695446

BOOK_VRU
1000162617

รายงานการวิจัย

เรื่อง

อิทธิพลของโลหะหนักที่มีผลต่อสาหร่ายสไปรูไลนา

เอื้อมพร รัตนสิงห์

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
พุทธศักราช 2550

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

หัวข้อวิจัย อิทธิพลของโลหะหนักที่มีผลต่อสาหร่ายสไปรูไลนา

ประเภทงานวิจัย งานวิจัยประยุกต์

ผู้ดำเนินงานวิจัย นางสาวเอื้อมพร รัตนสิงห์

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิของโลหะหนักที่มีผลต่อสาหร่ายสไปรูไลนา โดยทำการเติมสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ หรือเลดคลอไรด์ลงในอาหารเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาและทำการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียล ความเข้มแสง 10,000 ลักซ์ เป็นเวลา 1 สัปดาห์ พบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมหรือตะกั่วในอาหารที่ทำให้สาหร่ายสไปรูไลนาสามารถเจริญเติบโตได้ดีอยู่ในช่วง 0-4 ppm และ 0-20 ppm ตามลำดับ ดังนั้นจึงทำการทดลองเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 1 2 3 และ 4 ppm และความเข้มข้นของตะกั่วที่ 4 8 12 16 และ 20 ppm เพื่อศึกษาการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยใช้เครื่อง AAS และ ICP-OES เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมหรือตะกั่วในอาหารเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาเพิ่มมากขึ้น พบว่าการดูดซับปริมาณแคดเมียมหรือตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนาเพิ่มมากขึ้นด้วย

นอกจากนี้ยังทำการวิเคราห์หาปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในสาหร่ายที่มีขายในท้องตลาด 2 ตัวอย่าง พบว่า ตัวอย่างที่ 1 มีปริมาณแคดเมียมน้อยกว่าตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 1 มีปริมาณตะกั่วมากกว่าตัวอย่างที่ 2 และเมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาและสาหร่ายสไปรูไลนาที่ขายตามท้องตลาดนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของปริมาณแคดเมียมและตะกั่ว พบว่าผลการวิเคราะห์ที่ตรวจพบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้จะสำเร็จลุล่วงไปมิได้หากไม่ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยและศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือต่างๆ ให้งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอื้อมพร รัตนสิงห์

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สาหร่ายสไปรูไลนา	4
2.1.1 การจัดอนุกรมวิธานของสาหร่ายสไปรูไลนา	4
2.1.2 ลักษณะทั่วไปของสาหร่ายสไปรูไลนา	4
2.2 การสืบพันธุ์ของสาหร่ายสไปรูไลนา	5
2.2.1 การแบ่งเซลล์	5
2.2.2 การขาดเป็นท่อน	5
2.2.3 การสร้างอะคีนีต	6
2.2.4 การสร้างสปอร์	6
2.3 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา	6
2.4 วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูไลนา	7
2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา	8
2.5.1 แสง	8

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 ความเป็นกรด-ด่าง	9
2.5.3 อุณหภูมิ	9
2.5.4 ความเค็ม	10
2.5.5 การกวน	10
2.5.6 ความหนาแน่นเริ่มต้นของสาหร่ายสไปรูไลนา	11
2.6 แหล่งอาหารของสาหร่ายสไปรูไลนา	11
2.6.1 ธาตุคาร์บอน	11
2.6.2 ธาตุไนโตรเจน	11
2.6.3 ธาตุฟอสฟอรัส	12
2.7 วิธีการเพาะเลี้ยงและขยายจำนวนสาหร่ายสไปรูไลนา	12
2.7.1 สาหร่ายสไปรูไลนาแยกเชื้อบริสุทธิ์	13
2.7.2 การเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูไลนา	13
2.7.3 วิธีเก็บรักษา	13
2.8 คุณค่าทางอาหารของสาหร่ายสไปรูไลนา	14
2.9 การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายสไปรูไลนา	15
2.9.1 ใช้เป็นอาหารของมนุษย์	15
2.9.2 ใช้เป็นอาหารสัตว์	16
2.9.3 ใช้ในการกำจัดน้ำเสีย	16
2.9.4 ใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ	17
2.9.5 ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง	17
2.9.6 ใช้ในอุตสาหกรรมยา	17
2.9.7 ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ	18
2.10 โลหะหนัก	18
2.10.1 การสะสมของโลหะหนัก	18
2.10.2 ความเป็นพิษของโลหะหนัก	19
2.10.3 แคดเมียม	20
2.10.3.1 ประโยชน์ของแคดเมียม	21

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ศึกษาอิทธิพลของแคดเมียมและตะกั่วต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาโดยใช้เครื่อง UV-visible Spectrophotometer	35
4.2.1 การศึกษาอิทธิพลของแคดเมียมต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา	35
4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของตะกั่วต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา	36
4.3 ศึกษาการดูดซับแคดเมียมของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยใช้เครื่อง AAS	37
4.3.1 กราฟมาตรฐาน	37
4.3.2 วิธีเตรียมตัวอย่าง	38
4.4 ศึกษาการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยใช้เครื่อง AAS	39
4.4.1 กราฟมาตรฐาน	39
4.4.2 วิธีเตรียมตัวอย่าง	40
4.5 ศึกษาการดูดซับแคดเมียมของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยใช้เครื่อง ICP-OES	41
4.5.1 กราฟมาตรฐาน	41
4.5.2 วิธีเตรียมตัวอย่าง	42
4.6 ศึกษาการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยใช้เครื่อง ICP-OES	43
4.6.1 กราฟมาตรฐาน	43
4.6.2 วิธีเตรียมตัวอย่าง	44
4.7 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนาในท้องตลาด	45
4.7.1 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสไปรูไลนาในท้องตลาด	45
4.7.2 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนาในท้องตลาด	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการวิจัย	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
บรรณานุกรม	49
ภาคผนวก	52

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ในพระบรมราชูปถัมภ์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนของสาหร่ายสไปรูไลนากับแหล่งโปรตีนอื่นๆ	14
2.2	ปริมาณวิตามินและแร่ธาตุต่างๆ ในสาหร่ายสไปรูไลนา	15
2.3	เกณฑ์มาตรฐานของปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม	20
3.1	ปริมาณสารเคมีในสูตรอาหาร Zarrouk	29
3.2	ปริมาณสารเคมีในสูตรอาหาร Zarrouk สารละลายของ A_5 และ B_6	29
4.1	การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นของแคดเมียมตั้งแต่ 0 – 20 ppm	33
4.2	การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นของตะกั่วตั้งแต่ 0 – 50 ppm	34
4.3	ค่าการดูดกลืนของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นของแคดเมียมตั้งแต่ 0-4 ppm	36
4.4	ค่าการดูดกลืนของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นของตะกั่วตั้งแต่ 0 – 20 ppm	36
4.5	ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม (Cd) โดยเครื่อง AAS	37
4.6	ปริมาณแคดเมียมที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับ โดยใช้เครื่อง AAS	38
4.7	ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) โดยเครื่อง AAS	39
4.8	ปริมาณตะกั่วที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับ โดยใช้เครื่อง AAS	40
4.9	การดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานของแคดเมียม (Cd) โดยเครื่อง ICP–OES	41
4.10	ปริมาณแคดเมียมที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับ โดยใช้เครื่อง ICP-OES	42
4.11	ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) โดยใช้เครื่อง ICP-OES	43
4.12	ปริมาณตะกั่วที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับ โดยใช้เครื่อง ICP-OES	44
4.13	ปริมาณแคดเมียม (ppm) ในอาหารเสริมจากสาหร่ายสไปรูไลนาตามท้องตลาด	45
4.14	ปริมาณตะกั่ว (ppm) ในอาหารเสริมจากสาหร่ายสไปรูไลนาตามท้องตลาด	46
ก.1	คุณภาพหรือมาตรฐานของอาหารเสริมจากสาหร่ายสไปรูไลนา	52
ก.2	ปริมาณโลหะตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนา วัดค่า 3 ครั้ง โดยเทคนิค AAS	52
ก.3	ปริมาณโลหะตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนา วัดค่า 3 ครั้ง โดยเทคนิค ICP-OES	53
ก.4	ปริมาณโลหะแคดเมียมในสาหร่ายสไปรูไลนา วัดค่า 3 ครั้ง โดยเทคนิค AAS	54
ก.5	ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสไปรูไลนา วัดค่า 3 ครั้ง โดยใช้เครื่อง ICP-OES	55

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะรูปร่างของสาหร่ายสไปรูไลนา	5
2.2	วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูไลนา	8
4.1	การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา	35
4.2	กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0- 4 ppm โดยใช้เครื่อง AAS	38
4.3	กราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้น 0- 20 ppm โดยใช้เครื่อง AAS	40
4.4	กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0- 4 ppm โดยใช้เครื่อง ICP – OES	42
4.5	กราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้น 0-20 ppm โดยใช้เครื่อง ICP – OES	44

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต ในพระบรมราชูปถัมภ์

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้เกิดการขยายตัวทางด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ทำให้ มีการนำโลหะหนักหลายชนิดไปใช้ประโยชน์ โดยโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเกลืออินทรีย์และเกลืออนินทรีย์ โดยเฉพาะแคดเมียมและตะกั่ว ซึ่งแคดเมียมใช้เป็นส่วนประกอบของสารเคมีกำจัดวัชพืช (Herbicide) สารเคมีกำจัดเชื้อรา (Fungicide) ผลิตภัณฑ์สี หมึกพิมพ์ สารป้องกันการเกิดสนิม อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ส่วนตะกั่วใช้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น การทำแบตเตอรี่รถยนต์อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน เคลือบสายเคเบิล อุตสาหกรรมหลอมตะกั่ว การผลิตสี อุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผา อุตสาหกรรมตัวพิมพ์ การผลิตกระสุน การเชื่อมแผงวงจรอิเล็คโทรนิค ยาฆ่าแมลง เป็นต้น จึงทำให้มนุษย์มีการสัมผัสกับโลหะหนักจากการปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม ซึ่งสาเหตุของการปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมเกิดจากการที่เกษตรกรและโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนโดยไม่มีการบำบัด หรือการบำบัดไม่มีประสิทธิภาพดีพอที่จะกำจัดให้โลหะหนักออกจากน้ำทิ้งได้ทำให้โลหะปนเปื้อสู่สิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะแหล่งน้ำ และพื้นดิน เช่น แม่น้ำ ลำคลอง และพื้นที่เพาะปลูกอื่นๆ ทำให้โลหะหนักสามารถแพร่กระจายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารเป็นปัญหาสำคัญในการจัดการ และกำจัดทิ้ง

สาหร่ายสไปรูไลนา (Spirulina) เป็นจุลินทรีย์กลุ่มสีน้ำเงินแกมเขียว (Cyanobacteria) ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนแหล่งใหม่ของโลกนอกเหนือจากพืช และสัตว์ที่มนุษย์เราคุ้นเคยอยู่แล้ว โปรตีนเซลล์เดียวที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตพวกจุลินทรีย์ เช่น รา ยีสต์ แบคทีเรีย และสาหร่าย สิ่งชีวิตเหล่านี้มีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น สามารถผลิตโปรตีนที่มีคุณภาพ สามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว ต้นทุนการผลิตค่อนข้างต่ำ และสามารถควบคุมการผลิตได้ง่าย โปรตีนจากยีสต์และแบคทีเรียจะมีปริมาณของกรดนิวคลีอิกสูง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในมนุษย์เมื่อนำมาบริโภค นอกจากนี้จุลินทรีย์ทั้งสองยังมีขนาดเล็กทำให้เก็บเกี่ยวค่อนข้างลำบาก โปรตีนจากราถึงแม้จะมีปริมาณของกรดนิวคลีอิกต่ำกว่า และมีขนาดใหญ่กว่าการเก็บเกี่ยวง่ายกว่า แต่ก็มีข้อเสีย คือ อัตราการเจริญเติบโตต่ำ ผู้ผลิตจึงหันมาสนใจโปรตีนจากสาหร่าย สาหร่ายที่นำมาผลิตโปรตีนเซลล์เดียว ได้แก่ คลอเรลลา และซีเนเดสมัส แต่สาหร่ายทั้งสองนี้มีขนาดเล็ก การเก็บเกี่ยวลำบากไม่เหมาะที่จะทำอุตสาหกรรม ต่อมาพบว่าสาหร่ายสไปรูไลนาเป็นสาหร่ายที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการผลิตโปรตีนเซลล์เดียวมากที่สุด ทั้งนี้เพราะสาหร่ายสไปรูไลนานี้เป็นสาหร่ายที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่สามารถทำ

เซลล์เดียวมากที่สุด ทั้งนี้เพราะสาหร่ายสไปรูไลนานี้เป็นสาหร่ายที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่สามารถทำการเก็บเกี่ยวได้ง่าย (วุฒิพร และสิริพันธ์, 2539) และนำมาผลิตโปรตีนที่มีกรดนิวคลีอิกต่ำ และเป็นโปรตีนที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง กล่าวคือปริมาณโปรตีนสูง และเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพ สาหร่ายสไปรูไลนามีปริมาณโปรตีนสูงถึง 62-68 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งมากกว่าปริมาณโปรตีนในไข่ไก่ และเนื้อวัวถึง 3.5 เท่า ประกอบด้วยกรดอะมิโนอยู่ในเกณฑ์ที่สมดุลทั้งในแง่ปริมาณและคุณภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่ายสไปรูไลนามีปริมาณของวิตามิน และเกลือแร่อยู่ในเกณฑ์สูง โดยเฉพาะมีปริมาณของแคลเซียม ฟอสฟอรัส โปตัสเซียม และเหล็กสูง ในขณะเดียวกันมีปริมาณของคาร์โบไฮเดรต และไขมันต่ำ ความสามารถในการถูกย่อยได้ของสาหร่ายสไปรูไลนามีสูงถึง 83-84 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าไฟโคไซยานิน และคาโรทีนอยด์ในปริมาณสูง โดยเฉพาะคาโรทีนอยด์ซึ่งเป็นแหล่งของสารเร่งสีในสัตว์ที่สัตว์ไม่สามารถสร้างขึ้นเองได้ จากการศึกษาลักษณะทางชีววิทยาของสาหร่ายสไปรูไลนา ยังพบว่าที่บริเวณผนังเซลล์ไม่มีเซลลูโลสเหมือนสาหร่ายหรือพืชชนิดอื่นๆ จึงเป็นของดีในการนำมาเป็นอาหารโปรตีนของมนุษย์เพราะในร่างกายของมนุษย์ไม่มีเอนไซม์สำหรับย่อยเซลลูโลส จากคุณค่าทางโภชนาการที่ครบถ้วน และคุณภาพสูงทำให้สาหร่ายสไปรูไลนามีประสิทธิภาพเป็นทั้งอาหาร และยาที่ให้ผลในการป้องกัน ควบคุม และรักษาโรคต่างๆ ผลจากการศึกษาของ ดร.ทากูชิ แห่ง Nation Medical and Dental University of Tokyo ได้เสนอถึงประสิทธิภาพของสาหร่ายชนิดนี้ในการป้องกัน ควบคุม และรักษาโรคต่างๆ คือ โรคเบาหวาน โรคโลหิตจาง โรคตับ โรคกระเพาะ โรคความดันโลหิตสูง และโรคมะเร็ง

