู้จักในด้านของการเป็นอาหารหรืออาหารเสริมแล้ว ยังเป็นที่รู้จักในแง่ของการเป็นยารักษาโรค ซึ่งปัจจุบันนี้มีการวิจัยออกมาอย่างแพร่หลาย โดยพบว่าสาหร่ายชนิดนี้มีสรรพคุณทางการเป็นยารักษาโรค เช่น สามารถรักษาโรคเบาหวาน อาการท้องอืด ท้องเฟ้อ โรคตับอักเสบ โรคตับแข็ง โรคตับอ่อนเรื้อรัง ต้อกระจก ต้อหิน โรคแผลในกระเพาะอาหาร โรคผมร่วง และลดความเครียด ซึ่งสามารถทำให้โรคเหล่านี้หายขาดในบางราย และทำให้อาการทุเลาลงในบางราย นอกจากนี้ยังมีรายงานเกี่ยวกับสรรพคุณของสาหร่ายสไปรูลินาว่าสามารถช่วยลดระดับคลอเรสเทอรอลในเลือด รวมถึงสามารถใช้เป็นอาหารเสริมในการลดความอ้วนได้ด้วย (เจียมจิตต์, 2532; ยุวดี, 2546)

สารเคมีบางตัวที่มีอยู่ในสาหร่ายสไปรูลินาที่สามารถช่วยรักษาโรคต่างๆ ได้ เช่น สารซัลโฟลิปิด (sulfolipid) เป็นสารกลุ่มไขมันที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ มีประสิทธิภาพในการ

ต้านไวรัส HIV สารเคมีอีกชนิดหนึ่งคือ บีตา-แคโรทีน จะพบมากในผักและผลไม้ที่มีสีส้มเหลือง หรือแดงรวมถึงสาหร่ายสไปรูลินาด้วย หากมีการรับประทานในระดับปกติหรือระดับสูงมีผลช่วยป้องกันการเกิดมะเร็งในมนุษย์ เนื่องจากเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน สาเหตุของการเกิดโรคมะเร็ง

รงควัตถุที่ให้สีน้ำเงินหรือฟ้าพบในสาหร่ายสไปรูลินามีชื่อว่า ไฟโคไซยานิน นอกจากการใช้สีจากรงควัตถุดังกล่าวไปใช้ในการผสมอาหาร ยา หรือเครื่องสำอางแล้วยังพบว่าการบริโภคอาหารที่มีไฟโคไซยานินเป็นองค์ประกอบจะช่วยป้องกันและยับยั้งอาการของโรคมะเร็ง มีสมบัติในการต้านออกซิเดชัน และต้านการอักเสบ (ยุวดี, 2546) ซึ่งในการวิจัยของ Hanaa and El-Baky (2003) ได้ศึกษาสมบัติของไฟโคไซยานินในการยับยั้งเซลล์มะเร็งโดยการวัดการรอดชีวิตจากร้อยละการอยู่รอดของ Ehrlich Ascites Carcinoma Cells (EACC) หรือ มะเร็งคาร์ซิโนมา เป็นมะเร็งที่เกิดจากเนื้อเยื่อบุผิว และเป็นมะเร็งชนิดที่พบได้บ่อยที่สุด เกือบทั้งหมดของโรคมะเร็ง (ประมาณร้อยละ 90-95) พบว่าเซลล์ที่ให้ไฟโคไซยานินมีการรอดชีวิตลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดจากสาหร่ายสไปรูลินาเพิ่มขึ้น เนื่องจากไฟโคไซยานินจะยับยั้งการสร้าง DNA ของเซลล์มะเร็ง

ไม่เพียงแต่สารเคมี หรือรงควัตถุเท่านั้นที่สามารถใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ได้ ในผนังเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลินามีส่วนประกอบของพอลิแซคคาไรด์ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านการแพทย์ได้เช่นกัน ที่ผ่านมามีงานศึกษาวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับพอลิแซคคาไรด์จากสาหร่ายสไปรูลินา ดังในการศึกษาของ Qishen et al. (1988) ได้ทำการทดลองโดยใช้พอลิแซคคาไรด์จากผนังเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลินาไปกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์เอนโดนิวคลีเอส (Endonuclease) ซึ่งทำหน้าที่ซ่อมแซม DNA ทำให้การแบ่งตัวของเซลล์แม่นยำเหมือนเดิม หากเอนไซม์ชนิดนี้ถูกยับยั้ง เช่น ผ่านการฉายรังสีหรือถูกพิษ DNA จะเกิดการเสียหาย หากไม่ได้รับการซ่อมแซมจะทำให้ไม่สามารถควบคุมการเจริญของเซลล์ได้ และอาจกลายเป็นมะเร็งขึ้นในที่สุด จากผลการศึกษาดังกล่าว พบว่าพอลิแซคคาไรด์ของสาหร่ายสไปรูลินาทำหน้าที่ช่วยซ่อมแซม DNA ของเอนไซม์ชนิดนี้ให้ทำหน้าที่ได้ดียิ่งขึ้น และในงานวิจัยของ Lisheng et al. (1991) ได้ทำการทดลอง โดยใช้พอลิแซคคาไรด์ที่สกัดจากสาหร่ายสไปรูลินามาทดสอบในหนูที่เป็นมะเร็ง พบว่าสามารถยับยั้งการแบ่งตัวของเซลล์มะเร็งตับของหนูได้โดยใช้พอลิแซคคาไรด์สกัดที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม ซึ่งพอลิแซคคาไรด์จะไปยับยั้งการสร้าง DNA ที่เกิดจากการรวมตัวของ thymidine, uridine และ leucine เป็นสาย DNA และเกิดการสังเคราะห์โปรตีนของมะเร็ง sarcoma 180 และ ascitic heptoma cells ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง

ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (antioxidant activity)

อนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ (free radical) เป็นอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่มีหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งอะตอม เป็นอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ ไม่มีความเสถียร ว่องไวมาก ซึ่งจะเป็นตัวที่ทำลายไขมัน เนื้อเยื่อและเซลล์ต่างๆ ในร่างกาย ทำให้เป็นโรค เช่น โรคมะเร็ง โรคหัวใจและหลอดเลือด และโรคที่เกี่ยวข้องกับภาวะเสื่อมหรือชราภาพ การทำลายของอนุมูลอิสระจะไม่หยุดนอกจากมีอะไรมายับยั้ง อนุมูลอิสระเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากการใช้อาหาร และออกซิเจนเป็นพลังงาน หากร่างกายยังคงต้องการพลังงาน อนุมูลอิสระก็จะเกิดขึ้นไม่หยุด ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอนุมูลอิสระในร่างกายมีทั้งปัจจัยภายในร่างกาย และปัจจัยภายนอกร่างกาย ปัจจัยภายนอกที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ เช่น รังสีจากแสงอาทิตย์ การสูบบุหรี่ และสารพิษต่างๆ ความเสื่อมโทรมต่างๆ ที่เกิดจากอนุมูลอิสระทำให้เกิดมะเร็ง และโรคร้ายแรง (เจียมจิตต์, 2535; วรพล, 2555) ดังนี้

ปัจจัยภายในร่างกาย (Halliwell, 1995; Halliwell, 1999; Konstan and Berger, 1993)

การสร้างและการสลายโมเลกุลของสารที่เรียกว่ากระบวนการเมทาบอลิซึมถือเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ อีกทั้งการกินอาหารที่อิ่มเกินไป การได้รับบาดเจ็บทางกาย การอักเสบจากการติดเชื้อ ความเครียด การทำงานหนัก และการออกกำลังกายที่หักโหมก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระได้ ตัวอย่างปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ได้แก่

ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นเอง (auto oxidation) แบ่งออกเป็น 3 ระยะ คือ

ระยะเหนี่ยวนำเริ่มต้น (initiation) เป็นระยะที่กรดไขมันแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระโดยมีแสง ความร้อน และไอออนของโลหะหนักที่มีวาเลนซีตั้งแต่ 2 ขึ้นไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้มีการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ติดกับคาร์บอนที่มีพันธะอยู่ ดังสมการ

$$RH + \text{initiator} \xrightarrow[T]{\text{light}} \dot{R} + \dot{H}$$

ระยะเพิ่มจำนวน (propagation) เป็นระยะที่อนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกซี่ (peroxy radical) แล้วทำปฏิกิริยาต่อกับกรดไขมัน

เกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydro peroxide) และอนุมูลอิสระ โดยไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ที่เกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่ไม่มีกลิ่นหรือรสชาติ แต่จะแตกตัวต่อไปได้แอลดีไฮด์ คีโตน กรดอินทรีย์ และแอลกอฮอลล์หลายชนิด ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์แก่อาหาร โดยมีแสง และความร้อนเป็นตัวเร่ง อนุมูลอิสระดังกล่าวจะเพิ่มขึ้น และอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นก็สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนใหม่ได้ต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ดังสมการ

$$R^{\bullet} + O_2 \longrightarrow ROO^{\bullet}$$

$$ROO^{\bullet} + RH \longrightarrow ROOH + R^{\bullet}$$

ระยะสิ้นสุด (Termination) เป็นระยะที่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นรวมตัวกันทำให้เกิดเป็นโมเลกุลที่เสถียร โดยอนุมูลอิสระที่เหลืออยู่จะจับกันเอง ทำให้การเกิดเปอร์ออกไซด์สิ้นสุดลง ดังสมการ

$$R^{\bullet} + R^{\bullet} \longrightarrow RR$$

$$ROO^{\bullet} + ROO^{\bullet} \longrightarrow ROOR + O_2$$

ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง เอนไซม์ที่มีผลกระตุ้นการสร้างอนุมูลอิสระภายในร่างกายมี 2 ชนิด ได้แก่

เอนไซม์แซนธีนออกซิเดส (xanthine oxidase : XO) ทำหน้าที่สำคัญในกระบวนการสลายเบสพิวรีน (purine) โดยเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนไฮโพแซนธีน (hypoxanthine) เป็นแซนธีน (xanthine) และ แซนธีนเป็นกรดยูริก (uric acid) พร้อมๆ กับเคลื่อนย้ายอิเล็คตรอนให้ออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2^{\bullet-}$)

เอนไซม์ลิพอกซีจีเนส (lipoxygenase: LOX) เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (polyunsaturated fatty acid) เช่น กรดลิโนเลอิก ลิโนเลนิก และอะราคิโดนิก ภายในโมเลกุลของเอนไซม์นี้มีเหล็ก (Fe^{2+}) เป็นส่วนประกอบอยู่ทำหน้าที่ดึงอะตอมไฮโดรเจนจากกรดไขมัน และเติมออกซิเจนให้กับกรดไขมันเกิดเป็นไฮโดรเปอร์-ออกไซด์ ซึ่งจะสลายตัวเป็นอนุมูลของกรดไขมันต่อไป

กระบวนการกำจัดสิ่งแปลกปลอมของเม็ดเลือดขาว

ในขั้นตอนการทำลายสิ่งแปลกปลอมโดยเฉพาะเชื้อโรคที่ถูกกลืนกินเข้ามาภายในร่างกาย เซลล์เม็ดเลือดขาวจะมีการดึงโมเลกุลออกซิเจน (O_2) มาใช้เป็นจำนวนมากเพื่อ

ผลิตเป็นอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2^{\cdot-}$) โดยการทำงานของเอนไซม์ NADPH ออกซิเดส (NADPH oxidase) ที่อยู่บนเยื่อบุชั้นนอก (outer membrane) ของเม็ดเลือดขาว

โลหะทรานสิชัน (transition metal)

โลหะทรานสิชัน 2 ชนิดคือ เหล็ก (Fe^{2+}) และทองแดง (Cu^{2+}) ที่มีอยู่ทั่วไปในร่างกายสามารถเร่งการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลจากซูปเปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) ได้

ปัจจัยภายนอกร่างกาย (Gressier et al., 1994; Voest et al., 1994; Bast et al., 1991; Valacchi, 2004) ได้แก่

ยารักษาโรคบางชนิด สารเคมีบำบัดที่ใช้รักษาโรคมะเร็ง ยาบางชนิดที่รับประทานเข้าไปในร่างกายสามารถก่อให้เกิดอนุมูลอิสระได้โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ยาในกลุ่มต้านจุลชีพและต้านมะเร็ง เช่น บลีโอไมซิน (bleomycin) แอนทราไซคลินส์ (antracyclines) และ เมโธ-ทรีเสต (methotrexate) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเสริมฤทธิ์ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (prooxidation)

รังสี การใช้รังสีรักษาโรค เช่น รังสีเอกซ์ (X-ray) รังสีแกมมา (γ-ray) อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นในร่างกาย หรือรังสีต่างๆ เช่น รังสีปรมาณู และรังสีจากเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น เตาไมโครเวฟ คอมพิวเตอร์ ทีวี โทรศัพท์มือถือ เนื่องจากการถ่ายทอดพลังงานให้กับน้ำซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์แล้วก่อให้เกิดปฏิกิริยาขั้นต่อไป (secondary reaction) กับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในเซลล์นั้นเกิดเป็นอนุมูลอิสระ

ควันบุหรี่ ในควันบุหรี่มีส่วนประกอบของ ไนตริกออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_2) และเพอรอกซีไนไตรท์ ($ONOO^-$) รวมถึงสารมลพิษได้แก่ ควันไฟ ควันจากท่อไอเสีย เขม่าควัน สารพิษจากโรงงานอุตสาหกรรม ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) ซึ่งจะถูกกำจัดออกจากร่างกายโดยเอนไซม์ ไซโทโครม P-450 ไฮดรอกซีเลส (cytochrome P-450 hydroxylase) ที่มีอยู่มากในเซลล์ตับและพบได้บ้างในเซลล์ปอดและลำไส้เล็ก ทำให้เป็นสาเหตุของการสร้างอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ภายในเซลล์ดังกล่าว

โอโซน โอโซนไม่ได้เป็นอนุมูลอิสระแต่จัดเป็นสารออกซิไดส์ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถเปลี่ยนรูปเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลได้จากการกระตุ้นของคลื่นแสง จากปัญหามลพิษทางอากาศ ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิสูง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องทำความร้อน และจากกระบวนการผลิตต่างๆ ในอุตสาหกรรม ทำให้เกิดการปล่อยสาร

ในกลุ่ม NOx (เช่น NO_2, NO) ซึ่งจะสลายตัวเป็น nitric oxide (NO) และอนุมูลอิสระของออกซิเจนที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากจะเกิดการทำ ปฏิกิริยาต่อไปซึ่ง ก๊าซโอโซนก็เป็นสาเหตุสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา

อาหารปิ้ง ย่าง ทอดที่เกรียมไหม้ อาหารที่ทอดซ้ำๆ การนำน้ำมันทอดอาหารที่มีความร้อนจัดๆ กลับมาใช้ใหม่ ก็เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระได้เช่นกัน อาหารเหล่านี้ก่อให้เกิดสารไนโตรซามีน สารกลุ่มพัยโรลัยเซต (pyrolysates) พบมากในส่วนที่ไหม้เกรียมของอาหารปิ้ง ย่าง สารกลุ่มนี้มีฤทธิ์ก่อกลายพันธุ์สูงมาก และสารกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbon) เป็นสารพิษที่ค่อนข้างร้ายแรงมาก ส่วนใหญ่เป็นสารเริ่มต้นของสารกลายพันธุ์เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ เช่น ไขมันที่อยู่ในเนื้อสัตว์ น้ำมัน และไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงพบสารชนิดนี้ในส่วนที่ไหม้เกรียมของอาหาร ปิ้ง ย่าง อาหารทอดกรอบ อาหารรมควัน เป็นต้น

สารต้านออกซิเดชัน

สารต้านออกซิเดชัน (antioxidants) คือสารที่ทำลายอนุมูลอิสระ โดยสารต้านออกซิเดชันสามารถให้อิเล็คตรอนกับอนุมูลอิสระหรือสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนนั้น สำหรับสารต้านออกซิเดชันจะมีอิเล็คตรอนอิสระอยู่ จำเป็นต้องมีสารอื่นมาช่วยให้เกิดการสร้างสารต้านออกซิเดชันตัวแรกขึ้นอย่างต่อเนื่องสารต้านออกซิเดชันเหล่านี้ทำหน้าที่ป้องกันสารชีวโมเลกุลที่สำคัญภายในร่างกาย เช่น ไขมัน ดีเอ็นเอ และเอนไซม์ที่สำคัญ หรือป้องกันโครงสร้างของเซลล์ เช่น เยื่อบุผิวของเซลล์หรือออร์แกเนล (organelles) อีกทั้งสารต้านออกซิเดชันยังสามารถกำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเป็นลำดับ โดยออกฤทธิ์ที่จุดต่างๆ ของการสร้างอนุมูลอิสระ (วรพล, 2555)

ในการต้านอนุมูลอิสระจะมีโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่อการออกฤทธิ์ สำหรับโครงสร้างที่มีผลให้มีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันที่ดี ได้แก่

โครงสร้าง *catechol* หรือ ortho-diphenolic group ถือเป็นโครงสร้างที่สำคัญที่สุด เนื่องจากสามารถยังยั้งอนุมูลอิสระโดยทำหน้าที่เป็น hydrogen donating และยังสามารถจับ หรือคีเลตโลหะโดยเฉพาะทองแดง และเหล็ก ซึ่งทั้งทองแดง และเหล็กเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระในร่างกาย

พันธะคู่ที่ตำแหน่ง 2-3 คอนจูเกท กับหมู่ 4- oxo ในวง C ซึ่งโครงสร้างนี้จะไปเพิ่มความเสถียรของอนุมูล flavonoid phenoxyl

หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3 และ 5 จากการมีหมู่ไฮดรอกซิลแทนตำแหน่งดังกล่าว ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล โครงสร้างจะมีลักษณะแบนราบในระนาบเดียวกัน ส่งผลให้การ delocalization ของอิเล็กตรอนผ่านพันธะคู่ (π-bond) เกิดได้ดีขึ้น (โอภา และคณะ, 2549)

การทดสอบความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

การทดสอบความสามารถในการต้านออกซิเดชัน จะเป็นการทดสอบความสามารถในการยับยั้งหรือกำจัดอนุมูลอิสระ โดยการเข้าไปหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่เพื่อไม่ให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ จึงมีวิธีการที่ใช้ทดสอบความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ดังนี้

สารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด (total polyphenol compounds, TPC)

การวัดปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด หลักการ คือ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดทำปฏิกิริยากับ Folin-Ciocalteu reagent ซึ่งประกอบด้วย phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents สารดังกล่าวจะถูกรีดิวซ์โดย phenolic hydroxyl groups ของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเกิดเป็น tungsten และ molybdenum blue ซึ่งให้สีน้ำเงินและดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายกรดแกลลิกที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นสารละลายมาตรฐาน (Kim and Lee, 2002)

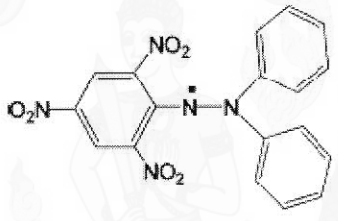
2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging capacity assay

วิธีนี้จะวัดความสามารถในการยับยังยั้ง 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical (DPPH) โดย DPPH เป็นสารอนุมูลไนโตรเจนที่ค่อนข้างคงตัว (ภาพ 2) การวิเคราะห์จะเป็นการวัดความสามารถในการรีดิวซ์ โดยสีขณะเริ่มต้นการทดลองจะให้สารสีเข้ม เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นสารจะมีสีซีดจางลง ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร หากมีปริมาณสารต้านออกซิเดชันมาก สีของสารละลายก็จะลดลงเร็ว ค่าที่ได้สามารถแสดงได้หลายรูปแบบ ได้แก่ แสดงเป็นร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระ (% radical scavenging activity) ค่าความเข้มข้นของสารสกัดที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50 จากปริมาณอนุมูลอิสระเริ่มต้น (IC_{50}) หรือค่า

ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (antiradical efficiency, AE) หรือคำนวณเป็น % inhibition ดังนี้ (ขนิษฐา, 2553: สินีนาฏ, 2550)

$$\% \text{ inhibition} = [(A_{517\ control} - A_{517\ test\ sample})/A_{517\ control}] \times 100$$

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย มีความแม่นยำ ใช้เวลาน้อย และใช้เครื่องมือแค่เครื่องวัดการดูดกลืนแสงเท่านั้น



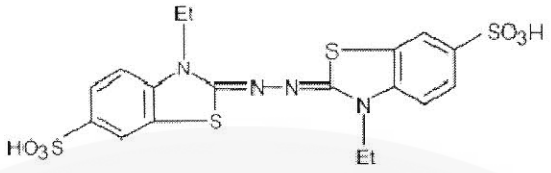
ภาพ 2 โครงสร้างทางเคมีของ DPPH
ที่มา: Prior et al. (2005)

การวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์ของสารต้านออกซิเดชัน (reducing power assay)

ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของแต่ละสารที่สกัดได้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์ริกไอออนกับสารสกัดแต่ละชนิดมีค่าคงที่ และค่าของการดูดกลืนแสงที่วัดได้มีความยาวคลื่น 700 nm โดยใช้หลักการทำงานของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยจะมีค่าแปรผันตามความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่เกิดขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าดูดกลืนแสงจะแสดงถึงความสามารถของการเป็นรีดิวซิงเอเจนต์ (เพชรรุ่ง และคณะ, 2555)

ABTS radical cation decolorization assay

สาร ABTS (2,2-azonobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonate)) มีสูตรโครงสร้างดังนี้



ภาพ 3 โครงสร้างทางเคมีของ ABTS
ที่มา: Prior et al. (2005)

สำหรับการทดสอบจะนำ ABTS มาทำให้เป็นอนุมูลอิสระโดยการถูกรีดิวซ์ด้วย potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) กลายเป็น $ABTS^{\cdot+}$ มีลักษณะเป็นสีฟ้าอมเขียว (ขนิษฐา, 2553) โดยจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660, 734 และ 840 นาโนเมตร หลักการของวิธีนี้คือวัดความสามารถของสารต้านออกซิเดชันในการยับยั้งอนุมูลเพอร์ออกซิลของ ABTS วัดได้จากเมื่อเติมสารทดสอบที่มีกิจกรรมต้านออกซิเดชัน จะทำให้ $ABTS^{\cdot+}$ ลดลงมีสีจางลง โดยคำนวณเป็น % inhibition ดังนี้

$$\% \text{ inhibition} = [(A_{734\ control} - A_{734\ test\ sample})/A_{734\ control}] \times 100$$

วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย อนุมูล $ABTS^{\cdot+}$จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับสารต้านออกซิเดชันประมาณ 5 นาที $ABTS^{\cdot+}$ อนุมูล $ABTS^{\cdot+}$ สามารถละลายได้ทั้งในน้ำและสารละลายอินทรีย์ ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ไม่ว่าจะเป็นสารที่ละลายน้ำ หรือสารที่ละลายในลิปิด (โอภาและคณะ, 2549)

ผลของการทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

การทำแห้ง (drying)

การทำแห้งหรือการดึงน้ำออก เป็นวิธีการถนอมอาหารที่เก่าแก่ที่สุดวิธีหนึ่งซึ่งแต่เดิมกระบวนการทำแห้งจะอาศัยธรรมชาติ คือ แสงแดดทำให้น้ำในอาหารระเหยออกจนมีความชื้นที่ต่ำในระดับที่ไม่เกิดการสูญเสียเนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ เอนไซม์ และปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ การทำแห้งนอกจากจะทำให้อาหารสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานแล้ว ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านบรรจุภัณฑ์ การเก็บรักษาและการขนส่งได้ เนื่องจากอาหารที่ผ่านการระเหยน้ำจะมีน้ำหนัก

และปริมาตรลดลง อาหารที่ได้มีความคงตัว แต่ข้อด้อยของการทำแห้งต่ออาหาร คือ อาหารส่วนใหญ่จะไวต่อความร้อนทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอาหาร เช่น มีการหดตัวลงของอาหารเนื่องจากการแห้งกรอบ หรือเกิดกลิ่นรสไหม้ขึ้น การทำแห้งอาจทำให้เกิดการเสื่อมเสียจากเอนไซม์ มีการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันนี้การพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีการผลิตเครื่องจักรต่างๆ ที่ใช้ในการทำแห้งโดยมีวัตถุประสงค์ในด้านการคืนรูปของผลิตภัณฑ์ให้ใกล้เคียงกับของสดมากที่สุด รักษาองค์ประกอบของอาหารหรือคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้สูง อีกทั้งเครื่องจักรเหล่านี้สามารถควบคุมอุณหภูมิ และการหมุนเวียนของอากาศได้ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (สมศิริ, 2542)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำแห้งอาหาร

อาหารที่นำมาทำแห้งมีหลากหลายรูปแบบ โดยอาหารที่จะนำมาทำแห้งอาจเป็นของเหลว ของกึ่งแข็งกึ่งเหลว หรือของแข็ง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ซึ่งอาจเป็นชิ้น เป็นแผ่น หรือเป็นผง ที่มีลักษณะ และคุณภาพที่แตกต่างกันอาจจะต้องคำนึงถึงการเตรียมอาหารก่อนการทำแห้ง ดังนั้นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำแห้งอาหาร มีดังนี้ (พิชญา และคณะ, 2547)

ลักษณะธรรมชาติของอาหาร อาหารที่มีพื้นที่ผิวมาก หรือมีรูพรุนจะมีอัตราการอบแห้งเร็ว เนื่องจากพื้นที่การระเหยของน้ำในอาหารเพิ่มมากขึ้น

รูปร่างและความหนาของอาหาร โดยอัตราการทำแห้งจะแปรผกผันกับความหนาของอาหาร

ปริมาณของอาหารที่นำมาอบแห้ง หากนำอาหารในปริมาณที่มากมาอบแห้ง อัตราการอบแห้งก็จะช้าลง

ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม

ความดันกับการระเหยของน้ำ โดยการทำแห้งภายใต้ความดันจะทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น

วิธีการทำแห้ง

การทำแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง หากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลง วิธีการทำแห้งมีหลายวิธีดังนี้ (มานิตย์, 2540; ลักขณา และคณะ, 2540; พรพล, 2545; วิไล, 2545)

