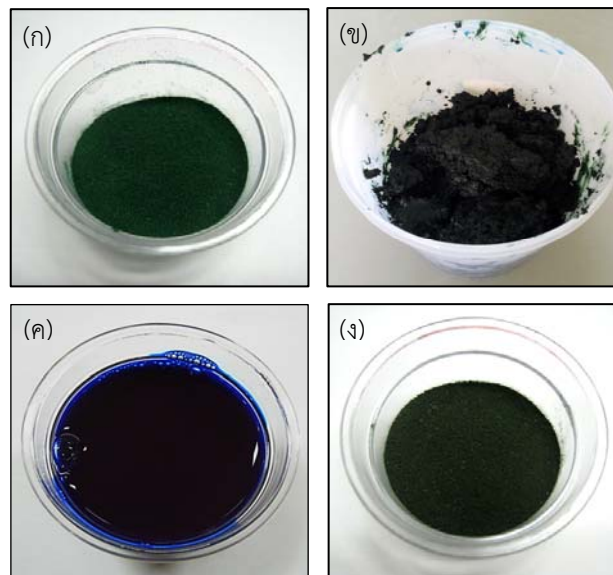


บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ผลการสกัดซี-ไฟโคไซยานินและการวิเคราะห์คุณภาพกากชีวมวลเหลือทิ้งของการสกัดซี-ไฟโคไซยานินจากสาหร่ายสไปรูลิน่า

ซี-ไฟโคไซยานินเป็นรงควัตถุสีฟ้าครามที่ละลายน้ำได้ จัดเป็นสารประกอบโปรตีนที่อยู่ในกลุ่มไฟโคไบลิโปรตีน (phycobiliprotein) และเป็นโปรตีนหลักที่พบมากในเซลล์สาหร่ายสไปรูลิน่า ภายหลังจากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าในอาหาร Zarrouk's medium ในบ่อเพาะเลี้ยงขนาด 250 ลิตร เป็นเวลา 14 วันแล้ว ได้เก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยผ้ากรองขนาด 50 ไมครอน แล้วนำชีวมวลที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง จากนั้นนำชีวมวลดังกล่าวไปบดละเอียดด้วยเครื่องบด (Retsch ZM1) แล้วนำไปสกัดซี-ไฟโคไซยานิน ด้วยกระบวนการไดโนมิลล์ (Dyno-mill) ร่วมกับการตกตะกอนโปรตีนปนเปื้อนด้วยการปรับค่าพีเอช ซึ่งการสกัดซี-ไฟโคไซยานินโดยวิธีการนี้เป็นวิธีการที่สะดวก รวดเร็วและง่ายต่อการปฏิบัติ อีกทั้งยังไม่มี การปนเปื้อนของสารเคมีอันตรายจึงทำให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค



ภาพที่ 4.1 ลักษณะปรากฏของ (ก) ชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่าอบแห้งบดละเอียด (ข) กากชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่าสดที่เหลือจากการสกัดซี-ไฟโคไซยานิน (ค) สารละลายซี-ไฟโคไซยานินที่สกัดได้ (ง) กากชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่าที่เหลือจากการสกัดซี-ไฟโคไซยานิน ซึ่งผ่านการอบแห้งและบดละเอียดแล้ว

ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะปรากฏลักษณะของชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่าอบแห้ง บดละเอียด กากชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่าสดที่เหลือจากการสกัดซี-ไฟโคไซยานิน สารละลาย ซี-ไฟโคไซยานินที่สกัดได้ และกากชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่าที่เหลือจากการสกัดซี-ไฟโคไซยานิน ซึ่งผ่านการอบแห้งและบดละเอียดแล้ว ซึ่งพบว่ากากชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่าสดที่เหลือจากการ สกัดซี-ไฟโคไซยานินจะมีลักษณะเหนียวและมีสีเขียวเข้ม (ภาพที่ 4.1 ข) ในขณะที่กากชีวมวล ของสาหร่ายสไปรูลิน่าที่เหลือจากการสกัดซี-ไฟโคไซยานินซึ่งผ่านการอบแห้งและบดละเอียดแล้ว (ภาพที่ 4.1 ง) จะมีสีเขียวที่ซีดจางลงเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลสาหร่ายก่อนการสกัด (ภาพที่ 4.1 ก) ทั้งนี้เนื่องมาจากซี-ไฟโคไซยานินส่วนใหญ่และคลอโรฟิลล์บางส่วนได้ถูกสกัดออกไป

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลสาหร่ายสไปรูลิน่าก่อนและหลังการสกัด ซี-ไฟโคไซยานิน