ปัจจุบันเทคโนโลยีสาหร่ายกำลังมีความก้าวหน้า และได้รับการพัฒนาอย่างมากมีผลิตภัณฑ์จากสาหร่ายหลายชนิดที่ได้รับการพัฒนาถึงขั้นออกวางจำหน่ายในท้องตลาดทั่วโลกแล้ว เช่น อาหารเสริมสุขภาพจากสาหร่าย โปรวิตามิน รงควัตถุสีน้ำเงิน และสีส้ม เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นที่รู้จักกันดีในประเทศไทยแถบตะวันตก มีอีกหลายประเทศที่ผลิตเป็นอุตสาหกรรมเพื่อเป็นอาหารของมนุษย์ และอาหารสัตว์ เช่น ในสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และอิสราเอล มีอุตสาหกรรมการผลิตสาหร่ายสไปรูไลนาเป็นอาหารสัตว์เพื่อประโยชน์ในการเพิ่มโปรตีนแก่เนื้อสัตว์ และผลิตภัณฑ์อาหารเสริมเพื่อบำรุงสุขภาพมนุษย์ ในการผลิตสาหร่ายสไปรูไลนา เพื่อเป็นอาหารสุขภาพของมนุษย์นั้นนิยมใช้อาหารสูตร Zarrouk ซึ่งประกอบไปด้วยสารอนินทรีย์หลายชนิดที่มีราคาค่อนข้างสูง ส่วนการผลิตสาหร่ายสไปรูไลนาเพื่อเป็นอาหารสัตว์นั้นต้องลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำจึงหันมาใช้น้ำหรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ยังมีคุณภาพเหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งอาหารของสาหร่าย เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมยางพารา

การศึกษาครั้งนี้จึงทำการศึกษาความสามารถของสาหร่ายสไปรูไลนาในการสะสมของโลหะหนักชนิดต่างๆ สมบัติ และปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสะสมโลหะหนัก แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองมาศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตสาหร่ายสไปรูไลนาเพื่อใช้ในทางอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการสะสมแคดเมียมและตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนาในน้ำเลี้ยงบริสุทธิ์

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนาที่เราเลี้ยงโดยควบคุมในห้องปฏิบัติการและสาหร่ายสไปรูไลนาที่นำมาเป็นอาหารเสริมให้กับคนในท้องตลาด

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.3.1 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการสะสมโลหะหนักของสาหร่ายสไปรูไลนา

1.3.2 เพื่อเป็นแนวทางในการนำมาประยุกต์การเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาเพื่อเป็นอาหารเสริม

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

สาหร่ายที่นำมาศึกษาคือ สาหร่ายสไปรูไลนา ซึ่งได้สายพันธุ์มาจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย นำมาทำการศึกษาทดลองการสะสมแคดเมียมและตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนาที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่ควบคุม อุณหภูมิ แสง ระยะเวลาการเลี้ยงที่เท่ากัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับแคดเมียมและตะกั่ว และหาปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนาที่เราเลี้ยงโดยควบคุมในห้องปฏิบัติการและสาหร่ายสไปรูไลนาที่นำมาเป็นอาหารเสริมให้กับคนในท้องตลาด

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลยถวายพระพร ในพระบรมราชูปถัมภ์

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาหร่ายสไปรูไลนา (Spirulina platensis)

สาหร่ายสไปรูไลนา (Spirulina platensis) เป็นพืชหลายเซลล์ มีลักษณะเป็นเกลียว ผนังเซลล์ประกอบด้วยน้ำตาลชนิดต่างๆ และโปรตีนซึ่งแตกต่างจาก พืชชนิดอื่นๆ ที่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลลูโลส เป็นสาหร่ายสีเขียวเข้ม ชอบขึ้นในน้ำอุ่นที่มีความเป็นด่างสูง แต่สามารถปรับตัวให้อยู่ใน สภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดีกว่าพืชชนิดอื่น ปัจจุบันเป็นที่นิยมนำมา เป็นอาหารกันมาก จึงมีการเพาะเลี้ยงเป็นอุตสาหกรรมเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศแรกที่ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา ต่อมาเป็นประเทศไทย อินเดีย จีน และประเทศอื่นๆ (เยาวลักษณ์, 2545)

2.1.1 การจัดอนุกรมวิธานของสาหร่ายสไปรูไลนา

สาหร่ายสไปรูไลนามีการจัดอนุกรมวิธานดังต่อไปนี้

Kingdom	:	*Monera*
Phylum	:	*Cyanophyta*
Class	:	*Cyanophyceae*
Order	:	*Oscillatoriale*
Family	:	*Oscillatoriacea*
Genus	:	*Spirulina*

2.1.2 ลักษณะทั่วไปของสาหร่ายสไปรูไลนา

สไปรูไลนา ประกอบด้วยเซลล์รูปทรงกระบอกหลายเซลล์เรียงต่อกันเป็นเส้นสายที่ไม่แตกแขนงเรียกว่า ไตรโครม (Trichome) เส้นสายจะบิดเป็นเกลียว รูปร่างที่เป็นเกลียวเป็นลักษณะของสกุล (Genus) ความกว้างของเกลียว (Helix) ประมาณ 4-8 ไมโครเมตร ระยะห่างระหว่างเกลียว (Pitch) ประมาณ 60 ไมโครเมตร และความยาวของไตรโครม (Trichome length) ประมาณ 300-500 ไมโครเมตร จะแตกต่างไปตามแต่ชนิด (Species) แต่อย่างไรก็ดีสาหร่ายสไปรูไลนาชนิดเดียวกัน เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมต่างกัน ขนาด และรูปร่างก็อาจจะแตกต่างกัน เช่น ลักษณะที่บิดเป็นเกลียวอาจเปลี่ยนแปลงไปเป็นเส้นตรง ชนิดที่พบโดยมากมีเม็ดอากาศ (Gas Vacuoles) เล็กๆ จำนวนมากอยู่ภายในเซลล์ ทำให้สาหร่ายสไปรูไลนาลอยตัวได้ดี เม็ดอากาศแต่ละเม็ดอยู่ภายในถุง ซึ่งเป็นเยื่อบางๆ และเยื่อนี้เป็นสารจำพวกโปรตีน สาหร่ายสไปรูไลนาเคลื่อนที่ได้แบบ

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

เลื่อนไถล โดยมีการหมุนรอบไตรโครม ผนังเซลล์ของสาหร่ายสไปรูไลนาประกอบด้วยสารโคพอลิเมอร์ เพคติน และโพลีแซคคาไรด์ ไม่พบสารประกอบพวกเซลลูโลส และไม่มีเมือกหุ้ม มีกรดนิวคลีอิกอยู่เป็นกลุ่มในไซโตพลาสซึม ภายในจะมีไทลาคอยล์เป็นที่เกาะของคลอโรฟิลล์เอ และรงควัตถุอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีแกสแวนคิวโอทำให้สาหร่ายสไปรูไลนามีการลอยตัวได้ดี และสาหร่ายสไปรูไลนามีสารปฏิชีวนะ สาหร่ายสไปรูไลนา เป็นพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae Phylum) ลักษณะคล้ายกับแบคทีเรีย คือ ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส จึงจัดเป็นพวกโปรคาริโอต สามารถสังเคราะห์แสงได้ เพราะมีคลอโรฟิลล์ แต่ไม่มีคลอโรพลาส เป็นสิ่งมีชีวิตชั้นต่ำ ไม่มีราก ลำต้น ใบ ที่แท้จริง ภายในเซลล์มีสารไฟโคไซยานิน (Phycocyanin) ส่วนใหญ่อยู่ในน้ำจืดพบบ้างในน้ำกร่อย และน้ำทะเล นอกจากนี้ยังสามารถลอยตัวในทะเลสาบที่มีความเป็นด่างสูง (pH > 9.0) และอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 35 – 40 องศาเซลเซียส (ธิดา, 2548)

รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปร่างของสาหร่ายสไปรูไลนา
ที่มา www.boongreenbaikaew.com/

2.2 การสืบพันธุ์ของสาหร่ายสไปรูไลนา

การสืบพันธุ์ของสาหร่ายสไปรูไลนาเป็นการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ ซึ่งการสืบพันธุ์ที่พบ ได้แก่

2.2.1 การแบ่งเซลล์

เป็นการเพิ่มจำนวนเซลล์แบบทวีคูณ ถ้าเป็นพวกเซลล์เดียวที่มีเมือกหุ้ม เมื่อทำการแบ่งเซลล์หลายๆ ครั้งจะทำให้เห็นกลุ่มเซลล์อยู่รวมกันภายในเมือกเดียวกัน หลังจากนั้นจึงจะหลุดออกจากกันเป็นเซลล์เดียวกัน หลังจากนั้นจึงจะหลุดออกจากกันเป็นเซลล์เดี่ยวๆ ในพวกกลุ่มเซลล์เมื่อมีการแบ่งเซลล์จะทำให้ขนาดของกลุ่มเซลล์ใหญ่ขึ้นค่อมาจึงหลุดออกเป็นกลุ่มเซลล์ย่อยๆ

2.2.2 การขาดเป็นท่อน

สำหรับพวกที่เป็นเส้นสายการแบ่งเซลล์จะทำให้เกิดเส้นสายยืดยาวออก เมื่อถูกกระทบกระเทือนจะเกิดการขาดท่อนแต่ละท่อนสามารถเจริญเป็นเส้นสายใหม่ต่อไป ถ้าเป็นที่มี

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

เฮสเทอโรซีสจะมีเซลล์ตาย และเซพาเรชันดิส เกิดขึ้นภายในเส้นสาย ซึ่งเป็นจุดอ่อนทำให้เกิดการขาดท่อนตรงเซลล์ตายนี้ ในกรณีที่มีเมือกหนา และเหนียวหุ้มอยู่ เมื่อเกิดมีเซลล์ตายมากๆ จะเห็นกลุ่มเซลล์ท่อนสั้นๆ เรียกว่า ฮอร์โมโกเนีย (Homogonia) เกิดอยู่ภายในเมือกที่มีจำนวนมากมาย ฮอร์โมโกเนีย เหล่านี้จะถูกผักดันให้ออกจากเมือกแล้วจึงไปสร้างเมือกใหม่ และเจริญเป็นเส้นสาย

2.2.3 การสร้างอะคีนีต (Akenete)

ในพวกที่มีเส้นสายมีการสร้างอะคีนีตได้ อะคีนีตที่เกิดขึ้นอาจเกิดขึ้นอยู่ตำแหน่งใดหรือที่เซลล์อาจเกิดเดี่ยวๆ หรือเป็นคู่หรือต่อกันเป็นสายสาหร่ายสไปรูไลนาจะมีจุดเกิดที่แน่นอนเป็นลักษณะเฉพาะของชนิดนั้นๆ ส่วนมากจะเกิดติดกับเฮสเทอโรซีสต์ซึ่งอาจอยู่ตรงปลายหรือตรงกลางเส้นสาย

2.2.4 การสร้างสปอร์ (Spore)

เป็นการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ สปอร์ที่สร้างเป็นแบบสปอร์ชนิดที่เคลื่อนที่ไม่ได้ (Non-motile spore) มี 2 ชนิดได้แก่

2.2.4.1 เอนโดสปอร์ (Endospore) เป็นสปอร์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ โดยการแบ่งโปรโตพลาสต์ออกเป็นสองส่วนหรือหลายๆ ส่วน แต่ละส่วนเมื่อหลุดออกจากผนังเซลล์เดิมจะไปงอกเป็นต้นใหม่ต่อไป

2.2.4.2 เอกโซสปอร์ (Exospore) เป็นสปอร์ที่เกิดขึ้นโดยการตัดแบ่งส่วนปลายของเซลล์ออกมาอาจมีจำนวนเพียงหนึ่งหรือหลายๆ สปอร์เรียงต่อกัน (พิณทิพย์, 2541)

2.3 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาในระบบปิด (Close system) ซึ่งเรียกว่า Batch culture คือ การนำสาหร่ายสไปรูไลนามาใส่ในอาหารใหม่ สาหร่ายสไปรูไลนาจะมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์ แล้วอัตราการเจริญเติบโตจะลดลงจนกลายเป็นศูนย์ในที่สุด เนื่องจากความเข้มข้นของของเสียที่ปล่อยออกมาหรือเนื่องจากภาวการณ์ขาดแคลนอาหาร หรือความหนาแน่นของสาหร่ายสไปรูไลนาที่สูงจนเกินไป ซึ่งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ระยะ ดังต่อไปนี้

- Lag phase เป็นระยะที่สาหร่ายสไปรูไลนามีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ ระยะนี้ไม่มีการเพิ่มจำนวนเซลล์

- Acceleration phase ระยะนี้มวลสาหร่ายสไปรูไลนามีการเปลี่ยนแปลงเป็นลำดับดังนี้ RNA มีปริมาณเพิ่มขึ้น ต่อมาโปรตีน และน้ำหนักแห้งจะเพิ่มขึ้นมาตามลำดับ และขั้นสุดท้ายจึงมีการเพิ่มจำนวนเซลล์

- Logarithmic phase ระยะนี้สาหร่ายสไปรูไลนามีการแบ่งเซลล์ และเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็วมีอัตราเมตาบอลิซึมสูงสุด และเป็นอัตราเจริญที่เพิ่มขึ้นคงที่