การทำแห้งด้วยแสงแดด (sun drying) การทำแห้งด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย และเสียค่าใช้จ่ายน้อยมากแต่มีข้อเสียหลายอย่างเช่น ตัวอย่างที่ได้มักไม่ค่อยบริสุทธิ์เนื่องจากสัมผัสกับอากาศโดยตรง และองค์ประกอบต่างๆ ที่สำคัญในอาหารจะมีปริมาณน้อยกว่าการทำแห้งโดยวิธีอื่นๆ และมักได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ ในการทำแห้งวิธีนี้ต้องขึ้นกับสภาพอากาศที่ไม่แน่นอน และอาจเกิดการเสียหายจากแสงแดดที่มากเกินไปหรือเกิดการเน่าเสียก่อนที่จะแห้ง ข้อเสียของวิธีนี้จะเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบที่สำคัญในอาหาร เช่น โปรตีนและวิตามินจะถูกทำลายไปมาก และมีปัญหาเรื่องกลิ่นเนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์

การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ (solar drying) วิธีนี้จะพัฒนามาจากการทำแห้งด้วยแสงแดด เนื่องจากเกิดปัญหาการปนเปื้อนจากสิ่งปนเปื้อน และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ สำหรับการทำแห้งโดยพลังงานจากแสงอาทิตย์ เป็นการอบแห้งด้วยวิธีที่ง่ายสามารถทำได้โดยใช้ไม้ทำเป็นกล่องภายในทาสีดำเพื่อเพิ่มอัตราการทำแห้งให้เร็วขึ้นและปิดด้วยกระจกหนา 2 มิลลิเมตร จะทำให้ได้อุณหภูมิภายในประมาณ 60-65 องศาเซลเซียส

การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying) เป็นการอบแห้งโดยให้อาหารสัมผัสกับพื้นผิวโลหะที่ร้อนโดยตรงทำให้ความชื้นในอาหารระเหยไป เครื่องมือนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งโลหะเดี่ยวหรือคู่ ภายในกลวงและมีไอน้ำร้อนไหลวนเวียนอยู่ ลูกกลิ้งจะถูกตรึงให้หมุนรอบแกนในแนวนอนด้วยความเร็วที่สามารถปรับได้ตามต้องการ อัตราเร็วในการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับการส่งผ่านความร้อนจากผิวของลูกกลิ้งไปยังอาหาร การทำแห้งวิธีนี้มีอัตราการทำแห้งสูงมาก มักใช้อุณหภูมิสูงกว่า 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2-30 วินาที

การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย (spray drying) การทำแห้งด้วยวิธีนี้อาหารที่มีลักษณะเหลวจะถูกพ่นเข้าไปในกระแสลมร้อนเป็นฝอยเล็กๆ ขนาด 10-200 ไมครอน ทำให้มีพื้นที่ผิวมากเพื่อสัมผัสกับลมร้อนสูงทำให้อัตราการทำแห้งเร็วมาก ความชื้นในอาหารจะระเหยอย่างรวดเร็วและแขวนลอยอยู่ในช่วง 1-10 วินาทีเท่านั้น จึงไม่ทำให้อาหารเกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อน และสามารถลดความชื้นให้เหลือร้อยละ 5-10 อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียด วิธีนี้เป็นวิธีที่รวดเร็ว และได้ผลิตภัณฑ์ที่พร้อมบรรจุ

การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง (freeze drying) เป็นการทำแห้งแบบไม่ต่อเนื่องโดยต้องทำให้อาหารแข็งตัวโดยผ่านการแช่เยือกแข็งมาแล้ว หลังจากนั้นจึงทำแห้งด้วยการระเหิดที่อุณหภูมิต่ำและมีความดันสุญญากาศสูงพอโดยน้ำในอาหารจะระเหิดเป็นไอน้ำออกไป วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถรักษาสภาพของอาหารได้ค่อนข้างเหมือนเดิม มีการสูญเสียคุณค่าทางอาหารน้อย แต่เครื่องมือที่ใช้มีราคาสูง ค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานานในการทำแห้ง นอกจากนี้มีข้อจำกัดทางเทคนิคเมื่อต้องการผลิตจำนวนมาก จึงไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน (hot air drying) การอบแห้งด้วยวิธีนี้อาหารจะถูกวางบนถาด อากาศจะถูกดูดโดยพัดลมเข้าในเครื่องผ่าน heat coil แล้วจึงไปไหลวนผ่านอาหารจนกระทั่งอาหารแห้ง เป็นวิธีการอบแห้งที่ง่าย แต่วิธีนี้ระยะเวลาในการอบที่นาน และการใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง อาจทำให้คุณค่าทางอาหารลดลง

การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ (vacuum drying) เป็นเครื่องอบ (drier) ที่ใช้ทำแห้ง (dehydration) อาหารที่ทำงานภายใต้ภาวะที่ความดันอากาศต่ำกว่าความดันบรรยากาศ (atmoshperic pressure) การเป็นสุญญากาศทำให้น้ำระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำลงการทำให้เกิดสุญญากาศในห้องอบ จะใช้ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) เพื่อสูบอากาศออกการทำแห้งด้วยเครื่องอบสุญญากาศ จะช่วยรักษาคุณภาพของอาหาร ได้ดีกว่าการทำแห้งที่ความดันบรรยากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี สารระเหยยังคงอยู่ในผลิตภัณฑ์ แต่จะมีความไวต่อการดูดความชื้น วิธีนี้ต้องมีการบรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันความชื้นเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษา

ผลของการทำแห้งที่มีต่ออาหารอบแห้งในด้านต่างๆ

การทำแห้งอาหารเป็นวิธีที่นิยมโดยทั่วไป เนื่องจากเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาของอาหาร โดยอาหารที่มีความชื้นต่ำ ค่ากิจกรรมของน้ำน้อยกว่า 0.6 จะมีความปลอดภัยจากจุลินทรีย์ก่อโรค สามารถยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ และสารเคมีต่างๆ สารที่มีประโยชน์ในอาหารมีทั้งชนิดที่ละลายในน้ำ และไม่ละลายในน้ำ หากอาหารเกิดการสูญเสียน้ำอาจส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของอาหารได้ ดังนั้นผลของการทำแห้งที่มีต่ออาหารอบแห้งในด้านต่างๆ มีดังนี้ (วิไล, 2545)

ผลของการทำแห้งที่มีต่อคุณค่าทางอาหาร

การดึงน้ำออกจากอาหาร ไล่ความชื้น และเพิ่มความเข้มข้นของอาหาร เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน การทำแห้งจะทำให้คุณภาพอาหารลดลง โดยเฉพาะวิตามินที่ละลาย

ในน้ำ โดยจะสูญเสียไปกับน้ำ สำหรับคาร์โบไฮเดรตในอาหาร เมื่อให้ความร้อนสูงอาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (browning reaction) ซึ่งจะพบในอาหารพวกผัก ผลไม้ ในระหว่างการทำแห้งจะเกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) และปฏิกิริยาของน้ำตาลรีดิวส์กับกรดอะมิโน ทำให้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ในส่วนของอาหารที่มีไขมันโดยทั่วไปแล้วอาหารที่มีไขมันเมื่อผ่านความร้อนสูงจะทำให้เหม็นหืนได้เร็วขึ้น อาหารชนิดนี้จึงเหมาะต่อการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิไม่สูงมากจนเกินไป เช่น การทำแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศ เป็นต้น และอาหารที่มีโปรตีนเป็นส่วนประกอบหลัก เมื่อทำแห้งโดยใช้ความร้อนสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติ (denature) และความสามารถในการจับกับน้ำ ดังนั้นจึงควรเลือกวิธีการทำแห้งให้เหมาะสมกับองค์ประกอบหลักของอาหาร

ผลของการทำแห้งต่อเอนไซม์

การทำแห้งเป็นการช่วยหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้ เนื่องจากความชื้นของอาหารมีผลต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ โดยหากถ้าความชื้นในอาหารลดลง ปฏิกิริยาของเอนไซม์ก็จะลดลงด้วย แต่อัตราเร็วของปฏิกิริยาของเอนไซม์จะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของเอนไซม์

ผลของการทำแห้งที่มีต่อรงควัตถุในอาหาร

การทำแห้งมีผลทำให้สีของอาหารมีการเปลี่ยนแปลง โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ที่เกิดจากน้ำตาลรีดิวซ์กับหมู่เอมีนที่อยู่ในโมเลกุลของแอมโมเนีย กรดอะมิโน หรือโปรตีน เป็น carbonyl-amine reaction ซึ่งจะทำให้เกิดสีน้ำตาล รวมถึงมีกลิ่นและรสชาติที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น แคโรทีนอยด์ และแอนโทไซยานินจะมีสีซีดลงถ้าใช้อุณหภูมิสูง และเป็นเวลานาน

ผลของการทำแห้งต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร

การระเหยน้ำทำให้ตัวทำละลายที่ผิวอาหารมีความเข้มข้นมากขึ้น ในการใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้อาหาร โดยเฉพาะผลไม้ ปลา เนื้อ เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพที่ผิวหน้าอาหาร ทำให้ผิวหน้าของอาหารจะมีลักษณะแห้งแข็ง อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง และอัตราการทำแห้งมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร โดยการทำแห้งอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสมากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และใช้ระยะเวลานาน

ผลของการทำแห้งต่อกลิ่นรส

การทำแห้งด้วยความร้อนทำให้สารหอมระเหยบางชนิดในอาหาร เช่น สมุนไพร หรือเครื่องเทศ ที่สามารถละลายได้ในน้ำสูญเสียไประหว่างการทำแห้ง เนื่องจากการทำแห้งเป็นการระเหยน้ำออกจากอาหาร การสูญเสียกลิ่นรสของอาหารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของของแข็งในอาหาร

ผลของการทำแห้งต่อการดูดคืนน้ำ

การทำแห้งโดยใช้ความร้อนสูงจะลดระดับการดูดคืนน้ำในอาหาร และความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ มีผลทำให้โปรตีนจับตัวกัน และลดความสามารถในการอุ้มน้ำ สำหรับอัตราเร็วและระดับของการดูดคืนน้ำอาจใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของอาหารได้ โดยการทำแห้งที่สภาวะที่เหมาะสมจะเกิดความเสียหายน้อยกว่า และดูดคืนน้ำได้เร็ว เช่นการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือก-แข็ง เป็นวิธีที่สามารถรักษากลิ่นรส และคุณค่าทางโภชนาการ ได้ดีมาก เกิดการทำลายโครงสร้างและเนื้อสัมผัสน้อยมาก เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สี และลักษณะภายนอกน้อย เกิดโพรงในโครงสร้างทำให้เกิดการดูดน้ำกลับได้อย่างรวดเร็ว และลักษณะของอาหารไม่แตกต่างจากอาหารสดมากนัก เนื่องจากเป็นการทำแห้งโดยไม่ใช้ความร้อน

ผลการทำแห้งต่อจุลินทรีย์

การทำแห้งไม่มีความสามารถในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ การเสียของอาหารแห้งมักมีจุลินทรีย์เป็นสาเหตุหลัก แต่เนื่องจากแบคทีเรียต้องการปริมาณน้ำอิสระมากกว่า 0.90 แบคทีเรียจึงไม่มีผลต่ออาหารแห้ง ยีสต์และรามีส่วนสำคัญในการเสียของอาหารแห้ง โดยอาหารแห้งที่มี ปริมาณน้ำอิสระ 0.80-0.85 จะเสียภายใน 1-2 อาทิตย์ โดยมีเชื้อราเป็นสาเหตุ ถ้าอาหารมีปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.75 จะทำให้เกิดการเสียช้าลง และหากมีปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.65 จะเกิดการเสียของผลิตภัณฑ์น้อยมากและสามารถเก็บรักษาได้นานมากกว่า 2 ปี

การให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิสูงจะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านโภชนาการ และสมบัติของสารต้านออกซิเดชัน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่ได้รับ ปริมาณออกซิเจนภายในระบบ อุณหภูมิ องค์ประกอบของอาหาร ระยะเวลาที่สัมผัสกับความร้อนและแสง (วรพล, 2555)

สารสกัดที่ได้จากธรรมชาติมักมีความเสถียรภาพต่อการแปรรูปอาหารค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจส่งผลต่อปริมาณและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของสารต้านออกซิเดชันได้ เช่น ฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันอาจลดลง ซึ่งการแปรรูป ได้แก่ การแปรรูปด้วยความร้อน การแปรรูปโดยไม่ใช้ความ

ร้อน และผลของการเก็บรักษา สิ่งเหล่านี้มีผลต่อเสถียรภาพของสารต้านอนุมูลอิสระ สำหรับการวิจัยผลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณ 6-gingerol สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสมบัติการต้านออกซิเดชันของขิง (*Zingiber officinale*) พบว่า ขิงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน ให้ปริมาณ 6-gingerol ซึ่งเป็นสารสำคัญที่ให้กลิ่นฉุน รสเผ็ดสามารถยับยั้งอาการปวดและป้องกันการอักเสบได้ไม่แตกต่างกันกับขิงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง แต่การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อนจะให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และสมบัติการต้านออกซิเดชันมากกว่าการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง (ธิดารัตน์ และศศิธร, 2553)

ในงานวิจัยของ นฤมล และศศิธร (2550) ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการแปรรูปต่อคุณสมบัติการต้านออกซิเดชันในบัวบก (*Centella asiatica* (Linn.) ด้วยวิธีทำแห้งแบบถาด (tray-dried) การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย น้ำชาบัวบก และน้ำบัวบกพาสเจอร์ไรส์ พบว่า เมื่อนำตัวอย่างบัวบกที่ผ่านการแปรรูปด้วยวิธีการวัดคุณสมบัติการต้านออกซิเดชันด้วยหลักการวัดคุณสมบัติให้อิเล็คตรอนกับอนุมูลอิสระ ทั้ง 3 วิธี คือวัดคุณสมบัติการให้อิเล็คตรอน (reducing property) ด้วยวิธี total phenol assay วัดคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS พบว่า บัวบกอบแห้งแบบถาด (tray-dried) มีคุณสมบัติต้านออกซิเดชันสูงที่สุด รองลงมาคือบัวบกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง บัวบกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย น้ำชาบัวบก และน้ำบัวบกพาสเจอร์ไรส์ ตามลำดับ ($p<0.05$) ผลที่ได้อาจเกิดจากอุณหภูมิที่ใช้เป็นความร้อนเหมาะสมที่สามารถทำให้เซลล์ของพืชแตกออก ซึ่งสารสำคัญจะถูกปลดปล่อยออกมาได้มากขึ้น และอาจเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดซึ่งส่งผลต่อการเกิด chain breaking และ oxygen scavenging activities ทำให้แสดงคุณสมบัติต้านออกซิเดชันสูงขึ้น (Manzocco et al., 2001) ซึ่งให้ผลที่แตกต่างจากงานวิจัยของ Wu et al. (2013) ที่ได้ศึกษาการทำแห้งเห็ดกระดุมบราซิล (*Agaricus blazei* Murrill) โดยใช้กระบวนการทำแห้งที่แตกต่างกัน 3 วิธีคือ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งด้วยอุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส การทำแห้งแบบสุญญากาศด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.09 MPa และการทำแห้งแบบลมร้อนด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่า วิธีทำแห้งที่มีความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ที่ตรวจสอบด้วยวิธี DPPH, ABTS และความสามารถในการจับ Fe^{2+} พบว่า วิธีการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันดีที่สุด รองลงมาคือการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน ตามลำดับ โดยสมบัติการต้านออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้น อีกทั้งการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งยังทำให้ได้ร้อยละของผลผลิตมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน โดยมีค่าของผลผลิตร้อยละ 12.18, 11.54 และ 11.19 ตามลำดับ

การทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา

สารต้านออกซิเดชันจากสาหร่ายสไปรูลินา

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะประกอบด้วยรงควัตถุ ดังนี้ (ยุวดี, 2546)

คลอโรฟิลล์ เป็นคลอโรฟิลล์เอ

แคโรทีนอยด์ ประกอบด้วย

บีตา-แคโรทีน

แซนโทฟิลล์หลายชนิด ส่วนใหญ่จะเป็นมิกโซแซนทิน มิกโซ-แซนโทฟิลล์

ไฟโคบิลิน ประกอบด้วย

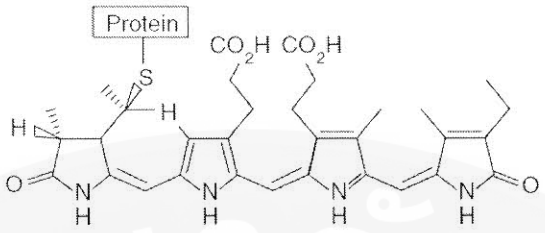
ซี-ไฟโคไซยานิน

ซี-อัลโลไฟโคไซยานิน

ซี-ไฟโคเออริทริน

รงควัตถุดังกล่าวมีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์ ดังนี้

ซี-ไฟโคไซยานิน (C- phycocyanin) หรือ ไฟโคไซยานิน (การมีอักษรซี (C) นำหน้าหมายถึง การพบรงควัตถุดังกล่าวในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน) มีโครงสร้างเป็นโปรตีน (ภาพ 4) มีสีน้ำเงิน ประกอบด้วยธาตุแมกนีเซียม กับธาตุเหล็ก เมื่อรวมกับคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นสีเขียวจึงทำให้สาหร่าย สไปรูลินาเห็นเป็นสีเขียว-น้ำเงิน ซี-ไฟโคไซยานินมีความเข้มข้นถึงร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก โดยสารซี-ไฟโคไซยานินนี้จะพบในสาหร่ายสไปรูลินาเท่านั้น โดยพบว่าซี-ไฟโคไซยานินนี้มีสมบัติต้านออกซิเดชัน และป้องกันการอักเสบ อีกทั้งเนื่องจากซี-ไฟโคไซยานินในสาหร่ายเป็นโปรตีน สาหร่ายจึงเป็นแหล่งผลิตเอนไซม์ที่สำคัญด้วยเพราะเอนไซม์ทุกชนิดจะสร้างมาจากโปรตีนโดยมีถึง 2,000 ชนิด ส่วนใหญ่จะทำหน้าที่ต้านหรือทำลายอนุมูลอิสระ (สมศักดิ์, 2547) จากการที่สไปรูลินาประกอบด้วยซี-ไฟโคไซยานินในปริมาณสูง จึงมีคุณสมบัติหลายประการและมีการนำไปใช้ในงานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นสีผสมอาหารใช้เป็นอาหารเสริมสำหรับมนุษย์ ใช้ผสมอาหารสัตว์ และใช้เป็นตัวรับรู้ทางวิทยาอิมมูน (fluorescent probes) สำหรับการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์พบว่า ซี-ไฟโคไซยานิน สามารถต้านออกซิเดชัน ต้านการอักเสบ ต้านมะเร็ง และต้านแบคทีเรียก่อโรคชนิดที่ดื้อยาบางชนิดได้ (มณชัย, 2554)



ภาพ 4 โครงสร้างทางเคมีของซี-ไฟโคไซยานิน
ที่มา: Gershwin and Belay (2008)

คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) มีสีเขียว มีบทบาทในการสร้างภูมิต้านทาน สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย หยุดโรคเหงือกอักเสบ ทำให้กลิ่นปากหายเหม็นได้ (สมศักดิ์, 2547)

แคโรทีนอยด์ (carotenoid) กลุ่มสารสีส้มที่สำคัญคือ บีตา-แคโรทีน และกลุ่มสารสีเหลืองที่สำคัญ คือ แซนโทฟิล (xanthophylls) โดยแคโรทีนอยด์จะเป็นตัวกระตุ้นภูมิต้านทานของร่างกาย และช่วยต้านออกซิเดชันอย่างมีประสิทธิภาพ (สมศักดิ์, 2547)

จากคุณสมบัติเหล่านี้สาหร่ายสไปรูลินาจึงจัดเป็น King of Antioxidant ที่นอกจากจะกำจัดมะเร็ง ชะลอความเครียด ชะลอความแก่แล้ว ยังสามารถช่วยรักษาโรคต่างๆ ได้อีกด้วย (เจียมจิตต์, 2535)

ในการศึกษาของ สินีนาฎ (2550) ได้ศึกษาผลของของการแปรรูปและอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อปริมาณ ซี-ไฟโคไซยานิน และสมบัติการต้านออกซิเดชันของสารสกัดสาหร่ายสไปรูลินา พบว่า ปริมาณซี-ไฟโคไซยานินมีความสัมพันธ์กับสมบัติการต้านออกซิเดชัน และสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอยมีความคงตัวมากที่สุดในทุกอุณหภูมิของการเก็บรักษา และในการศึกษาของ สินีนาฎ และ ศศิธร (2550) ทำการศึกษาผลของการทำแห้งต่อซี-ไฟโคไซยานินและสมบัติการต้านออกซิเดชันของสารสกัดสาหร่ายสไปรูลินา พบว่าการทำแห้งมีผลต่อปริมาณซี-ไฟโคไซยานินบริสุทธิ์ และชนิดหยาบ รวมทั้งสมบัติการต้านออกซิเดชัน เมื่อเปรียบเทียบสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธีต่างๆ กับสาหร่ายสไปรูลินาทางการค้า พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง และการทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย มีปริมาณซี-ไฟโคไซยานินบริสุทธิ์ และชนิดหยาบสูงสุด และจากการศึกษาคุณสมบัติการต้านออกซิเดชันพบว่าสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งมีประสิทธิภาพสูงสุด

ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินายังมีไม่มาก โดยในงานวิจัยส่วนใหญ่จะพบว่าสารไฟโคไซยานิน คือสารที่มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันที่พบเฉพาะในสาหร่ายสไปรูลินาเท่านั้น ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาเกิดจากการจับกับอนุมูลอิสระ และการยับยั้งการออกซิเดชันของลิพิด อีกทั้งยังสามารถยับยั้งความเสียหายที่เกิดจากการออกซิเดชันของร่างกายที่เกิดจากโลหะ การออกกำลังกายจากปฏิกิริยาไนโตรเซชัน และสารพิษในตับ รวมทั้งความเสียหายจากการออกซิเดชันของเซลล์สมอง ซึ่งที่ผ่านมามีรายงานการวิจัยพบว่า สาหร่ายสไปรูลินา และสารสกัดจากสาหร่ายสไปรูลินามีผลดีต่อระบบภูมิคุ้มกัน มีสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ มีสมบัติการต้านมะเร็ง และมีสมบัติการต้านไวรัส (สินีนาฎ, 2550) และยังพบว่าไฟโคไซยาโนบิลิน ที่เป็นองค์ประกอบของไฟโคไซยานินมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้ดีกว่า วิตามินอี ซีแซนทิน และกรดคาเฟอิค (Hirata et al., 2000) ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเป็นสารแอนติออกซิแดนท์ของสาหร่ายสไปรูลินา ซึ่งจากการศึกษาพบว่า สารสกัดจากสาหร่ายสไปรูลินาด้วยแอลกอฮอล์สามารถยับยั้งการเกิด lipid peroxidation ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของไขมันโดยจะให้ผลดีกว่าสารแอนติออกซิแดนท์จากสารเคมี ได้แก่ วิตามินอี BHA และ บีตาแคโรทีน ส่วนการสกัดด้วยน้ำพบว่ามีความสามารถในการเป็นสารแอนติออกซิแดนท์มากกว่ากรดแกลลิก และกรดคลอโรจีนิค (Manoj et al., 1992)

Zhi-gang et al. (1997) ทดลองใน *in vitro* ได้ทำการศึกษาพอลิแซคคาไรด์ที่สกัดด้วยน้ำร้อนจากสาหร่าย *Spirulina maxima* (SPS I) และสกัดด้วยเอทานอล (SPS II) โดยนำตัวอย่างทั้ง 2 ส่วนไปทำบริสุทธิ์ ด้วยวิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟี เพื่อดูความสามารถในการต้านออกซิเดชันของตัวอย่างทั้ง 2 ส่วน ด้วยการทดสอบความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide radical; O^{-}_{2}) ลิพิด (lipid redical; $R^{\cdot}$) และไฮดรอกซิล (hydroxyl radical; $OH^{\cdot}$) พบว่าทั้ง (SPS I) และ (SPS II) มีความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($P<0.05$) แต่ไม่มีผลต่ออนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ($p>0.1$) และ SPS I สามารถจับกับอนุมูลอิสระของลิพิดที่ความเข้มข้นต่ำได้ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระจากพอลิแซคคาไรด์จากสาหร่าย *Spirulina maxima* มีความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลมากกว่าอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์

Miranda et al. (1998) ทำการศึกษาความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากสาหร่าย *Spirulina maxima* ที่สกัดด้วยเมทานอลร้อยละ 95 พบว่า มีค่า IC_{50} (ค่าความ

เข้มข้นของสารที่สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ร้อยละ 50) ของสารสกัดอยู่ที่ 0.18 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อนำไปทดสอบกับพลาสมา และตับในหนูทดลอง โดยให้ตัวอย่าง 5 มิลลิกรัมต่อวัน เป็นเวลา 2 และ 7 สัปดาห์ พบว่าในการทดสอบกับพลาสมา มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันถึงร้อยละ 71 เมื่อเทียบกับกลุ่มหนูทดลองที่ไม่มีการให้ตัวอย่าง พบว่ามีความสามารถในการต้านออกซิเดชันเพียงร้อยละ 54 ส่วนการทดสอบในตับพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติของหนูทดลองทั้งสองกลุ่ม

Romay et al. (1998) ทดลองใน *in vitro* พบว่าสารไฟโคไซยานินสามารถจับกับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล และอนุมูลอัลคอกซิลได้ โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 0.91 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ และสามารถยับยั้งการออกซิเดชันของลิพิดจากไมโครโซมอลของตับได้ โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 12 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร โดยซี-ไฟโคไซยานินมีความสามารถในการต้านอนุมูลอัลคอกซิลเทียบเท่ากับโทรล็อกซ์ และมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลไฮดรอกซิล และอนุมูลไดเมธิลไฮดรอกซิลไม่แตกต่างกัน และยังมีการศึกษาพบว่าสารซี-ไฟโคไซยานิน มีประสิทธิภาพในการยับยั้งคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (carbontetrachloride: CCl_4) ซึ่งเป็นตัวที่เหนี่ยวนำให้เกิด lipid peroxidation ในตับของหนูทดลอง (Bhat and Madyastha, 2000)

Romay and Gonzalez (2000) ทดลองใน *in vitro* โดยทำการศึกษาความสามารถในการต้านออกซิเดชันของไฟโคไซยานิน เทียบกับโทรล็อกซ์ (อนุพันธ์ของวิตามินอี) และกรดแอสคอร์บิกเพื่อใช้ทดสอบการป้องกันภาวะที่เกิดการทำลายเม็ดเลือดแดงก่อนอายุขัย พบว่าไฟโคไซยานินสามารถยับยั้งสารที่สร้างอนุมูลอิสระจำพวก 2,2'-azobis (2-amidinopropane) dihydrochloride ซึ่งทำให้เกิดการแตกของเซลล์เม็ดเลือดแดงของมนุษย์ โดยผลที่ได้ดีกว่าโทรล็อกซ์ และกรดแอสคอร์บิก 16 และ 20 เท่า ตามลำดับ