องค์ประกอบทางเคมี	ชีวมวลสาหร่ายสไปรูลิน่า	กากชีวมวลสาหร่ายสไปรูลิน่า
ความชื้น (ร้อยละ)	8.60 ± 0.05	10.12 ± 0.17
โปรตีนหยาบ (ร้อยละ)	60.67 ± 0.46	61.17 ± 0.57
ไขมันหยาบ (ร้อยละ)	1.53 ± 0.42	2.60 ± 0.35
เยื่อใย (ร้อยละ)	5.16 ± 0.18	4.65 ± 0.29
เถ้า (ร้อยละ)	5.58 ± 0.31	5.81 ± 0.01
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	2.69	6.28
ซี-ไฟโคไซยานิน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	111.13 ± 19.24	54.85 ± 7.56
คลอโรฟิลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	15,649.46 ± 1,745.34	9,315.42 ± 665.28

จากตารางที่ 4.1 พบว่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลิน่าก่อนการสกัดมีความชื้น โปรตีนหยาบ ไขมันหยาบ เยื่อใย คาร์โบไฮเดรต เท่ากับ ร้อยละ (โดยน้ำหนักแห้ง) 8.60, 60.67, 1.53, 5.16 และ 2.69 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาที่เคยมีรายงานไว้ก่อนหน้านี้ (Cohen, 1997; Belay, 2008) เป็นที่ทราบกันดีว่ารงควัตถุที่มีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์แสงในสาหร่าย สไปรูลิน่าคือซี-ไฟโคไซยานินและคลอโรฟิลล์ ในขณะที่แคโรทีนอยด์พบในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น (Cohen, 1997) โดยที่คลอโรฟิลล์ เอ และอนุพันธ์ของคลอโรฟิลล์ เอ เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ในขณะที่แคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุที่ละลายได้ดีในตัวทำละลายน้ำมัน (liposoluble pigments) และมีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชัน ส่วนซี-ไฟโคไซยานินเป็นสารประกอบโปรตีนที่ละลายน้ำได้มี

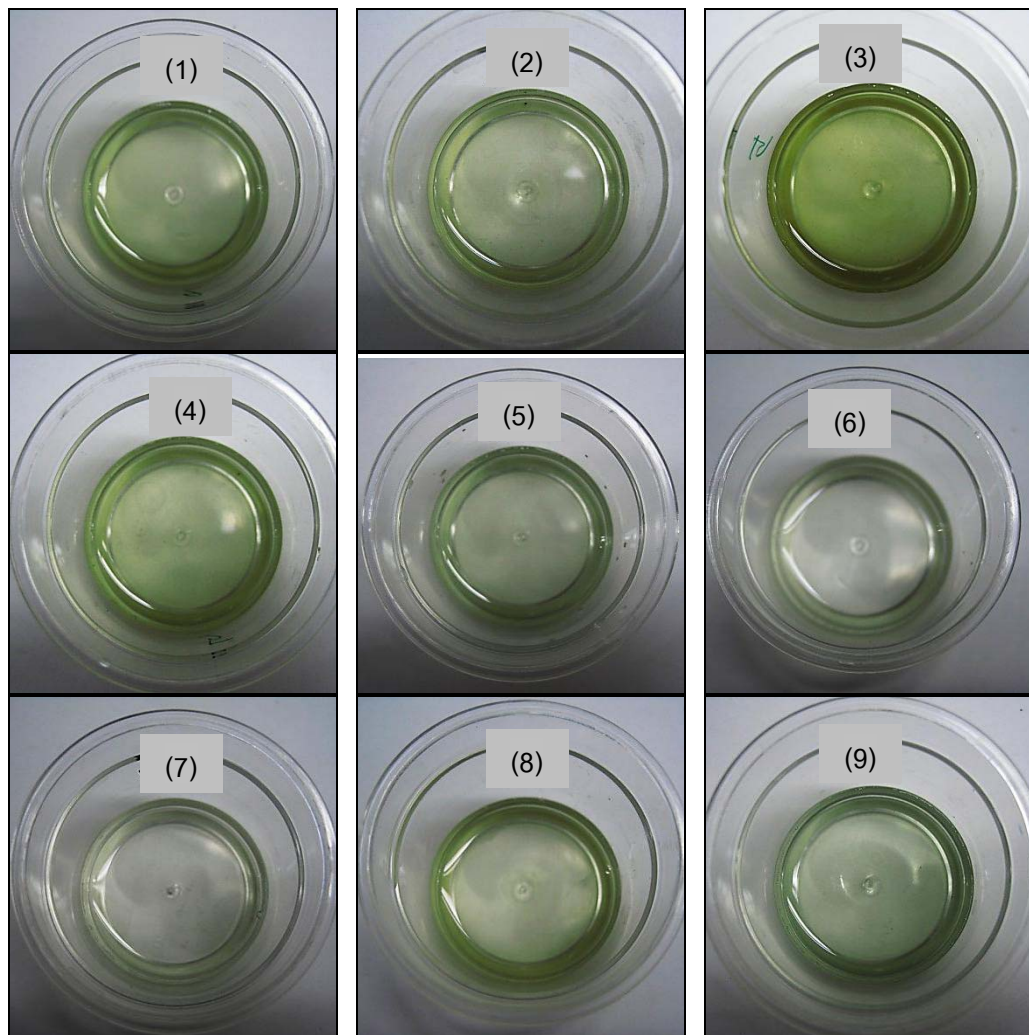
คุณสมบัติด้านออกซิเดชัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณซี-ไฟโคไซยานินและคลอโรฟิลล์ของชีวมวลสาหร่ายสไปรูลิน่าก่อนการสกัดพบว่า มีปริมาณเท่ากับ 111.13 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 15,649.46 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งปริมาณดังกล่าวแตกต่างจากรายงานของ Siam Algae Company (162 และ 12 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ) (Shimamatsu, 2004) โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ สภาพที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง วิธีการเก็บเกี่ยวเซลล์ ตลอดจนวิธีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันด้วย