- Deceleration phase สาหร่ายสไปรูไลนามีอัตราการเจริญเติบโตลดลง เนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการบังแสงซึ่งกันและกัน ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง มีผลให้อัตราการเจริญเติบโตลดลงด้วย

- Stationary phase ระยะดังกล่าวทั้งมวลหรือจำนวนสาหร่ายสไปรูไลนามีปริมาณคงที่ ลักษณะองค์ประกอบบางอย่างในเซลล์มีการเปลี่ยนแปลง ช่วงการเจริญนี้จะเกิดการขาดแคลนธาตุสำคัญหรือความเข้มข้นของเสียที่มากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง รวมถึงรบบังแสงที่เกิดจากความหนาแน่นของสาหร่ายสไปรูไลนาที่สูงขึ้น ปัจจัยเหล่านี้ทำให้สาหร่ายสภาวะขาดแคลน และใช้อาหารที่สะสมไว้ภายในเซลล์

- Death phase ในระยะสุดท้ายมวลสาหร่ายสไปรูไลนาจะเริ่มลดลง เนื่องจากอัตราส่วนของอัตราหายใจต่อการสังเคราะห์แสงเพิ่มจนมีค่ามากกว่าหนึ่ง หรือเนื่องจากมีการตายของเซลล์สาหร่ายสไปรูไลนา

2.4 วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูไลนา

วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูไลนาเมื่อเลี้ยงในสภาวะห้องปฏิบัติการจะมีระยะเวลาสั้นประมาณ 1 วัน และใช้เวลาประมาณ 3-5 วัน เมื่อเลี้ยงในสภาวะแวดล้อมตามตามธรรมชาติมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific grow rate) สูงสุด คือ 0.3 ต่อวันภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ และ0.2 ต่อวัน ภายในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ มีประสิทธิภาพในการดูดพลังงานแสงประมาณร้อยละ 3.0-4.5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้สาหร่ายสไปรูไลนามักลอยตัวขึ้นมาบริเวณผิวน้ำเนื่องจากภายในเซลล์มีแกสแวคคิวโอ ดังนั้นจึงทำให้ง่ายต่อการเก็บเกี่ยว (รักชนก, 2539) วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูลินาดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2 ไตรโคมที่เจริญเติบโตเต็มที่ มีการสร้างเซลล์ที่มีลักษณะเฉพาะที่เรียกว่า เนครีเดีย (Necridia) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะถูกย่อยทำให้ไตรโคมแตกหักออกเป็นท่อนสั้นๆ ขนาดประมาณ 2-4 เซลล์ ที่มีลักษณะเหมือนกันเป็นส่วนใหญ่เรียกว่า โฮโมโกเนีย จากนั้นจึงมีการแบ่งตัวเพิ่มความยาวหรือจำนวนเซลของแต่ละโฮโมโกเนียจนเป็นไตรโคมที่สมบรูณ์ ในสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสมโฮโมโกเนีย อาจไม่เจริญเติบโตแต่จะพักตัวจนกว่าสภาพแวดล้อมเหมาะสมจึงเจริญเติบโตโดยการเพิ่มจำนวนเซลล์ด้วยการแบ่งตัวซึ่งเกิดเมื่อของเหลวภายในเซลล์เข้มขึ้น เซลล์สาหร่ายสไปรูไลนาขณะนี้จึงมีสีเขียวสดใส ด้วยกระบวนการดังกล่าว ไตรโคมสาหร่ายสไปรูไลนาจะยาวขึ้น และมีรูปร่างบิดเป็นเกลียว การแบ่ง

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลยออกแบบ
ใบพระบรมราชูปถัมภ์

- Logarithmic phase ระยะนี้สาหร่ายสไปรูไลนามีการแบ่งเซลล์ และเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็วมีอัตราเมตาบอลิซึมสูงสุด และเป็นอัตราเจริญที่เพิ่มขึ้นคงที่

- Deceleration phase สาหร่ายสไปรูไลนามีอัตราการเจริญเติบโตลดลง เนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการบังแสงซึ่งกันและกัน ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง มีผลให้อัตราการเจริญเติบโตลดลงด้วย

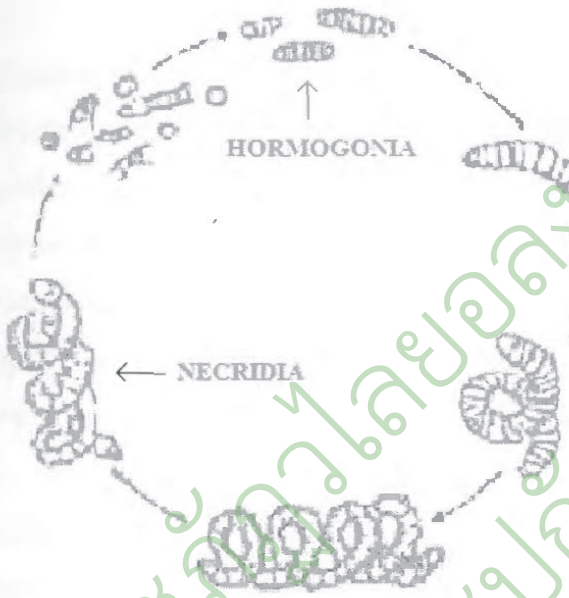
- Stationary phase ระยะดังกล่าวทั้งมวลหรือจำนวนสาหร่ายสไปรูไลนามีปริมาณคงที่ แต่ลักษณะองค์ประกอบบางอย่างในเซลล์มีการเปลี่ยนแปลง ช่วงการเจริญนี้จะเกิดการขาดแคลนแร่ธาตุสำคัญหรือความเข้มข้นของเสียที่มากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง รวมถึงการบดบังแสงที่เกิดจากความหนาแน่นของสาหร่ายสไปรูไลนาที่สูงขึ้น ปัจจัยเหล่านี้ทำให้สาหร่ายเกิดภาวะขาดแคลน และใช้อาหารที่สะสมไว้ภายในเซลล์

- Death phase ในระยะสุดท้ายมวลสาหร่ายสไปรูไลนาจะเริ่มลดลง เนื่องจากอัตราส่วนของการหายใจต่อการสังเคราะห์แสงเพิ่มจนมีค่ามากกว่าหนึ่ง หรือเนื่องจากมีการตายของเซลล์สาหร่ายสไปรูไลนา

2.4 วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูไลนา

วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูไลนาเมื่อเลี้ยงในสภาวะห้องปฏิบัติการจะมีระยะเวลาสั้นประมาณ 1 วัน และใช้เวลาประมาณ 3-5 วัน เมื่อเลี้ยงในสภาวะแวดล้อมตามตามธรรมชาติมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific grow rate) สูงสุด คือ 0.3 ต่อวันภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ และ0.2 ต่อวัน ภายในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ มีประสิทธิภาพในการดูดพลังงานแสงประมาณร้อยละ 3.0-4.5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้สาหร่ายสไปรูไลนามักลอยตัวขึ้นมาบริเวณผิวน้ำเนื่องจากภายในเซลล์มีแกสแวคคิวโอ ดั้งนั้นจึงทำให้ง่ายต่อการเก็บเกี่ยว (รักชนก, 2539) วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูลินาดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2 ไตรโคมที่เจริญเติบโตเต็มที่ มีการสร้างเซลล์ที่มีลักษณะเฉพาะที่เรียกว่า เนครีเดีย (Necridia) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะถูกย่อยทำให้ไตรโคมแตกหักออกเป็นท่อนสั้นๆ ขนาดประมาณ 2-4 เซลล์ ที่มีลักษณะเหมือนกันเป็นส่วนใหญ่เรียกว่า โฮโมโกเนีย จากนั้นจึงมีการแบ่งตัวเพิ่มความยาวหรือจำนวนเซลของแต่ละโฮโมโกเนียจนเป็นไตรโคมที่สมบรูณ์ ในสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสมโฮโมโกเนีย อาจไม่เจริญเติบโตแต่จะพักตัวจนกว่าสภาพแวดล้อมเหมาะสมจึงเจริญเติบโตโดยการเพิ่มจำนวนเซลล์ด้วยการแบ่งตัวซึ่งเกิดเมื่อของเหลวภายในเซลล์เข้มขึ้น เซลล์สาหร่ายสไปรูไลนาขณะนี้จึงมีสีเขียวสดใส ด้วยกระบวนการดังกล่าว ไตรโคมสาหร่ายสไปรูไลนาจะยาวขึ้น และมีรูปร่างบิดเป็นเกลียว การแบ่ง

เซลล์สาหร่ายสไปรูไลนาขาดเป็นท่อนๆ บริเวณ เนคริเดีย หรือการที่เซลล์สาหร่ายสไปรูไลนาขาดจากกันเองทำให้สาหร่ายสไปรูไลนาเพิ่มจำนวน และแพร่กระจายอยู่ทั่วไป (มารศรี, 2549)



ภาพที่ 2.2 วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูไลนา
ที่มา (Richmond, 1986)

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา

2.5.1 แสง (Light)

สาหร่ายสไปรูไลนาต้องการแสงสว่างในการสังเคราะห์แสง สาหร่ายสไปรูไลนาจัดเป็น Photoautotrophic algae แม้ว่าจะสามารถเจริญเติบโตแบบ Heterotrophy ซึ่งเจริญเติบโตในความมืดสามารถใช้อินทรีย์สาร เช่น กลูโคส หรือ กรดแอซิติก ได้พลังงานซึ่งช่วยในการสังเคราะห์แสงเป็นพลังงานซึ่งได้จากแสงในช่วงที่เราสามารถมองเห็นได้ (Visible light) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร และแสงในช่วงที่เป็นรังสีความร้อน (Infrared) ความยาวคลื่นของแสงมีความจำเพาะต่อรงควัตถุแต่ละชนิด สาหร่ายสไปรูไลนาประกอบด้วยรงควัตถุหลายชนิดแต่ที่พบในปริมาณมาก คือ คลอโรฟิลล์ เบต้าแคโรทีนอยด์ โฟโคไซยานิน และไฟโคอิริทริน รงควัตถุเหล่านี้จะถูกกระตุ้นโดยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน พลังงานแสงที่ได้รับทั้งหมดจากรงควัตถุต่างๆ จะถูกถ่ายทอดไปยังโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ โดยที่คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุสีเขียวที่ดูดกลืนแสงสีแดง รงควัตถุเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานของโปรตอน และส่งไปยังศูนย์กลางของ

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

579.8
0.935 0 9
2550

การเกิดปฏิกิริยา จากนั้นสาหร่ายสไปรูไลนาจะใช้พลังงานนี้แบ่งแยกเชื่อม และจัดระเบียบโมเลกุลอะตอมจนถึงอนุภาคเพื่อให้ได้สารใหม่ดังสมการ

$$nH_2O + nCO_2 \xrightarrow[\text{รงควัตถุ}]{\text{แสง}} (CH_2O)_n + nO_2$$

แม้ว่าแสงจะจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสไปรูไลนา แต่สาหร่ายสไปรูไลนาเองก็มีความสามารถในการทนทานต่อแสงได้จำกัด การได้รับแสงในปริมาณมากเกินไปจะทำให้รงควัตถุถูกทำลายสาหร่ายสไปรูไลนาจะมีสีซีดและตายในที่สุด เป็นผลมาจากปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) หรือโฟโตไลซิส (Photolysis) ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้เกิดหลังจากระยะ lag phase ความเข้มแสงซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาที่เลี้ยงในบริเวณกลางแจ้งที่มีอุณหภูมิสูง (pH < 9.0) สาหร่ายสไปรูไลนาจะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงความเข้มแสง 20,000–30,000 ลักซ์ ส่วนการเลี้ยงในห้องปฏิบัติการใช้ความเข้มแสงเพียง 8,000–10,000 ลักซ์ (Richmond, 1986)

2.5.2 ความเป็นกรด – ด่าง

ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายอาหารมีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของสาหร่ายสไปรูไลนา นอกจากนี้ความเป็นกรด–ด่างมีผลต่อการละลายของเกลือและสารประกอบชนิดต่างๆ ในน้ำ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษหรือยับยั้งการเจริญของสิ่งมีชีวิต ดังนั้นสาหร่ายสไปรูไลนาจึงอาจขาดธาตุโลหะที่จำเป็นบางตัวได้ ค่าความเป็นกรด–ด่างของสารละลายอาหารจะมีค่าเท่าใด ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของปริมาณของสารในอาหาร ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในอาหารและอุณหภูมิในกระบวนการเมตาบอลิซึมของสาหร่ายสไปรูไลนา ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่เหมาะสม คือ 7.8–8.5 และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาอยู่ในช่วงระหว่าง 8.5–10.5 เนื่องจากสาหร่ายสไปรูไลนาสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไปได้ แต่ถ้าในสารละลายอาหารมีตัวควบคุมน้อยค่าความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดอันตรายต่อสาหร่ายสไปรูไลนา ซึ่งสูตรอาหารของ Zarrouk มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ในปริมาณ 16.8 กรัมต่อลิตร ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกันกระทบที่ดีของอาหาร ซึ่งโดยทั่วไปความเป็นกรด–ด่างที่เหมาะสมในการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาเท่ากับ 8.3 – 10.5 (FOX, 1993)

2.5.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยมีผลต่อส่วนประกอบของเซลล์ของโครงสร้างเซลล์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อกลไกการควบคุมกระบวนการเมตาบอลิซึมและความจำเพาะของปฏิกิริยาของเอนไซม์ นอกจากนี้อุณหภูมิยังส่งผลต่ออัตราการทำ

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

ปฏิกิริยาของเซลล์ โดยขึ้นกับการได้รับพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาของเซลล์นั่นเอง ดังนั้นการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะ จึงมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10-15 องศาเซลเซียส สาหร่ายสไปรูไลนาไม่มีการเจริญเติบโต (Richmond, 1986) สาหร่ายสไปรูไลนาชอบอุณหภูมิค่อนข้างสูง สามารถเจริญได้ดีในสภาพอากาศแบบกึ่งร้อน มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 28–34 องศาเซลเซียส ในห้องปฏิบัติการพบว่าสาหร่ายสไปรูไลนาที่ถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงไม่มีการเจริญเติบโตขึ้น แต่จะมีการเจริญเติบโตขึ้นถ้านำสาหร่ายสไปรูไลนากลับมาเลี้ยงที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส จะเกิดการหักของสายสาหร่ายสไปรูไลนา และถ้านำมาเลี้ยงในอุณหภูมิสูงถึง 50 องศาเซลเซียส แม้ในระยะเวลาสั้นๆ เพียง 10 นาที ทำให้สาหร่ายสไปรูไลนาตายได้ อย่างไรก็ตามพบว่าอุณหภูมิสัมพันธ์กับความเข้มแสงด้วย เช่น ที่ความเข้มแสง 23,000 ลักซ์ อุณหภูมิที่พอเหมาะอยู่ในช่วง 30–35 องศาเซลเซียส แต่ถ้าความเข้มแสงลดลงเหลือ 8,000 ลักซ์ อุณหภูมิที่พอเหมาะจะอยู่ในช่วง 25–30 องศาเซลเซียส (Ciferri, 1983)