Bhat and Madyastha (2000) ได้ทำการศึกษาผลของ ซี-ไฟโคไซยานิน จากสาหร่าย *Spirulina platensis* ต่อความสามารถในการยับยั้งสารคาร์บอนเตรตะคลอไรด์ (CCl_4) ที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิดในตับหนู พบว่าสารซี-ไฟโคไซยานินจากสาหร่ายสไปรูลินาช่วยยับยั้งคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) ซึ่งเป็นสารที่เหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิดในตับหนูได้ โดยซี-ไฟโคไซยานินมีความสามารถในการจับกับอนุมูลเปอร์ออกซีได้ดีเช่นเดียวกับ กรดยูริก โดยมีค่าคงที่ของอัตราการสลายตัว เท่ากับ 1.54 และ 3.5 ตามลำดับ โดยสารซี-ไฟโคไซยานินนี้จะช่วยจับกับอนุมูลอิสระ และป้องกันการออกซิเดชัน เมื่อศึกษาความสามารถในการยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระเปอร์ออกซีในตัวอย่างซี-ไฟโคไซยานิน และตัวอย่างซี-ไฟโคไซยานิน บริสุทธิ์พบว่ามีค่า IC_{50} เท่ากับ 11.35 และ 12.7 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ

ดังนั้นซี-ไฟโคไซยานินที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์จะมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันมากกว่าซี-ไฟโคไซยานินที่ไม่ได้ทำให้บริสุทธิ์

ผลของการเก็บรักษาต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

กระบวนการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ ในอาหารโดยทั่วไปแล้วการป้องกันและลดการเกิดออกซิเดชันในอาหารมักเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่า แต่การเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพลดลงได้ ดังนั้นสภาวะและระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารต้านออกซิเดชัน และฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน (วรพล, 2555)

ในงานวิจัยของ Ahmed et al. (2014) กล่าวถึงการเก็บรักษาต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชัน และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของดอกดาวกระจาย (*Cosmos caudatus*) พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งมีการรักษาคุณภาพ และความคงตัวของสารชีวโมเลกุลในระหว่างการเก็บรักษามากกว่าตัวอย่างสด โดยตัวอย่างของดอกดาวกระจายจะผ่านการทำแห้ง 3 วิธี ได้แก่ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง วิธีทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟ และตัวอย่างสด ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน พบว่า ไม่มีความแตกต่างของความสามารถในการต้านออกซิเดชัน และ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้ง แต่เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างสดพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งมีความเสถียรของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งมากกว่าตัวอย่างสด และในงานวิจัยของ Anna (2011) ที่ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมอาหารก่อนการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของใบคะน้า (kale) (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) โดยก่อนการทำแห้งจะทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ อุณหภูมิห้องที่ 18-20 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิต่ำ 8-10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 เดือน พบว่า สารพอลิฟีนอลทั้งหมดลดลงร้อยละ 3-25 และมีการสูญเสียวิตามินซีร้อยละ 22-37 ในตัวอย่างที่ไม่ผ่านการลวก และร้อยละ 9-24 ในตัวอย่างที่ผ่านการลวก เมื่อเทียบตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งจะสูญเสียวิตามินซีน้อยกว่า การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน และตัวอย่างที่เก็บที่อุณหภูมิต่ำจะรักษาปริมาณของวิตามินซีได้มากกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

การสืบค้นสิทธิบัตรมีประโยชน์ต่อทั้ง อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา ผู้ผลิต ลูกจ้างโครงการ หรือบุคคลที่ต้องการทำวิจัย หรือประดิษฐ์คิดค้นใดๆ ควรจะสืบค้นสิทธิบัตรก่อนที่จะเริ่มทำวิจัย เพื่อจะได้ไม่ทำวิจัยหรือสิ่งประดิษฐ์ซ้ำซ้อนกับของผู้อื่น เพื่อป้องกันการละเมิดสิทธิบัตรของผู้อื่นเสียเวลา และค่าใช้จ่าย สิทธิบัตรเป็นแหล่งองค์ความรู้ของเทคโนโลยีที่สามารถใช้เป็นฐานความรู้ในการต่อยอดเทคโนโลยีที่มีอยู่จำนวนมากจากทั่วโลก และทำให้ได้เห็นแนวโน้มในอนาคตของนวัตกรรมได้อีกด้วย โดยสิทธิบัตรที่ได้สืบค้นจะเกี่ยวข้องกับการสกัดสารไฟโค-ไซยานิน จากสาหร่ายสไปรูลินา อาหาร เครื่องสำอาง เครื่องดื่ม และของใช้ในชีวิตประจำวันที่มีส่วนประกอบของสาหร่ายสไปรูลินา ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (2554) จดสิทธิบัตรกรรมวิธีการผลิตไฟโคไซยานินเกรดอาหารและเครื่องสำอาง โดยสกัดไฟโคไซยานินจากสาหร่ายสไปรูลินาด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในอัตราส่วนสาหร่ายต่อสารละลายในช่วง 1:75 ถึง 1:200 น้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นแยกไฟโคไซยานิน โดยการกรองขั้นต้นด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์ไมโครฟิลเตรชั่น 2 ชุด ชุดแรกเป็นการกรองสารละลายไฟโคไซยานินผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ไมโครฟิลเตรชั่นชุดที่ 1 ที่ประกอบด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์ขนาด 1 ไมครอน 0.45 ไมครอน และ 0.2 ไมครอน แบบกรองซ้ำต่อเนื่องและ ชุดที่ 2 เป็นการกรองสารละลายไฟโคไซยานินผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ไมโครฟิลเตรชั่นที่ประกอบด้วยเยื่อแผ่น สังเคราะห์ขนาด 0.2 ไมครอน และ 0.03 ไมครอน แบบกรองผ่านครั้งเดียว แล้วแยกไฟโคไซยานินด้วยการกรอง ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์อัลตร้าฟิลเตรชั่นขนาด 50 กิโลดาลตัน

วศิมน และคณะ (2549) จดสิทธิบัตรกรรมวิธีการสกัดสารไฟโคไซยานินที่พร้อมบริโภค นำเซลล์สาหร่ายซึ่งอยู่ในถุงบรรจุ นำไปแช่ในช่องแช่แข็งของตู้เย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 4 ถึง -30 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 20-50 นาที เมื่อนำถุงบรรจุใส่ลงในน้ำร้อนหรือน้ำเดือด การผ่านความเย็นจัดแล้วมาโดนความร้อนในทันที จะทำให้ เซลล์ของสาหร่ายแตกและปล่อยสารไฟโค-ไซยานินซึ่งเป็นสารที่ต้องการออกมา และกากของเซลล์สาหร่ายจะถูก กรองไว้โดยถุงบรรจุและไม่ปะปนออกมากับสารไฟโคไซยานิน การบรรจุใบชา หรือ ผงกาแฟ หรือ กาแฟ หรือ ขิง หรือ ตะไคร้ ชนิดแห้งในถุงบรรจุเดียวกับสาหร่ายสไปรูลินา ส่วนสารละลายที่ได้ ก็สามารถซึมผ่านถุงบรรจุออกมาตามปกติพร้อมกับสารไฟโคไซยานินเมื่ออยู่ในน้ำร้อน หรือการนำสารไฟโคไซยานินมาผสมกับสารสกัด จากชา หรือ กาแฟ หรือ ขิง หรือ ตะไคร้ หรือ สมุนไพรแห้ง จึงทำให้ได้เครื่องดื่มชา กาแฟ ขิง หรือตะไคร้ มี สารไฟโคไซยานินจากสาหร่ายสไปรูลินาที่พร้อมบริโภค

กฤชภร (2552ก) จดสิทธิบัตร กาแฟปรุงสำเร็จชนิดผง กาแฟปรุงสำเร็จชนิดผง ที่ประกอบด้วย กาแฟ ครีม น้ำตาลฟรุตโตส สาหร่ายสไปรูลินา และโสม โดยมีขั้นตอนการทำ ดังนี้ คือ นำกาแฟ ครีม น้ำตาลฟรุคโตส สาหร่ายสไปรูลินาและ โสม ตามอัตราส่วนดังกล่าว นำมาผสมลง ในถังสแตนเลส ปั่นให้เข้ากัน ประมาณ 20 นาที

สายชล (2552) จดสิทธิบัตร การสกัดสารไฟโคไซยานินจากเซลล์สาหร่ายสไปรูลินาแบบสดด้วยวิธีตกตะกอน การสกัดสารไฟโคไซยานิน ที่มีสีฟ้าเข้ม ใส ด้วยวิธีการใหม่และสามารถนำไปใช้ผลิตเป็น การค้าในระดับประเทศได้ มีขั้นตอนที่สำคัญที่สามารถสรุปได้ 2 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการทำให้เซลล์สาหร่ายสดแตกด้วยโมเลกุลของน้ำแข็ง ที่เกิดจากการแช่แข็ง ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสกัดแยกส่วนของไฟโคไซยานินซึ่งเป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ออกมา ด้วยวิธีการการตกตะกอนด้วยกรดมะนาว โดยเตรียมน้ำกรองสะอาดที่ผ่านการต้มเดือดและปล่อยให้เย็น ในปริมาตรที่ต้อง บรรจุไว้ใน ภาชนะแก้ว ใส ทรงสูง ปากกว้าง เพื่อสะดวกในการกวนผสมและสังเกตปฏิกิริยาด้วยตาเปล่า หลังจากนั้นเตรียมกรดมะนาวความเข้มร้อยละ 10 เตรียมกระดาษวัดความเป็นกรด-เบส (pH paper) ใช้แท่งแก้วคนผสม ทำการตกตะกอนโดยตวงสาหร่ายสดที่ถูกทำให้เซลล์แตกแล้วมาในปริมาตรร้อยละ 20 ของปริมาตรของน้ำที่เตรียมไว้ คนผสมด้วยแท่งแก้ว ค่อยๆ เติมกรดมะนาวร้อยละ 10 ด้วยการหยดหรือปิเปต ขณะที่ หยดกรดจะต้องคนตลอดเวลา และวัดความเป็นกรด-เบส ด้วยกระดาษวัด ที่ค่า pH เท่ากับ 3 จะสังเกตปฏิกิริยาการตกตะกอนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และสิ้นสุดสมบูรณ์ ใช้เวลาประมาณ 30 นาที พบการแยกชั้นระหว่างตะกอนสีเขียวเข้ม กับน้ำส่วนบนสีฟ้าเข้มใส คือ ไฟโคไซยานิน ที่ต้องการ และทำการแยกส่วนไฟโคไซยานินออกจากตะกอนโดยวิธีกาลักน้ำ (Siphon)

กฤชภร (2552ข) จดสิทธิบัตร เจลอาบน้ำสาหร่ายสไปรูลินา เจลอาบน้ำสาหร่ายสไปรูลินานี้ ที่ประกอบด้วย แชมพูเบส N70 โซเดียมคลอไรด์ (ผงข้น) โซเดียมลอริลซัลเฟท (ผงฟอง) ผงบุก กรดมะนาว สาหร่ายสไปรูลินา สารกันบูด น้ำสะอาด และน้ำหอม โดยนำส่วนผสมทั้งหมดมาผสมกัน

กฤชภร (2552ค) จดสิทธิบัตร แชมพูสระผมผสมสาหร่ายสไปรูลินา แชมพูสระผมสาหร่าย สไปรูลินา ตามการประดิษฐ์นี้ ประกอบด้วย เบสแชมพู โซเดียมคลอไรด์ (ผงข้น) กลีเซอรีน สารให้ความชุ่มชื้น สารกันบูด สาหร่ายสไปรูลินา ประคำดีควาย หมี่เหม็น น้ำหอม และน้ำสะอาด โดยนำส่วนผสมทั้งหมดมาผสมกัน

สุดธน (2548) จดสิทธิบัตร ผลิตภัณฑ์อาหารเสริมซึ่งมีสรรพคุณใช้สำหรับป้องกันรักษา โรคปวดศีรษะและโรคไมแกรนซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ สาหร่ายสไปรูลินาร้อยละ 74 (โดย

น้ำหนัก) สารสกัดจากสมุนไพรฟีเวอร์ฟิวร้อยละ 2 (โดยน้ำหนัก) สารสกัดจากสมุนไพรกระชายดำร้อยละ 5 (โดยน้ำหนัก) แคลเซียมร้อยละ 19 (โดยน้ำหนัก)

บริษัท ที.ซี. ยูเนี่ยน โกลบอล จำกัด (มหาชน) (2548) จดสิทธิบัตร สูตรผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่สามารถลดอาการเมาค้าง ผลิตภัณฑ์เสริมอาหารป้องกันการเมาค้าง และบำรุงตับ ที่มีแอล-กลูตาไทโอน เป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งประกอบไปด้วยแอล-กลูตาไทโอน รอยัลเยลลี่ สาหร่าย สไปรูลินา สารสกัดจากหอยนางรม ไคโตซาน และวิตามินซี ซึ่งสามารถลดอาการเมาค้างได้ โดยสูตร ผสมผลิตภัณฑ์เสริมอาหารดังกล่าวประกอบด้วย แอล-กลูตาไทโอนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก รอยัลเยลลี่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สาหร่ายสไปรูลินาร้อยละ 17 โดยน้ำหนัก สารสกัดจากหอยนางรมร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ไคโตซานร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก วิตามินซีร้อยละ 16 โดยน้ำหนักรวมร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุอุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ซื้อจากฟาร์มเพาะเลี้ยงสาหร่าย จ. เชียงใหม่ โดยตัวอย่างสาหร่ายสดจะถูกบรรจุลงในถุงพลาสติก แช่เย็นในถังน้ำแข็ง โดยใช้เวลาจากฟาร์มมาถึงห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า 2-3 ครั้งผ่านผ้าขาวบาง นำไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน ก่อนนำไปทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง

1.2 สาหร่ายสไปรูลินาทางการค้า

1.2.1 สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A ราคา 600 บาท บรรจุ 100 แคปซูล แคปซูลละ 500 มิลลิกรัม ผลิตในประเทศไทย

1.2.2 สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ B ราคา 300 บาท บรรจุ 100 แคปซูล แคปซูลละ 500 มิลลิกรัม ผลิตในประเทศไทย

2. อุปกรณ์

2.1 กระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil)

2.2 ถ้วยกระเบื้อง (crucible) ขนาด 30 มิลลิลิตร

2.3 กระป๋องอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด (moisture can)

2.4 ลูกยางดูดสาร (rubber)

2.5 Thimble (whatman cellulose extraction 26 × 60 mm., England)

2.6 Extraction cup

2.7 หลอดทดลอง (tube) ขนาด 20 ml. พร้อมฝาปิด (PYREX, Germany)

2.8 ที่วางหลอดทดลองขนาด 60 ช่อง (Rack)

2.9 บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 50, 100, 250 และ 600 ml. (PYREX, USA)

2.10 แท่งแก้วคนสาร (stirring rod)

2.11 ช้อนตักสารเคมี (dispensing spoons)

2.12 กระบอกตวง (cylinder) ขนาด 100 และ 1,000 ml. (Witeg, Germany)

2.13 หลอดย่อยตัวอย่าง (digestion tube)

2.14 ขวดสีชา และขวดแก้วสำหรับใส่สารเคมี

2.15 กระดาษกรอง (filter paper: Whatman No. 1)

2.16 ไมโครปิเปต (micropipette) (Gilson, FRANCE)

2.17 ปิเปตทิป (pipette tip)

2.18 ขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 50, 100, 200 ml. (DURAN, Germany)

2.19 หลอดวัดการดูดกลืนแสง (cuvettes)

2.20 นาฬิกาจับเวลา (stopwatch)

2.21 ขวดรูปชมพู่ (flask) ขนาด 125 และ 250 ml. (PYREX, USA)

2.22 บิวเรต (burette)

2.23 ปิเปต (pipette) (Precicolor, Germany)

2.24 โถดูดความชื้น (desiccator) (Glaswerk Wertheim, Germany)

2.25 ขวดน้ำกลั่น (wash bottle)

2.26 ถาดอะลูมิเนียม (aluminum tray)

2.27 กล่องพลาสติกกันร้อน

2.28 พาราฟิล์ม (Parafilm "M", USA)

2.29 แคปซูลใส เบอร์ 0 ขนาด 500 ไมโครกรัม

2.30 ขวดพลาสติกสีขาวขุ่นฝาเกลียว ที่ทำจากวัสดุ high density polyethylene (HDPE)

3. สารเคมี

3.1 Methanol (A.R. Grade, RCI Labscan, Thailand)

3.2 Ethanol (A.R. Grade, RCI Labscan, Thailand)

3.3 Folin-Ciocalteu's phenol reagent (MERCK, Germany)

3.4 Sodium carbonate (Na_2CO_3, MERCK, Germany)

3.5 Gallic acid (Sigma, Germany)

3.6 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH, Sigma, Germany)

3.7 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (Sigma, Germany)

3.8 Potassium persulphate ($K_2S_2O_8$, Ajax, Australia)

3.9 Sodium acetate (trihydrate) (RCI Labscan, Thailand)

3.10 Acetic acid (glacial) (MERCK, Germany)

3.11 IRON(III) chloride anhydrous ($FeCl_3$, Ajax, Australia)

3.12 IRON(II) sulphate ($FeSO_4.7H_2O$, Ajax, Australia)

3.13 2,4,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine (TPTZ, Sigma, Switzerland)

3.14 Hydrochloric acid (HCl, A.R. Grade, RCI Labscan, Thailand)

3.15 Kjeltabs (FOSS Analytical, Sweden)

3.16 กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) (J.T. Baker, Thailand)

3.17 โซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH A.R. Grade (RCI Labscan, Thailand)

3.18 Bromocresol green (MERCK, Germany)

3.19 Methyl red (BDH, England)

3.20 กรดบอริค boric acid A.R. Grade (MERCK, Germany)

3.21 Anhydrous Na_2CO_3 A.R. Grade (QReC, Newzealand)

วิธีการทดลอง

1. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสาหร่ายสไปรูลินาสด

1.1 ปริมาณโปรตีนด้วยวิธีเจลดาห์ล (Kjeldahl) (ดัดแปลงจาก AOAC, 2005)

ชั่งตัวอย่างอาหารประมาณ 0.3 กรัม ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (SARTORIUS Cp224S, Germany) ใส่ลงไปในหลอดย่อย และใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือ Kjeldahl catalyst ลงไป 1 เม็ด เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงไป 5 มิลลิลิตร แล้วย่อยตัวอย่างด้วยเครื่องย่อย (Tecator Digestor 2012, Sweden) ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส จนสารละลายมีสีเขียวใส หลังจากนั้นนำมากลั่นด้วยเครื่อง Kjeltec System รุ่น 1026 (Tecator, Sweden) โดยใช้สารละลายกรดบอริค

เข้มข้นร้อยละ 4 จำนวน 25 มิลลิลิตร เพื่อดักจับก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้น แล้วนำมาไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริคเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนสารละลายมีสีชมพูม่วง

$$\text{ปริมาณโปรตีน (ร้อยละ)} = \frac{0.0014 \times A \times (B-C) \times 100 \times 6.25}{0.1 \times D}$$

โดยที่ A = ความเข้มข้นที่แน่นอนของไฮโดรคลอริคเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

B = ปริมาตรของไฮโดรคลอริคเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ที่ไตเตรตกับตัวอย่าง (ml)

C = ปริมาตรของไฮโดรคลอริคเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ที่ไตเตรตกับ blank (ml)

D = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

6.25 = ค่าคงที่สำหรับการเปลี่ยนปริมาณไนโตรเจนเป็นโปรตีน สำหรับตัวอย่างอาหาร หรือตัวอย่างอื่นๆ ที่ไม่ระบุเฉพาะ

1.2 ปริมาณเถ้า (AOAC, 2005)

ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม นำไปเผาในเตาเผาเถ้า Muffle furnace (CARBOLITE ELF 11/14, England) ที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส จนได้เถ้าที่มีสีขาว แล้วชั่งน้ำหนักเถ้าที่ได้โดยคำนวณเทียบกับน้ำหนักตัวอย่าง 100 กรัม

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักเถ้า} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

1.3 ปริมาณความชื้น (moisture content) ทำตามวิธี AOAC (2005)

ชั่งตัวอย่างที่ต้องการหาความชื้นให้ได้น้ำหนักแน่นอน 1-2 กรัม ใส่ลงในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนักแน่นอน นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง หรือ จนมีน้ำหนักคงที่ นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักภาชนะพร้อมตัวอย่าง

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{\text{ผลต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบและหลังอบ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)}}$$

1.4 ค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity)

การวัดค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity) หรือ a_w ด้วยเครื่องวัดค่ากิจกรรมของน้ำ (Aqualab 3TE, U.S.A.) จะต้องทำการอุ่นเครื่องก่อนทำการวิเคราะห์เป็นเวลา 30 นาที และ calibrate เครื่องก่อนใช้งาน หลังจากนั้นนำตัวอย่างสาหร่ายผง โดยจะใส่ตัวอย่างในการวิเคราะห์ประมาณ 5 กรัม ทุกครั้งที่ทำการวิเคราะห์ เพื่อลดความคลาดเคลื่อน หลังจากนั้นนำใส่เครื่องวัดค่ากิจกรรมของน้ำ หมุนปุ่มไปที่ load รอจนกระทั่งเครื่องอ่านค่าที่แน่นอนที่ได้จากตัวอย่าง

1.5 ค่าสี (colour value)

ในการวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Tri-stimulus colorimeter รุ่น JC801) ที่ Illuminant D65 จะต้องทำการอุ่นเครื่องก่อนเป็นเวลา 100 นาที หลังจากนั้นเลือกแท่นรองให้สัมพันธ์กับขนาดของวัตถุที่จะวัด วางบนช่องที่แสงผ่าน แล้วปรับมาตรฐานเครื่องวัดสีด้วย standard white plate ก่อนการวัดค่าสีของตัวอย่าง โดยตัวอย่างจะถูกบรรจุในคิวเวตแก้ว ซึ่งการวัดค่าสีระบบ CIE ประกอบด้วยค่า

L* หมายถึง ค่าความสว่างของสี ซึ่งมีค่าจาก 0 คือสีดำ ถึง 100 คือสีขาว

a* หมายถึง ค่าความเป็นสีเขียวและสีแดง เมื่อ a* มีค่าบวก จะแสดงถึงความเป็นสีแดง และเมื่อ a* มีค่าลบ จะแสดงถึงความเป็นสีเขียว

b* หมายถึง ค่าความเป็นสีน้ำเงินและสีเหลือง เมื่อ b* มีค่าบวก จะแสดงถึงความเป็นสีเหลือง และเมื่อ b* มีค่าลบ จะแสดงถึงความเป็นสีน้ำเงิน

1.6 ลักษณะเซลล์สาหร่าย

ในการดูเซลล์สาหร่าย จะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Olympus, Japan) ในการดูลักษณะโครงสร้างของเซลล์ และใช้วิธี wet mount ซึ่งเป็นการตรวจสอบลักษณะเซลล์เบื้องต้น โดยการนำสารละลายสาหร่ายที่เตรียมไว้ (เจือจางโดยใช้น้ำกลั่น) หยดลงบนสไลด์เปล่า แล้วปิดด้วย cover slide แล้วนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์โดยไม่ต้องย้อมสี ที่กำลังขยาย 40 เท่า

2. การศึกษาวิธีการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินา

ทำการศึกษาการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินาโดยวิธีการต่างๆ ดังนี้

2.1 การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ (solar drying) นำตัวอย่างเกลี่ยบางๆ ประมาณ 0.5 เซนติเมตร บนถาดโลหะ (อลูมิเนียม) ที่มีขนาด กว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร ที่รองด้วยแผ่นพลาสติก แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีอุณหภูมิในการทำแห้งประมาณ 55 องศาเซลเซียส

2.2 การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน (hot air drying) นำตัวอย่างเกลี่ยบางๆ ประมาณ 0.5 เซนติเมตร บนถาดโลหะ (อลูมิเนียม) ที่มีขนาด กว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร ที่รองด้วยแผ่นพลาสติก แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน (hot air drying) (Termaks, TS8000, Norway) ที่อุณหภูมิ 60–70 องศาเซลเซียส

2.3 การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ (vacuum drying) นำตัวอย่างมาเกลี่ย โดยให้มีความหนาประมาณ ½ นิ้ว ในภาชนะ (กล่องพลาสติก) ที่มีขนาด กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 19 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร ปิดด้วยแผ่นฟอยล์ที่มีการเจาะรู โดยทำการเจาะ 15 รู เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร เพื่อให้ไอน้ำสามารถระเหยได้สะดวก และป้องกันการฟุ้งกระจายของตัวอย่าง แล้วนำเข้าเครื่องทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ (vacuum drying) (WTB binder, Germany) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 60 มิลลิบาร์

2.4 การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย (spray drying) นำตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาสดมาผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 (สาหร่ายสด 10 กิโลกรัม ต่อ น้ำ 10 กิโลกรัม) ก่อนที่จะทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย ด้วยเครื่องทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย (J.C. Machinery and Civil Work, SDE50, Thailand) ที่อุณหภูมิขาเข้า 210 องศาเซลเซียส

2.5 การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง (freeze drying) นำตัวอย่างมาเกลี่ย ให้มีความหนาประมาณ ½ นิ้ว ในภาชนะ (กล่องพลาสติก) ที่มีขนาด กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร โดยก่อนทำแห้งจะทำการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน จากนั้น ปิดด้วยพลาสติกพาราฟินที่มีการเจาะรูเพื่อให้ไอน้ำสามารถระเหิดได้สะดวกและป้องกันการฟุ้งกระจายของตัวอย่าง โดยทำการเจาะ 20 รู เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เซนติเมตร แล้วนำเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) (Dura Dry, II MP, USA.) โดยทำแห้งที่อุณหภูมิ -26 องศาเซลเซียส

นำตัวอย่างอบแห้งที่ได้ทุกตัวอย่าง มาทำการปั่นให้เป็นผงด้วยเครื่องปั่น (Panasonic, MX-J210GN, PRC) จนละเอียดเป็นผง แล้วนำไปตรวจวัดหาปริมาณความชื้น (AOAC, 2005) โดยทุกวิธีจะต้องได้สาหร่ายสไปรูลินาอบแห้งที่มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 เพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่องสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง (มผช. 542/2549)

3. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนด้วยวิธีเจลดาห์ล (Kjeldahl) (ดัดแปลงจาก AOAC, 2005)

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 1.1

3.2 ปริมาณความชื้น (moisture content) ทำตามวิธี AOAC (2005)

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 1.3

3.3 ค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity)

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 1.4

3.4 ค่าสี (colour value)

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 1.5

3.5 การดูลักษณะเซลล์สาหร่าย

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 1.6

4. ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมดของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

4.1 วิธีการเตรียมสารสกัด (Jittawan and Sirithon, 2011)

สาหร่ายแห้ง 1 กรัม สกัดด้วยเมธานอลเข้มข้นร้อยละ 80 จำนวน 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เขย่าด้วยเครื่องเขย่า (orbital shaker) (Ratek, Australia) ที่ความเร็วรอบ 180 rpm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 2400 g ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Sorvall, RC 5C Plus, USA) เป็นเวลา 20 นาที จะได้ความเข้มข้นของสารสกัด 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตรหลังจากนั้นนำส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด ดังนี้

4.2 ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด (Singelton et al., 1999)

นำตัวอย่างสารสกัดมา 100 ไมโครลิตร เติมสารละลาย Folin-Ciocalteau 0.5 มิลลิลิตร 95% ethanol และน้ำ 5 มิลลิลิตร ผสมด้วยเครื่อง vortex mixer (Scientific Industries G560E, USA.) วางไว้ 5 นาที เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 5 จำนวน 1 มิลลิลิตร บ่มนาน 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 725 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Rayleigh, VIS-723G, China) เปรียบเทียบค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก ดังแสดงในภาคผนวก ค รายงานค่าเป็นมิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักแห้ง 100 กรัม

สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดทำปฏิกิริยากับ Folin-Ciocalteu reagent สารดังกล่าวจะถูกรีดิวซ์โดย phenolic hydroxyl groups ของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเกิดเป็น tungsten และ molybdenum blue ซึ่งให้สีน้ำเงินและดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร และรายงานค่าออกมาเป็น mg GAE/100 g dry weight

5. ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

วิธีการเตรียมสารสกัด (Jittawan and Sirithon, 2011)

สาหร่ายแห้ง 1 กรัม สกัดด้วยเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 จำนวน 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เขย่าด้วยเครื่องเขย่า (orbital shaker) (Ratek, Australia) ที่ความเร็วรอบ 180 rpm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 2400 g ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Sorvall, RC 5C Plus, USA) เป็นเวลา 20 นาที นำส่วนใสมาทำการเจือจางด้วยเมทานอลอีก 10 เท่า จะได้ความเข้มข้นของสารสกัด 0.01 กรัมต่อมิลลิลิตร และนำมาวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ดังนี้

5.1 DPPH radical scavenging activity (Shimada et al., 1992)

นำตัวอย่างที่ความเข้มข้น 0.8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จำนวน 80 ไมโครลิตร ปรับปริมาตรด้วยเมทานอลให้ครบ 0.5 มิลลิลิตร ไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ DPPH เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ จำนวน 2.5 มิลลิลิตร เก็บไว้ที่มืดนาน 30 นาที แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Rayleigh, VIS-723G, China) สำหรับตัวอย่างควบคุมใช้เมทานอลแทนตัวอย่าง

ค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงแสดงว่ามีความสามารถในการจับกับอนุมูลอิสระได้มากขึ้น คำนวณจาก

% inhibition = (Acontrol-Asample) x 100/Acontrol

DPPH หรือ 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl เป็นสารอนุมูลอิสระ (free radical) ที่สามารถรับ electron หรือ hydrogen radical เมื่อทำปฏิกิริยากับสารที่มีฤทธิ์ antioxidant จะทำให้มีสีจางลง โดยใช้ ความยาวคลื่นในการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 nm

5.2 Ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay (Yen and Chen, 1995)

ทำการวัดค่าความสามารถในการรีดิวซ์ (reducing power) โดยการดูความสามารถในการรีดิวซ์สารประกอบเฟอริก โดยการผสม 300 มิลลิโมลาร์ acetate buffer โดยวัดค่า pH ด้วยเครื่อง (Mettler toledo, Switzerland) ให้ได้ค่า pH 3.6, 20 มิลลิโมลาร์ Ferric chloride solution และ 10 มิลลิโมลาร์ TPTZ (2,4,6-Tris(2-pyridyl)-1,3,5-triazine) solution ในอัตราส่วน 10:1:1 หลังจากนั้น นำไปอุ่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ 1 มิลลิลิตร ผสมกับ สารที่เตรียม 2 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องและในที่มืด วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Rayleigh, VIS-723G, China) ค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นแสดงว่ามีความสามารถในการรีดิวซ์ได้มากขึ้น โดยคำนวณจากกราฟมาตรฐาน $FeSO_4$ ดังแสดงในภาคผนวก ค

FRAP (Ferric reducing antioxidant power) assay เป็นการวัดความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการให้อิเล็กตรอนอิสระ (reducing agent) โดยที่ ferric tripyridyltriazine (Fe^{3+}-TPTZ) complex จะถูกรีดิวซ์ด้วยสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ที่ สามารถให้อิเล็กตรอนได้ ทำให้เกิด Fe^{2+}-TPTZ complex ที่มีสีน้ำเงิน ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 nm

5.3 $ABTS^{+}$ radical scavenging activity (Re et al., 1999)

การเตรียม ABTS radical cation จะต้องทำการเตรียม ABTS radical cation stock solution โดยเตรียมจาก ชั่ง ABTS 0.0360 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร (7 มิลลิโมลาร์) และชั่ง $K_2S_2O_8$ 0.3784 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร (140 มิลลิโมลาร์) หลังจากนั้นผสม 7 มิลลิโมลาร์ ABTS 10 มิลลิลิตร กับ 140 มิลลิโมลาร์ $K_2S_2O_8$ 176 ไมโครลิตร ในขวดสีชา ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้น นำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วนของ ABTS radical cation stock solution : น้ำกลั่น 1:75 มิลลิลิตร ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำสารละลายอนุมูล $ABTS^{+}$ จำนวน 2.5 มิลลิลิตร มาผสมกับสารละลายตัวอย่างจำนวน 0.5 มิลลิลิตร (ทำทั้งหมด 5 ความเข้มข้น) ผสมให้เข้ากันเบาๆ แล้ววางไว้ที่อุณหภูมิห้องและที่มืดเป็นเวลา 6 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Rayleigh, VIS-723G, China) แล้วคำนวณหาค่า IC_{50} จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวอย่างที่ใช้ และ % inhibition ดังแสดงในภาคผนวก ค

ABTS จะถูกทำเป็นอนุมูลอิสระโดยการถูกรีดิวซ์ด้วย potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) กลายเป็น $ABTS^{+}$ ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่มีสีฟ้าอมเขียว เมื่อทำปฏิกิริยากับสารที่มีความสามารถในการต้านออกซิเดชัน จะทำให้ $ABTS^{+}$ ลดลง ทำให้สีจางลง โดย $ABTS^{+}$ ทำปฏิกิริยาต่อสารต้านอนุมูลอิสระสีน้ำเงินของ $ABTS^{+}$ ถูกแปลงกลับไปเป็นรูปไม่มีสีที่เป็นกลางและตรวจวัดได้ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 nm รายงานผลเป็นค่า IC_{50} (mg/mL)

6. ศึกษาผลของการเก็บรักษาต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

นำตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันที่ดีที่สุดจากผลการทดลองก่อนหน้านี้จำนวน 2 ตัวอย่าง และตัวอย่างทางการค้า 2 ตัวอย่าง มาทำการร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 60 mesh บรรจุในแคปซูลใส ด้วยเครื่องบรรจุแคปซูล (ภาพ 5) แล้วบรรจุในขวดพลาสติกสีขาวขุ่น ฝาเกลียว ที่ทำจากวัสดุ High Density Polyethylene (HDPE) เก็บรักษาเป็นเวลา 0 และ 90 วัน ในตู้บ่ม (Memmert, BE 100, Thailand) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 37 (วัดด้วยเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Hygrometer) (Barigo, Germany)) และทำการศึกษา ดังนี้

6.1 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ได้แก่

6.1.1 ปริมาณความชื้น (moisture content)

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 1.3

6.1.2 ค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity)

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 1.4

6.1.3 ค่าสี (colour value) (L*, a*, b*)

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 1.5

6.2 ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 4.2

6.3 ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

6.3.1 DPPH radical scavenging activity

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 5.1

6.3.2 Ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 5.2

6.3.3 $ABTS^{+}$ radical scavenging activity

ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 5.3

ภาพ 5 เครื่องบรรจุแคปซูลขนาด 500 ไมโครกรัม

7. การหาปริมาณผลผลิตในการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินา

การทำแห้งในแต่ละวิธีจะมีการสูญเสียน้ำ สารอาหาร เนื้อของอาหารที่แตกต่างกันเนื่องด้วย วิธีการ และกระบวนการอบแห้ง อีกทั้งเครื่องมือที่แตกต่างกันทำให้ผลผลิตที่ได้มีค่าแตกต่างกันในแต่ละวิธี โดยการคำนวณปริมาณผลผลิต หรือ ร้อยละการผลิต จะคำนวณจาก

$$\text{ร้อยละการผลิต (\% Yield)} = \frac{\text{น้ำหนักสาหร่ายหลังการทำแห้ง} \times 100}{\text{น้ำหนักสาหร่ายสด (เริ่มต้น)}}$$

8. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาผง

ทำการคำนวณต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ตามวิธีของ พุทธธินันทร์ และคณะ (2551) โดยการทำแห้งด้วยวิธีที่แตกต่างกันมี 5 วิธี ได้แก่ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง เพื่อดูต้นทุนต่อผลผลิตที่ได้จากกระบวนการทำแห้งทั้ง 5 วิธี โดยต้นทุนการผลิตที่จะทำการคำนวณมาจากวัตถุดิบที่ใช้ และค่าไฟฟ้าในการทำแห้งแต่ละวิธี โดยมีสูตรในการคำนวณ คือ

ค่าสาหร่ายสไปรูลินาสด 100 บาท/กิโลกรัม

ค่าไฟฟ้า

คำนวณ จาก $P = IxV$

โดย P = กำลังไฟฟ้า, วัตต์

I = กระแสไฟฟ้า, แอมแปร์

V = ความต่างศักดิ์ไฟฟ้า, โวลท์

ค่าไฟฟ้าคิดเป็นหน่วยละ 3.94 บาท (ค่าไฟฟ้าราคาหน่วยละ 3.94 บาท อ้างอิง จากค่าไฟฟ้าคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้) รายละเอียดการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ง.

9. การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

การทดลองในข้อ 1 ถึง 7 ทำการวางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT (Duncan's Multiple Range Test) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสาหร่ายสไปรูลินาสด

คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสาหร่ายสไปรูลินาผงแสดงดังตาราง 2 ดังนี้

1. ปริมาณโปรตีนด้วยวิธีเจลดาห์ล (Kjeldahl)

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในสาหร่ายสไปรูลินาสด พบว่า มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 64.04±2.80 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Richmond (1986) โดยมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 60-70 โดยน้ำหนักแห้ง

2. ปริมาณเถ้า

ในการหาปริมาณเถ้า พบว่ามีปริมาณเถ้าร้อยละ 9.09±0.37 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของกับ Richmond (1986) ที่ได้รายงานว่า พบประมาณเถ้าร้อยละ 9

3. ปริมาณความชื้น (moisture content)

จากการหาปริมาณความชื้น พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาสดมีความชื้นร้อยละ 8.17±0.65 ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่สูง และอาจก่อให้เกิดการเน่าเสียจากจุลินทรีย์ได้ง่าย

4. ค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity)

จากการหาค่ากิจกรรมของน้ำ พบว่ามีค่า 0.991±0.00 นับว่าเป็นค่าที่สูงเหมาะแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา การเสื่อมเสีย และความปลอดภัยของอาหาร

5. ค่าสี (colour value)

ค่าสี L* เป็นค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0-100 โดยถ้าค่า L* เข้าใกล้ 0 หมายถึงตัวอย่างมีความสว่างน้อยหรือมีสีดำ ส่วนถ้าค่า L* เข้าใกล้ 100 หมายถึงตัวอย่างมีความสว่างมากจนเป็นสีขาว สำหรับค่าสี a* เป็นค่าสีที่แสดงถึงความเข้มของสีแดงและเขียว โดยถ้าค่า a* เป็นบวก หมายถึง ตัวอย่างเป็นสีแดง แต่ถ้าค่า a* เป็นลบ หมายถึงตัวอย่างเป็นสีเขียว และค่าสี b* เป็นค่าที่

แสดงถึงความเข้มของสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยถ้าค่า b* เป็นบวก หมายถึง ตัวอย่างเป็นสีเหลือง แต่ถ้าค่า b* เป็นลบ หมายถึง ตัวอย่างเป็นสีน้ำเงิน (Hunter et al., 1987) จากการทดลองในตาราง 2 พบว่า สีของสาหร่าย สไปรูลินาสด มีค่า L*, a* และ b* เท่ากับ 18.06±0.00, -6.06±0.80 และ 12.08±0.00 ตามลำดับ และจากการมองด้วยสายตา พบว่าสาหร่ายสไปรูลินามีสีเขียวเข้ม ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดค่าสี โดยจะเห็นได้จากการที่มีค่า a* เป็นลบ คือ -6.06±0.80 และมีค่าความสว่างน้อย คือ 18.06±0.00

สาหร่ายสไปรูลินาที่มีจำหน่ายในทางการค้าส่วนใหญ่มีจุดประสงค์เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร (dietary supplement) มักผ่านกระบวนการถนอมรักษาโดยการทำแห้ง และวางจำหน่ายในรูปของเม็ดยาหรือแคปซูล

ตาราง 2 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสาหร่ายสไปรูลินาสด

คุณภาพ	สาหร่ายสไปรูลินาสด
โปรตีน (ร้อยละ)	64.04±2.80
เถ้า (ร้อยละ)	9.09±0.37
ความชื้น (ร้อยละ)	88.17±0.65
ค่ากิจกรรมของน้ำ	0.991±0.00
ค่าสี	
L*	18.06±0.00
a*	-6.06±0.80
b*	12.08±0.00

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)
- การคำนวณในหน่วยร้อยละมาจากการคำนวณโดยฐานแห้ง

จากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาสดมีความชื้น และมีค่ากิจกรรมของน้ำที่สูง แสดงว่ามีปริมาณน้ำอิสระสูง ซึ่งจะก่อให้เกิดการเน่าเสียทั้งจากแบคทีเรีย และปฏิกิริยาทางเคมีได้ง่าย ดังนั้นถ้าหากต้องการเก็บรักษาให้นานขึ้นจะต้องใช้เทคโนโลยีการถนอมอาหาร เช่น การแช่เย็น การแช่เยือกแข็ง และการทำแห้ง เป็นต้น เนื่องจากการดึงน้ำออกจากเซลล์เพื่อลดการทำงานภายในเซลล์ทำให้ยืดอายุการเก็บรักษาได้

6. ลักษณะเซลล์สาหร่าย

จากการดูลักษณะเซลล์สาหร่ายสไปรูลินาสดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบเซลล์ทรงกระบอกหลายเซลล์เรียงต่อกันเป็นเส้นสายตรง หรือขดเป็นเกลียว ซึ่งเซลล์มีลักษณะสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพ 6

ภาพ 6 ลักษณะเซลล์สาหร่ายสไปรูลินาสด กำลังขยาย 40 เท่า

การศึกษาวิธีการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินา

จากศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินา โดยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง เพื่อให้ได้สาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 เพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐาน มผช. 542/2549 สาหร่ายสไปรูลินาแห้ง และสำหรับค่ากิจกรรมของน้ำต้องมีค่าไม่เกิน 0.6 เนื่องจากจุลินทรีย์มีช่วงของค่ากิจกรรมของน้ำที่เจริญได้ ซึ่งค่ากิจกรรมของน้ำที่เหมาะสมที่สุดต่อการเจริญส่วนใหญ่จะเข้าใกล้ 1 ซึ่งเป็นค่าที่สูง และที่จุดนั้นจะมีสารอาหารละลายอยู่เหมาะสมกับการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับค่า กิจกรรมของน้ำต่ำสุดที่จุลินทรีย์จะเจริญได้อยู่ที่ 0.61 ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านั้น ได้แก่ พวกราต่างๆ หากค่า กิจกรรมมีค่าลดลงไปกว่าค่ากิจกรรมของน้ำที่ต่ำสุดที่จุลินทรีย์จะเจริญได้ จะทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้และค่อยๆ ตายลง (Jay, 2000) อีกทั้งค่ากิจกรรมของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการคาดคะเนอายุการเก็บอาหารและเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยของอาหาร โดยทำหน้าที่ควบคุมการอยู่รอด การเจริญ และการสร้างสารพิษของจุลินทรีย์ จากการทดลองได้สภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมดังตาราง 3

ตาราง 3 วิธีการทำแห้งและสภาวะการทำแห้งสำหรับสาหร่ายสไปรูลินาในการทดลอง

วิธีการทำแห้ง	สภาวะที่เหมาะสม
การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์	- ทำการอบแห้งเป็นเวลา 3 วัน
การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน	- ทำที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 2 วัน แล้วเพิ่มเป็น 70 องศาเซลเซียส นาน 2 วัน
การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ	- ทำที่ 70 องศาเซลเซียส นาน 4 วัน
การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย	- ใช้อุณหภูมิขาเข้า 210 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของตัวอย่าง 11 กิโลกรัม/ชั่วโมง
การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง	- ทำที่ -26 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

1. การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนด้วยวิธีเจลดาห์ล (Kjeldahl)

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนของตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาด้วยวิธีเจลดาห์ล (Kjeldahl) พบว่าปริมาณโปรตีนของตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่ทำแห้งต่างวิธีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังแสดงในตาราง 4 โดยพบว่าโปรตีนของสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง มีปริมาณโปรตีนสูงสุด คือร้อยละ 89.04±1.52 รองลงมา คือ สาหร่าย สไปรูลินาจากตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ A และ B โดยตัวอย่างทางการค้าทั้ง 2 ยี่ห้อ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 85.76±2.24 และ 84.91±0.33 ตามลำดับ และในตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 75.40±0.31 ส่วนการทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 72.84±0.37 และ 72.14±0.76 ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และในการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน พบว่ามีปริมาณโปรตีนน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 68.98±0.78

โดยธรรมชาติของสาหร่ายสไปรูลินา สามารถตรึงไนโตรเจนได้ ทำให้ส่วนประกอบโดยส่วนใหญ่เป็นโปรตีน เมื่อนำมาทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน ที่ใช้ความร้อนสูง และระยะเวลาในการทำแห้งที่นาน เมื่อเซลล์สาหร่ายตายเนื่องจากความร้อนแต่ยังเกิดกิจกรรมของเอนไซม์อยู่ จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ออโตไลซิส (autolysis) คือการสลายตัวเองของเซลล์

เนื่องจากเอนไซม์ภายในเซลล์ สาหร่ายสไปรูลินาที่มีการย่อยตัวเองจากรูปร่างที่เป็นสายเกลียว เมื่อเกิดการย่อยตัวเองจะพบว่าเซลล์จะแตกเป็นชิ้นเล็กๆ หรือเซลล์เกิดการแตกหัก ในสภาวะที่เกิดออโตไลซิสสาหร่ายจะมีค่าความเป็นด่างมากกว่า และเมื่อสภาวะด่างเจอกับความร้อนเป็นระยะเวลานานจะทำให้เกิดการย่อยเซลล์ซึ่งการย่อยเซลล์ จากโปรตีนที่เป็นโมเลกุลใหญ่จะถูกย่อยให้เป็นสารประกอบที่เป็นโมเลกุลเล็ก เช่น เพปไทด์ และกรดอะมิโน ซึ่งกรด อะมิโนจะถูกย่อยสลายต่อเป็นเอมีน กรดคีโต แอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้โปรตีนถูกย่อยจนได้ออกเป็นก๊าซไนโตรเจนแล้วระเหยไปในอากาศ (Qiang et al., 2010) ดังนั้นตัวอย่างที่ใช้ความร้อนสูง และเป็นระยะเวลานาน เกิดกระบวนการออโต-ไลซิสจึงสูญเสียปริมาณโปรตีนไปมากกว่าตัวอย่างที่ใช้ความร้อนสูงแต่ระยะเวลาสั้น หรือการทำแห้งโดยไม่ใช้ความร้อน จากการทดลองจึงเห็นได้ว่าการทำแห้งมีผลต่อปริมาณโปรตีนในสาหร่ายสไปรูลินา โดยสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งมีปริมาณโปรตีนสูงสุด เนื่องมาจากการทำแห้งด้วยวิธีนี้ใช้อุณหภูมิต่ำในการทำแห้ง ส่วนการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อนมีปริมาณโปรตีนต่ำสุด เนื่องจากการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูง และเป็นระยะเวลานาน

ลักขณา และคณะ (2540) โดยพบว่าสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งจะมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด คือ ร้อยละ 50.13 ของน้ำหนักแห้ง เมื่อเทียบจากราฟมาตรฐานของ BSA รองลงมาได้แก่ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งโดยการตากแดด โดยมีปริมาณเหลือเพียงร้อยละ 90.42 และ 78.93 ของปริมาณโปรตีนจากการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง ตามลำดับ และจากผลการทดลองการทำแห้งด้วยวิธีตู้อบลมร้อนจะมีปริมาณโปรตีนต่ำที่สุดได้สอดคล้องกับ สินีนาฏ (2550) ในการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนของตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่คำนวณได้จากราฟมาตรฐานของ BSA พบว่าปริมาณโปรตีนของตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนมีปริมาณโปรตีนน้อยที่สุด เนื่องจากการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนทำให้สาหร่ายสไปรูลินาได้รับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานทำให้โครงสร้างของโปรตีนถูกทำลาย ปริมาณโปรตีนจึงสูญเสียไปมากที่สุด แต่ในการทดลองนี้ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย มีปริมาณโปรตีนต่ำกว่าการทำแห้งด้วยวิธีตู้อบสุญญากาศ อาจเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิขาเข้าที่สูงจนเกินไป โดยในการทดลองนี้จะใช้อุณหภูมิขาเข้าสูงถึง 210 องศาเซลเซียส แต่ในงานวิจัยของสินีนาฏ (2550) พบว่าใช้เพียง 160 องศาเซลเซียส ดังนั้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า วิธีที่ใช้อุณหภูมิสูง หรือระยะเวลานานในการทำแห้ง มีผลต่อปริมาณโปรตีนของสาหร่ายสไปรูลินาโดยจะทำให้โครงสร้างของโปรตีนถูกทำลาย จึงสูญเสียปริมาณโปรตีนไปมากกว่าการทำแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ หรือใช้ระยะเวลาที่สั้นในการทำแห้ง

ตาราง 4 ปริมาณโปรตีนในตัวอย่างทางการค้า และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งแต่ละวิธี

ตัวอย่าง	ปริมาณโปรตีน (ร้อยละ) โดยน้ำหนักแห้ง
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A	85.76±2.24[b]
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ B	84.91±0.33[b]
การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์	72.14±0.76[d]
การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน	68.98±0.78[e]
การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ	75.40±0.31[c]
การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย	72.84±0.37[d]
การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง	89.04±1.52[a]

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

- ตัวอักษรยกขึ้นที่แตกต่างกัน [abc] แสดงถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

2. ปริมาณความชื้น (moisture content)

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

เมื่อนำตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธีต่างๆ มาทำการวิเคราะห์ ความชื้นตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 5 วิธี รวมถึงตัวอย่างทางการค้า 2 ยี่ห้อ พบว่าในทุกตัวอย่างมีความชื้นลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 2.83-8.11 โดยมีค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 ซึ่งสอดคล้อง

ตามมาตรฐาน มผช. 542/2549 สาหร่ายสไปรูลินาแห้ง ยกเว้นตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ A มีความชื้นมากกว่าร้อยละ 7 ดังแสดงในตาราง 5

3. ค่ากิจกรรมของน้ำ

ค่ากิจกรรมของน้ำของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งทุกตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.147–0.428 ดังแสดงในตาราง 5 ซึ่งจะเห็นว่าทุกตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นค่ากิจกรรมของน้ำที่เหมาะสมสำหรับอาหารแห้ง และสำหรับค่ากิจกรรมของน้ำ ต้องมีค่าไม่เกิน 0.6 เนื่องจาก วอเตอร์แอกทิวิตี เป็นปัจจัยสำคัญในการคาดคะเนอายุการเก็บอาหารและเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยของอาหาร โดยทำหน้าที่ควบคุมการอยู่รอด การเจริญ และการสร้างสารพิษของจุลินทรีย์ ได้ จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้และค่อยๆ ตายลง (Jay, 2000)

4. ค่าสี (L*, a*, b*)