เมื่อพิจารณาปริมาณซี-ไฟโคไซยานินที่เหลืออยู่ในกากชีวมวลต่อน้ำหนักแห้งเปรียบเทียบกับปริมาณซี-ไฟโคไซยานินในชีวมวลสาหร่ายเริ่มต้นพบว่า กระบวนการสกัดดังกล่าวสามารถสกัดซี-ไฟโคไซยานินได้ประมาณร้อยละ 50 (ตารางที่ 4.1) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบอื่น ๆ ที่เหลืออยู่ในกากชีวมวลสาหร่ายสไปรูลิน่าหลังการสกัดซี-ไฟโคไซยานินพบว่า มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 61.17 ของน้ำหนักแห้ง ในขณะที่โปรตีนที่มีอยู่ในชีวมวลสาหร่ายเริ่มต้นมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 60.67 ของน้ำหนักแห้ง อีกทั้งยังมีปริมาณไขมันและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับร้อยละ 2.60 และ 6.28 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าชีวมวลสาหร่ายเริ่มต้น สาเหตุที่องค์ประกอบเหล่านี้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลสาหร่ายเริ่มต้น เนื่องจากองค์ประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในชีวมวลสไปรูลิน่าได้ถูกสกัดออกไปพร้อมกับซี-ไฟโคไซยานินด้วย ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบดังกล่าวแล้วเทียบต่อน้ำหนักแห้งจึงมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองขั้นต้นแสดงให้เห็นว่ากากชีวมวลสไปรูลิน่าที่เหลือจากการสกัดซี-ไฟโคไซยานินยังคงมีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะโปรตีนที่มีมากถึงร้อยละ 61.17 ซึ่งโปรตีนที่มีอยู่ในสาหร่ายสไปรูลิน่านี้จัดเป็นสารชีวโมเลกุลที่ดีสามารถช่วยเสริมสร้างพลังงานให้แก่ร่างกาย อีกทั้งยังเป็นแหล่งของกรดอะมิโนจำเป็นชนิดต่าง ๆ ที่ร่างกายต้องการ และเป็นสารตั้งต้นของการเกิดกลีโคสที่ดีในผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมและมีความเป็นไปได้สูงในการนำส่วนเหลือทิ้งดังกล่าวมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร

4.2 ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมส่วนสกัดโปรตีนจากกากชีวมวลเหลือทิ้งของการสกัดซี-ไฟโคไซยานินด้วยวิธีทะกุจิ

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทางกลร่วมกับการใช้เอนไซม์ในการย่อยสลายโปรตีนที่มีอยู่ในกากชีวมวลสาหร่ายสไปรูลิน่า ซึ่งการย่อยสลายโปรตีนโดยวิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้ดีกับกระบวนการผลิตอาหารเพราะมีความปลอดภัยต่อการบริโภคสูง โดยในขั้นตอนการสกัดซี-ไฟโคไซยานินด้วยกระบวนการดังกล่าว โปรตีนส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายให้มีโมเลกุลเล็กลง ในขณะที่การใช้เอนไซม์จะทำให้ได้ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนอย่างจำเพาะเจาะจง โดยเฉพาะกรด

กลูตามิกซึ่งเป็นกรดอะมิโนสำคัญที่เป็นสารต้นตอของการเกิดกลิ่นรสอูมามิ (umami) ในผลิตภัณฑ์อาหาร จากการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารละลายโปรตีนจากกากชีวมวลสาหร่ายสไปรูลิน่าของการสกัดซี-ไฟโคไซยานินด้วยวิธีทะกัจ โดยมีทั้งหมด 4 ปัจจัย ๆ ละ 3 ระดับ โดยภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะปรากฏของส่วนสกัดโปรตีนที่สกัดได้ทั้ง 9 ชุดการทดลอง ซึ่งพบว่าส่วนสกัดที่ได้ในแต่ละชุดการทดลองมีกลิ่นเฉพาะของสาหร่ายสไปรูลิน่าและกลิ่นของโปรตีนชัดเจนขึ้น และมีลักษณะปรากฏเป็นสีเขียวเข้มและจางแตกต่างกันไป ซึ่งเกิดจากรงควัตถุคลอโรฟิลล์ที่ให้สีเขียวและสภาวะในการทำปฏิกิริยาในแต่ละชุดการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ 3 ส่วนสกัดโปรตีนที่ได้จะมีสีเขียวเข้มมากที่สุด