2.5.4 ความเค็ม

เนื่องจากการตอบสนองต่อความเค็มในอาหารที่ต่างกัน ทำให้สามารถแยกสาหร่ายสไปรูไลนาออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ สาหร่ายสไปรูไลนาที่ทนต่อความเค็ม (Halophillic algae) สาหร่ายสไปรูไลนาที่ทนต่อความเค็มแบบมีกลไกการตอบสนอง (Respond mechanism) ซึ่งทำให้มีการปรับตัวจนสามารถเจริญเติบโตในอาหารที่มีความเค็มสูงได้ สาหร่ายสไปรูไลนาที่ทนความเค็มในปริมาณสูงนั้น เนื่องจากมีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อเซลล์มากกว่าสาหร่ายสไปรูไลนาที่ทนความเค็มต่ำ ความเค็มจึงมีผลต่อการปรับตัวของสาหร่ายสไปรูไลนาต่อระดับความดันออสโมติกของสารอาหาร การปรับตัวดังกล่าวเป็นกระบวนการสองขั้นตอน คือ ขั้นแรกมีการลดกิจกรรมของการสังเคราะห์แสงโดยไม่มีผลต่อกิจกรรมการหายใจ ขั้นที่สองซึ่งต้องผ่านขั้นตอนแรกแล้วพบว่ากิจกรรมการสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้นพร้อมกับการเพิ่มของกิจกรรมการหายใจ และมีความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้น เพื่อใช้ในการปรับสมดุลของโซเดียมไอออน (Na^+) และโปตัสเซียมไอออน (K^+) และอาจมีการสังเคราะห์โมเลกุลซึ่งมีความจำเป็นต่อการปรับสมดุลดังกล่าว (Richmond, 1986)

2.5.5 การกวน

การกวนมีผลต่อการเจริญของสาหร่ายสไปรูไลนา เนื่องจากการกวนทำให้เพิ่มการกระจายตัวของสาหร่ายให้ได้รับแสงสม่ำเสมอ ช่วยลดอัตราการตกตะกอนของสาหร่าย และทำให้สารอาหารกระจายอย่างทั่วถึง โดยเฉพาะช่วยกระจายคาร์บอนไดออกไซด์ให้สาหร่ายนำไปใช้อย่างเต็มที่ และการเลี้ยงในบ่อเลี้ยงขนาดใหญ่การกวนจะช่วยลดการแบ่งแยกชั้นน้ำอันเนื่องจากอุณหภูมิ

อัตราการกวนขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มแสง ถ้าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสไปรูไลนาได้รับแสงที่มีความเข้มแสงสูงโดยไม่มีการกวนเป็นสาเหตุให้เกิด Photolysis หรือ Photodestruction และการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่มีอัตราการกวนต่ำทำให้การเจริญเติบโตเป็นไปอย่างช้าๆ ดังนั้นในการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาจึงต้องควบคุมอัตราการกวนให้น้ำมีการเคลื่อนที่ประมาณ 20–25 เซนติเมตรต่อวินาที (Fox, 1993)

2.5.6 ความหนาแน่นเริ่มต้นของสาหร่ายสไปรูไลนา

ความหนาแน่นเริ่มต้นของสาหร่ายสไปรูไลนาที่พอเหมาะมีความสำคัญต่อการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา เนื่องจากปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นที่น้อยเกินไปอาจทำให้สาหร่ายสไปรูไลนาตาย เนื่องจากได้รับปริมาณแสงมากเกินไปจนเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชั่น และในทางกลับกันปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นที่มีความหนาแน่นมากเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงลดลง เนื่องจากอัตราการหายใจที่เพิ่มมากขึ้นและเกิดการบดบังแสงกันเองของเซลล์สาหร่าย ความหนาแน่นเริ่มต้นของสาหร่ายสไปรูไลนาที่เหมาะสมยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเข้มแสง ส่วนประกอบของสารอาหาร และความลึกของบ่อเลี้ยง เป็นต้น พบว่าหากใช้ความหนาแน่นเริ่มต้นของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ 225–250 มิลลิกรัมต่อลิตร(น้ำหนักแห้ง) ช่วยลดระยะเวลาในการเลี้ยงให้น้อยลง (Ciferri, 1983)

2.6 แหล่งอาหารของสาหร่ายสไปรูไลนา

สูตรอาหารสำหรับสาหร่ายสไปรูไลนา คือ สูตรอาหารทั่วไปที่ใช้ในปัจจุบัน ประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิด ซึ่งเป็นสูตรอาหารที่สาหร่ายสไปรูไลนาทั่วไปต้องการใช้ในการเจริญเติบโต มีดังต่อไปนี้

2.6.1 ธาตุคาร์บอน

สาหร่ายทุกชนิดต้องการใช้ธาตุคาร์บอนในการใช้สังเคราะห์แสง โดยแหล่งคาร์บอนในน้ำจะอยู่ในรูปต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) กรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) หรือคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของแหล่งน้ำจืดแต่ละแห่ง โดยทั่วไปแหล่งน้ำจืดมีระบบบัฟเฟอร์ในรูป CO_2 H_2CO_3 HCO_3^- หรือ CO_3^{2-} ซึ่งระบบบัฟเฟอร์มีความสำคัญต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา โดยการปรับสมดุลของความเป็นกรด-ด่าง โดยทั่วไปพบว่า คาร์บอนอยู่ในรูปไบคาร์บอเนตมากที่สุด (Richmond, 1986)

2.6.2 ธาตุไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นอีกธาตุหนึ่งที่มีความสำคัญต่อสาหร่ายสไปรูไลนา เนื่องจากสาหร่ายสไปรูไลนาสามารถนำไนโตรเจนไปใช้ได้ทั้งในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ในการสร้างสารที่

เป็นองค์ประกอบของเซลล์ เช่น โปรตีน กรดอะมิโน โคเอนไซม์ กรดนิวคลีอิกและคลอโรฟิลล์ เป็นต้น สาหร่ายสไปรูไลนาไม่สามารถดึงไนโตรเจนจากอากาศได้ จึงใช้ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนไตรท์และแอมโมเนีย หรือสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ ยูเรีย กลูตามิน แอสพาราจิน และกรดอะมิโน เป็นต้น เมื่อสาหร่ายสไปรูไลนาใช้ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียโดยส่งผลต่อความเป็นกรด-ด่างลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่สาหร่ายสไปรูไลนาเมื่อดูดซึมไนไตรท์และไนเตรทต้องผ่านกระบวนการรีดิวซ์ให้เป็นแอมโมเนียเสียก่อนจึงนำมาใช้ได้ สาหร่ายสไปรูไลนามีการสะสมไนโตรเจนในรูปรงควัตถุไซยาโนไฟซินและไซโยฟินิน และปล่อยไนโตรเจนออกจากเซลล์ในรูปของพอลิเปปไทด์เป็นส่วนใหญ่และกรดอะมิโนอิสระเป็นส่วนน้อย (สุมาลี, 2536)

2.6.3 ธาตุฟอสฟอรัส

ธาตุฟอสฟอรัสเป็นธาตุหนึ่งที่มีบทบาทในกระบวนการสร้างพลังงาน และสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก เซลล์สาหร่ายสไปรูไลนาใช้พลังงานที่อยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ เช่น ฟอสเฟส (PO_4^{3-}) ไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) และไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($H_2PO_4^-$) สำหรับฟอสเฟตในรูปสารอินทรีย์ สาหร่ายสไปรูไลนาจะต้องย่อยด้วยเอนไซม์เสียก่อนจึงจะสามารถนำไปใช้งานได้ นอกจากนี้ แสง ความเป็นกรด-ด่าง หรือปริมาณไอออนต่างๆ เช่นแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) โซเดียมไอออน (Na^+) หรือโปแตสเซียมไอออน (K^+) เป็นต้น สาหร่ายสไปรูไลนาสามารถเปลี่ยนฟอสเฟตให้อยู่ในรูปของออโธฟอสเฟต (Orthophosphate) และพลังงาน ATP ตามลำดับ และสะสมไว้ภายในเซลล์ ซึ่งถ้าอาหารมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สาหร่ายสไปรูไลนาลดการเจริญเติบโตลงอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่ระยะคงที่และระยะลดจำนวน สาหร่ายสไปรูไลนาเริ่มปล่อยฟอสฟอรัสออกจากเซลล์ เมื่อมีความหนาแน่นครึ่งหนึ่งของความหนาแน่นสูงสุด แต่ปล่อยออกมาเพียงเล็กน้อยในขณะที่กำลังเจริญเติบโต และเริ่มปล่อยมากขึ้นหลังจากหยุดการเจริญเติบโตอัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ดีที่สุดในการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา คือ 5/3 ต่อ 1 (สุมาลี, 2536) การขาดธาตุฟอสฟอรัสเป็นตัวการทำให้ส่วนประกอบของโปรตีน คลอโรฟิลล์เอ RNA และ DNA น้อยลง และมีผลต่อลักษณะรูปร่างของสาหร่ายสไปรูไลนา เนื่องจากส่วนประกอบของเซลล์ที่เป็นพอลิฟอสเฟตหายไป นอกจากนี้ยังมีการสะสม Granules ในเซลล์ที่ขาดฟอสฟอรัสอีกด้วย (Nakamura, 1982)

2.7 วิธีการเพาะเลี้ยงและขยายจำนวนสาหร่ายสไปรูไลนา

ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การแยกเชื้อบริสุทธิ์ การเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูไลนาและวิธีการเก็บรักษา

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ใบพระบรมราชูปถัมภ์

2.7.1 สาหร่ายสไปรูไลนาแยกเชื้อบริสุทธิ์

การแยกเชื้อบริสุทธิ์ โดยวิธี Micromanipulator คือนำตัวอย่างน้ำที่มีสาหร่ายสไปรูไลนาตามที่ต้องการ หยดลงบนจานแก้ว ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ เมื่อพบเซลล์สาหร่ายสไปรูไลนาที่ต้องการ ให้จุ่มปลายไมโครปิเปตไปดูดเซลล์ เพื่อนำมาใส่หลอดแก้วขนาดเล็กบรรจุอาหาร สูตร Zarrouk ประมาณ 3 มิลลิลิตร ตั้งในที่มีแสงสว่าง เพื่อให้สาหร่ายสไปรูไลนาเจริญเติบโตใช้เวลาประมาณ 2-4 สัปดาห์

2.7.1.1 การเก็บรักษาเชื้อสาหร่ายบริสุทธิ์ ทำได้ในอาหารวุ้นและอาหารเหลว

2.7.1.2 การเพาะเลี้ยงในห้องควบคุม นำมาเพาะเลี้ยงขยายในห้องควบคุม ที่มีระบบอุปกรณ์ที่เหมาะสม ต่อการเจริญของสาหร่ายสไปรูไลนาโดยมีอุปกรณ์ และปัจจัยอื่นๆ ดังนี้ ตู้เพาะเลี้ยง หลอดแก้วเพาะเลี้ยง แสง การกวน อาหารเลี้ยงเชื้อสูตร Zarrouk การวัดการเจริญของสาหร่ายสไปรูไลนา วัดปริมาณคลอโรฟิลล์ วัดปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่นโปรตีน เม็ดสี และกรดไขมัน เป็นต้น

2.7.1.3 การเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง ปัจจัยที่มีผลต่อการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาได้แก่ สายพันธุ์ สารอาหาร อ่างเลี้ยง ความเป็นกรด-ด่างอุณหภูมิ ความเข้มแสง ออกซิเจนละลายน้ำ ความลึกเชื้อเริ่มต้น การกวน การให้อากาศ การระเหยของน้ำฝน และปัญหาการปนเปื้อน

2.7.2 การเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูไลนา

ควรเก็บเกี่ยวในช่วงเช้ามืดหรือช่วงอากาศเย็น หยุดเครื่องกวน 1-2 ชั่วโมง เมื่ออากาศเย็น 5-10 นาที เมื่ออากาศร้อนตักน้ำในบ่อหรือถังเพาะใส่สวิง สาหร่ายสไปรูไลนาค้างอยู่ในสวิงขนาด 60 ไมครอน ขณะที่ตะกอนหยาบค้างอยู่ในสวิงตาหยาบ ส่วนน้ำเลี้ยงพร้อมตะกอนขนาดเล็กหลุดออกไป เทน้ำสะอาด (ใช้น้ำแช่น้ำแข็งยิ่งดี) ลงบนสาหร่ายสไปรูไลนาเบาๆ ใช้มือช้อนใต้สวิงขยับมือเพื่อช่วยให้ทุกเส้นสายของสาหร่ายสไปรูไลนาได้รับการล้างโดยน้ำไหลผ่านหลายๆ ครั้งจนสะอาด สาหร่ายสไปรูไลนา 100 กรัม ใช้น้ำล้างประมาณ 15-20 ลิตร สาหร่ายสไปรูไลนาที่ล้างสะอาด มีลักษณะเนื้อละเอียดเป็นเงา ไม่มีกลิ่น ชิมดูไม่ได้รสอื่นยกเว้น ถ้ารับประทานรู้สึกลื่นคอได้รับรสหวานมันเล็กน้อย เมื่อล้างาหร่ายสไปรูไลนาเสร็จแล้วสามารถรับประทานได้ทันที

2.7.3 วิธีเก็บรักษา

เก็บในตู้เย็นได้ช่องแช่แข็ง (แต่ไม่เป็นน้ำแข็ง) แช่ในน้ำแข็ง หรือเก็บที่อุณหภูมิ 1-2 องศาเซลเซียส ได้นาน 3-10 วัน แต่ต้องเก็บเกี่ยวมาอย่างดี หากรับประทานไม่หมดภายใน 7 วันให้นำไปแช่แข็ง อบหรือตากแห้ง เก็บในตู้เย็นได้นานแต่คุณค่าทางอาหารลดลง