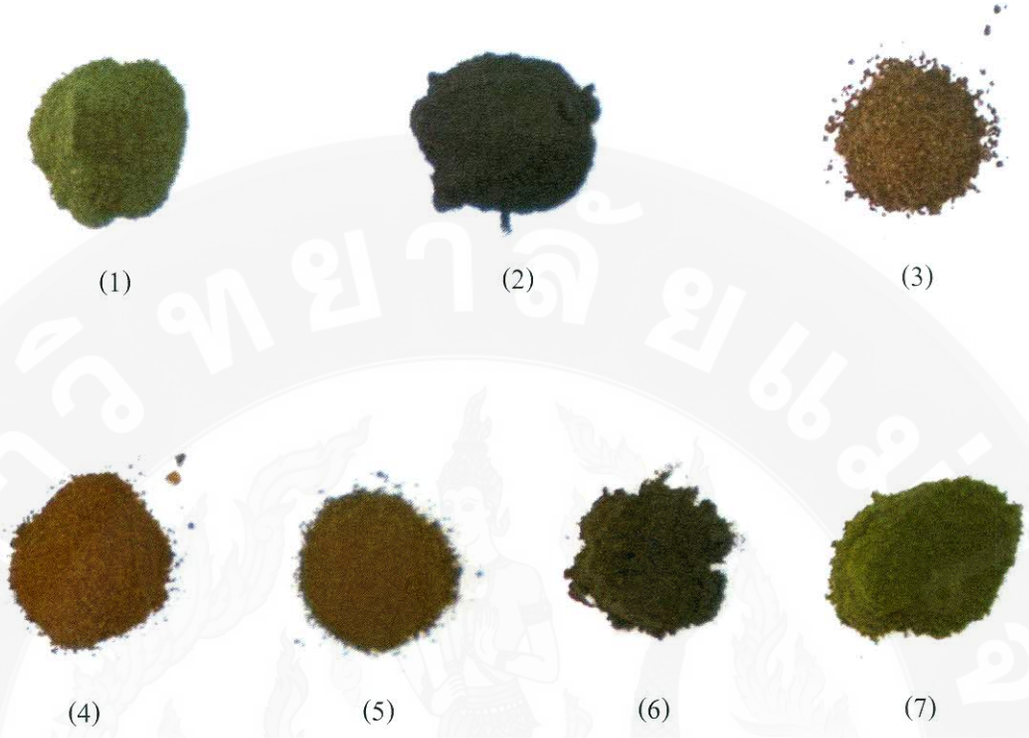
ตัวอย่างสาหร่ายที่ผ่านการทำแห้งในแต่ละวิธีจะให้สีของตัวอย่างที่แตกต่างกัน โดยมีค่า L* a* และ b* อยู่ในช่วง 20.29 ถึง 31.64, -9.65 ถึง 6.24 และ 5.86 ถึง 18.70 ตามลำดับ สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A ยี่ห้อ B สาหร่ายที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง จะมีสีของผงสาหร่ายเป็นสีเขียวแต่ในตัวอย่าง การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน และ การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ สาหร่ายผงจะมีสีน้ำตาลเหลือง หรือน้ำตาลแดง ดังแสดงในภาพ 7 และเมื่อนำตัวอย่างสาหร่ายผงไปวัดค่าสีในระบบ CIE (L^*, a^*, b^*) จะได้ผลดังแสดงในตาราง 6

ตาราง 5 ปริมาณความชื้น และค่ากิจกรรมของน้ำในสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

สาหร่ายสไปรูลินาแห้ง	ความชื้น (ร้อยละ)	ค่ากิจกรรมของน้ำ (a_w)
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A	8.11 ± 0.06^{a}	0.428 ± 0.00^{a}
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ B	6.92 ± 0.10^{ab}	0.387 ± 0.00^{b}
การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์	6.15 ± 0.34^{b}	0.342 ± 0.03^{bc}
การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน	6.90 ± 0.05^{ab}	0.356 ± 0.02^{c}
การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ	5.77 ± 0.82^{b}	0.300 ± 0.05^{d}
การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย	2.83 ± 0.11^{c}	0.221 ± 0.02^{e}
การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง	3.61 ± 1.38^{c}	0.147 ± 0.03^{f}

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

- ตัวอักษรยกขึ้นที่แตกต่างกัน ^{abc} แสดงถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



ภาพ 7 ตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธีต่างๆ

หมายเลข (1) คือ สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A

หมายเลข (2) คือ สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ B

หมายเลข (3) คือ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์

หมายเลข (4) คือ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน

หมายเลข (5) คือ การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ

หมายเลข (6) คือ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย

หมายเลข (7) คือ การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง

ตาราง 6 ค่าสีตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผง

สาหร่ายสไปรูลินาผง	L*	a*	b*
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A	31.64±1.18[a]	-9.65±1.15[c]	8.74±1.36[b]
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ B	22.99±0.63[d]	-5.00±1.84[b]	5.86±0.28[b]
การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์	30.90±1.57[ab]	6.24±0.98[a]	18.70±2.21[a]
การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน	30.44±1.47[abc]	4.84±0.99[a]	18.65±2.43[a]
การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ	27.34±1.18[c]	4.45±1.32[a]	15.83±1.65[a]
การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย	20.29±0.19[d]	-3.21±0.62[b]	10.02±0.43[b]
การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง	28.03±0.54[bc]	-2.53±0.52[b]	10.72±0.74[b]

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

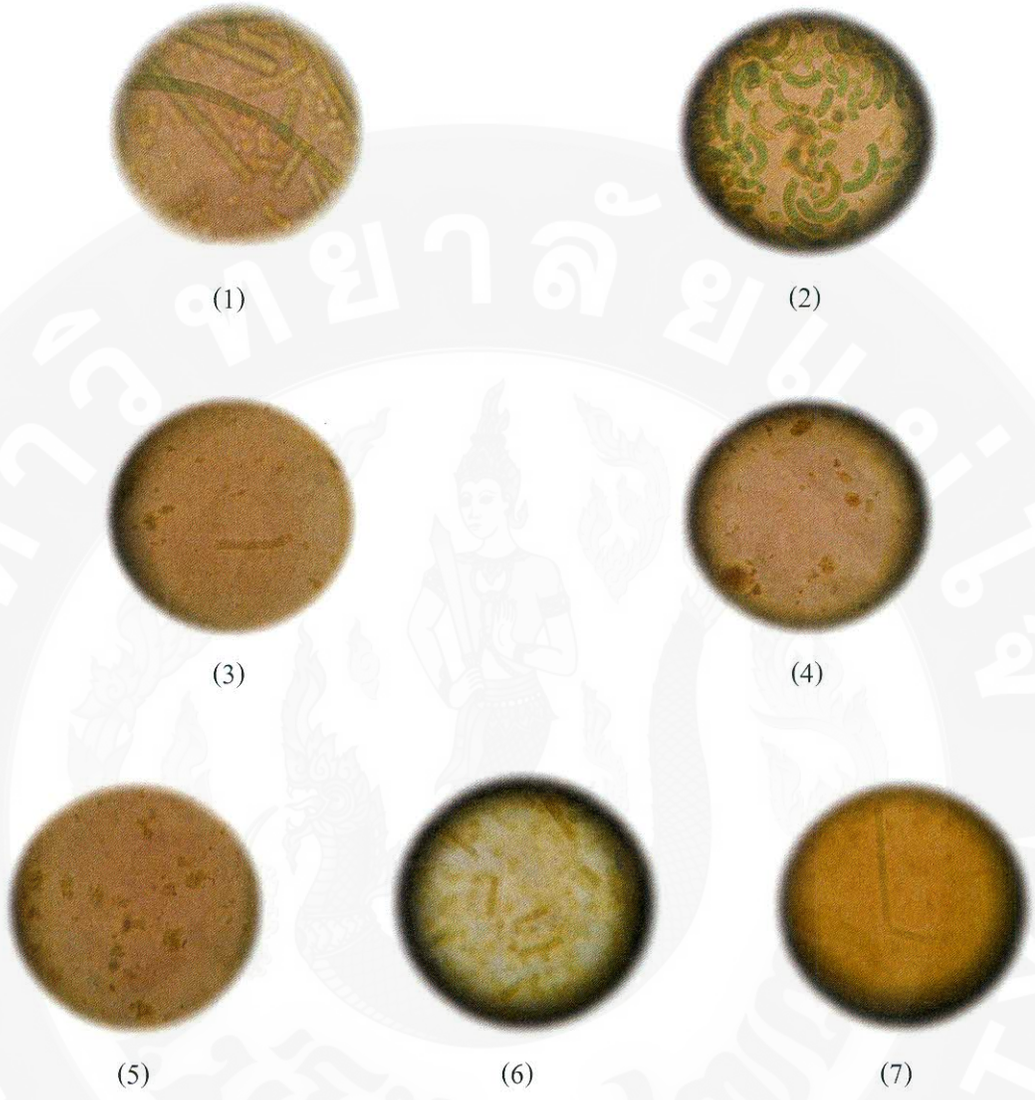
- ตัวอักษรยกขึ้นที่แตกต่างกัน [abc] แสดงถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยความร้อนสูง และเป็นระยะเวลานาน จะพบว่าจะมีสีเขียวคล้ำ หรือเป็นสีน้ำตาลแดง เมื่อเทียบกับตัวอย่างทางการค้า และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธี ฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง ซึ่งมีสีเขียว สาเหตุเหล่านี้อาจเนื่องมาจากกรดอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปโดยใช้ความร้อนมีผลทำให้คลอโรฟิลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและเคมี โดยทำให้เนื้อเยื่อของเซลล์เปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีเขียวอมน้ำตาล เนื่องจากอะตอมของแมกนีเซียมในโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ถูกแทนที่โดยอะตอมของไฮโดรเจน คลอโรฟิลล์ในพืชชั้นสูงจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของโปรตีน (chlorophyll-protein complex) โปรตีนที่ติดอยู่กับคลอโรฟิลล์ช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์ แต่เมื่อโปรตีนได้รับความร้อนเกิดการเสียสภาพทำให้คลอโรฟิลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นอนุพันธุ์ชนิดอื่น (Lajallo and Lanfer, 1982)

5. ลักษณะเซลล์สาหร่าย

ในการศึกษาลักษณะเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลินาพบว่า ในตัวอย่างของทางการค้าทั้ง 2 ยี่ห้อ มีลักษณะของเซลล์ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ คือมีลักษณะเป็นแท่ง เซลล์ไม่มีการแตกหรือเกิดความเสียหายแก่เซลล์มาก สำหรับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และการทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอยยังคงมีลักษณะเซลล์ที่เป็นแท่งอยู่จำนวนหนึ่งแต่โดยส่วนใหญ่เซลล์จะถูกทำลายเหลือเป็นท่อนสั้นๆ และสำหรับการทำแห้งแบบตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ ตู้อบลมร้อน และตู้อบสุญญากาศ พบว่าลักษณะของเซลล์เสียหายค่อนข้างมาก ผนังเซลล์ฉีกขาด และถูกทำลาย แทบจะไม่พบลักษณะเป็นท่อนของสาหร่าย ด้วยเหตุนี้อาจเนื่องมาจากความร้อนที่เหมาะสมที่สามารถทำให้เซลล์แตกออก (Hirata et al., 2000) ดังแสดงในภาพ 8

จากการวิจัยของ Shih et al. (2009) ได้ทำการศึกษา ผลของการอบแห้งและการอัดขึ้นรูปต่อสี องค์ประกอบทางเคมี ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ พบว่าการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง มีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลสูงที่สุด มากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากโครงสร้างในเนื้อเยื่อระหว่างการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง มีการแตกหัก ทำให้ง่ายต่อการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งส่งผลให้การทำแห้งด้วยวิธีดังกล่าวมีผลดีกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน



ภาพ 8 ลักษณะเซลล์สาหร่ายผง (กำลังขยาย 40 เท่า)

หมายเลข (1) คือ สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A

หมายเลข (2) คือ สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ B

หมายเลข (3) คือ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์

หมายเลข (4) คือ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน

หมายเลข (5) คือ การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ

หมายเลข (6) คือ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย

หมายเลข (7) คือ การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง

ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมดของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

จากการเตรียมสารสกัดจากสาหร่ายสไปรูลินาผงจะได้สารสกัดที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรของสารสกัดในการใช้วิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

สารประกอบพอลิฟีนอลมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ จึงได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลในแต่ละวิธีการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินา ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาที่ทำแห้งด้วยวิธีที่แตกต่างกันมีปริมาณสารประกอบพอลิ-ฟีนอลทั้งหมดอยู่ในช่วง 104.22±1.80 ถึง 1017.50±7.48 mg GAE/100g dry weight โดยการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ มีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมดมากที่สุด รองลงมาเป็นการทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย การทำแห้งด้วยวิธี แช่เยือกแข็ง ตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ A และตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ B ตามลำดับ ($p<0.05$) ดังแสดงในตาราง 7 การทำแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงปานกลางคือที่ 70 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่ปราศจากอากาศ (ออกซิเจน) ทำให้สามารถรักษาสารประกอบพอลิฟีนอลไว้ได้ดีกว่าการทำแห้งโดยวิธีอื่นๆ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ และการใช้ตู้อบลมร้อน จัดเป็นการทำแห้งที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แต่ต้องทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมให้แน่นอน และคงที่ต่อไป เพื่อให้ได้สาหร่ายสไปรูลินาแห้งที่มีคุณภาพ และมีค่า ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ดี สำหรับการทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย เป็นการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าทุกวิธีแต่ในการทดลองนี้อุณหภูมิสูงมาก คือที่ 210 องศาเซลเซียส ทำให้มีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมดต่ำกว่าวิธีอื่นๆ (Tiburcio et al., 2007) นอกจากนี้การทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอยยังเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง อาจสูงถึงร้อยละ 30 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

จากการทดลองของ Kepekci et al. (2013) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสาหร่าย สไปรูลินามีค่าเท่ากับ 6.32±3.89 mg GAE/g และเมื่อเลี้ยงโดยการเพิ่มความเข้มของแสงเพื่อกระตุ้นการสร้างสารประกอบฟีนอลิกพบว่ามีค่าเท่ากับ 49.83±5.56 mg GAE/g ซึ่งเพิ่มขึ้นกว่าเดิมประมาณ 8 เท่า สำหรับงานวิจัยของ Pagnussatt et al. (2013) พบว่าในสาหร่ายสไปรูลินามีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 70 มิลลิกรัม/100 กรัม โดยวัดด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้

ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

จากการเตรียมสารสกัดจะได้สารสกัดที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.01 กรัมต่อมิลลิลิตรของสารสกัดในการใช้วิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

1. DPPH radical scavenging activity

วิธีนี้จะใช้ค่าร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระ ซึ่งโดยปกติแล้วในวิธีนี้มักจะรายงานเป็นค่า IC_{50} คือ ค่าความเข้มข้นของสารสกัดที่สามารถยังยั้งอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50 แต่ในการทดลองนี้สีของสารสกัดที่ได้ส่งผลต่อการทดลอง เมื่อไล่ระดับความเข้มข้นจะพบว่าแนวโน้มของกราฟจะโค้งลง เนื่องจากเมื่อสารสกัดสาหร่ายที่มีความเข้มข้นสูงสามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ดี สารละลาย DPPH จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อรวมกับสีของสารสกัดสาหร่าย ทำให้สีที่ได้เข้มมากขึ้น การอ่านค่าการดูดกลืนแสงคลาดเคลื่อน ดังนั้น ในการทดลองจึงรายงานค่าเป็น ร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระ (% inhibition) โดยหากวิธีการทำแห้งใดที่มีร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระสูงจะหมายถึงมีประสิทธิภาพในการยับยั้ง หรือกำจัดอนุมูลอิสระได้ดี จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ จะมีร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระสูงที่สุด รองลงมาคือการทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และตัวอย่างทางการค้าทั้ง 2 ยี่ห้อ ดังแสดงในตาราง 7 โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เวลานาน จะทำให้สูญเสียความสามารถในการต้านออกซิเดชันไปได้มากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง เวลาสั้น เช่นในกรณีของการทำแห้ง red bell-pepper (พริกแดงหวาน) โดยใช้ตู้อบไมโครเวฟที่ 700 วัตต์จะสามารถรักษาความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้ดีกว่าการใช้ตู้อบไมโครเวฟที่ 210 วัตต์ ซึ่งร้อนน้อยกว่าและใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่า โดยการประเมินจากค่า TEAC และ DPPH assay (Arslan and Ozcan, 2011)

2. Ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay

ในวิธีนี้จะใช้ Fe^{2+} ในการหาความสามารถในการรีดิวซ์จาก Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} หากวิธีการทำแห้งใดที่มีปริมาณ Fe^{2+} มากจะหมายถึงมีประสิทธิภาพในการยับยั้ง หรือกำจัดอนุมูลอิสระได้ดี สาหร่ายสไปรูลินาที่ทำแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 17.64-98.37 μg Fe^{2+}/g โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ จะมีความสามารถในการรีดิวซ์สูงที่สุด รองลงมาเป็นการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย การทำแห้ง

ด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง ตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าสาหร่ายที่จำหน่ายในทางการค้า ($p<0.05$) ดังแสดงในตาราง 7

3. ABTS$^+$ radical scavenging activity

วิธีนี้จะใช้ค่า IC_{50} เป็นค่าที่สารสกัดสามารถยับยั้ง หรือกำจัดอนุมูลอิสระได้ครึ่งหนึ่ง ถ้าค่าที่ได้มีค่าน้อย แสดงว่าสารสกัดจากตัวอย่างมีประสิทธิภาพในการยับยั้ง หรือกำจัดอนุมูลอิสระได้ดี เมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้น 5 ระดับ แล้วนำมาคำนวณหาค่า IC_{50} พบว่า สาหร่ายสไปรูลินาที่ทำแห้งมีค่า IC_{50} อยู่ในช่วง 2.88-0.54 โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ และการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และมีค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าตัวอย่างสาหร่าย สไปรูลินาที่จำหน่ายในทางการค้า ($p<0.05$) ดังแสดงในตาราง 7

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพของสาหร่ายผง ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศมีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอล และความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงที่สุด รองลงมาคือ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน และการทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากการทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์เป็นวิธีที่ควบคุมอุณหภูมิในการทำแห้งได้ยาก ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งมีความไม่สม่ำเสมอซึ่งจะขึ้นกับสภาพอากาศ และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นทางผู้ทดลองจึงได้เลือกวิธีการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน มาศึกษาอายุการเก็บรักษา เทียบกับตัวอย่างทางการค้า 2 ยี่ห้อ ดังแสดงในตาราง 7

สำหรับตัวอย่างทางการค้าจะพบว่ามีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งในห้องปฏิบัติการอาจเนื่องมาจาก ในตัวอย่างทางการค้ามีการผลิตและเก็บรักษามาเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งทำให้การทำแห้งเริ่มต้นไม่เท่ากับอย่างที่ผ่านการทำแห้งในห้องปฏิบัติการจึงทำให้ประสิทธิภาพของสารต้านออกซิเดชันในสาหร่ายทางการค้ามีความสามารถลดลงจึงมีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมดและความสามารถในการต้านออกซิเดชันน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งในห้องปฏิบัติการ

ตาราง 7 ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันในตัวอย่างสาหร่ายทางการค้า และสาหร่ายผง

ตัวอย่าง	TPC (mg GAE/100 g dry weight)	Antioxidant activity		
		DPPH (% Inhibition) (0.8 mg/ml)	IC_{50} of ABTS assay (mg/mL)	FRAP (μg Fe^{2+}/g)
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A**	139.81±1.12^{e}	3.11±0.64^{d}	1.68±0.22^{b}	19.57±1.99^{e}
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ B**	104.22±1.80^{f}	2.85±0.35^{d}	2.88±0.28^{a}	17.64±2.69^{de}
การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์	807.91±5.42^{b}	16.65±1.40^{b}	0.62±0.08^{d}	57.72±3.53^{b}
การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน**	809.77±5.76^{b}	13.77±1.11^{c}	0.54±0.13^{d}	59.75±1.73^{b}
การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ**	1017.50±7.48^{a}	22.67±2.78^{a}	0.56±0.26^{d}	98.37±1.30^{a}
การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย	189.40±3.72^{c}	2.51±1.24^{d}	0.99±0.06^{c}	27.64±2.87^{c}
การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง	168.34±1.91^{d}	2.72±1.27^{d}	0.86±0.07^{c}	24.77±5.11^{cd}

หมายเหตุ
- ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6)
- ตัวอักษรยกขึ้นที่แตกต่างกัน ^{abc} แสดงถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)
- ตัวอย่างที่ยกขึ้นด้วย ** จะถูกนำไปศึกษาอายุการเก็บรักษา

จากการศึกษาพบว่า ทั้งปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันในตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบแบบสุญญากาศ จะให้ผลดีที่สุด ซึ่งแตกต่างจาก งานวิจัยของ Dalbir et al. (2014) ที่ได้ทำการทำแห้งมะม่วงหั่นเต๋า ด้วยวิธี freeze drying, cabinet (hot-air), vacuum และ Infra-red พบว่าผงมะม่วงที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธี freeze drying จะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมากที่สุดคือ 1725.2 mg GAE/100g db. ส่วนวิธีที่ได้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกน้อยที่สุดคือ การทำแห้งด้วยวิธี cabinet (hot-air) โดยมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอยู่ที่ 936.2 mg GAE/100g db. และการรายงานของชาลีดา (2555) ที่กล่าวว่า วิธีการทำแห้งที่เหมาะสมกับอาหารที่ไวต่อการเสื่อมสภาพจากความร้อน เช่น ผัก ผลไม้ สมุนไพร อาหารที่มีสารหอมระเหย และผลิตภัณฑ์ยา ต้องเป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิต่ำในการทำแห้ง เพื่อผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะมีคุณภาพที่ดี มีการทำลายโครงสร้างน้อย สามารถรักษาสารหอมระเหย สี และคุณค่าทางโภชนาการได้ใกล้เคียงก่อนการทำแห้ง โดยวิธีที่นิยมใช้คือ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการรักษาโครงสร้างที่ดีของวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือก-แข็ง ทำให้ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันที่ได้น้อยกว่าตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิสูง และเวลานานในการทำแห้ง เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Thermal reaction คือการทำแห้งโดยใช้ความร้อนและระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะทำให้เซลล์แตกและสามารถปลดปล่อยสารสำคัญออกมา ซึ่งถือเป็นข้อดีของการทำแห้งผลิตภัณฑ์บางชนิด ตามงานวิจัยของ Barbieri et al. (2004) ได้ศึกษาการทำแห้งใบโหระพาด้วยลมร้อน และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ พบว่าสารหอมระเหยบางชนิดเกิดปรากฏการณ์ thermal reaction เช่น methyl chavicol ที่ผ่านการทำแห้งด้วยการอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยพบว่ามีปริมาณมากกว่าในใบโหระพาสด

ในงานวิจัยของ Ozlem et al. (2015) ได้ทำการศึกษาการทำแห้งต่อสมบัติการต้านออกซิเดชันในมะเขือเทศ และขิง โดยมีการทำแห้งอยู่ 4 วิธี ได้แก่ การทำแห้งด้วยวิธีตากแดด การทำแห้งด้วยการใช้ไมโครเวฟ การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และ การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง พบว่าการทำแห้งที่มีสมบัติการต้านออกซิเดชันสูงที่สุดคือ การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง แต่งานวิจัยนี้ก็ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Toor and Savage (2006) ที่กล่าวว่ามะเขือเทศที่ทำแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ (42 องศาเซลเซียส) มีสารประกอบฟีนอลิกต่ำกว่ามะเขือเทศสด ผลดังกล่าวเนื่องมาจากระหว่างการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ จะไปกระตุ้น การทำงานของเอนไซม์ เช่น polyphenol oxidase (PPO) ซึ่งทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียสารประกอบฟีนอลิก และ Arslan and Ozcan (2011) กล่าวว่าการทำแห้งมีผลทำให้อาหารอบแห้งมีคุณภาพด้อยลงโดยเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาคาราเมล และ

เมลลาร์ด การเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากเอนไซม์ การเสื่อมสลายของรงควัตถุ และการออกซิเดชันของกรดแอสคอร์บิก

ในการศึกษาของ Tripti et al. (2011) ทำการศึกษาผลของการทำแห้งต่อปริมาณฟีนอลิก และความสามารถในการต้านออกซิเดชันขององุ่น โดยมีการอบแห้งทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ vacuum belt drying (VBD), hot air drying (HAD) และ freeze drying (FD) พบว่า การทำแห้งด้วยวิธี vacuum belt drying (VBD) จะรักษาสารประกอบฟีนอลิก และความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้มากกว่าการทำแห้งด้วยวิธี hot air drying (HAD)

การศึกษาของ Yujing et al. (2015) ได้ทำการศึกษาผลของการทำแห้งต่อสาร phytochemical และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ของผลส้มดิบ โดยมีการอบแห้ง 3 วิธี ได้แก่ sun-drying, hot air-drying และ freeze-drying โดยผลงานวิจัยดังกล่าวพบว่าการทำแห้งแบบ freeze-drying จะยังมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมากกว่า และสามารถรักษาสารซินเนฟฟรีน (synephrine) และความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้ดีกว่าการทำแห้งด้วยวิธีอื่น ส่วนการทำแห้งด้วย hot air-drying จะมีปริมาณ flavonoids สูงสุด และการอบแห้งทั้ง 3 วิธี มีความสามารถในการรักษาสารลิโมนอยด์ (limonoids) ได้ไม่แตกต่างกัน

ในงานวิจัยของ Sirithon et al. (2012) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสี ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน และแคโรทีนอยด์ (ไลโคปีน เบต้าแคโรทีน ลูทีน) ของดาวเรือง จากกระบวนการทำแห้งที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้มีการทำแห้งทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ freeze drying (FD), hot air drying (HA) และ การใช้รังสีอินฟาเรดร่วมกับลมร้อน (FIR-HA) จากการศึกษาดังกล่าว พบว่า การทำแห้งด้วยการใช้รังสีอินฟาเรดร่วมกับลมร้อน (FIR-HA) จะให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงกว่าตัวอย่างดอกดาวเรืองสด อีกทั้งยังมีสารลูทีน และไลโคปีน ที่สูง ขณะที่ การทำแห้งด้วยวิธี hot air drying (HA) จะมีปริมาณของสารเบต้าแคโรทีนที่สูงที่สุด เนื่องจากการใช้รังสีอินฟาเรดร่วมกับลมร้อน (FIR-HA) เป็นการลดเวลาในการทำแห้งโดยใช้ความเข้มของรังสี FIR ที่ 5 kW/m^2 และใช้ลมร้อนในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ส่วนการทำแห้งโดยวิธี freeze drying (FD) จะใช้อุณหภูมิที่ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และการทำแห้งโดยวิธี hot air drying (HA) จะใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากกระบวนการในการทำแห้งทำให้ การใช้รังสีอินฟาเรดร่วมกับลมร้อน (FIR-HA) ไม่ส่งผลต่อสี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

ไม่เพียงแต่วิธีการทำแห้งเท่านั้น ที่มีผลต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชัน กระบวนการวิธีการสกัด ความเข้มข้นหรือชนิดของตัวทำละลายก็มีผลต่อประมาณสารออกฤทธิ์ที่