ภาพที่ 4.2 ลักษณะปรากฏของส่วนสกัดโปรตีนที่ได้จากการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณกรดอะมิโนรวมคำนวณในรูปของกรดกลูตามิกและ S/N ratio ซึ่งพบว่าชุดการทดลองที่ 3 ให้ค่าเฉลี่ยของปริมาณกรดอะมิโนรวมและ S/N ratio สูงสุด เท่ากับ 21.50 กรัมต่อลิตร และ 26.65 ตามลำดับ ซึ่งชุดการทดลองดังกล่าวใช้อัตราส่วนระหว่างกากชีวมวลสาหร่ายสด : น้ำ เท่ากับ 1 : 2.5, ปริมาณเอนไซม์ ProteAX[®] ร้อยละ 2.0 ต่อปริมาณโปรตีน ปริมาณเอนไซม์ Glutaminase SD-C100S[®] ร้อยละ 0.4 ต่อปริมาณโปรตีน และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 20 ชั่วโมง จากตารางที่ 4.3 พบว่าอัตราส่วนระหว่างกากชีวมวลสาหร่ายสด : น้ำ มีอิทธิพลต่อปริมาณกรดอะมิโนรวมมากที่สุด (ร้อยละ 49.41) เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างกากชีวมวลและน้ำทำให้ปริมาณกากชีวมวลซึ่งจัดเป็นซับสเตรตของเอนไซม์ลดลง จึงส่งผลให้ปริมาณกรดอะมิโนรวมที่สกัดได้มีปริมาณลดลงด้วย ในขณะที่ปริมาณเอนไซม์ Glutaminase SD-C100S[®] มีอิทธิพลต่อการสกัดโปรตีนน้อยที่สุดเพียง ร้อยละ 5.09

ตารางที่ 4.2 ปริมาณกรดอะมิโนรวมในแต่ละชุดการทดลองที่ออกแบบการทดลองด้วยวิธีทฤษฎี

ชุดการทดลอง	A ¹	B	C	D	ปริมาณกรดอะมิโนรวม (กรัมต่อลิตร)	S/N ratio
1	1:2.5	0.5	0.2	5	10.06 ± 0.28	20.04
2	1:2.5	1.0	0.4	10	9.71 ± 0.18	19.79
3	1:2.5	2.0	0.8	20	21.50 ± 0.04	26.65
4	1:5	0.5	0.4	20	6.73 ± 0.09	16.56
5	1:5	1.0	0.8	5	7.95 ± 2.39	17.42
6	1:5	2.0	0.2	10	6.40 ± 1.92	15.53
7	1:7.5	0.5	0.8	10	3.01 ± 0.10	9.56
8	1:7.5	1.0	0.2	20	6.04 ± 0.38	15.60
9	1:7.5	2.0	0.4	5	5.39 ± 0.44	14.58

หมายเหตุ¹ ดูคำอธิบายปัจจัยที่ใช้ในการทดลองในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (main effect) ของปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมส่วนสกัดโปรตีนจากกากชีวมวลเหลือทิ้งของการสกัดซี-ไฟโคไซยานินด้วยวิธีหะกัจโดยอาศัยค่า S/N ratio ในการวิเคราะห์

ระดับ	ปัจจัย			
	A ¹	B	C	D
1	22.14	15.39	17.06	17.35
2	16.50	17.59	16.96	14.94
3	13.25	18.92	17.88	19.60
ค่าสูงสุด	13.25	15.39	16.96	14.94
ค่าต่ำสุด	22.14	18.92	17.88	19.60
อิทธิพล	8.90	3.53	0.92	4.66
% อิทธิพล	49.41	19.62	5.09	25.87