2.8 คุณค่าทางอาหารของสาหร่ายสไปรูไลนา

คุณค่าทางอาหารหรือองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสไปรูไลนาเป็นปัจจัยที่สำคัญในการนำสาหร่ายมาใช้ประโยชน์ เช่น อาหารสัตว์ อาหารมนุษย์ อาหารเสริมสุขภาพ หรือนำไปสกัดสารบางอย่างเพื่อใช้เป็นยารักษาโรค ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสไปรูไลนาแปรผันตามสายพันธุ์ แสง อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง และอาหาร การเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนของสาหร่ายสไปรูไลนากับแหล่งโปรตีนอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนของสาหร่ายสไปรูไลนากับแหล่งโปรตีนอื่นๆ

สารอาหาร	สาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง	คลอเรลลา	ถั่วเหลือง	เนื้อวัว	ไข่	ปลาทูปลาอินทรี	ปริมาณมาตรฐาน
โปรตีน	69.5-71%	40-86%	33-35%	18-20%	10-25%	20%	-
กรดอะมิโน							
ไอโซลิวซีน	3.3-3.9	3.9	1.8	0.93	0.67	0.83	4.2
ลิวซีน	5.9-5.6	6.01	2.70	1.7	1.08	1.28	4.8
ไลซีน	2.6-3.3	3.9	2.58	1.78	0.89	1.95	4.2
เมทไธโอนีน	1.3-2.0	0.61	0.48	0.43	0.40	0.58	2.2
ซีสตีน	0.5-0.7	0.48	0.48	0.23	0.35	0.38	4.2
เฟนนีลอะลานีน	2.6-3.3	3.00	1.98	0.86	0.65	0.61	2.8
ไทโรซีน	2.6-3.3	2.53	1.38	0.68	0.49	0.61	0
ทรีโอนีน	3.0-3.6	2.30	1.62	0.86	0.59	0.99	2.8
ทริปโตเฟน	1.0-1.6	0.59	0.55	0.25	0.20	0.30	1.4
วาลีน	4.0-4.6	3.30	1.86	1.05	0.83	1.02	4.2

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ใบพระบรมราชูปถัมภ์

นอกจากนี้สาหร่ายสไปรูไลนายังมีปริมาณวิตามินและแร่ธาตุที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณวิตามินและแร่ธาตุต่างๆ ในสาหร่ายสไปรูไลนา

วิตามิน	ปริมาณต่อน้ำหนักแห้ง 100 กรัม	แร่ธาตุ	ปริมาณต่อน้ำหนักแห้ง 10 กรัม (1)	ปริมาณต่อน้ำหนักแห้ง 10 กรัม (2)
เบต้า-แคโรทีน	220,000 IU	แคลเซียม	70	13.15
วิตามิน E	10 IU	เหล็ก	10	5.8
วิตามิน B1	3.1 มิลลิกรัม	ฟอสฟอรัส	80	89.42
วิตามิน B2	3.5 มิลลิกรัม	แมกนีเซียม	40	19.15
วิตามิน B3	1.46 มิลลิกรัม	สังกะสี	0.3	0.39
วิตามิน B6	80 ไมโครกรัม	เซเลเนียม	0.01	0.004
วิตามิน B12	320 ไมโครกรัม	แมงกานีส	0.5	0.25
โฟลาซิน	10 ไมโครกรัม	-	-	-
ไบโอติน	5 ไมโครกรัม	-	-	-

ที่มา (ดนัย, 2550)

2.9 การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายสไปรูไลนา

2.9.1 ใช้เป็นอาหารมนุษย์

มนุษย์รู้จักนำสาหร่ายมาใช้เป็นอาหารนานนับพันปีแล้ว เช่น ชาวจีน ญี่ปุ่น ใช้สาหร่ายสีน้ำตาล (Laminaria) และสาหร่ายสีแดง (Porphyra) หรือที่เรียกว่า จีฉาย มาทำอาหารพวกแกงจืด ญี่ปุ่นผสม Chlorella sp. ลงในชา ซุป น้ำผลไม้ บะหมี่ และไอศกรีม สำหรับห้องปฏิบัติการ

สาหร่ายตามธรรมชาติ คัดแยกสายพันธุ์บริสุทธิ์ วิเคราะห์ปริมาณโปรตีน 40-50 เปอร์เซ็นต์ ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาในห้องควบคุมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเลี้ยงในอ่างขนาดใหญ่เพื่อเข้าสู่อุตสาหกรรม ซึ่งผลงานวิจัยมีมากมาย เช่น การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีโซเดียมไบคาร์บอเนตระดับต่างๆ กัน การคัดเลือกหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา เพื่อใช้เป็นอาหารมนุษย์ การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาพันธุ์พื้นบ้านเพื่อหาปริมาณโปรตีนเปรียบเทียบกับพันธุ์ Scenedesmus acutus (Selection of Local Algae Strains Related to Protein Content Compared with Scenedesmus acutus) เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาจากการเพาะเลี้ยงด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ 2 ชนิด (Growth Comparison of Green Algae Cultivated in Two Different Media.) สำหรับสาหร่ายสไปรูไลนา เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันในรูปของอาหารเสริมสุขภาพ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น คือ มีปริมาณโปรตีนสูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ และเป็นโปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นกระจัดกระจายอยู่ในเซลล์อย่างได้สัดส่วน มีวิตามิน เกลือแร่ และสารให้สีธรรมชาติจำนวนมาก นอกจากนี้ สาหร่ายสไปรูไลนามีเซลล์ขนาดใหญ่ สามารถเก็บเกี่ยวได้ง่าย ผนังเซลล์บาง จึงถูกย่อย และดูดซึมได้เร็วกว่าสาหร่ายสีเขียวซึ่งมีผนังเซลล์หนา

2.9.2 ใช้เป็นอาหารสัตว์

สาหร่ายสไปรูไลนาสามารถนำไปเลี้ยงสัตว์กระเพาะเดี่ยว เช่น หมู และสัตว์ปีกได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้สาหร่ายสไปรูไลนายังเป็นอาหารที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำวัยอ่อนที่กินพืชเป็นอาหาร เช่น ปลา กุ้ง และแพลงตอนสัตว์ เช่น ไรแดง ไรน้ำเค็ม ในประเทศญี่ปุ่นใช้สาหร่ายสไปรูไลนาเลี้ยงปลาไหล ปลาเทร้า กุ้ง ปลาคาร์พสี เป็นต้น ทำให้เศรษฐกิจของอุตสาหกรรมการเลี้ยงปลาสวยงามได้พัฒนาก้าวไกลออกไปมาก ผลงานวิจัย เช่น การเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาจากน้ำทิ้งแหล่งชุมชนเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ การศึกษาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของสาหร่าย Chlorella Sp. (K3) สำหรับนำไปเลี้ยงพวกไดอะตอม แพลงตอนสัตว์ (Lapadella benjamini) ที่ระดับความหนาแน่นแตกต่างกัน การนำ Chlorella Sp. ที่ได้จากการเลี้ยงในน้ำทิ้งโรงงานผลิตน้ำนมถั่วเหลืองมาเลี้ยงไรแดง ความเป็นไปได้ในการเลี้ยงหอยมุกน้ำจืด Chamberlai hainesiana ด้วยสาหร่ายชนิดต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ เป็นต้น

2.9.3 ใช้ในการกำจัดน้ำเสีย

การใช้สาหร่ายสไปรูไลนาในการกำจัดน้ำเสียร่วมกับแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียจะทำการย่อยสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่มีอยู่ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ให้เป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่น แอมโมเนียม ไนเตรต คาร์บอนไดออกไซด์ และเกลือแร่ต่างๆ ในสภาพการเกิดที่มีอากาศ (Aerobic) หรือไม่มีอากาศ (Anaerobic) จากนั้นสาหร่ายสไปรูไลนาจะใช้

สารประกอบเหล่านี้ในกระบวนการเมตาบอลิสซึมต่างๆ สำหรับสาหร่ายที่ได้จากระบบกำจัดน้ำเสียนี้ อาจนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ ปุ๋ยพืชสด หรือใช้ในการทำแก๊สชีวภาพได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา ที่เพาะเลี้ยงในมูลหมูผสมมูลไก่ที่มีการหมุนเวียนของสารอาหารแตกต่างกัน การผลิตสาหร่ายสไปรูไลนา จากน้ำทิ้งโรงงานแป้งมันสำปะหลัง การเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาจากน้ำทิ้งโรงงานน้ำอัดลม เป็นต้น

2.9.4 ใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ

สาหร่ายสไปรูไลนารู้จักกันแพร่หลายในแง่ของการใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ จากการวิจัยของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย พบว่าสไปรูไลนาในนาข้าวบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนในอากาศให้เป็นสารประกอบไนโตรเจน เช่น แอมโมเนียม ทำให้ข้าวเจริญเติบโต ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ Anabaena sp. และ Nostoc sp. พันธุ์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย พบในประเทศ และให้ผลผลิตดี มีชื่อว่า Anabaena siamensis

2.9.5 ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

สาหร่ายประกอบด้วยสารเคมีบางชนิดที่ช่วยในการรักษาผิวหนัง ชนเผ่า Kanembu ที่อยู่รอบทะเลสาบชาด ได้ใช้สาหร่ายสไปรูไลนารักษาโรคผิวหนังบางชนิด การศึกษาในประเทศญี่ปุ่นพบว่า เครื่องสำอางที่ผสมสาหร่ายสไปรูไลนา และสารสกัดจากสาหร่ายสไปรูไลนาช่วยให้ผิวพรรณดีขึ้น และลดริ้วรอย ส่วนในประเทศไทยก็ได้มีบริษัทหลายแห่งที่ใช้สาหร่ายสไปรูไลนาเป็นเครื่องสำอางในรูปครีมบำรุงผิว

2.9.6 ใช้ในอุตสาหกรรมยา

นักวิทยาศาสตร์ และนายแพทย์หลายท่านได้ทดลองใช้สาหร่ายสไปรูไลนาในการป้องกัน และรักษาโรคต่างๆ เช่น โรคเบาหวาน โรคกระเพาะ อีกทั้งยังช่วยลดความเครียดและความไม่สมดุลในร่างกาย ในประเทศฝรั่งเศส ได้ทดลองใช้ยาที่ผสมสาหร่ายสไปรูไลนาทาแผล ทำให้แผลแห้งเร็วขึ้น ธาตุแมกนีเซียมในคลอโรฟิลล์ยังมีบทบาทอย่างสำคัญในการรักษาบาดแผล มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อป้องกันการเกิดของแบคทีเรีย และช่วยสร้างเซลล์ขึ้นมาใหม่ด้วย คลอโรฟิลล์ในสาหร่ายสไปรูไลนามีโครงสร้างเหมือนสารสีแดงในเลือด (Hemo-globin) นักวิทยาศาสตร์จึงแนะนำให้ใช้คลอโรฟิลล์รักษาโรคโลหิตจาง นอกจากนี้สาหร่ายบางชนิดมีสารปฏิชีวนะซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวงการแพทย์ ได้แก่ Cyanophycin หรือ Marinamycin ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ ได้ สาหร่ายสไปรูไลนาเป็นสาหร่ายที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย แยกได้จากดินนาจังหวัดพิษณุโลก พบว่า สามารถผลิตสารปฏิชีวนะ Cyanobacterin ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นทั้ง Algicide และ Bacteriocide ที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย และแบคทีเรียบางชนิดได้

2.9.7 ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ

สาหร่ายสีแดงพวก Gelidium, Gracilaria สามารถนำไปสกัดทำเป็นวุ้น เพื่อนำไปใช้ในการประกอบอาหาร และเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ สาหร่ายสีน้ำตาลพวก Laminaria, Ascophyllum, Macrocystis นำไปสกัดเป็น แอลจินหรือแอลจิเนต ซึ่งนำไปใช้ในการทำนม ขนมปัง ไอศครีม ขนมหวาน ลูกกวาด สบู่ แชมพูสระผม เป็นต้น ปัจจุบันห้องปฏิบัติการสาหร่ายนอกจากจะพัฒนากรรมวิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเป็นแหล่งอาหารโปรตีนแล้ว ยังได้นำสายพันธุ์สาหร่ายที่มีศักยภาพที่สามารถผลิตในทางการค้า เช่น Chlorella, Scenedesmusbs Spirulina, Dunaliella, Haematococcus มาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงเพื่อผลิตสารอาหารหรือสารเคมีที่มีมูลค่าสูง รวมทั้งวิธีการสกัด การนำไปใช้ประโยชน์ และการแปรรูปในด้านต่างๆ นอกจากนี้ห้องปฏิบัติการสาหร่ายยังให้บริการสายพันธุ์สาหร่าย ให้คำปรึกษา แนะนำด้านการเพาะเลี้ยงและการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายสไปรูไลนา แก่นิสิต นักศึกษา และประชาชนที่สนใจทั่วไปด้วย (ไปรมา, 2546)

2.10 โลหะหนัก (Heavy metals)

โลหะหนัก (Heavy metal) หมายถึง โลหะธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป มีความหนาแน่นสูงกว่า 4 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร โดยไม่รวมโลหะหนักที่เป็นอัลคาไลน์เอิร์ท โดยทั่วไปจะเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน มีเลขอะตอมในช่วง 23–92 อยู่ในคาบที่ 4–7 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน ดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ โลหะหนักมีความสำคัญในงานอุตสาหกรรมอย่างมาก และยังเป็นต้นกำเนิดโลหะผสมอีกหลายชนิดด้วยกัน

โลหะหนักที่พบในสิ่งแวดล้อมทั่วไป มีแหล่งปนเปื้อน ของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมหลายแหล่งแบ่งออกเป็นแหล่งใหญ่ 2 แหล่งได้แก่

- การปนเปื้อนจากธรรมชาติ ได้แก่ การปนเปื้อนของโลหะจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น จากหินที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบซึ่งเกิดการผุกร่อนหรือถูกกัดเซาะ และการระเบิดของภูเขาไฟ
- การปนเปื้อนจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ การปนเปื้อนจากการใช้สารเคมีทางการเกษตร ปนเปื้อนจากการทำเหมืองแร่ ปนเปื้อนจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม

2.10.1 การสะสมของโลหะหนัก

สารพิษโลหะหนักชนิดต่างๆเมื่ออยู่ในแหล่งน้ำจะสะสมกับตัวกลาง เช่น ดินตะกอน พืชน้ำ สัตว์น้ำหรือ แขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างอิสระได้ในปริมาณต่างๆ กัน ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่

ปะปนหรือสะสมอยู่ในตัวกลางเหล่านั้น สามารถที่จะเปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนย้ายในตัวกลางแต่ละชนิดในแหล่งน้ำสามารถแยกรายละเอียดได้ดังนี้

- การสะสมโลหะในน้ำ โลหะหนักที่สะสมในแหล่งน้ำมีทั้งในรูปที่ละลายน้ำ (Dissolved) และอยู่ในรูปสารแขวนลอย (Suspended solid) ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักน้ำมีโอกาสเปลี่ยนได้ตลอดเวลา เนื่องจากความสามารถในการผสมผสานของสารแขวนลอยพวกที่ละลายน้ำแตกต่างกัน โดยพวกที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยจะมีเวลาที่อยู่ในน้ำ (Reidence time) ยาวนานกว่าพวกที่ละลายน้ำ

- การสะสมโลหะหนักในดินตะกอน การสะสมโลหะหนักในดินตะกอนส่วนหนึ่งเป็นโลหะหนักที่เกิดจากการสะสมตามธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ การชะล้างพวกเกลือแร่ที่อยู่บนพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ หรือ โลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบของแร่ที่มีอยู่ในธรรมชาติบริเวณนั้นตามสภาพทางธรณีวิทยาแล้วละลายออกมาปะปนอยู่ในน้ำได้ และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการใช้ และโลหะหนักสามารถเกิดการสะสมอยู่ในดินตะกอน โดยมีปริมาณความเข้มข้นสูงกว่าที่มีอยู่น้ำมาก เนื่องจากมีขบวนการเข้ามาเกี่ยวข้องทั้งทางด้านเคมี ฟิสิกส์ และชีวภาพ องค์ประกอบในดินตะกอนที่มีผลต่อการสะสมโลหะหนักได้แก่ พวกคาร์บอเนต ออกไซด์ของแมงกานีส และเหล็ก ตลอดจนองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่างๆ

- การสะสมของโลหะหนักในพืชน้ำมิลลิกรัมต่อลิตร การสะสมของโลหะหนักของพืชน้ำจะสะสมด้วยการดูดซับจากน้ำโดยตรง ซึ่งพืชน้ำจะไม่สามารถควบคุมปริมาณโลหะหนักในตัวเองได้ ปริมาณการสะสมจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลาย หรือ แขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นสำคัญ รวมถึงอายุของพืชเหล่านั้นด้วย ทั้งนี้พืชน้ำต่างชนิดกัน ก็จะมีการสะสมของปริมาณโลหะหนักแตกต่างกัน

- การสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำ สัตว์น้ำส่วนใหญ่ได้รับสารพิษโลหะหนักเข้าไปด้วยการกินอาหาร ในลักษณะต่าง ๆ ตามชนิดของสัตว์น้ำนั้น การสะสมของโลหะหนักโดยการดูดซึมจากน้ำเข้าไปโดยตรงเป็นไปได้น้อยมาก การสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำจะเพิ่มขึ้นตามลำดับการบริโภค (โอภาส, 2546)

2.10.2 ความเป็นพิษของโลหะหนัก

ในทางชีวภาพสามารถจำแนกโลหะหนักตามความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ดังต่อไป

2.10.2.1 กลุ่มที่มีความเป็นพิษต่ำและพบในปริมาณสูงตามธรรมชาติ เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) ปรอท (Hg) แคลเซียม (Ca) เหล็ก (Fe) และลิเทียม (Li)

2.10.2.2 กลุ่มที่มีความเป็นพิษสูงแม้จะใช้ในความเข้มข้นต่ำๆ เช่น โคบอลต์ (Co) นิเกิล(Ni) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) ดีบุก (Sn) โครเมียม (Cr) สารหนู (As) ซีลิเนียม (Se) ทอง (Au) เงิน(Ag) ปรอท (Hg) ตะกั่ว (Pd) แคดเมียม (Cd) และแบริลเลียม (Be)

2.10.2.3 กลุ่มที่มีความเป็นพิษ แต่พบในปริมาณน้อยตามธรรมชาติ เช่น ไททาเนียม (Ti) เซอร์โคเนียม (Zr) ทังสเตน (W) เทลเรียม (Ta) แกลเลียม (Ga) และเรดอน (Rn) (สุภาวดี ศิริวัฒนานนท์สุจรรยา หมวดดารักษ์, 2546)

ปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมีเกณฑ์มาตรฐาน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์มาตรฐานของปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม

โลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน (มิลลิกรัม/ลิตร)
ปรอท (Mercury)	ไม่มากกว่า 0.005
เซเลเนียม (Selenium)	ไม่มากกว่า 0.020
แคดเมียม (Cadmium)	ไม่มากกว่า 0.030
ตะกั่ว (Lead)	ไม่มากกว่า 0.200
อาร์เซนิก (Arsenic)	ไม่มากกว่า 0.250
โครเมียม (Cr^{6+}, Hexavalent Chromium)	ไม่มากกว่า 0.250
(Cr^{3+}, Trivalent Chromium)	ไม่มากกว่า 0.750
นิกเกิล (Nikel)	ไม่มากกว่า 1.000
ทองแดง (Copper)	ไม่มากกว่า 2.000
สังกะสี (Zinc)	ไม่มากกว่า 5.000
แมงกานีส (Manganese)	ไม่มากกว่า 5.000

ที่มา (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539)

2.10.3 แคดเมียม

แคดเมียม จัดเป็นธาตุโลหะหนัก ที่ได้รับความสนใจธาตุหนึ่ง ทั้งในแง่การใช้ประโยชน์ และความเป็นพิษจากการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันมีงานศึกษาวิจัย พบปริมาณแคดเมียมที่เพิ่มขึ้นทั้งทางอากาศ ทางน้ำ และดิน เนื่องจากมีความเป็นไปได้ ที่แคดเมียมจะปนเปื้อนผ่านห่วงโซ่อาหาร จากดินสู่พืช และจากพืชสู่มนุษย์ได้ในที่สุด แคดเมียมพบได้ในดินโดยทั่วไป เกิดจากการผุพังของแร่ในหินชนิดต่างๆ ในบริเวณนั้น หรือเกิดจากการทับถมของดินตะกอน

ที่ถูกพัดพามา โดยกระแสน้ำ หรือถูกพัดพาโดยลม หรือดิน เพื่อการเพาะปลูกโดยทั่วไป มักมีปริมาณแคดเมียมปนอยู่ต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณแคดเมียมในดินแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะธรณีวิทยา และองค์ประกอบของหิน แคดเมียมเป็นสารที่คงตัว และสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน พืชชนิดต่างๆ จึงมีโอกาสดูดซึมแคดเมียมเข้าไปสะสมในส่วนต่างๆ ได้ และมีโอกาสที่จะแพร่กระจายสู่สิ่งมีชีวิต ได้ทุกชนิดรวมถึงมนุษย์ การปนเปื้อนของแคดเมียมในดิน มักเกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์เป็นหลัก เช่น จากกิจกรรมการทำเหมือง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง จากควัน หรือไอระเหยจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง การเผาไหม้กากของเสีย หรือขยะจากโรงถลุงโลหะ ใช้ปุ๋ยฟอสเฟสที่มีแคดเมียมเจือปน จากพื้นที่ฝังกลบขยะที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีการใช้โลหะแคดเมียม และจากการใช้กากอุตสาหกรรมดังกล่าว ผสมลงในดินเพาะปลูก เมื่อปริมาณแคดเมียมในดินเพิ่มขึ้น จะทำให้พืชมีโอกาสดูดซึมได้มากขึ้นด้วย ในใบยาสูบจะมีปริมาณแคดเมียมค่อนข้างสูง คือ ประมาณ 0.5-3.0 ไมโครกรัมต่อกรัม ของใบยาสูบ พบว่า การสูบบุหรี่หนึ่งซองต่อวัน อาจมีแคดเมียมดูดซึมเข้าสู่ร่างกายประมาณ 1-4 ไมโครกรัม

2.10.3.1 ประโยชน์ของแคดเมียม

- ด้านอุตสาหกรรม แคดเมียมเป็นสารที่ใช้เพื่อหลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยส่วนใหญ่จะผสมกับโลหะชนิดอื่น

- ด้านเกษตรกรรม แคดเมียมเป็นส่วนผสมของสารเคมีปราบวัชพืช สารเคมีฆ่าเชื้อรา และเป็นส่วนผสมในปุ๋ยบางชนิด

2.10.3.2 ความเป็นพิษของแคดเมียม

การรับสัมผัสแคดเมียมโดยทางหายใจ มีผลทำให้เกิดอาการเจ็บใต้อกเหนื่อย อ่อนเพลีย เกิดภาวะหัวใจล้มเหลวได้ การรับสัมผัสโดยการกิน ถ้ามีการปนเปื้อนในน้ำดื่มที่มีปริมาณแคดเมียมมากกว่า 15 ไมโครกรัมเข้าไป หรือกินอาหารที่มีแคดเมียม 30 ไมโครกรัมเข้าไป จะเกิดอาการคลื่นไส้อาเจียน ท้องเดินรุนแรง และหมดสติ ถ้าได้รับแคดเมียมในปริมาณ 0.35-1 กรัม อาจจะทำให้เกิดอาหารช็อค อาจจะเสียชีวิตภายใน 24 ชั่วโมง หรือภายใน 1-2 สัปดาห์ ตัวอย่างเช่น โรคอิไต-อิไต (Itai Itai disease) ในประเทศญี่ปุ่น หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 มีรายงานผู้ป่วยโรคไต และมีความผิดปกติที่กระดูก และมีอาการปวดกระดูกมาก ซึ่งเกิดจากพิษของแคดเมียม จะมีอาการกรวยไตผิดปกติ ท่อไตไม่ทำงาน มีโปรตีนในปัสสาวะ เป็นโรคกระดูกอ่อน มีอาการเหมือนคนกระดูกหัก มักพบได้ในผู้หญิงที่มีบุตรหลายคน ที่อาศัยอยู่บริเวณแม่น้ำจินซู เขตโตยามา และมีจำนวนมากขึ้นเมื่อมีการพัฒนาอุตสาหกรรมมากขึ้น ผู้ป่วยจะมีอาการเจ็บปวดมากบริเวณเอว หลัง และเกิดความผิดปกติของกระดูกสันหลัง เมื่อดูจากฟิล์มเอกซเรย์ พบว่า ผู้ป่วยมีความผิดปกติของกระดูกแขน

และซี่โครง สาเหตุเจากร่างกายได้รับแคลเซียมน้อย และแคดเมียมมากเกิน (พิพัฒน์ และคณะ, 2541)

2.10.4 ตะกั่ว

ตะกั่วมีเกือบทุกแห่งในโลก ปกติพบในรูปของซัลไฟต์ แต่บางที่เป็นผลผลิตของการสลายตัวจากการรวมของออกซิเจนของซัลไฟต์ ตะกั่วปกติเกิดขึ้นปะปนกับสังกะสีและบ่อยครั้งปะปนกับเงิน ในประเทศไทยมีพบมากที่กาญจนบุรีในรูปของ กาลีน่า (Galena) และที่ยะลาปะปนมากับแร่ดีบุกในรูปของตะกั่วฟอสเฟต (Pyromorphite) และตะกั่วคาร์บอเนต (Cerussite) นอกจากนี้มีปริมาณเล็กน้อยที่เพชรบูรณ์ เชียงใหม่

ตะกั่วที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับต้านทานการกัดกร่อนในทางเคมี มีตะกั่วเคมี (Chemical lead) ตะกั่วกรด (acid lead) และตะกั่วทองแดง (copper lead) ประกอบด้วยเทลลูเลียม 0.04% ซึ่งเป็นตัวทำให้การต้านทานความล้าที่ดี นอกจากนี้ตะกั่วกัดกร่อน (Chemical lead) เป็นตะกั่วที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด นิยมใช้ในการผลิตสีตะกั่วและสารเคมี (ประเสริฐ, 2542)

ตะกั่วเป็นโลหะชนิดหนึ่งซึ่งมีคุณสมบัติโดยทั่วไป คือ อ่อนมีสีน้ำเงินปนเทาเป็นโลหะหนัก หลอมเหลวได้ ทำให้อ่อนและตัดแปลงให้มีรูปร่างลักษระต่างๆได้ตามต้องการ และสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิสูงๆ ตะกั่วใช้ในวงการอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 2 พวกคือ

ตะกั่วเป็นโลหะที่มนุษย์นำมาใช้เป็นประโยชน์มากเป็นเวลาหลายพันปีและใช้ในการพัฒนาอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ตามวิทยาการและเทคโนโลยีสมัยใหม่จนทำให้ตะกั่วเป็นสารที่ใกล้มนุษย์มากยิ่งขึ้น ทั้งๆ ที่ตะกั่วเป็นสารพิษก่ออันตรายต่อร่างกายโดยสามารถทำลายประสาทสำคัญต่าง ๆ ของร่างกายได้ หากได้รับในปริมาณที่เกินขีดความสามารถของร่างกายจะรับได้ แต่เนื่องจากตะกั่วใช้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น การทำแบตเตอรี่รถยนต์ อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน เคลือบสายเคเบิล อุตสาหกรรมหลอมตะกั่ว การผลิตสี อุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผา อุตสาหกรรมตัวพิมพ์ การผลิตกระสุน การเชื่อมแผงวงจรอิเล็คโทรนิค ยาฆ่าแมลง มนุษย์จึงจำเป็นต้องสัมผัสกับตะกั่ว เราอาจพบตะกั่วได้ในสิ่งแวดล้อมทุกรูปแบบใน อากาศ ดิน น้ำ พืช เครื่องอุปโภคบริโภคในครัวเรือน เป็นเหตุให้มีผู้ป่วยรับพิษจากสารตะกั่วได้ง่ายยิ่งขึ้น (จุไรรัตน์, 2531)