ได้เช่นกัน ดังในงานวิจัยของ Cepoi et al. (2010) ได้ศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของจากการใช้เอทานอลสกัดจาก *Spirulina platensis* และ *Nostoc linckia* จากการทดสอบด้วยวิธี Radical scavenging activity using radical DPPH พบว่าที่ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 10-40 จะมีการยับยั้งร้อยละ 30 แต่หากเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลเป็นร้อยละ 55-70 พบว่าความสามารถในการยับยั้งจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 46 และ 52 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 10-40 จากการสกัดสาหร่ายนอสตอก พบว่ามีค่าสูงกว่าสไปรูลินาโดยมีความสามารถในการยับยั้งอยู่ที่ร้อยละ 40 เมื่อทดสอบด้วยวิธี Activity of radical cation ($ABTS^+$) พบว่า ร้อยละการยับยั้งของสาหร่ายสไปรูลินา และนอสตอก เมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 10 จะมีร้อยละการยับยั้งของ $ABTS^+$ อยู่ที่ 38 และ 56 แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลเป็นร้อยละ 70 จะมีร้อยละการยับยั้งของ $ABTS^+$ อยู่ที่ 48 และ 44 ตามลำดับ จากงานวิจัยนี้เป็นไปได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะส่งผลให้ความสามารถในการต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่กล่าวมานั้นให้ผลการวิจัยที่แตกต่างกันไป การทำแห้งแต่ละวิธีก็จะให้ผลที่มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน อาหารที่มีลักษณะทางกายภาพ ลักษณะธรรมชาติของอาหาร รูปร่างของอาหาร ปริมาณของอาหาร สารประกอบในอาหาร รวมถึงวิธีหรือกระบวนการที่ใช้ในการทำแห้งอาหารย่อมมีผลและให้ผลที่แตกต่างกัน ดังนั้น อาหารแต่ละชนิดมีความเหมาะสมที่แตกต่างกันในแต่ละวิธีการทำแห้ง

ศึกษาผลของการเก็บรักษาต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

ในการศึกษาผลของการเก็บรักษาต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาขั้นตอนนี้ จะเป็นตัวอย่างที่นำมาจากฟาร์มคนละรอบการทดลอง ซึ่งอาจทำให้ค่าการวิเคราะห์เริ่มต้นที่ได้ มีค่าแตกต่างจากรายการวิเคราะห์เบื้องต้น ดังนี้

1. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ

1.1.1 ปริมาณความชื้น (moisture content)

จากการวิเคราะห์ความชื้นพบว่าตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาแห้งทางการค้าทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามอายุการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ในการเก็บรักษาตั้งแต่วันที่ 30 พบว่าทุกตัวอย่างมีค่าความชื้นที่สูงกว่า ร้อยละ 7 (ภาคผนวก ข) ซึ่งเกินกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

(มผช.) ฉบับที่ 542 (พ.ศ. 2549) เรื่อง สาหร่ายสไปรูลินาแห้ง ที่ได้กำหนดปริมาณความชื้นของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งให้มีค่าไม่เกินร้อยละ 7 ดังแสดงในตาราง 8

1.1.2 ค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity)

ค่ากิจกรรมของน้ำในทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ไม่เกิน 0.6 ดังแสดงในตาราง 8 โดยจะเห็นว่าเมื่อระยะเวลาอายุการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น ทุกตัวอย่างมีแนวโน้มของค่ากิจกรรมของน้ำเพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีค่ากิจกรรมของน้ำต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นค่ากิจกรรมของน้ำที่เหมาะสมสำหรับอาหารแห้ง โดยค่ากิจกรรมของน้ำต้องไม่เกิน 0.6 เนื่องจาก ค่ากิจกรรมของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการคาดคะเนอายุการเก็บอาหารและเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยของอาหาร โดยทำหน้าที่ควบคุมการอยู่รอด การเจริญ และการสร้างสารพิษของจุลินทรีย์

1.1.3 ค่าสี (colour value) (*L*, a*, b)**

ตัวอย่างสาหร่ายที่ผ่านการทำแห้งในแต่ละวิธีจะให้สีของตัวอย่างที่แตกต่างกัน โดยเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นค่า L* a* และ b* จะมีการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่าง โดยในทุกตัวอย่างจะมีค่า L*, b* ที่เพิ่มขึ้น และ a* มีค่าลดลง สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A ยี่ห้อ B จะมีสีของผงสาหร่ายเป็นสีเขียว และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อนจะมีสีของผงสาหร่ายเป็นสีเขียวคล้ำแต่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ สาหร่ายผงจะมีสีน้ำตาลแดง ดังตาราง 8

ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน จะมีสีน้ำตาลแดง เมื่อเทียบกับตัวอย่างทางการค้าซึ่งมีสีเขียว เนื่องมาจากกรดอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปโดยใช้ความร้อนมีผลทำให้คลอโรฟิลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและเคมี โดยทำให้เนื้อเยื่อของเซลล์เปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีเขียวอมน้ำตาลเนื่องจากอะตอมของแมกนีเซียมในโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ถูกแทนที่โดยอะตอมของไฮโดรเจน คลอโรฟิลล์ในพืชชั้นสูงจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของโปรตีน (chlorophyll-protein complex) โปรตีนที่ติดอยู่กับคลอโรฟิลล์ช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์ แต่เมื่อโปรตีนได้รับความร้อนเกิดการเสียสภาพทำให้คลอโรฟิลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นอนุพันธุ์ชนิดอื่น (Lajallo and Lanfer, 1982) เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นค่าสีของสไปรูลินาผงมีการเปลี่ยนแปลง โดยตัวอย่างทางการค้าทั้ง 2 ยี่ห้อ พบว่าค่า L*, a*, b* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน
จะมีค่า L*, a*, b* ที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ระหว่างการทำแห้ง การที่ใช้ระยะเวลานาน และอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงในการทำแห้ง เมื่อทำการเก็บรักษาจึงมีค่าสีที่ไม่เปลี่ยนแปลง (Arabhosseini et al., 2007)

ตาราง 8 ความชื้น ค่ากิจกรรมของน้ำ และค่าสี ของสาหร่ายสไปรูลินาในระหว่างการเก็บรักษา เป็นระยะเวลา 90 วัน

คุณภาพ	สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A		สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ B		การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน		การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ	
	วันที่ 0	วันที่ 90	วันที่ 0	วันที่ 90	วันที่ 0	วันที่ 90	วันที่ 0	วันที่ 90
ความชื้น	6.74 ± 0.04^{b}	7.93 ± 0.05^{c}	$7.45\pm0.09^{a,ns}$	$7.65\pm0.02^{d,ns}$	5.49 ± 0.08^{c}	10.08 ± 0.05^{a}	4.89 ± 0.22^{d}	9.85 ± 0.12^{b}
ค่ากิจกรรมของน้ำ	0.387 ± 0.00^{c}	0.461 ± 0.00^{d}	0.467 ± 0.01^{a}	0.492 ± 0.00^{c}	0.429 ± 0.00^{b}	0.537 ± 0.00^{a}	0.360 ± 0.00^{d}	0.507 ± 0.00^{b}
ค่าสี								
L*	28.87 ± 0.67^{a}	31.84 ± 0.11^{a}	$18.47\pm0.61^{c,ns}$	$18.73\pm0.27^{c,ns}$	$22.40\pm0.92^{b,ns}$	$21.02\pm0.14^{b,ns}$	23.87 ± 0.95^{b}	20.99 ± 0.05^{b}
a*	-8.50 ± 0.10^{d}	-11.34 ± 0.27^{d}	-6.67 ± 0.06^{c}	-10.14 ± 0.16^{c}	-1.03 ± 0.15^{b}	0.48 ± 0.12^{b}	5.97 ± 0.65^{a}	8.79 ± 0.06^{a}
b*	7.87 ± 0.21^{c}	9.81 ± 0.34^{c}	2.27 ± 0.23^{d}	5.37 ± 0.29^{d}	$11.03\pm0.76^{b,ns}$	$11.25\pm0.52^{b,ns}$	17.27 ± 0.38^{a}	15.16 ± 0.34^{a}

หมายเหตุ
- ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)
- ตัวอักษรยกขึ้นที่แตกต่างกัน ^{abc} แสดงถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในตัวอย่างสาหร่ายผง
- ตัวอักษรยกขึ้น ^{ns} แสดงถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ระหว่างการเก็บรักษาในวันที่ 0 และ 90

2. ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด

จากผลการทดลอง พบว่าการทำแห้งด้วยวิธีตู้อบสุญญากาศ มีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลค่ามากที่สุด รองลงมาเป็นการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน และมีค่าสูงกว่าสาหร่ายที่จำหน่ายในทางการค้า ($p<0.05$) และเมื่อระยะเวลาในการการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลก็จะมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในตาราง 9 และเมื่อทำการคำนวณหาอัตราในการลดลงของปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลพบว่าตัวอย่างยี่ห้อ A มีอัตราเร็วในการสูญเสียปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลมากที่สุด รองลงมาคือ การทำแห้งด้วยวิธีตู้อบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน และตัวอย่างยี่ห้อ B ดังแสดงในตาราง 11

3. ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

จากการศึกษาความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH radical scavenging activity, Ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay และ $ABTS^{+}$ radical scavenging activity พบว่า การทำแห้งด้วยวิธีตู้อบสุญญากาศ มีค่ามากที่สุด รองลงมาเป็นการทำแห้งด้วย การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน และมีค่าสูงกว่าสาหร่ายที่จำหน่ายในทางการค้ายี่ห้อ A และ B ($p<0.05$) ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาในการการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ความสามารถในการต้านออกซิเดชันทั้ง 3 วิธีก็จะมีแนวโน้มลดลงซึ่งทั้ง3วิธีนี้ให้ผลที่สอดคล้องกันแต่เมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณถึงร้อยละการลดลงของความสามารถในการต้านออกซิเดชันพบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน และ การทำแห้งด้วยวิธีตู้อบสุญญากาศ มีค่าร้อยละการลดลงของความสามารถในการต้านออกซิเดชันมากกว่าตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ A และ B ดังแสดงในตาราง 10 และ 11

ตาราง 9 ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด (TPC) ในระหว่างการเก็บรักษา เป็นระยะเวลา 90 วัน

ตัวอย่าง	TPC (mg GAE/100g dry weight)	
	วันที่ 0	วันที่ 90
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A[c,**]	203.99±0.06	151.96±0.01
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ B[d,**]	110.50±0.02	94.32±0.01
การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน [b,**]	378.94±0.08	318.23±0.04
การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ[a,**]	622.81±0.11	501.37±0.05

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6)

- ตัวอักษรยกขึ้นที่แตกต่างกัน [abc] แสดงถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในตัวอย่างสาหร่ายผง

- สัญลักษณ์ที่ยกขึ้น [**] แสดงถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ระหว่างการเก็บรักษาในวันที่ 0 และ 90

ตาราง 10 ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา (DPPH, FRAP, ABTS) ในระหว่างการเก็บรักษา เป็นระยะเวลา 90 วัน

ตัวอย่าง	DPPH (% Inhibition) (ที่ระดับความเข้มข้น 0.8 mg/ml)		FRAP (μg Fe^{2+}/g)		ABTS (IC_{50} mg/ml)	
	วันที่ 0	วันที่ 90	วันที่ 0	วันที่ 90	วันที่ 0	วันที่ 90
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ A[c,**]	4.81±0.28	3.05±0.43	32.89±1.18	28.35±0.93	1.51±0.05	2.26±0.05
สาหร่ายทางการค้ายี่ห้อ B[d,**]	3.88±0.34	2.02±0.27	26.19±1.39	22.61±0.46	2.80±0.03	3.60±0.02
การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน [b,**]	7.97±0.37	4.12±0.45	39.58±1.73	31.21±0.46	1.24±0.07	1.90±0.03
การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ[a,**]	13.07±0.57	6.45±0.56	60.89±1.16	38.53±1.54	0.87±0.01	1.28±0.06

หมายเหตุ
- ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6)
- ตัวอักษรยกขึ้นที่แตกต่างกัน [abc] แสดงถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในตัวอย่างสาหร่ายผง
- สัญลักษณ์ที่ยกขึ้น [**] แสดงถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ระหว่างการเก็บรักษาในวันที่ 0 และ 90

ตาราง 11 ร้อยละการลดลงของปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (วันที่ 90)

ตัวอย่าง	สาหร่ายทางการค้า ยี่ห้อ A	สาหร่ายทางการค้า ยี่ห้อ B	การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน	การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ
TPC (mg GAE/100g dry weight)	25.51	14.64	16.02	19.50
ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน				
DPPH (% Inhibition)	36.49	47.81	48.35	50.70
FRAP (μg Fe^{2+}/g)	13.81	13.69	21.14	36.71
ABTS (IC_{50} mg/ml)	50.06	28.57	53.00	47.86

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6)

จากการทดลองพบว่า ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมดมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากเกิดการสลายตัว (degradation) ออกซิเดชัน (oxidation) อีพิเมอร์ไรเซชัน (epimerization) และ พอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ในระหว่างการเก็บรักษา (Chen et al., 2003) ส่วนความสามารถในการต้านออกซิเดชันจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH assay, FRAP assay และ ABTS assay ให้ผลการทดลองที่สัมพันธ์กับปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมดลดลงเช่นกัน โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีตู้อบสุญญากาศ จะมีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลและความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน ตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ A และ ตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ B ตามลำดับ ($p<0.05$) จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสารประกอบพอลิฟีนอลมีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชัน โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนมากจะศึกษาในเรื่องของ C-phycocyanin ต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่าย โดย C-phycocyanin เป็นโปรตีนที่พบในสาหร่ายสไปรูลินาเท่านั้น ซึ่งมีสมบัติต้านออกซิเดชัน และป้องกันการอักเสบ โดยมีบทบาททั้งการต้านอนุมูลอิสระ DPPH กับ ABTS และมีบทบาทเป็นสารรีดิวซ์อีกด้วย (FRAP) และพบว่าผลการทดลองมีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของตัวอย่างสาหร่ายที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ ก็เพิ่มมากขึ้นด้วย

จากผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tsantili et al. (2011) ที่พบว่าเมื่อเก็บรักษา pistachio (*Pistachia vera* L.) nuts โดยทำการอบแห้งและเก็บรักษาโดยการบรรจุแบบดัดแปลงบรรยากาศ (packaging atmosphere) โดยใช้อากาศแห้ง หรือ N_2 ที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส หรือ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 เดือน พบว่าทั้ง total phenolic, flavonoids และ total antioxidant capacity (FRAP, DPPH assay) มีค่าลดลง โดย มีค่าลดลงร้อยละ 24.7, 21.8, 30.3 และ 32.4 ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และความสามารถในการต้านออกซิเดชันเกิดขึ้นเนื่องจากออกซิเจนเกิด oxidative process ในอาหาร (Luefven et al., 2008) ในการใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง (มากกว่า 20 องศาเซลเซียส) ในการเก็บรักษาอาจก่อให้เกิด lipid oxidation โดย Tavakolipour et al. (2010) ได้แนะนำเกี่ยวกับการเก็บรักษา Kerman pistachios ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะสามารถป้องกันการเกิด lipid oxidation ได้ Bellomo et al. (2009) ได้กล่าวว่าการเก็บรักษา pistachios ที่อุณหภูมิต่ำ เช่นที่ 10 องศาเซลเซียส จะสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสี (chlorophylls และ lutein) และน้ำมัน รวมถึงสามารถป้องกันการเกิดเชื้อราได้ Blomhoff et al. (2006) กล่าวว่าความแตกต่างหรืออัตราที่แตกต่างกันของการเสื่อมสภาพของสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิด เนื่องมาจากจำนวนและธรรมชาติของกลุ่มไฮดรอกซิลที่ติดอยู่กับสารประกอบ ในสาหร่าย

ขนาดเล็กสารหลักที่มีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันอาจจะไม่ใช่สารประกอบพอลิฟีนอล (Li et al., 1998) เนื่องจากสาหร่ายมีสารประกอบที่สามารถต้านออกซิเดชันได้หลายชนิด เช่น แคโรทีนอยด์ บีตา-แครอทีน คลอโรฟิลล์ กรดไขมันไม่อิ่มตัว และสารพวกโพลีแซคคาไรด์ (Chen et al., 2005) ดังนั้น แสดงให้เห็นว่าสารที่มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันมีหลายกลุ่ม ซึ่งอาจจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง วิธีการทำแห้ง และการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับ งานวิจัยของ สินีนาฏ (2550) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติการให้อิเล็กตรอนในตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธีตู้อบลมร้อน (อบแห้งครั้งที่ 1) วิธีตู้อบลมร้อน(อบแห้งครั้งที่ 2) การทำแห้งแบบเยือกแข็ง และการทำแห้งแบบพ่นฝอย เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 สัปดาห์พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นสมบัติการให้อิเล็กตรอนก็จะลดลง โดยตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย มีการลดลงของสมบัติการให้อิเล็กตรอนน้อยกว่าตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งโดยการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง และการทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน

การหาปริมาณผลผลิตในการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินา

จากการหาปริมาณผลผลิตในการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินา พบว่าการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง จะให้ปริมาณผลผลิตมากที่สุด รองลงมาคือการทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน และการทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอยจะให้ปริมาณผลผลิตในการทำแห้งต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจาก การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอยจะต้องใช้ตัวอย่างในปริมาณมากอีกทั้งเครื่องที่ใช้ในการทำแห้งมีขนาดใหญ่ ทำให้ในขั้นตอนของการทำให้เป็นผงจะทำให้สาหร่ายที่เป็นผงไปติดบริเวณผนังภายในห้องอบแห้ง (drying chamber) จากกระบวนการทำแห้งของวิธีฉีดพ่นฝอย จึงทำให้ได้ปริมาณผลผลิตน้อยกว่าวิธีทำแห้งอื่นๆ ดังแสดงในตาราง 12

ตาราง 12 ผลผลิตในการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินา

วิธีทำแห้ง	น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสาหร่ายผง (กรัม)	ร้อยละผลผลิต (%Yield)
การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์	15,000	1,617	10.78±0.51[b]
การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน	10,000	1,157	11.57±0.51[ab]
การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ	2,500	312	12.47±0.64[a]
การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย	10,000	677	6.77±0.68[c]
การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง	1,200	147	12.22±0.87[a]

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาผง

จากผลการคำนวณต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาผง พบว่าการผลิตโดย การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ จะมีต้นทุนในการผลิตต่อกรัมน้ำหนักแห้งน้อยที่สุด รองลงมาคือ การทำแห้งการทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และ การการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 13

การทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินาโดยการทำแห้งแบบแบบแช่เยือกแข็ง เป็นการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะมีการสูญเสียโปรตีน และมีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยที่สุด แต่วิธีนี้จะมีต้นทุนในการผลิตที่สูงกว่าวิธีอื่นมาก เครื่องมือที่ใช้มีราคาสูง ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนาน ดังนั้นการทำแห้งโดยวิธีนี้อาจจะเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นแหล่งโปรตีน หรือนำไปสกัดรงควัตถุไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง หรือส่วนผสมในอาหาร การทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย เป็นการทำแห้งที่มีความรวดเร็ว มีค่าใช้จ่ายไม่สูงมาก แต่วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้เครื่องมือราคาแพง ทำความสะอาดและบำรุงรักษาเครื่องได้ยาก อีกทั้งผลผลิตในการทำแห้งน้อยกว่าวิธีอื่น เนื่องจากมวลของสาหร่ายสไปรูลินาจะไปติดบริเวณผนังของเครื่องมือ แต่ข้อดีของการทำแห้งโดยวิธีนี้คือ ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นผงสำเร็จรูป ไม่ต้องมีขั้นตอนในการทำให้เป็นผงต่อไป การทำแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นวิธีที่ใช้ค่าใช้จ่ายในการทำแห้งน้อยที่สุด แต่การทำแห้งด้วยวิธีนี้ ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้เนื่องจากใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงไม่มีความสม่ำเสมอ ถ้ามีการทำแห้งเป็นระยะเวลานาน ก็จะทำให้สูญเสียโปรตีนมากยิ่งขึ้น ส่วนการทำแห้ง

ด้วยตู้อบลมร้อน และการทำแห้งด้วยวิธีตู้อบสุญญากาศ วิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายน้อย และมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงวิธีนี้จึงเหมาะแก่การนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่ช่วยต้านออกซิเดชัน หรือใช้เป็นอาหารเสริมในด้านของสารต้านอนุมูลอิสระ

ตาราง 13 ต้นทุนในการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาผง

วิธีทำแห้ง	ต้นทุนที่ใช้ในการผลิต (บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)
การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์	927
การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน	1,236
การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ	3,092
การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย	1,477
การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง	8,574

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการทดลอง

1. ในสาหร่ายสไปรูลินาสด พบว่ามีความชื้นร้อยละ 88.17±0.65 ค่ากิจกรรมของน้ำ 0.991±0.00 ปริมาณโปรตีนร้อยละ 64.04±2.80 ของน้ำหนักแห้ง มีปริมาณเถ้าร้อยละ 9.09±0.37 และ สีของสาหร่ายสไปรูลินาสด มีค่า L*, a* และ b* เท่ากับ 18.06±0.00, -6.06±0.80 และ 12.08±0.00 ตามลำดับ และเมื่อดูลักษณะเซลล์ผ่านกล้องจุลทรรศน์ พบว่าเซลล์มีลักษณะที่สมบูรณ์ มีลักษณะเป็นเซลล์แท่งหลายเซลล์เรียงต่อกันเป็นเส้นสายตรง หรือขดเป็นเกลียว

2. จากการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินา พบว่าทุกตัวอย่างมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 และค่ากิจกรรมของน้ำไม่เกิน 0.6 โดยแต่ละวิธีจะได้สภาวะที่เหมาะสมดังนี้ ในการทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ จะทำการอบแห้งเป็นเวลา 3 วัน การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน ใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน และ 70 องศาเซลเซียส อีก 2 วัน การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ ใช้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย ใช้อุณหภูมิขาเข้า 210 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของตัวอย่าง 11 กิโลกรัม/ชั่วโมง และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง ใช้อุณหภูมิ -26 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน

3. จากการหาปริมาณโปรตีนของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาจากตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ A มีปริมาณโปรตีน 85.76±2.24 สาหร่ายสไปรูลินาจากตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ B มีปริมาณโปรตีน 84.91±0.33 และสำหรับปริมาณโปรตีนของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 5 วิธี คือ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง จะมีปริมาณโปรตีนที่แตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 72.14±0.76, 68.98±0.78, 75.40±0.31, 72.84±0.37 และ 89.04±1.52 ตามลำดับ

4. จากการวิเคราะห์ความชื้นสาหร่ายผงพบว่าตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ A มีความชื้นร้อยละ 8.11±0.06 ตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ B มีความชื้นร้อยละ 6.92±0.10 และสำหรับความชื้นของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 5 วิธี คือ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง พบว่ามีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 2.83±0.11 ถึง 6.90±0.05

5. ค่ากิจกรรมของน้ำในตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ A มีค่ากิจกรรมของน้ำ 0.428±0.00 ตัวอย่างทางการค้ายี่ห้อ B มีค่ากิจกรรมของน้ำ 0.387±0.00 และสำหรับค่ากิจกรรมของน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 5 วิธี คือ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง พบว่ามีความชื้นอยู่ในช่วง 0.147±0.03 ถึง 0.356±0.02

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

7. เมื่อนำตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งไปส่องกล้องจุลทรรศน์ พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน และการทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ มีการแตกหัก และการฉีกขาดของผนังเซลล์มากกว่าตัวอย่างอื่น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอล และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน คือ ตัวอย่างที่มีการแตกของผนังเซลล์มากจะมีการปลดปล่อยสารชีวภาพออกมามากกว่าตัวอย่างอื่นๆ

8. จากการศึกษาการทำแห้ง 5 วิธีได้แก่ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง โดยศึกษาปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน พบว่าตัวอย่างที่มีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมดและความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ที่ดีที่สุด 2 ตัวอย่างคือ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน และการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ ดังนั้น การทำแห้งทั้ง 2 วิธีนี้จึงนำมาทำศึกษาผลของการเก็บรักษาต่อคุณสมบัติทางเคมี และทางกายภาพ ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง

9. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาแห้งในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าทั้งคุณภาพและความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง เมื่อระยะการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ความชื้น ค่ากิจกรรมของน้ำ มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสีมีการเปลี่ยนแปลง โดยความชื้นมีค่าเกินร้อยละ 7 หลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 90 วัน ค่ากิจกรรมของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ไม่เกิน 0.6 สำหรับสารประกอบพอลิฟีนอล และความสามารถในการต้านออกซิเดชันมีค่าลดลง โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ มีค่าสูงที่สุด ออกซิเดชัน แต่เมื่อทำการคำนวณหาร้อยละการลดลงของปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอล และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ในตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ และตู้อบลมร้อนพบว่า ร้อยละของการลดลงของความสามารถในการต้านออกซิเดชันมากกว่าตัวอย่างทางการค้าทั้ง 2 ยี่ห้อ

10. การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งจะให้ปริมาณผลผลิตมากที่สุด รองลงมาคือ การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน และการทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอยจะให้ปริมาณผลผลิตในการทำแห้งต่ำที่สุด

11. การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์ จะมีต้นทุนในการผลิตต่อกรัมน้ำหนักแห้งน้อยที่สุด รองลงมาคือ การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง โดยมีต้นทุนที่ใช้ในการผลิต (บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) เท่ากับ 927, 1,236, 3,092, 1,477 และ 8,574 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการทดลองสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ มีปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอล และสมบัติการต้านออกซิเดชันสูงกว่าสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีอื่น หากนำไปประยุกต์ใช้จริงในโรงงานผลิตอาจจะต้องมีการปรับสภาวะในการทำแห้งต่อเครื่องมือการทำแห้งที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และคำนึงถึงต้นทุนในการผลิต

2. ควรทำการศึกษากลไกการเสื่อมสภาพ หรือการลดลงของปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอล และความสามารถในการต้านออกซิเดชันที่แตกต่างกันในแต่ละวิธี

บรรณานุกรม

กฤชภร คำชุม. กาแฟปรุงสำเร็จชนิดผง. **สิทธิบัตรไทย เลขที่คำขอ 0803000859**. 10 กุมภาพันธ์ 2552 ก.

_____. เจลอาบน้ำสาหร่ายสไปรูลิน่า. **สิทธิบัตรไทย เลขที่คำขอ 0803000860**. 10 กุมภาพันธ์ 2552 ข.

_____. แชมพูสระผมผสมสาหร่ายสไปรูลิน่า. **สิทธิบัตรไทย เลขที่คำขอ 0803000861**. 10 กุมภาพันธ์ 2552 ค.

กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์. 2557. **สาหร่าย**. กรุงเทพ ฯ: คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 343 น.

ขนิษฐา คงยอด. 2553. **ผลการต้านแบคทีเรียและอนุมูลอิสระของสาหร่ายเกลียวทอง.**วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 113 น.