หมายเหตุ ¹ ดูคำอธิบายปัจจัยที่ใช้ในการทดลองในตารางที่ 3.1

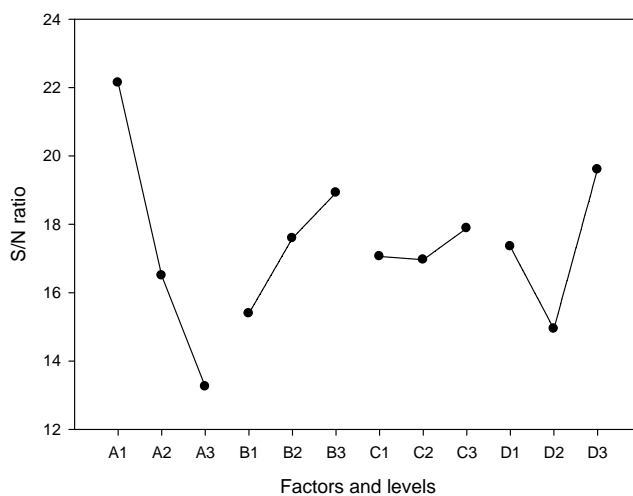
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของ S/N ratio โดยไม่นำปริมาณเอนไซม์ Glutaminase SD-C100S[®] มาวิเคราะห์ เนื่องจากในการใช้โปรแกรม Qualitex-4 ver.15.5 กับปัจจัยและระดับการทดลองที่มาก ส่งผลให้ค่าความคาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ความแปรปรวนเท่ากับ 0 ดังนั้น จากผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.4 พบว่าอัตราส่วนระหว่างกากชีวมวลสำหรับยีสไปรูลิน่าสด : น้ำ มีอิทธิพลต่อการสกัดโปรตีนมากที่สุด คือ ร้อยละ 68.70 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 4.3 ข้างต้น ในการประมาณหาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมส่วนสกัดโปรตีนที่ให้ปริมาณกรดอะมิโนรวมสูงสุด โดยการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า S/N ratio กับระดับและปัจจัยของการทดลอง แสดงดังภาพที่ 4.3 จากนั้นพิจารณาจากค่าสูงสุดของระดับในแต่ละปัจจัยของการทดลอง สรุปได้ว่าค่าสูงสุดคือสถานะที่ให้ปริมาณของกรดอะมิโนทั้งหมดสูงที่สุดเช่นกัน ซึ่งก็คือสถานะที่เหมาะสมในการทดลอง ดังนั้นจากภาพที่ 4.3 พบว่าอัตราส่วนระหว่างกากชีวมวลสำหรับยีส : น้ำ เท่ากับ 1 : 2.5 ปริมาณเอนไซม์ ProteAX[®] ปริมาณเอนไซม์ Glutaminase SD-C100S[®] ร้อยละ 2.0 และ 0.8 ต่อปริมาณโปรตีนของกากสำหรับยีส ตามลำดับ และเวลาในการสกัดนาน 20 ชั่วโมง เป็นสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมสารละลายโปรตีนเพราะให้ปริมาณกรดอะมิโนโดยรวมสูงที่สุด ซึ่งจากการทำนายของโปรแกรม Qualitex-4 ver.15.5 ระบุว่าสถานะดังกล่าวให้ปริมาณกรดอะมิโนโดยรวมเท่ากับ 26.65 กรัมต่อลิตร

(ตารางที่ 4.5) และสามารถคำนวณหาค่าคาดหวังได้จากสมการ $Y_{opt} = T + (A_1 - T) + (B_3 - T) + (C_3 - T) + (D_3 - T)$ โดย Y_{opt} , T , A_1 , B_3 , C_3 และ D_3 คือ ค่าคาดหวัง ผลรวมทั้งหมดของค่าเฉลี่ยในทุกชุดการทดลอง ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองในแต่ละปัจจัย (A, B, C, D) ที่ระดับของการทดลองที่เหมาะสม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อทดลองยืนยันตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายโดยวิธีทฤษฎีในการเตรียมสารละลายโปรตีนพบว่า ปริมาณกรดอะมิโนโดยรวมมีค่าเท่ากับ 21.01 ± 1.52 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทำนายด้วยวิธีทฤษฎี

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของ S/N ratio ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมส่วนสกัดโปรตีนจากกากชีวมวลเหลือทิ้งของการสกัดซี-ไพโคไซยานินด้วยวิธีทฤษฎี

Factor	DOF	SS	Variance	F-ratio	Pure Sum	P (%)	Confidence
A ¹	2	121.59	60.79	80.08	120.07	68.70	85.80
B	2	19.10	9.55	12.58	17.58	10.06	82.20
C	(2)	(1.518)	POOLED				
D	2	32.56	16.28	21.45	31.04	17.76	83.97
Other/Error	2	1.52	0.76			3.48	
Total	8	174.76				100.00	
						%	

หมายเหตุ ¹ ดูคำอธิบายปัจจัยที่ใช้ในการทดลองในตารางที่ 3.1



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของ S/N ratio ของแต่ละปัจจัยการทดลอง (A-D) ที่ระดับต่าง ๆ กัน

4.3 ผลการผลิตซุสสำหรับยาสไปรูลิน่าสกัดเข้มข้นจากส่วนสกัดโปรตีน

จากการพัฒนาผลิตภัณฑ์ซุสสำหรับยาสไปรูลิน่าสกัดเข้มข้นพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 60 องศาบริกซ์ มีกลิ่นรสเฉพาะตัวของซุสสำหรับยาสไปรูลิน่า ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกลิ่นซุสไปสกัดทางการค้า ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์มีลักษณะขุ่นเหนียว และมีสีเขียวมะกอกดังแสดงในภาพที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์พบว่า มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์ และรา น้อยกว่า 30 โคโลนี ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำซอสปรุงรส (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2549) แสดงให้เห็นว่ากรรมวิธีการผลิตซุสสำหรับยาสไปรูลิน่าสกัดเข้มข้นมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ผลการวิเคราะห์ชนิดของกรดอะมิโนโดยโครมาโทกราฟีแบบของเหลว (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) พบว่าประกอบกรดอะมิโน 18 ชนิด โดยมีกรดอะมิโนจำเป็น 10 ชนิด ได้แก่ อาร์จินีน (0.9%), ฮีสติดีน (0.5%), ไอโซลิวซีน (1%), ลิวซีน (1.5%), ไลซีน (1%), เมทไธโอนีน (0.6%), ฟีนิลอะลานีน (0.9%), ทรีโอนีน (1%), ทริปโตเฟน (0.2%) และวาเลีน (1.3%) โดยกรดอะมิโนหลักที่พบได้แก่ กรดกลูตามิก (2.2%) และกรดแอสปาทิก (1.9%) แสดงดังตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดเข้มข้นที่พัฒนาได้