2.10.4.1 แหล่งกำเนิดสารพิษตะกั่ว

- แหล่งจากการประกอบอาชีพ ได้แก่ การทำเหมืองตะกั่ว อุตสาหกรรมอิเล็คทรอนิคส์และคอมพิวเตอร์ การนำของเก่าที่มีตะกั่วผสมอยู่มาหลอมใช้ใหม่ การบรรทุกหรือขนถ่ายสิ่งของที่มีฝุ่นตะกั่วผสมอยู่ การทำให้ตะกั่วบริสุทธิ์ การผลิตบรอนซ์ตะกั่ว สีตะกั่ว ตะกั่วผง และตะกั่วในรูปอื่นๆการผลิตแก้วที่มีตะกั่วปนอยู่ การทาหรือพ่นสีกันสนิม การใช้สารประกอบ

ของตะกั่วในรูปที่เป็นผงผลิตแบตเตอรี่ การชุบโลหะ การทำเครื่องปั้นดินเผา การทำและบรรจุสารกำจัดศัตรูพืช การเรียงพิมพ์ การเติมน้ำมัน การใช้น้ำมันเบนซินทำความสะอาดเครื่องยนต์กลไกต่างๆ ซึ่งแหล่งจากการประกอบอาชีพเป็นแหล่งที่สารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายคนได้มากที่สุด

- แหล่งจากอากาศที่ปนเปื้อนตะกั่ว โดยทั่วไปแล้วการหายใจเอาตะกั่วในอากาศนั้นเป็นทางได้รับตะกั่วที่สำคัญ ที่พักอาศัยและการจราจรจะมีผลอย่างมาก โดยระดับตะกั่วจะสัมพันธ์กับปริมาณการจราจรเฉลี่ยในแต่ละวันของถนนสายสำคัญใกล้บ้าน นอกจากนั้นสถานีบริการน้ำมันเป็นแหล่งกำเนิดทำให้อากาศปนเปื้อนตะกั่วได้

- แหล่งจากดินและฝุ่น ดินและฝุ่นได้รับตะกั่วโดยการสะสมจากตะกั่วในอากาศที่ได้รับจากรถยนต์ โรงงานอุตสาหกรรม และแหล่งอื่นๆรวมทั้งแผ่นสีเก่าหลุดสะสมในดิน โดยตะกั่วที่สะสมมักจะอยู่มนบริเวณผิวดินพบมากในเด็กที่มีพฤติกรรมชอบสำรวจจึงทำให้เด็กเหล่านี้มักมีโอกาสได้รับตะกั่วจากดินและฝุ่นโดยการกิน

- แหล่งอาหารและน้ำดื่ม พืชผลที่เจริญเติบโตบริเวณสถานีบริการน้ำมันหรือใกล้ทางสัญจร จะมีความเข้มข้นของตะกั่วที่สะสมจากตะกั่วในอากาศมากว่าพืชผลที่เจริญเติบโตในบริเวณอื่นตะกั่วสามรถสะสมในอาหารระหว่างขบวนการผลิตการขนส่ง อาหารกระป๋อง โดยเฉพาะอาหารที่มีฤทธิ์เป็นกรด จะสามารถละลายส่วนที่เป็นตะกั่วจากกระป๋องที่บรรจุได้ตะกั่วในน้ำดื่มส่วนใหญ่ได้มาจากการละลายจากท่อประปาที่มีตะกั่วผสมอยู่ โดยเฉพาะถ้าน้ำดังกล่าวมีฤทธิ์เป็นกรดด้วย

- จากเครื่องถ้วยชามที่เคลือบปนด้วยสารตะกั่ว ในสหรัฐอเมริกามีการรายงานการเป็นพิษของตะกั่วอยู่หลายครั้ง จากแหล่งเครื่องถ้วยชามนี้ เพราะเครื่องถ้วยชามสามารถปล่อยตะกั่วจำนวนมากไปในอาหารและเครื่องดื่มได้ โดยเฉพาะชิ้นที่มีการแตกร้าว หรือแม้แต่มีการใช้มากและล้างขัดมาก

- สีที่มีตะกั่วเป็นพื้น เป็นแหล่งที่ให้ตะกั่วปริมาณสูงโดยน้ำหนักของสีขณะแห้ง เด็กที่อาศัยอยู่ในบ้านที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่วหรือบ้านที่ทาสีด้วยสีที่มีตะกั่ว ทั้งสีภายในและภายนอกเป็นเด็กที่เสี่ยงต่อการได้รับตะกั่ว ยิ่งถ้าสีเหล่านั้นเก่าและมีการหลุดลอกออกจะเกิดชิ้นเล็กๆ และมีฝุ่นตะกั่วผสมอยู่ตามพื้นทำให้ได้รับตะกั่วเข้าไปสะสมในร่างกายได้

- สีจากแหล่งอื่นๆตะกั่วสมารถพบในยาแผนโบราณ เช่นยาจีนหลายชนิด ซึ่งเราอาจได้รับตะกั่วจำนวนมากๆต่อครั้งได้ อาจได้รับจากการสูดดมน้ำมันก๊าซโซลีน การเผาน้ำมันที่ทิ้งแล้ว จากกระดาษหนังสือพิมพ์ สีจากเปลือกแบตเตอรี่ ซึ่งเคยมีรายงานในประเทศไทย พ.ศ.2514 ในเครื่องสำอาง ที่ผลิตขึ้นอย่างไม่เหมาะสมบางชนิด การใช้น้ำมันหล่อลื่นบางชนิดที่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบอยู่ถึงร้อยละ 30 (นัทธีรา, 2541)

2.10.4.2 ประโยชน์ของตะกั่ว

- ใช้ในทางโลหะกรรม โดยผสมกับโลหะต่างๆ เป็นโลหะผสมเพื่อประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมต่างๆเช่น ใช้ทำหัวลูกปืน ทำระฆัง แบตเตอรี่ ตะกั่วบัดกรีและใช้ในอุตสาหกรรมการพิมพ์เป็นต้น

- ใช้ในด้านการแพทย์และศิลป ใช้ในอุตสาหกรรมทำสีต่างๆอุตสาหกรรมเคมีและใช้ในการเคลือบภาชนะดินเผาให้สวยงาม

- ใช้ในด้านเกษตรกรรม โดยผสมในยาปราบศัตรูพืช

- ตะกั่วเทตราเอทธิลและตะกั่วเทตราเมทธิลใช้ผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่ใช้กับเครื่องบิน และรถยนต์เพื่อช่วยให้เครื่องยนต์เดินเรียบ

2.10.4.3 ความเป็นพิษ

ตะกั่วเป็นโลหะที่ร่างกายไม่ต้องการ คือไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบเผาผลาญอาหารยิ่งไปกว่านั้น ตะกั่วยังเป็นพิษต่อร่างกายอย่างแรง ถ้าร่างกายได้รับตะกั่วเข้าไปในปริมาณสูง โดยปกติร่างกายคนเราสามารถทนต่อตะกั่วในปริมาณสูงพอสมควร มีการวิจัยพบว่าคนทั่วไปมีตะกั่วในเลือด 0.25 ppm. (part per million)โดยไม่เกิดอาการเป็นพิษแต่อย่างใด แต่ถ้าร่างกายรับตะกั่วเข้าไปในปริมาณที่มากในทันทีทันใด เช่น ในเลือดมีมากกว่า 0.8 ppm. จะเกิดอาการเป็นพิษอย่างเฉียบพลัน แต่สำหรับพิษของตะกั่วแบบสะสม คือ ร่างกายรับตะกั่วหรือสารประกอบของตะกั่วเข้าไปทีละเล็กทีละน้อยแต่มากกว่าที่ร่างกายจะสามารถขับถ่ายออกไปได้ (สุชาดา, 2535)

2.10.4.4 อาการพิษของตะกั่ว

- ระบบทางเดินอาหาร ผู้ป่วยเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก ปวดท้อง

- ระบบประสาทส่วนปลาย ผู้ป่วยจะอ่อนแรง กล้ามเนื้อแขนขาเพลียไม่มีแรง ปวดตามข้อมือ เท้าห้อย อาจเป็นอัมพาตได้

- อาการทางสมอง มักพบในเด็กที่ได้รับสารตะกั่วในปริมาณที่สูง เช่น จะเกิดอาการนอนไม่หลับ ฝันร้าย อารมณ์ฉุนเฉียว ไวต่อการถูกกระตุ้นมากกว่าปกติ สติคุ้มดีคุ้มร้าย ชัก หมดสติ

- ระบบเลือด จะเกิดโรคโลหิตจาง ซีดอ่อนเพลีย ตัวเหลือง ตาเหลือง ตรวจพบการสะสมตะกั่วในร่างกายได้ (วรนันท์, 2538)

มหาวิทยาลัยรามคำแหง ใบพระบรมราชูปถัมภ์ ห้องสมุดกลาง

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติ โพธิปัทมะ และคณะ (2545). ได้ศึกษาปริมาณการสร้างแคโรทีนอยด์ จากสาหร่ายสไปรูลินาด้วยวิธีการเพาะเลี้ยงแบบต่างๆ ได้เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยวิธีแตกต่างกัน 5 วิธี เป็นเวลา 24 วัน แล้วใช้วิธีการสกัด และการคำนวณเพื่อหาปริมาณของแคโรทีนอยด์ที่สาหร่ายสไปรูลินาผลิตได้ ผลการทดลองบ่งชี้ว่าวิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบต่างๆ มีผลต่อปริมาณการสร้างแคโรทีนอยด์ โดยพบว่าวิธีที่ 2 (เลี้ยงในอาหารเหลวในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร) มีปริมาณการผลิตแคโรทีนอยด์สูงที่สุด คือ 2.0 มิลลิกรัม แคโรทีนอยด์กรัมเซลล์ รองลงมาคือวิธีที่ 1 (เลี้ยงในอาหารเหลวในหลอดทดลอง) วิธีที่ 3 (เลี้ยงในทรายบริสุทธิ์) วิธีที่ 4 (เลี้ยงในจานเลี้ยงเชื้อ) และวิธีที่ 5 (เลี้ยงในหลอดวุ้นเอียง) ซึ่งมีปริมาณการผลิตแคโรทีนอยด์เท่ากับ 1.486, 1.31, 0.856 และ 0.79 มิลลิกรัม แคโรทีนอยด์ต่อกรัมเซลล์ ตามลำดับ

รัตนา ชัยกล้าหาญ และคณะ (2545). ได้ศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* Z19/2 ปริมาตร 4 ลิตร ที่อัตราการเจือจาง (Dilution rate) 0.25 ต่อวัน (คลอโรฟิลล์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในสภาวะกลางแจ้งแบบกึ่งต่อเนื่อง ด้วยอาหารน้ำหมักมูลไก่ (COD 1,100 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2 สูตร โดยสูตรแรกเติม $NaHCO_3$ 5 กรัมต่อลิตร และปุ๋ย NPK (สูตร 16:16:16) 0.2 กรัมต่อลิตร และสูตรที่สองเติม $NaHCO_3$ 5 กรัมต่อลิตร KNO_3 1.5 กรัมต่อลิตร และK_2HPO_4 0.5 กรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับอาหารสูตร Zarrouk พบว่า การเลี้ยง *S. platensis* Z19/2 ในอาหารน้ำหมักมูลไก่ทั้ง 2 สูตรให้ผลผลิตใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 14 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน ขณะที่การเลี้ยงสาหร่ายนี้ด้วยอาหารสูตร Zarrouk ให้ผลผลิตประมาณ 18 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน เมื่อพิจารณาองค์ประกอบภายในเซลล์พบว่า *Spirulina* ที่เลี้ยงจากอาหารทุกสูตรมีกรดแกมมาลิโนลินิก คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไฟโคไซยานิน ปริมาณไม่แตกต่างกันเท่าใดนัก คือ ร้อยละ 1.0 23 50 และ 7.5 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ แต่พบว่า การเลี้ยงในอาหารน้ำหมักมูลไก่ทั้งสองสูตรให้เซลล์ที่มีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงกว่าในอาหารสูตร Zarrouk ประมาณร้อยละ 20 นอกจากนี้การเพาะเลี้ยง *Spirulina* ในน้ำหมักมูลไก่ยังลดปริมาณ Chemical oxygen demand (COD) ถึงร้อยละ 62 อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบราคาอาหารต่อลิตรยังพบว่า การใช้อาหารน้ำหมักมูลไก่สูตรแรกและสูตร ที่สอง มีราคาต้นทุนต่ำกว่าอาหารสูตร Zarrouk ร้อยละ 45 และ 30 ตามลำดับ

โอภาส คำฝึกฝน (2545). ได้ทำการศึกษาหาปริมาณโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำทิ้ง จากบริษัท เซรามิคอุตสาหกรรมไทย จำกัด ตำบลโคกตำแย้ อำเภอหนองแค จังหวัดสระบุรี โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อหาความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียม และนำผลไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดของกรมควบคุมมลพิษ ผลการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของตะกั่ว และแคดเมียมกับเกณฑ์มาตรฐาน

พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วโดยเฉลี่ยทั้งก่อนหลังการบำบัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (0.2 มิลิกรัมต่อลิตร) ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วก่อนการบำบัด อยู่ในช่วง 0.091-0.390 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังการบำบัดในช่วง 0.085-0.244 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมโดยเฉลี่ยทั้งก่อน และหลังการบำบัด สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน คือ (0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมก่อนการบำบัด อยู่ในช่วง 0.0 27-0.037 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังการบำบัดมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.024-0.036 มิลลิกรัมต่อลิตร