จงกล พรมยะ. 2552. **เอกสารประกอบการสอนรายวิชา พล 422 การเพาะเลี้ยงสาหร่าย**. เชียงใหม่ คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 128 น.

เจียมจิตต์ บุญสม. 2532. **ความลับของสาหร่ายเกลียวทอง:ผลทางการรักษาโรคที่นายแพทย์ชาวญี่ปุ่นค้นพบ**. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 237 น.

_____. 2535. **ความลับของสาหร่ายเกลียวทอง**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว. 239 น.

ธิดารัตน์ พีรภาคย์ และ ศศิธร ตรงจิตภักดี. 2553. **ผลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณ 6-gingerol สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสมบัติการต้านออกซิเดชันของขิง (*Zingiber officinale*)**. น. 578-584. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นฤมล น้อยหวอย และ ศศิธร จันทนวรางกูร. 2550. **ผลกระทบของการแปรรูปต่อคุณสมบัติการต้านออกซิเดชันในบัวบก**. น. 681-688. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บริษัท ที.ซี. ยูเนี่ยน โกลบอล จำกัด (มหาชน). สูตรผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่สามารถลดอาการเมาค้าง. **สิทธิบัตรไทย เลขที่คำขอ 0201001279**. 9 ธันวาคม 2548.

พรพล รมย์นุกูล. 2545. **การถนอมอาหาร**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.192 น.

พิชญา บุญประสม, กัมปนาท บำรุงกิจ, อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล และ ศรายุทธ์ สมประสงค์. 2547. **การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสมุนไพรโดยใช้ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์** . เชียงใหม่: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พุทธธินันทร์ จารุวัฒน์, พิมล วุฒิสินธ์, ชูศักดิ์ ชวประดิษฐ์ และ ยงยุทธ คงซ่าน. 2551. **ศึกษาวิจัยเครื่องอบแห้งลำไยแบบต่อเนื่อง**. น. 29-45. ใน รายงานผลงานวิจัย วิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว: กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร.

เพชรรุ่ง เทพทอง, จิตพิสุทธิ์ จันทร์ทองอ่อน, อรมณี ประจวบจินดา, ศรีโสภา เรืองหนู และ อรุณพร อิฐรัตน์. 2555. **การเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกในสารสกัดชั้นเอทานอลของขิง พริกไทยดา และดีปลี**. น. 1-6. ใน การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

มณชัย เดชสังกรานนท์ และ สาโรจน์ ศิริศันสนียกุล. 2554. **สไปรูลิน่ากับมหัศจรรย์ทางโภชนาการ**. น. 3. ใน นิตยสารเปิด "สรรสาระเทคโนโลยีชีวภาพ". กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการหมัก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มณชัย เดชสังกรานนท์. 2554. **ไฟโคไซยานิน (Phycocyanin) : สารสีจากสไปรูลิน่า (1)**. [ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา www.4loadfree.com/neonbookmedia-triplesystems /08nw/09.pdf (11/9/2556).

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรรมวิธีการผลิตไฟโคไซยานินเกรดอาหารและเครื่องสำอาง. **สิทธิบัตรไทย เลขที่คำขอ 1003000046**. 13 ตุลาคม 2554.

มานิตย์ อ่อนนางใย. 2540. **ผลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณโปรตีนของ สาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*) ที่เพาะเลี้ยงด้วยน้ำทิ้งจากโรงงาน ผลิตแป้งขนมจีนในสภาพกลางแจ้ง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 60 น.

ยุวดี พีรพรพิศาล. 2546. **สาหร่ายวิทยา = Phycology.** 1. เชียงใหม่:ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 497 น.

_____. 2546. **สาหร่ายสไปรูลินา**. 2. เชียงใหม่: สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 72 น.

ยุวดี พีรพรพิศาล. 2548. **สาหร่ายน้ำจืดในภาคเหนือของประเทศไทย (Freshwater Algae in Northern Thailand)**. 1. กรุงเทพฯ: โครงการพัฒนาองค์ความรู้และศึกษานโยบายการจัดการทรัพยากรชีวภาพในประเทศไทย (โครงการ BRT). 361 น.

ยุวดี พีรพรพิศาล, สุพัตรา จันทร์ศิริโพธา และ สุนทรี เปรื่องการ. 2535. **คุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*) ที่เลี้ยงในน้ำกากส่าเหล้า**. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ลักขณา เหล่าไพบูลย์, พัฒนา เหล่าไพบูลย์ และ วิลัศนา โพธิ์ศรี. 2540. ผลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณองค์ประกอบต่างๆในสาหร่ายเกลียวทอง. **วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น**. 2(2): 46

วรพล เองวานิช. (บรรณาธิการ). 2555. **อนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระ**. เชียงใหม่: สมาคมเพื่อการวิจัยอนุมูลอิสระไทย (สวอ.). 431 น.

วศิมน เรืองเล็ก, สุรพล พิบูลโภคานันท์ และ อภิรดี หงส์ทอง. กรรมวิธีการสกัดสารไฟโคไซยานินที่พร้อมบริโภค. **สิทธิบัตรไทย เลขที่คำขอ 0403000698**. 26 มกราคม 2549.

วิไล รังสาดทอง. 2545. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 177 น.

สมศักดิ์ วรคามิน. 2547. **สาหร่ายอาหารของอนาคต**. กรุงเทพฯ: สยามเจริญพาณิชย์ จำกัด. 124 น.

สมศิริ หุยาภรณ์. 2542. **เอกสารประกอบการสอนวิชาการแปรรูปผักและผลไม้**. เพชรบุรี. สถาบันราชภัฏเพชรบุรี.

สายชล สุทธิธรรม. การสกัดสารไฟโคไซยานินจากเซลล์สหร่ายสไปรูลินาแบบสดด้วยวิธีตกตะกอน. **สิทธิบัตรไทย เลขที่คำขอ 0703001383**. 28 เมษายน 2552.

สินีนาฏ อักโขสุวรรณ. 2550. **ผลของการแปรรูปและอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อซี-ไฟโคไซยานินและสมบัติการต้านออกซิเดชันของสารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*)**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 105 น.

สินีนาฏ อักโขสุวรรณ และ ศศิธร จันทนวรางกูร. 2550. **ผลของการทำแห้งต่อ C-Phycocyanin และสมบัติการต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*)**. น. 594-601. <u>ใน</u> การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุดธน โอฬาร. ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม. **สิทธิบัตรไทย เลขที่คำขอ 0403000993**. 21 กุมภาพันธ์ 2548.

สุมลวรรณ ชุ่มเชื้อ. 2542. สาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina* sp.). **วารสารมหาวิทยาลัยมหาสารคาม** 18(1-2): 47-52 น.

โอภา วัชระคุปต์, ปรีชา บุญจง, จันทนา บุญะรัตน์ และ มาลีรักษ์ อัตต์สินทอง. 2549. **สารต้านอนุมูลอิสระ**. นนทบุรี : พี.เอส.พริ้นท์. 262 น.

A.O.A.C. 2005. **Official Methods of Analysis**. 18th ed. Washington,D.C. USA: Association of OfficialAnalytical chemistry.

Ahmed M., F. Abas, C. P. Tan and A. Khatib. 2014. Effects of different drying methods and storage time on free radical scavenging activity and total phenolic content of *Cosmos caudatus*. **Antioxidants** 3: 358-370.

Anna K. 2011. Effect of preliminary processing, method of drying and storage temperatureon the level of antioxidants in kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) leaves. **Food Science and Technology**. 44: 1711-1716.

Arabhosseini, A., W. Huisman, A. van Boxtel and J. Muller. 2007. Long-term effects of drying conditions on the essential oil and color of tarragon leaves during storage. **Journal of Food Engineering** 79: 561–566.

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

Barbieri, S., M. Elustondo and M. Urbicain. 2004. Retention of aroma compounds in basil dried with low pressure superheated steam. **Journal of Food Engineering** 65(1): 109-115.

Bast, A., G. R.M.M. Haenen and C. J.A. Doelman. 1991. Oxidants and antioxidants: state of art. **American Journal of Medicine** 91: 2-13.

Bellomo, M.G., B. Fallico and G. Muratore. 2009. Stability of pigments and oil in pistachio kernels during storage. **International Journal of Food Science and Technology** 44: 2358–2364.

Bhat, V. B. and K.M. Madyastha. 2000. C-Phycocyanin: a potent peroxyl radical scavenger *in vivo* and *in vitro*. **Biochemical and Biophysical Research Communications** 18, 275(1): 20–25.

Blomhoff, R., M.H. Carlsen, L.F. Andersen and D.R. Jr. Jacobs. 2006. Health benefits of nuts: potential role of antioxidants. **British Journal of Nutrition** 96(2): 52–60.

Cepoi, L., R. Ludmila, M. Vera, C. Angela, C. Tatiana and S. Daniela. 2010. Antioxidant Activity of Ethanol Extracts From *SPIRULINA* and *NOSTOC*. **Biotehnologii Vegetale si Animale** 2 (311): 169-175.

Chen, C. N., C. M. Liang, J. R. Lai, Y. J. Tsai, J. S. Tsay and J. K. Lin. 2003. Capillary electrophoretic determination of theanine, caffeine, and catechins in fresh tea leaves and oolong tea and their effects on rat neurosphere adhesion and migration. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 51: 7495–7503.

Chen, F., H. B. Li, R. N. S. Wong, B. Ji and Y. Jiang. 2005. Isolation and purification of the bioactive carotenoid zeaxanthin from the microalga microcystisaeruginosa by high speed countercurrent chromatography. **Journal of Chromatography** 1064: 183-186.

Dalbir, Si. S., M. Siddiq and K. D. Dolan. 2014. Total phenolics, carotenoids and antioxidant properties of Tommy Atkin mango cubes as affected by drying techniques. **LWT- Food Science and Technology** 62: 564-568.

Gershwin, M.E. and A. Belay. 2008. ***Spirulina* in human nutrition and health**. New York: CRC Press. 328 p.

Gressier, B., S. Lebegue and C. Brunet. 1994. Proxidant properties of methotrexate evatuationand prevention by an antioxidant drug. **Archiv der Pharmazie-Chemistry in Life Science** 49: 679-681.

Halliwell, B. 1995. The characterization of antioxidants. **Food and Chemical Toxicology** 33: 601-617.

Halliwell, B. 1999. Antioxidant defense mechanism: from the beginning to the end. **Society for Free Radical Biology and Medicine** 31: 261-272.

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

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

Hunter, Richard S., and Harold, Richard W. 1987. **The Measurement of Appearance**, 2nd ed. USA: John Wiley and Sons, Inc. 391 p.

Jay, M. J. 2000. **Modern Food Microbiology**. Las Vegas: Aspen Publishers. 625 p.

Jittawan, K. and S. Sirithon. 2011. Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril and seed) of thai gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng). **Food Chemistry** 127: 1138-1145.

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 Chemistry** 141: 1972-1979.

Kim, D.O., K.W. Lee, H.J. Lee and C.Y. Lee. 2002. Vitamin C equivalent antioxidant capacity(VCEAC) of phenolic phytochemicals. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 50: 3713-3717.

Konstan, M. W. and M. Berger. 1993. **Infection and inflammation in the lung in cystic fibrosis**. New York: Marcel Dekker, Inc. 219–276 p.

Lajallo, F.M. and M.U.M. Lanfer. 1982. Chlorophyll degradation in a spinach system at low and intermediate water Activities. **Journal of Food Science** 47(6): 1995-1998.

Luefven, A., N. Sedaghat and M.B.H. Najafi. 2008. Influence of different packaging systems on stability of raw dried pistachio nuts at various conditions. **Iranian Journal of Food Science and Technology** 3: 29–38.

Li, H.B., K.W. Cheng, C.C. Wong, K.W. Fan, F. Chen and Y. Jiang. 1998. Evaluation of antioxidant capacity and total phenolic content of different fractions of selected microalgae. **Food Chemistry** 102: 771-776.

Lisheng, L., G. Baojiang, R. Jihong, Q. Guangquan and W. Botang. 1991. Inhibitive effect and mechanism of polysaccharide of *spirulina* on transplanted tumor cells in mice. **Marine Sciences** 5: 33-38.

Manoj, G., L. V. Venkataraman, 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

Manzocco, L., S. Calligaris, D. Mastrocola, M. C. Nicoli and C.R. Lerici. 2001. Review of nonenzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. **Trends in Food Science and Technology** 11: 340–346.

Miranda, M.S., R.G. Cintra, S.B.M. Barroz and J. Mancini-Fiho. 1998. Antioxidant activity of the microalga *Spirulina maxima*, **Brazilian Journal of Medical and Biological Research** 31(8): 1075-1079.

Moorhead, K., B. Capelli and G. R. Cysewski. 2006. **Nature's Superfood: Spirulina**. Hawaii: Cyanotech Corporation. 66 p.

Ozlem, A. G., A. A. Borazan, N. Ercal and O. Demirkol. 2015. Drying effects on the antioxidant properties of tomatoes and ginger. **Food Chemistry** 173: 156–162.

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

Prior, R. L., X. Wu and K. Schaich. 2005. Standardized methods for the detemination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplement. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 53: 4290-4302.

Qiang F., L. Huang, J. Teng and B. Wei. China Patent. **201010173975**. 27 October 2010.

Qishen, P., G. Baojiang and R. Jihong. 1988. Enhancement of endonuclease activity and repair DNA synthesis by polysaccharide of *Spirulina platensis*. **Chinese Genetics Journal** 15(5): 374-381.

Re, R., N. Pellegrini. P, A. Proteggenta, A. Pannala, M. Yang and C. R. Evans. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology** 26: 1231-1237.

Richmond, A. 1986. **Microalgae Mass Culture**. USA: Blackwell publishing company. 545 p.

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

Romay, C., J. Armesto, D. Remirez, R. González, N. Ledon and I. García. 1998. Antioxidant and anti-inflammatory properties of c-phycocyanin from blue-green algae. **Inflammation Research** 47: 36–41.

Shih, M. C., C. C. Kuo. and C. Wenchang. 2009. Effects of drying and extrusion on colour, chemical composition, antioxidant activities and mitogenic response of spleen lymphocytes of sweet potatoes. **Food Chemistry** 117: 114–121.

Shimada, K., K. Fujikawa, K. Yahara, and T. Nakamura. 1992. Antioxidative properties of xanthin on autooxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 40: 945 – 948.

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

Sirithon, S., O. Kaisoona, and N. Meeso. 2012. Changes in colour, antioxidant activities and carotenoids (lycopene, b-carotene, lutein) of marigold flower (*Tagetes erecta* L.) resulting from different drying processes. **Journal of Functional Foods** 4: 757–766.

Tavakolipour, H., M. Armin and A. K. Ashtari. 2010. Storage stability of Kerman pistachio nuts (*Pistacia vera* L.). **International Journal of Food Engineering**. 6(6): 1556-3758.

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. **Journal of Applied Phycology** 19: 719-726.

Toor, R. K. and G. P. Savage. 2006. Effect of semi-drying on the antioxidant components of tomatoes. **Food Chemistry** 94(1): 90–97.

Tripti, V., R. K. Singh and R. B. Pegg. 2011. Effects of drying on the phenolics content and antioxidant activity of muscadine pomace. **LWT - Food Science and Technology** 44: 1649-1657.

Tsantili, E., K. Konstantinidis, M.V. Christopoulos and P.A. Roussos. 2011. Total phenolics and flavonoids and total antioxidant capacity in pistachio (*Pistachia vera* L.) nuts in relation to cultivars and storage conditions. **Scientia Horticulturae** 129: 694–701.

Valacchi, G. 2004. *In vivo* ozone exposure induces antioxidant stress-related responses in murine lung and skin. **Free Radical Biology and Medicine** 36: 673-681.

Venkataraman, L.V. 1983. **Bluegreen Alga : *Spirulina***. India: Department of Science and Technology. 100 p.

Voest, E.E., G. Vreugdenhil and J. J. M. Marx. 1994. Iron- chelating agents in non-iron overload conditions. **Annals of Internal Medicine** 120: 490-499.

Vonshak, A. 1993. Microalgae : Laboratory Growth Techniques and Biotechnology of Biomass Production. pp. 337-354. In **Photo Synthesis and Production in Changing Environment : A Filed and Laboratory Manual**. London: Chapman & Hall Pub.

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. **Carbohydrate Polymers** 103: 414-417.

Yen.G.C. and H.Y. Chen. 1995. Antioxidant Activity of Various Tea Extracts in Relation to Their Antimutagenicity. **Agricultural and Food Chemistry** 43(1): 27-32.

Yujing, S., Y. Shen, D. Liu and X. Ye. 2015. Effects of drying methods on phytochemical compounds and antioxidant activity of physiologically dropped un-matured citrus fruits. **LWT - Food Science and Technology** 60: 1269-1275.

Zhi-gang, Z., Zhi-li, L and L. Xue-xian. 1997. Study on the isolation, purification, andantioxidation properties of polysaccharides from *Spirulina maxima*. **Acta Botanica Sinica** 39: 77–81.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รูปภาพประกอบการวิจัย

ภาพผนวก 1 สาหร่ายสไปรูลินาสด

ภาพผนวก 2 การทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย (spray drying)

ภาพผนวก 3 สาหร่ายสไปรูลินาหลังการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย (spray drying)

ภาพผนวก 4 การทำแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ (solar drying)

ภาพผนวก 5 สาหร่ายสไปรูลินาหลังการทำแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ (solar drying)

ภาพผนวก 6 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying)

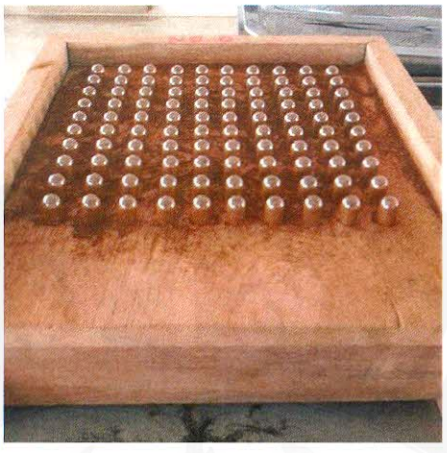
ภาพผนวก 7 สาหร่ายสไปรูลินาหลังการทำแห้งด้วยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying)

ภาพผนวก 8 การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (hot air drying)

ภาพผนวก 9 สาหร่ายสไปรูลินาหลังการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (hot air drying)

ภาพผนวก 10 การทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ (vacuum drying)

ภาพผนวก 11 สาหร่ายสไปรูลินาหลังการทำแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ (vacuum drying)



ภาพผนวก 12 การบรรจุสาหร่ายสไปรูลินาผงในแคปซูลใส ด้วยเครื่องบรรจุแคปซูล

ภาพผนวก 13 บรรจุแคปซูลในขวดพลาสติกสีขาวขุ่นฝาเกลียว ที่ทำจากวัสดุ High Density Polyethylene (HDPE) และเก็บในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 90 วัน

ภาคผนวก ข

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง (มผช. 552/2549)

มผช. 552/2549

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

สาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ครอบคลุมสาหร่ายสไปรูไลนาที่ทำให้แห้งและบดเป็นผงอาจบรรจุในซองเยื่อกระดาษ บรรจุในภาชนะบรรจุ ใช้สำหรับชงเป็นเครื่องดื่ม

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 สาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำสาหร่ายสไปรู-ไลนาสดมาล้างให้สะอาด ทำให้แห้งโดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือแหล่งพลังงานอื่น แล้วบดเป็นผง

3. คุณลักษณะที่ต้องการ

3.1 ลักษณะทั่วไป

ต้องเป็นผงแห้ง 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 กรวดชิ้น ส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์

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 สถานประกอบการต้องได้รับอนุญาตจากกระทรวงสาธารณสุขและให้เป็นไปตามคำแนะนำ

5. การบรรจุ

5.1 ให้บรรจุสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งในภาชนะบรรจุที่สะอาด ปิดได้สนิท และสามารถป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรกภายนอกได้

5.2 น้ำหนักสุทธิของสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งในแต่ละภาชนะบรรจุ ต้องไม น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก

6. เครื่องหมายและฉลาก

6.1 ที่ภาชนะบรรจุสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งทุกหน่วย 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 ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น มผช. 552/2549

7. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

7.1 รุ่น ในที่นี้ หมายถึง สาหร่ายสไปรูไลนาแห้งที่ทำโดยกรรมวิธีเดียวกัน ในระยะเวลาเดียวกัน

7.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้

7.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบสิ่งแปลกปลอม การบรรจุ และเครื่องหมายและฉลาก ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อตรวจสอบแล้ว ทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.5 ข้อ 5. และข้อ 6. จึงจะถือว่าสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบลักษณะทั่วไป สี กลิ่นรส และการสกัดด้วยน้ำเดือด ให้ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบตามข้อ 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 จึงจะถือว่าสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

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 5 คน แต่ละคนจะแยกกันตรวจและให้คะแนนโดยอิสระ

8.1.2 เทตัวอยางสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งลงในจานกระเบื้องสีขาว ตรวจสอบลักษณะทั่วไปและสีโดยการตรวจพินิจ

8.1.3 เทตัวอย่างสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งลงในภาชนะที่เหมาะสม เติมน้ำเดือดตามปริมาณที่ระบุไว้ที่ฉลาก ปิดฝาทิ้งไว้ 6 นาที ตรวจสอบกลิ่นรสและการสกัดด้วยน้ำเดือดโดยการตรวจพินิจและชิม

8.1.4 หลักเกณฑ์การให้คะแนน ให้เป็นไปตามตารางผนวก 1

8.2 การทดสอบสิ่งแปลกปลอม ภาชนะบรรจุ เครื่องหมายและฉลากให้ตรวจพินิจ

8.3 การทดสอบการเจือสี

เทตัวอย่างสาหร่ายสไปรูไลนาแห้งประมาณ 0.5 กรัมถึง 1 กรัมลงบนกระดาษกรอง พับกระดาษกรองเข้าหากัน แล้วขยี้ เทตัวอย่างสาหร่ายสไปรูไลนาออกจากกระดาษกรองให้หมด พ่นน้ำบนกระดาษกรองพอเปียก ต้องไม่มีสีเกิดขึ้นเห็นได้ชัดเจน ยกเว้นสีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้บนกระดาษกรองนั้น

8.4 การทดสอบความชื้น

ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.5 การทดสอบจุลินทรีย์

ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือ BAM หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.6 การทดสอบน้ำหนักสุทธิ

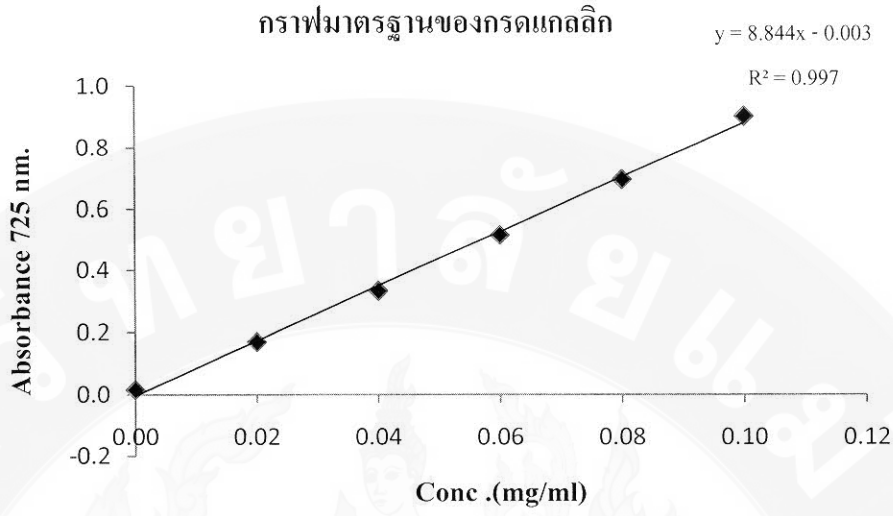
ให้ใช้เครื่องชั่งที่เหมาะสม

ตารางผนวก 1 หลักเกณฑ์การให้คะแนน (ข้อ 8.1.4.)