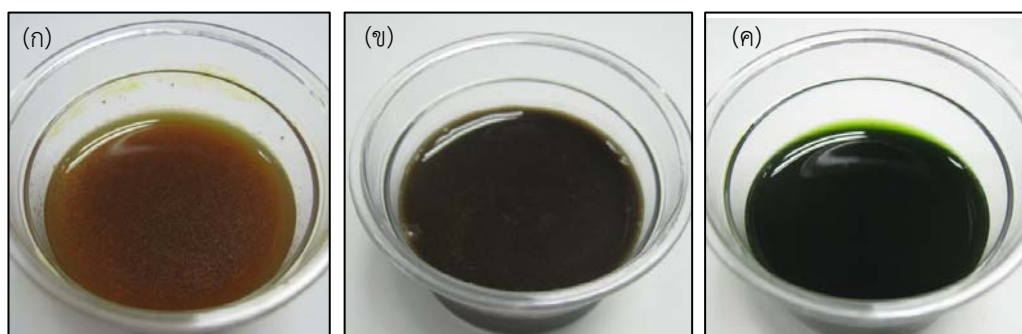
4.4 ผลการผลิตซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มจากซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดเข้มข้น

จากการนำซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดเข้มข้นมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มจำนวน 3 สูตร ได้แก่ ซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มผสมฟักข้าว ซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มรสโกโก้ และซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มรสชาเขียว โดยผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้มีลักษณะปรากฏแสดงดังภาพที่ 4.5 เมื่อนำผลิตภัณฑ์ทั้งหมดไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสเปรียบเทียบกับซูปไก่สกัดทางการค้ารสดั้งเดิม และรสช็อกโกแลต ได้ค่าเฉลี่ยของคะแนนคุณลักษณะทางด้านต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.6 ซึ่งพบว่าซูปไก่สกัดทางการค้ารสช็อกโกแลต มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด เท่ากับ 5.92 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับเฉย ๆ ถึงชอบเล็กน้อย ส่วนซูปไก่สกัดทางการค้ารสดั้งเดิมได้คะแนนความชอบรวมต่ำสุดเท่ากับ 4.54 ในขณะที่ซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มรสโกโก้ที่พัฒนาได้ ได้รับคะแนนความชอบรวมมากกว่าซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มรสชาเขียว และซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดผสมฟักข้าว โดยมีคะแนนเท่ากับ 5.16 ซึ่งอยู่ในระดับเดียวกับซูปไก่สกัดทางการค้ารสช็อกโกแลต ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ซูปสกัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความจำเพาะต่อกลุ่มผู้บริโภค ดังนั้นจึงสมควรอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพัฒนารสชาติ รูปแบบ และลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคต่อไป

ตารางที่ 4.5 ชนิดของกรดอะมิโนที่พบในซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดเข้มข้นต่อปริมาณ 100 กรัม

ชนิดของกรดอะมิโน	ร้อยละ
อะลานีน	1.4
อาร์จีนีน	0.9
กรดแอสปาทิก	1.9
ซีสทีน	0.4
กรดกลูตามิก	2.2
ไกลซีน	1.0
ฮีสติดีน	0.5
ไอโซลิวซีน	1.2
ลิวซีน	1.5
ไลซีน	1.0
เมไทโอนีน	0.6
ฟีนิลอะลานีน	0.9
โพรลีน	1.0
ซีรีน	1.0
ทรีโอนีน	1.0
ทริปโตเฟน	0.3
ไทโรซีน	0.7
วาเลีน	1.3

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดเข้มข้นเปรียบเทียบกับซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดีมรสโกโก้ โดยพบว่าซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดเข้มข้นมีปริมาณโปรตีนทั้งหมดร้อยละ 21.47 ในขณะที่ซูปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดีมรสโกโก้มีปริมาณโปรตีนเพียงร้อยละ 2.90 และมีองค์ประกอบอื่น ๆ ลดลง ซึ่งเกิดจากในขั้นตอนการผลิตได้มีการเจือจางซูปสาหร่ายสกัดเข้มข้นลงประมาณ 10 เท่า ดังนั้นหากต้องการเพิ่มปริมาณโปรตีน ซึ่งถือว่าเป็นจุดเด่นของผลิตภัณฑ์จะต้องลดการเจือจางซูปสาหร่ายสกัดเข้มข้นลง



ภาพที่ 4.5 ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ (ก) ซุปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดผสมผักข้าว

(ข) ซุปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มรสโกโก้ และ (ค) ซุปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มรสชาเขียว

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยของคะแนนคุณลักษณะทางประสาทของผู้บริโภคกลุ่มทั่วไปที่มีต่อผลิตภัณฑ์ ซุปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่ม

ผลิตภัณฑ์	คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส			
	สี	กลิ่นรส	รสชาติ	ความชอบรวม
ซุปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มผสมผักข้าว	5.84 ± 1.90 ^{a,b}	5.42 ± 1.89 ^b	4.92 ± 2.00 ^{b,c}	4.98 ± 1.90 ^b
ซุปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มรสโกโก้	5.16 ± 2.28 ^b	5.74 ± 2.16 ^b	5.38 ± 2.28 ^b	5.16 ± 1.96 ^b
ซุปสาหร่ายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มรสชาเขียว	6.06 ± 1.99 ^a	6.08 ± 1.75 ^{a,b}	5.34 ± 2.06 ^b	5.08 ± 1.88 ^b
ซูปลั้สกัด (รสดั้งเดิม)	6.52 ± 1.83 ^a	3.80 ± 2.19 ^c	4.28 ± 2.25 ^c	4.54 ± 2.21 ^b
ซูปลั้สกัด (รสช็อกโกแลต)	5.82 ± 2.14 ^{a,b}	6.64 ± 1.47 ^a	6.14 ± 1.95 ^a	5.92 ± 1.89 ^a

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ซุปรายสไปรูลิน่าสกัดเข้มข้นเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ซุปรายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่ม

องค์ประกอบทางเคมี	ซุปรายสไปรูลิน่าสกัดเข้มข้น	ซุปรายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่ม
ความชื้น (ร้อยละ)	14.20 ± 2.35	31.59 ± 0.74
โปรตีนหยาบ (ร้อยละ)	21.47 ± 0.17	2.90 ± 0.02
ไขมันหยาบ (ร้อยละ)	1.12 ± 0.11	0.31 ± 0.02
เยื่อใย (ร้อยละ)	1.08 ± 0.09	0.07 ± 0.01
เถ้า (ร้อยละ)	4.80 ± 0.09	0.22 ± 0.03
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	57.32	64.91

4.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซุปรายสไปรูลิน่าพร้อมดื่มในระหว่างการเก็บรักษา

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านกายภาพ (สี) เคมี (ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ พีเอช และปริมาณกรดในอาหาร) และชีวภาพ (จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา) ของซุปรายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มรสโกโก้ระหว่างการเก็บรักษา โดยนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวบรรจุในขวดแก้วใสขนาดปริมาตร 70 มิลลิลิตร และนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 วัน และสุ่มตัวอย่างทุก 3 วัน มาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 ตามลำดับ

จากการวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์ซุปรายสไปรูลิน่าสกัดพร้อมดื่มรสโกโก้ในระหว่างการเก็บรักษาพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์มีความเข้มเพิ่มมากขึ้นด้วย พิจารณาได้จากค่าสี L^* ซึ่งแสดงถึงความสว่าง โดยถ้ามีค่าเท่ากับ 100 แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีสีขาว แต่ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีสีดำ ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์เริ่มต้นมีค่า L^* เท่ากับ 1.07 ± 0.08 เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏเป็นสีน้ำตาลเข้มซึ่งเกิดจากรงควัตถุต่าง ๆ ของซุปรายสไปรูลิน่าและผงโกโก้ที่เติมลงไป และเมื่อเก็บรักษานานขึ้นค่าสี L^* จะมีค่าเข้าใกล้ 0 เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณของแข็งที่ละลายได้รวมตัวกันเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์จึงมีสีเข้มตามไปด้วย สำหรับค่าสี a^* แสดงความเป็นสีแดงและสีเขียว โดยถ้ามีค่าเป็นบวก แสดงค่าสีแดง ส่วนค่าลบแสดงค่าสีเขียว จากการวัดสีของผลิตภัณฑ์พบว่าผลิตภัณฑ์เริ่มต้นมีค่าสี a^* เป็นลบ แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีความเป็นสีเขียว ซึ่งเกิด