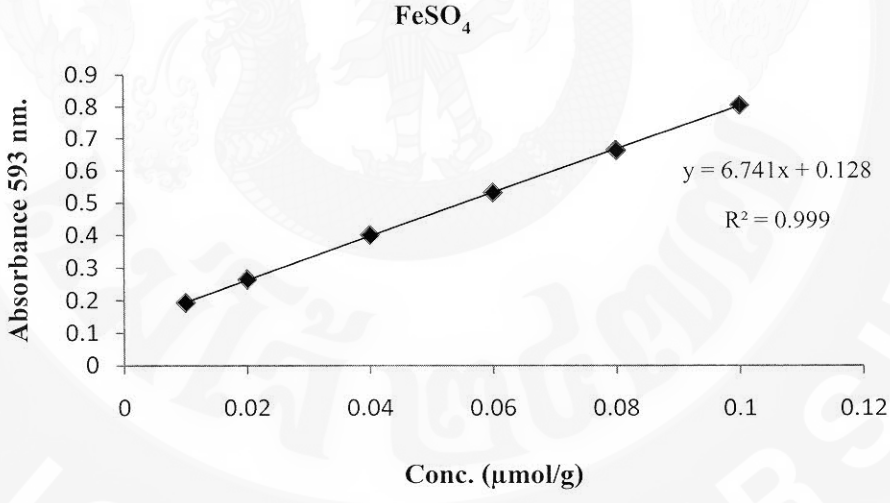
ลักษณะที่ตรวจสอบ	เกณฑ์ที่กำหนด	ระดับการตัดสิน (คะแนน)			
		ดีมาก	ดี	พอใช้	ต้องปรับปรุง
ลักษณะทั่วไป	ต้องเป็นผงแห้ง ไม่จับตัวเป็นก้อน	4	3	2	1
สี	ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง	4	3	2	1
กลิ่นรส	ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์	4	3	2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

ภาคผนวก ค

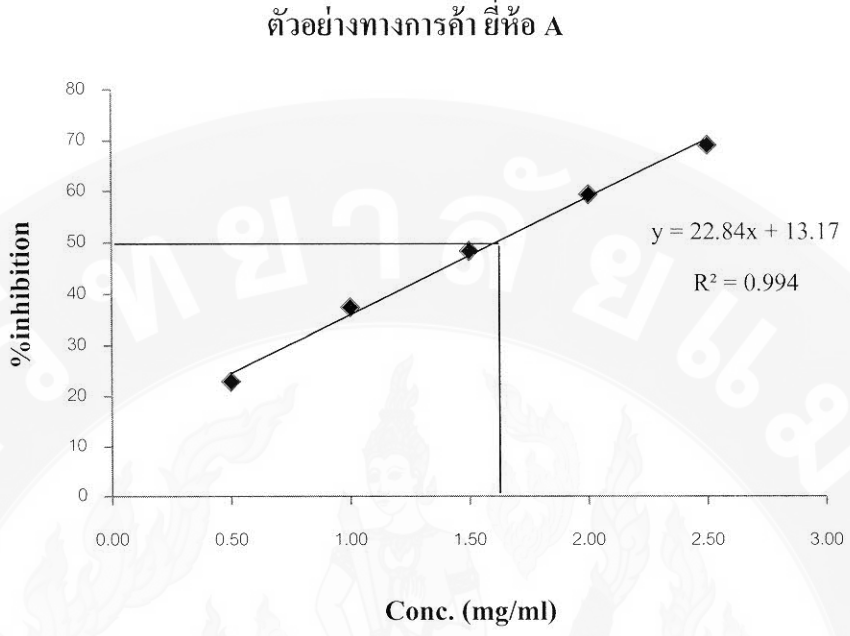
กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน



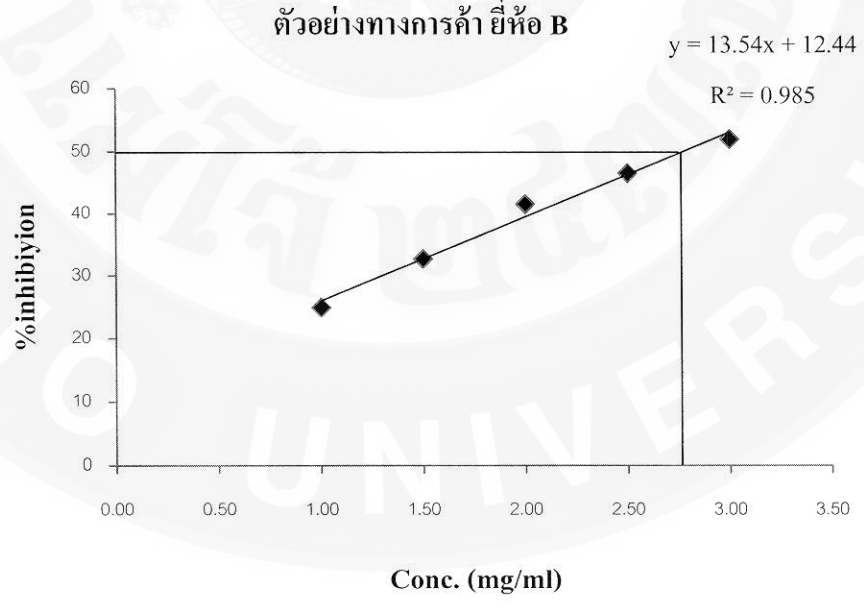
ภาพผนวก 14 กราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก ในการหาปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด



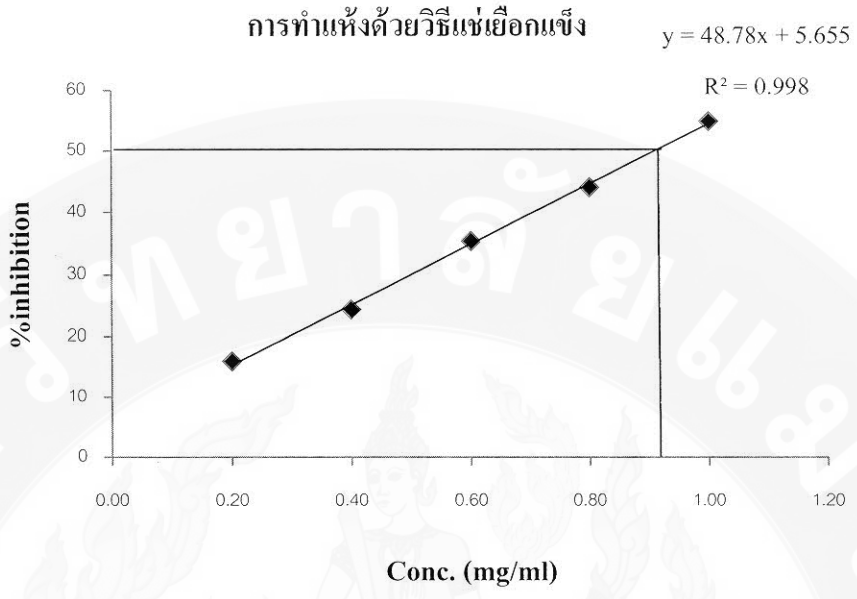
ภาพผนวก 15 กราฟมาตรฐาน $FeSO_4$ ในการหาสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ วิธี FRAP assay



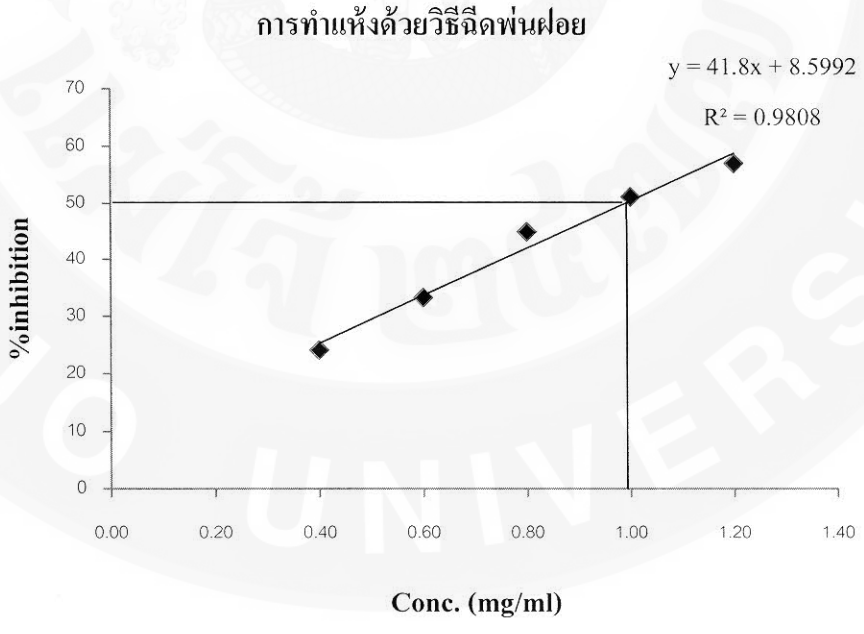
ภาพผนวก 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่ผ่านการทำแห้งกับร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี ABTS radical cation decolorization assay ของตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงทางการค้ายี่ห้อ A



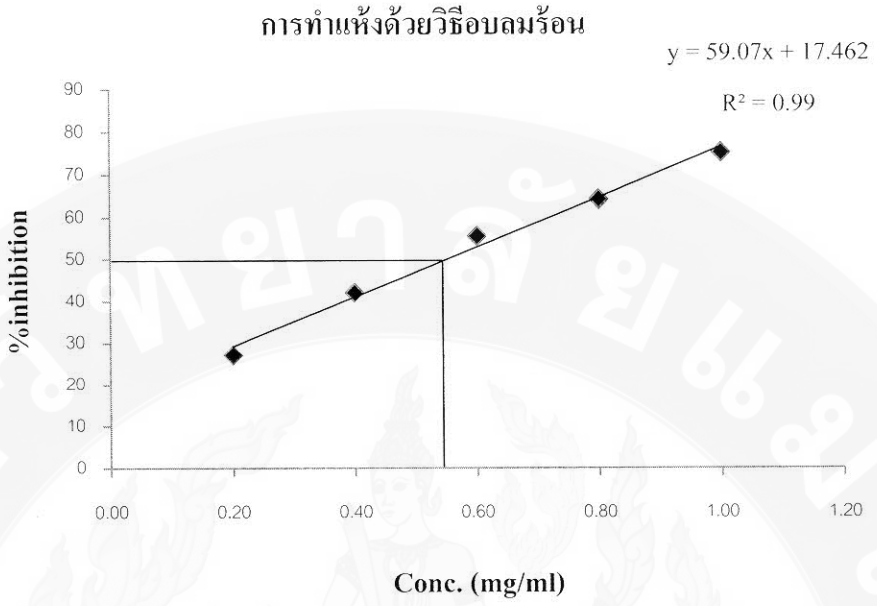
ภาพผนวก 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่ผ่านการทำแห้งกับร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี ABTS radical cation decolorization assay ของตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงทางการค้ายี่ห้อ B



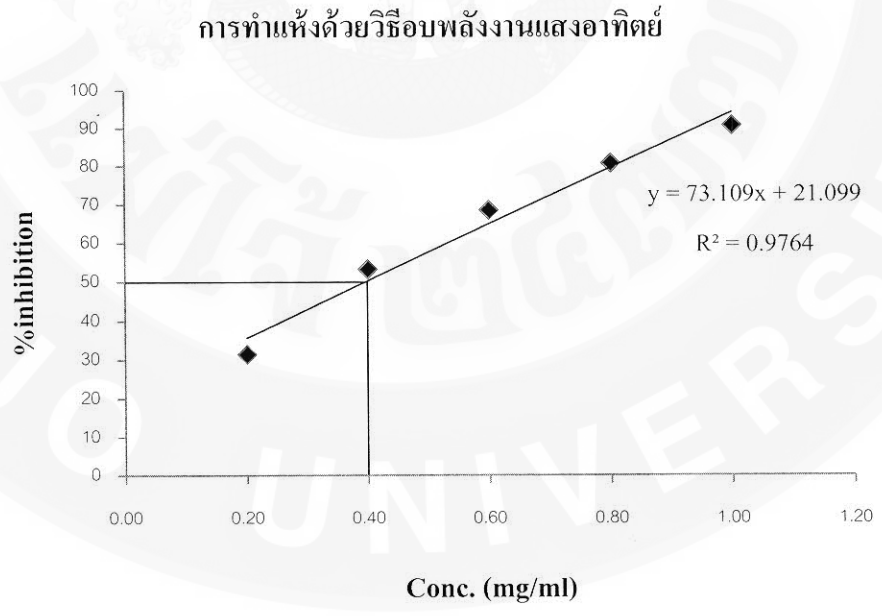
ภาพผนวก 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่ผ่านการทำแห้งกับร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี ABTS radical cation decolorization assay ของตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงที่ทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง



ภาพผนวก 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่ผ่านการทำแห้งกับร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี ABTS radical cation decolorization assay ของตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงที่ทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย

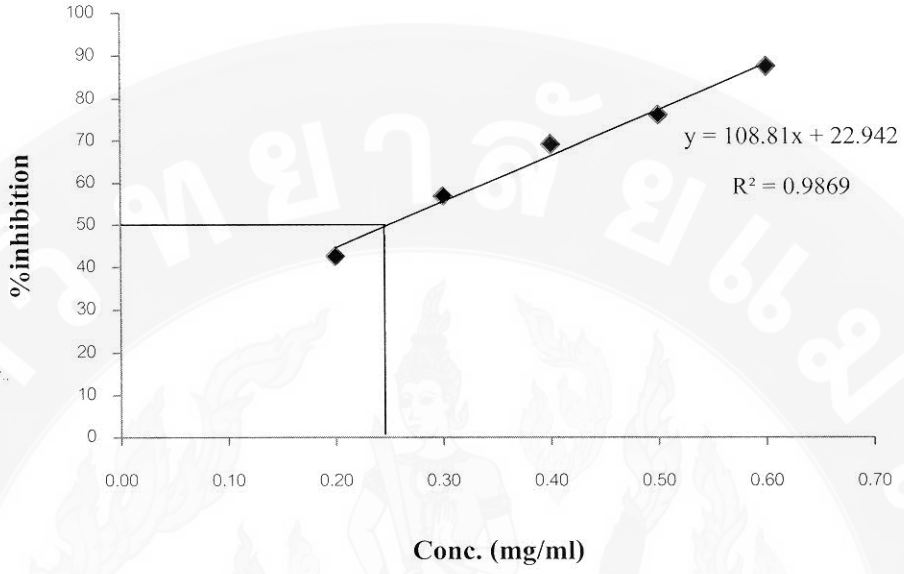


ภาพผนวก 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่ผ่านการทำแห้งกับร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี ABTS radical cation decolorization assay ของตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงที่ทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน



ภาพผนวก 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่ผ่านการทำแห้งกับร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี ABTS radical cation decolorization assay ของตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงที่ทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์

การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ



ภาพผนวก 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่ผ่านการทำแห้งกับร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี ABTS radical cation decolorization assay ของตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงที่ทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาผง

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาผง

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต เป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากในการรวบรวม แจกแจง วิเคราะห์ และรายงานค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในส่วนของต้นทุนต่างๆ ของการผลิต การคำนวณต้นทุนการผลิตนี้ ได้คำนวณมาจากราคาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต รวมกับค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต ได้แก่ ค่าไฟฟ้า ซึ่งต้นทุนการผลิตนี้ไม่รวมค่าเสื่อมราคาของเครื่องมือ

การคำนวณต้นทุนค่าใช้จ่าย (พุทธธินันทร์ และคณะ, 2551)

กำหนดให้

- ค่าสาหร่ายสไปรูลินาสด กิโลกรัมละ 100 บาท
- ค่าไฟฟ้า 3.94 บาท/หน่วย

(ค่าไฟฟ้าราคาหน่วยละ 3.94 บาท อ้างอิง จากค่าไฟฟ้าคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้)

การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์

- ค่าวัตถุดิบสาหร่ายสไปรูลินาสด 15 กิโลกรัม อบแห้ง 3 วัน

ค่าสาหร่ายสไปรูลินาสด 100 บาท/กิโลกรัม

ดังนั้นต้นทุนค่าวัตถุดิบ = 100 บาท/กิโลกรัม x 15 กิโลกรัม 3 วัน (1 ครั้ง)

= 1,500 บาท/ครั้ง

จากตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาสดทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ จะได้ตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงประมาณ 1,617 กรัม ดังนั้น ต้นทุนเฉลี่ยคิดเป็นต่อกรัมน้ำหนักแห้งคือ

สาหร่ายสไปรูลินาผง 1,617 กรัม มีต้นทุนในการผลิตทั้งหมดคือ 1,500 บาท ถ้าสาหร่ายสไปรูลินาผง 1 กรัม จะมีต้นทุนของสาหร่ายสไปรูลินาผงต่อกรัม

= (1 กรัม x 1,500 บาท)/1,617 กรัม

= 927 บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง

*วิธี ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ (solar dry) ไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า จะใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าไฟฟ้า

การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน

- ค่าวัตถุดิบสาหร่ายสไปรูลินาสด 10 กิโลกรัม อบแห้ง 4 วัน

ค่าสาหร่ายสไปรูลินาสด 100 บาท/กิโลกรัม

ดังนั้นต้นทุนค่าวัตถุดิบ = 100 บาท/กิโลกรัม x 10 กิโลกรัม 4 วัน(1 ครั้ง)

= 1000 บาท/ครั้ง

- ค่าไฟฟ้า

จากความสัมพันธ์ P = IxV

โดย P = กำลังไฟฟ้า, วัตต์

I = กระแสไฟฟ้า, แอมแปร์

V = ความต่างศักดิ์ไฟฟ้า, โวลท์

ตู้อบลมร้อน 380 โวลท์ ทำงาน 24 ชั่วโมง/วัน ใช้พลังงานไฟฟ้า 3 แอมแปร์

ดังนั้นใช้พลังงานไฟฟ้า

P = 3 x 380 วัตต์

= 1.14 กิโลวัตต์

ทำงานวันละ 24 ชั่วโมง = 1.14 x 24 กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/วัน

= 27.36 กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/วัน

= 27.36 หน่วย/วัน

คิดค่าไฟฟ้า หน่วยละ 4.50 บาท

ดังนั้น ต้นทุนค่าไฟฟ้า = 27.36 หน่วย/วัน x 3.94 บาท/หน่วย x 4 วัน

= 431.19 บาท/ครั้ง

ดังนั้นต้นทุนค่าวัตถุดิบ + ต้นทุนค่าไฟฟ้า

= 1,000 บาท + 431.19 บาท/ครั้ง

= 1,431.19 บาท/ครั้ง

จากตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาสดทำแห้งด้วยวิธีตู้อบลมร้อนจะได้ตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงประมาณ 1,157 กรัม ดังนั้น ต้นทุนเฉลี่ยคิดเป็นต่อกรัมน้ำหนักแห้งคือ

สาหร่ายสไปรูลินาผง 1,157 กรัม มีต้นทุนในการผลิตทั้งหมดคือ 1,431.19 บาท ถ้าสาหร่ายสไปรูลินาผง 1 กรัม จะมีต้นทุนของสาหร่ายสไปรูลินาผงต่อกรัม

= (1 กรัม x 1,431.19 บาท)/1,157 กรัม

= 1,236 บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง

ดังนั้น ในวิธีตู้อบลมร้อน จะมีต้นทุนการผลิต 1,236 บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง

การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ

- ค่าวัตถุดิบสาหร่ายสไปรูลินาสด 2.5 กิโลกรัม อบแห้ง 4 วัน

ค่าสาหร่ายสไปรูลินาสด 100 บาท/กิโลกรัม

ดังนั้นต้นทุนค่าวัตถุดิบ = 100 บาท/กิโลกรัม x 2.5 กิโลกรัม 4 วัน(1 ครั้ง)

= 250 บาท/ครั้ง

- ค่าไฟฟ้า

จากความสัมพันธ์ P = IxV

โดย P = กำลังไฟฟ้า, วัตต์

I = กระแสไฟฟ้า, แอมแปร์

V = ความต่างศักดิ์ไฟฟ้า, โวลท์

ตู้อบสุญญากาศ 230 โวลท์ ทำงาน 24 ชั่วโมง/วัน ใช้พลังงานไฟฟ้า 8.2 แอมแปร์

ดังนั้นใช้พลังงานไฟฟ้า

P	= 8.2 x 230	วัตต์
	= 1.89	กิโลวัตต์
ทำงานวันละ 24 ชั่วโมง	= 1.89 x 24	กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/วัน
	= 45.36	กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/วัน
	= 45.36	หน่วย/วัน

คิดค่าไฟฟ้า หน่วยละ 4.50 บาท

ดังนั้น ต้นทุนค่าไฟฟ้า = 45.36 หน่วย/วัน x 3.94 บาท/หน่วย x 4 วัน

= 714.87 บาท/ครั้ง

ดังนั้นต้นทุนค่าวัตถุดิบ + ต้นทุนค่าไฟฟ้า

= 250 บาท + 714.87 บาท/ครั้ง

= 964.87 บาท/ครั้ง

จากตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาสดทำแห้งด้วยวิธีตู้อบสุญญากาศ จะได้ตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงประมาณ 312 กรัม ดังนั้น ต้นทุนเฉลี่ยคิดเป็นต่อกรัมน้ำหนักแห้งคือ

สาหร่ายสไปรูลินาผง 312 กรัม มีต้นทุนในการผลิตทั้งหมดคือ 964.87 บาท ถ้าสาหร่ายสไปรูลินาผง 1 กรัม จะมีต้นทุนของสาหร่ายสไปรูลินาผงต่อกรัม

= (1 กรัม x 964.87 บาท)/312 กรัม

= 3,092 บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง

ดังนั้น ในวิธีตู้อบสุญญากาศ จะมีต้นทุนการผลิต 3,092 บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง

การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย

- ค่าวัตถุดิบสาหร่ายสไปรูลินาสด 10 กิโลกรัม ทำแห้ง 1 ชั่วโมง

ค่าสาหร่ายสไปรูลินาสด 100 บาท/กิโลกรัม

ดังนั้นต้นทุนค่าวัตถุดิบ = 100 บาท/กิโลกรัม x 10 กิโลกรัม 1 ชั่วโมง (1 ครั้ง)

= 1,000 บาท/ครั้ง

- ค่าไฟฟ้า

จากความสัมพันธ์ P = IxV

โดย P = กำลังไฟฟ้า, วัตต์

I = กระแสไฟฟ้า, แอมแปร์

V = ความต่างศักดิ์ไฟฟ้า, โวลท์

วิธีการทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย 380 โวลท์ ทำงาน 1 ชั่วโมง/วัน ใช้พลังงานไฟฟ้า 0.39 แอมแปร์ ดังนั้นใช้พลังงานไฟฟ้า

P = 0.39 x 380 วัตต์

= 0.15 กิโลวัตต์

ทำงานครั้งละ 1 ชั่วโมง = 0.15 x 1 กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/วัน

= 0.15 กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/วัน

= 0.15 หน่วย/วัน

คิดค่าไฟฟ้า หน่วยละ 4.50 บาท

ดังนั้น ต้นทุนค่าไฟฟ้า = 0.15 หน่วย/วัน x 3.94 บาท/หน่วย x 1 วัน

= 0.59 บาท/ครั้ง

ดังนั้นต้นทุนค่าวัตถุดิบ + ต้นทุนค่าไฟฟ้า

= 1,000 บาท + 0.59 บาท/ครั้ง

= 1,000.59 บาท/ครั้ง

จากตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาสดทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย จะได้ตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงประมาณ 677 กรัม ดังนั้น ต้นทุนเฉลี่ยคิดเป็นต่อกรัมน้ำหนักแห้งคือ

สาหร่ายสไปรูลินาผง 677 กรัม มีต้นทุนในการผลิตทั้งหมดคือ 1,000.59 บาท ถ้าสาหร่ายสไปรูลินาผง 1 กรัม จะมีต้นทุนของสาหร่ายสไปรูลินาผงต่อกรัม

= (1 กรัม x 1,000.59 บาท)/677 กรัม

= 1,477 บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง

ดังนั้น ในวิธีการทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย จะมีต้นทุนการผลิต 1,477 บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง

การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง

- ค่าวัตถุดิบสาหร่ายสไปรูลินาสด 1.2 กิโลกรัม ทำแห้ง 3 วัน

ค่าสาหร่ายสไปรูลินาสด 100 บาท/กิโลกรัม

ดังนั้นต้นทุนค่าวัตถุดิบ = 100 บาท/กิโลกรัม x 1.2 กิโลกรัม 3 วัน (1 ครั้ง)

= 120 บาท/ครั้ง

- ค่าไฟฟ้า

จากความสัมพันธ์ $P = IxV$

โดย P = กำลังไฟฟ้า, วัตต์

I = กระแสไฟฟ้า, แอมแปร์

V = ความต่างศักดิ์ไฟฟ้า, โวลท์

วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ในส่วนตู้ใส่ตัวอย่าง (condenser) 230 โวลท์ ทำงาน 24 ชั่วโมง/วัน ใช้พลังงานไฟฟ้า 6 แอมแปร์

ดังนั้นใช้พลังงานไฟฟ้า

P	= 6 x 230	วัตต์
	= 1.38	กิโลวัตต์
ทำงานวันละ 24 ชั่วโมง	= 1.38 x 24	กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/วัน
	= 33.12	กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/วัน
	= 33.12	หน่วย/วัน

คิดค่าไฟฟ้า หน่วยละ 4.50 บาท

ดังนั้น ต้นทุนค่าไฟฟ้า = 33.12 หน่วย/วัน x 3.94 บาท/หน่วย x 3 วัน

= 391.48 บาท/ครั้ง

วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ในส่วนคอยล์เย็นและเครื่องปั๊ม 220 โวลท์ ทำงาน 24 ชั่วโมง/วัน ใช้พลังงานไฟฟ้า 12 แอมแปร์

ดังนั้นใช้พลังงานไฟฟ้า

P	= 12 x 220	วัตต์
	= 2.64	กิโลวัตต์
ทำงานวันละ 24 ชั่วโมง	= 2.64 x 24	กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/วัน
	= 63.36	กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/วัน
	= 63.36	หน่วย/วัน

คิดค่าไฟฟ้า หน่วยละ 4.50 บาท

ดังนั้น ต้นทุนค่าไฟฟ้า = 63.36 หน่วย/วัน x 3.94 บาท/หน่วย x 3 วัน

= 748.91 บาท/ครั้ง

ดังนั้นต้นทุนค่าวัตถุดิบ + ต้นทุนค่าไฟฟ้า

= 120 บาท + 391.48 บาท/ครั้ง + 748.91 บาท/ครั้ง

= 1,260.39 บาท/ครั้ง

จากตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาสดทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จะได้ตัวอย่างสาหร่ายสไปรูลินาผงประมาณ 147 กรัม ดังนั้น ต้นทุนเฉลี่ยคิดเป็นต่อกรัมน้ำหนักแห้งคือ

สาหร่ายสไปรูลินาผง 147 กรัม มีต้นทุนในการผลิตทั้งหมดคือ 1,260.39 บาท ถ้าสาหร่ายสไปรูลินาผง 1 กรัม จะมีต้นทุนของสาหร่ายสไปรูลินาผงต่อกรัม

= (1 กรัม x 1,260.39 บาท)/147 กรัม

= 8,574 บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง

ดังนั้น ในวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จะมีต้นทุนการผลิต 8,574 บาท/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง

ตารางผนวก 2 ข้อมูลผลผลิตในการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลินาแต่ละวิธี

ตัวอย่าง	ซ้ำ	น้ำหนักเริ่มต้น (สด)(g.)	น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (g.)	Yield (%)	เฉลี่ย	SD
การทำแห้งด้วยวิธีอบพลังงานแสงอาทิตย์	1	15,000	1,550	10.33	10.78	0.51
	2	15,000	1,600	10.67		
	3	15,000	1,700	11.33		
การทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน	1	10,000	1,200	12.00	11.57	0.51
	2	10,000	1,100	11.00		
	3	10,000	1,170	11.70		
การทำแห้งด้วยวิธีอบสุญญากาศ	1	2,500	330	13.20	12.47	0.64
	2	2,500	300	12.00		
	3	2,500	305	12.20		
การทำแห้งด้วยวิธีฉีดพ่นฝอย	1	10,000	600	6.00	6.77	0.68
	2	10,000	700	7.00		
	3	10,000	730	7.30		
การทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง	1	1,200	155	12.92	12.22	0.87
	2	1,200	150	12.50		
	3	1,200	135	11.25		

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

ภาคผนวก จ

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวเจนจิรา ผลโภคกุล
เกิดเมื่อ	30 มกราคม พ.ศ. 2533
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2545 สำเร็จการศึกษา ประถมศึกษา โรงเรียนเทศบาล ๑ (พะเยาประชานุกูล)
	พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษา มัธยมศึกษา โรงเรียนพะเยาพิทยาคม
	พ.ศ. 2555 วท.บ. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่