จากรงควัตถุคลอโรฟิลล์ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ และเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าสี a^* มีแนวโน้มเป็นลบเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของคลอโรฟิลล์อันเนื่องมาจากแสงและความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการเก็บรักษา โดยทั่วไปแล้วเมื่อคลอโรฟิลล์ได้รับแสงหรือความร้อนเป็นเวลานาน คลอโรฟิลล์จะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวมะกอก และเปลี่ยนเป็นสีดำ ในที่สุด เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนได้เข้าไปแทนที่แมกนีเซียมไอออนในโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ ดังนั้น ภาวะบรรจุที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ควรเป็นภาวะที่บัพที่สามสามารถป้องกันแสงได้ สำหรับค่าสี b^* คือค่าที่แสดงความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยค่าบวกแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีความเป็นสีเหลือง ส่วนค่าลบแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีความเป็นสีน้ำเงิน จากการวัดค่าสี b^* พบว่าผลิตภัณฑ์เริ่มต้นมีค่าเข้าใกล้ 0 เนื่องมาจากรงควัตถุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสาหร่ายสไปรูลิน่า โดยเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้นพบว่าค่าสี b^* มีการเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดพบว่าการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ของแข็งที่ละลายและแขวนลอยอยู่ในผลิตภัณฑ์เกิดการรวมตัวกันเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่าพีเอชและปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น ซึ่งเกิดจากกิจกรรมหลักของจุลินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ โดยเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการเก็บรักษานาน 15 วัน ผลิตภัณฑ์มีค่าพีเอชและปริมาณกรดทั้งหมดเท่ากับ 5.34 และร้อยละ 0.96 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าสี ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ค่าพีเอช และค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ซूपสาหร่ายสไปรูลิน่าพร้อมดีมรสโกโก้ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ ต่ำ นาน 15 วัน

ระยะเวลา (วัน)	ค่าสี			ปริมาณ ของแข็งที่ ละลายได้ (ร้อยละ)	ค่าพีเอช	ค่าความเป็น กรด (ร้อยละ)
	L^*	a^*	b^*			
0	1.07 ± 0.08	0.05 ± 0.00	0.04 ± 0.00	10.6 ± 0.07	5.29 ± 0.00	0.88 ± 0.62
3	0.35 ± 0.40	-0.01 ± 0.01	0.04 ± 0.00	10.8 ± 0.21	5.30 ± 0.01	0.88 ± 0.07
6	0.39 ± 0.50	-0.01 ± 0.01	0.12 ± 0.01	10.8 ± 0.35	5.33 ± 0.00	0.88 ± 0.00
9	0.68 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.04 ± 0.00	10.7 ± 0.21	5.30 ± 0.03	0.93 ± 0.07
12	0.72 ± 0.01	0.05 ± 0.08	0.04 ± 0.02	10.9 ± 0.14	5.31 ± 0.04	0.96 ± 0.03
15	0.83 ± 0.29	-0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.10	11.0 ± 0.00	5.34 ± 0.01	0.96 ± 0.10

ตารางที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และราของผลิตภัณฑ์ซูปสาหร่าย
สไปรูลิनाพร้อมตีร์สโกโก้ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำนาน 15 วัน

ระยะเวลา (วัน)	จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ($\times 10^2$ โคโลนีต่อกรัม)	จำนวนยีสต์และรา ($\times 10^2$ โคโลนีต่อกรัม)
0	6.10 ± 0.10	< 30 colony
3	7.75 ± 0.35	< 30 colony
6	< 30 colony	3.85 ± 1.08
9	8.17 ± 0.68	6.58 ± 0.48
12	8.37 ± 3.12	> 30 colony
15	11.50 ± 1.12	8.98 ± 1.37

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์ซูปสาหร่าย
สไปรูลิनाสกัดพร้อมตีร์สโกโก้ในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น
จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนยีสต์และรามีจำนวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการพาสเจอร์ไรส์ผลิตภัณฑ์
ได้เลือกใช้สภาวะอุณหภูมิต่ำและระยะเวลานาน (Low temperature long time) ในการฆ่า
เชื้อจุลินทรีย์ เพื่อเป็นการรักษาโปรตีนและกรดอะมิโนในผลิตภัณฑ์ไว้ให้มากที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงมี
จุลินทรีย์บางส่วนหลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากประกาศของกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 144
พ.ศ.2535 ว่าด้วยเรื่องอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท กำหนดว่าผลิตภัณฑ์อาหารดังกล่าวต้องมี
จุลินทรีย์ไม่เกิน 1,000 ต่ออาหาร 1 กรัม และตรวจพบยีสต์และราไม่เกิน 100 ต่ออาหาร 1 กรัม
(สำนักอาหาร สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข, 2556) จากการวิเคราะห์
จำนวนจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ซูปสาหร่ายสไปรูลิनाสกัดพร้อมตีร์สโกโก้พบว่า วันที่ 15 ของ
ระยะเวลาในการเก็บรักษา พบจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 11.50×10^2 CFU ต่ออาหาร 1 กรัม
และวันที่ 6 ของระยะเวลาในการเก็บรักษา พบจำนวนยีสต์และราเท่ากับ 3.85×10^2 CFU ต่ออาหาร
1 กรัม ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาได้ไม่เกิน 6 วัน อย่างไรก็ตาม สามารถเพิ่ม
อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้โดยการสเตอริไรส์หรือเติมสารถนอมอาหาร ซึ่งในการเลือกใช้สาร
ถนอมอาหารต้องคำนึงถึงชนิดและปริมาณสารถนอมอาหารที่เหมาะสม รวมถึงลักษณะปรากฏ และ
คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ด้วย