ณัฐฐา งามจินดาสกุล และคณะ (2544). งานวิจัยนี้ในขั้นต้นได้ศึกษาสูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตบิสกิต ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และทางกายภาพของสาหร่ายสไปรูไลนา ศึกษาปริมาณสาหร่ายสไปรูไลนาที่ใช้ได้ในบิสกิตสูตรต้นแบบ จากนั้นศึกษาคุณภาพระหว่างเก็บผลิตภัณฑ์บิสกิตสาหร่ายสไปรูไลนา บรรจุในกล่องพลาสติกชนิด Polystyrene และถุงพลาสติก ionomer/Polypropylene ปิดผนึกที่ความดันบรรยากาศ ผลการทดลองพบว่า ปริมาณเนยขาว และผงฟูที่เหมาะสมคือ 22.50 และ 2.00 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สาหร่ายสไปรูไลนา มีความชื้น ไขมัน โปรตีน เถ้า และเส้นใยอาหาร 2.40 2.25 50.28 10.59 และ 3.42 เปอร์เซ็นต์ ระดับสูงสุดของสาหร่ายสไปรูไลนาที่เป็นที่ยอมรับคือ 5.5 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณแป้ง โดยมีคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสในระดับที่ยอมรับได้ (6-7) และที่ปริมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณแป้ง ผลิตภัณฑ์มีคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสทุกด้านอยู่ในเกณฑ์ดี (8-9) บิสกิตที่ใช้สาหร่ายสไปรูไลนา 2.5 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณแป้ง มีความชื้น, ไขมัน, โปรตีน, เถ้า และเส้นใยอาหาร 5.29 21.83 12.85 3.06 และ 5.32 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์บิสกิตสาหร่ายสไปรูไลนา 2.5 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณแป้ง บรรจุในกล่องพลาสติกชนิด polystyrene และถุงพลาสติกชนิด ionomer/polypropylene ปิดผนึกที่ความดันบรรยากาศ สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (34-37 องศาเซลเซียส) ได้อย่างน้อย 3 เดือน โดยคุณภาพทั้งทางกายภาพ ประสาทสัมผัส และจุลินทรีย์ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

สุมาลี ดุลยอนุกิจ (2536). ได้ทำการทดลองหาปริมาณไนโตรเจน(N) และฟอสฟอรัส (P) น้อยที่สุดที่มีผลทำให้สาหร่ายเกลียวทอง (spirulina sp.) ลดการเจริญหรือลดคุณภาพ และหาอัตราการใช้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่าย การทดลองกระทำในห้องปฏิบัติการ และใช้สูตรอาหาร Zarrouk ในการศึกษาธาตุอาหารดังกล่าว การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอน ตอนที่ 1 ทำการลดเฉพาะปริมาณไนโตรเจน โดยใช้ไนโตรเจนระดับ 2 6 12 25 และ50 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณไนโตรเจนในสูตรอาหารตอนที่ 2 ทำการลดเฉพาะปริมาณฟอสฟอรัส โดยใช้ฟอสฟอรัสระดับ 1 3 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณฟอสฟอรัสในสูตรอาหาร แต่ละตอนใช้เวลาในการเลี้ยงสาหร่ายครบ 5 วัน และมีชุดควบคุม (ไม่มีการลดปริมาณธาตุทั้งสองในสูตรอาหาร) ผลการทดลอง

พบว่าปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสน้อยที่สุด ที่มีผลทำให้สาหร่ายลดคุณภาพมีค่าไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเซลล์ (ใช้ค่า optical density หรือ O.D.ในการแสดง) และอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย (ใช้ค่าอัตราการเจริญจำเพาะในการแสดง) ในขณะนั้นพบว่าสาหร่ายมีการลดคุณภาพภายในเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อมีปริมาณไนโตรเจนเริ่มต้นในอาหารเท่ากับ 2.783 และ 9.593 มิลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่สาหร่ายมีค่า O.D. เริ่มต้นเท่ากับ 0.298 และ 0.571 ตามลำดับ และมีค่าอัตราการเจริญจำเพาะเท่ากับ 0.59 และ0.44 ต่อวันตามลำดับ และเมื่อมีปริมาณฟอสฟอรัสเริ่มต้นเท่ากับ 1.275 และ 0.236 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่สาหร่ายมีค่า O.D. เริ่มต้นเท่ากับ 0.096 และ1.685 ตามลำดับ และมีอัตราการเจริญจำเพาะเท่ากับ 1.23 และ0.23 ต่อวันตามลำดับ อัตราการใช้ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของสาหร่ายชุดควบคุมมีค่าอยู่ในช่วง 22.9–83.91 และ 4.62-13.98 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อการเพิ่มขึ้นของ O.D. เท่ากับ 1ต่อวันตามลำดับ

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สถานที่ศึกษา

ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์

3.2.1 ตู้ Growth Chamber

3.2.2 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 และ 42

3.2.3 Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) รุ่น JY 2000 ยี่ห้อ Jobin Jyon

3.2.4 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) รุ่น AA-6200 ยี่ห้อ Shimadzu

3.2.5 เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH)

3.2.6 ตู้แช่เย็งที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

3.2.7 เครื่อง Autoclave

3.2.8 เครื่อง UV – visible Spectrophotometer รุ่น UV – 1601 ยี่ห้อ Seimadzu

3.2.9 ตู้อบ (Hot Air Oven)

3.2.10 Laminar Air Flow Cabinet, Vertical

3.3 สารเคมี

3.3.1 กรดไนตริก (HNO_3) Damstadt, Germany

3.3.2 กรดเปอร์คลอริก ($HClO_4$) R-08110, Montcadai Rcixac

3.3.3 แคดเมียม (II) คลอไรด์ ($CdCl_2$) : AR grade Merck, Germany

3.3.4 เลด (II) คลอไรด์ ($PbCl_2$) : AR grade Merck, Germany

3.4 สาหร่าย

สาหร่ายสไปรูไลนาที่ใช้เป็นสายพันธุ์ Spirulina platensis จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย คลอง 5

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

3.5 การเตรียมสารอาหารเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมอาหารตามสูตรของ Zarrouk ดังแสดงในตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารเคมีต่างๆ ในการเตรียมอาหารปริมาณ 1 ลิตร และตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณสารเคมีต่างๆ ในการเตรียมสารละลาย A_5 และ B_6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารเคมีในสูตรอาหาร Zarrouk

ส่วนประกอบ	ปริมาณ
$NaHCO_3$	16.80 g
$NaNO_3$	0.05 g
K_2HPO_4	2.50 g
NaCl	1.00 g
$MgSO_4.7H_2O$	0.20 g
$FeSO_4.7H_2O$	0.01 g
$CaCl_2.2H_2O$	0.04 g
EDTA	0.08 g
K_2SO_4	1.00 g
A_5 Solution (g/L)	1 mL
B_6 Solution (g/L)	1 mL

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารเคมีในสูตรอาหาร Zarrouk สารละลาย A_5 และB_6 ประกอบด้วย

A_5 Solution	ปริมาณ	B_6 Solution	ปริมาณ
H_3BO_3	2.86 g	NH_4NO_3	22.9 g
$MnCl_2.2H_2O$	1.80 g	$K_2Cr_2(SO_4)_4.24H_2O$	96.0 g
$ZnSO_4.4H_2O$	0.22 g	$NiSO_4.7H_2O$	47.8 g
MoO_3	0.01 g	$Na_2SO_4.2H_2O$	17.9 g
$CuSO_4.5H_2O$	0.08	$Co(NO_3)_2.6H_2O$	4.4 g

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ชัยพรรษมหาราชูปถัมภ์

3.6 วิธีดำเนินการทดลอง

3.6.1 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา

การเตรียมการเพิ่มปริมาณเซลล์ของสาหร่ายสไปรูไลนา เพื่อใช้เป็นสาหร่ายสไปรูไลนาเริ่มต้นสำหรับใช้ในการทดลอง โดยเตรียมสารละลายอาหารตามสูตรของ Zarrouk แล้วเติมเชื้อสาหร่ายสไปรูไลนาปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในสารละลายอาหาร 250 มิลลิลิตรในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ทำการเลี้ยงภายใต้สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ให้แสงสว่างจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ความแข้มแสงประมาณ 10000 ลักซ์ โดยให้แสงสว่าง 24 ชั่วโมง เขย่าวันละหนึ่งครั้ง สาหร่ายสไปรูไลนาที่ใช้เป็นเชื้อเริ่มต้นมีอายุ 1 สัปดาห์ จึงนำมาใช้ในการทดลอง เนื่องจากสาหร่ายสไปรูไลนาอยู่ในช่วง Exponential phase

3.6.2 ศึกษาปริมาณของแคดเมียมและตะกั่วต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา

การศึกษาอิทธิพลของแคดเมียมและต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา ทำการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่มีความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในอาหารเลี้ยงสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ดังนี้ 4 8 12 16 และ 20 ppm (part per million) และทำการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่มีความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในอาหารเลี้ยงสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ดังนี้ 10 20 30 40 และ 50 ppm จากนั้นเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนากับอาหารเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่ไม่ได้เติมสารละลายแคดเมียมและตะกั่ว โดยพิจารณาดังนี้ ถ้าสาหร่ายมีสีเขียวเข้มลอยกระจายตัวในอาหารแสดงว่า มีการเจริญเติบโตดี แต่ถ้าสาหร่ายสไปรูไลนาที่มีสีเหลืองนอนอยู่ที่ก้นขวดรูปชมพู่ แสดงว่าสาหร่ายสไปรูไลนาตาย

3.6.3 ศึกษาอิทธิพลของแคดเมียมและตะกั่วต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา

โดยทำการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่มีความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในอาหารเลี้ยงสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ดังนี้ 1 2 3 และ 4 ppm และที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในอาหารเลี้ยงสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ดังนี้ 4 8 12 16 และ 20 ppm จากนั้นเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนากับอาหารเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่ไม่ได้เติมสารละลายแคดเมียมและตะกั่ว โดยพิจารณาอัตราการเจริญเติบโตจากความหนาแน่นของสาหร่ายสไปรูไลนาที่เปลี่ยนแปลงไปในรูป Optical density ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV–visible spectrophotometer

3.6.4 วิธีการเตรียมกราฟมาตรฐานแคดเมียม

3.6.4.1 สารละลายแคดเมียมมาตรฐานที่ใช้สำหรับเครื่อง AAS และ ICP–OES มีความเข้มข้นที่ 1,000 ppm เพื่อเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 1 2 3 และ 4 ppm

3.6.4.2 เตรียมสารละลายแคดเมียมมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 100 ppm โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 1000 ppm มา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วปรับด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจนถึงขีดปรับปริมาตร

3.6.4.3 ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 1 2 3 และ 4 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตรทั้ง 4 ขวด แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร จะได้สารละลายแคดเมียมมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 1 2 3 และ 4 ppm ตามลำดับ จากนั้นนำไปวัดค่าวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง AAS และ ICP–OES

3.6.4.4เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสง

3.6.5 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับ

สาหร่ายสไปรูไลนาทดลองโดยเลี้ยงเซลล์ในสารละลายอาหารปริมาตร 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายแคดเมียม (II) คลอไรด์ ($CdCl_2$) ในสารละลายอาหารให้มีความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นที่ 1 2 3 และ 4 ppm ตามลำดับ ทำการเลี้ยงภายใต้สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 1,0000 ลักซ์ โดยให้แสงสว่างตลอด 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ เก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ทุก 1 สัปดาห์ หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสาหร่ายสไปรูไลนาในปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยนำตัวอย่างที่เก็บได้กรองด้วยผ้าขาวที่มีขนาด 60 ไมครอน นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง นำสาหร่ายสไปรูไลนาที่อบแห้ง 0.05 กรัม ทำการย่อยด้วยกรดไนตริกและกรดเปอร์คลอริกในอัตรา 3 ต่อ 1 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เมื่อสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 42 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม โดยใช้เครื่อง AAS และ ICP–OES

3.6.6 วิธีการกราฟมาตรฐานตะกั่ว

3.6.6.1 สารละลายตะกั่วมาตรฐานที่ใช้สำหรับเครื่อง AAS และ ICP–OES มีความเข้มข้นที่ 1,000 ppm เพื่อเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 1 2 3 และ 4 ppm

3.6.6.2 เตรียมสารละลายตะกั่วมาตรฐานมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 100 ppm โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 1000 ppm มา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วปรับด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจนถึงขีดปรับปริมาตร

3.6.6.3 ปิเปตสารละลายตะกั่วมาตรฐานความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 4 8 12 16 และ 20 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตรทั้ง 4 ขวด แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร จะได้สารละลายตะกั่วมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 4 8 12 16 และ 20 ppm ตามลำดับ จากนั้นนำไปวัดค่าวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง AAS และ ICP–OES

3.6.6.4 เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสง

3.6.7 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับ

สาหร่ายสไปรูไลนาทดลองโดยเลี้ยงเซลล์ในสารละลายอาหารปริมาตร 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายเลด (II) คลอไรด์ ($PbCl_2$) ในสารละลายอาหารให้มีความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นที่ 4 8 12 16 และ 20 ppm ตามลำดับ ทำการเลี้ยงภายใต้สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 1,0000 ลักซ์ โดยให้แสงสว่างตลอด 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ เก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ทุก 1 สัปดาห์ หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสาหร่ายสไปรูไลนาในปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยนำตัวอย่างที่เก็บได้กรองด้วยผ้าขาวที่มีขนาด 60 ไมครอน นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง นำสาหร่ายสไปรูไลนาที่อบแห้ง 0.05 กรัม ทำการย่อยด้วยกรดไนตริกและกรดเปอร์คลอริกในอัตรา 3 ต่อ 1 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เมื่อสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 42 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม โดยใช้เครื่อง AAS และ ICP–OES

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ในพระบรมราชูปถัมภ์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 ศึกษาปริมาณของแคดเมียมและตะกั่วต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา

ในการศึกษาอิทธิพลของแคดเมียมและตะกั่วต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยทำการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 1,0000 ลักซ์ เป็นเวลา 1 สัปดาห์ โดยทำการเตรียมความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม(II) คลอไรด์ ลงในสารละลายอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 4 8 12 16 และ 20 ppm พบว่า สาหร่ายสไปรูไลนามีการเจริญเติบโตดังแสดงในตารางที่ 4.1 ทำการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว (II) คลอไรด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 10 20 30 40 และ 50 ppm พบว่า สาหร่ายสไปรูไลนามีการเจริญเติบโตดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นของแคดเมียมตั้งแต่ 0 -20 ppm

ความเข้มข้นของแคดเมียม	อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา
0 (ppm)	สาหร่ายลอยกระจายตัวในอาหาร จากนั้นสาหร่ายที่แข็งแรงจะลอยตัวขึ้นมาอยู่บนผิวน้ำ สาหร่ายมีสีเขียวเข้ม
4 (ppm)	สาหร่ายลอยกระจายตัวในอาหาร จากนั้นสาหร่ายที่แข็งแรงจะลอยตัวขึ้นมาอยู่บนผิวน้ำ สาหร่ายมีสีเขียวเข้ม
8 (ppm)	ไม่มีการเจริญเติบโต สาหร่ายมีสีเหลืองใบตอง นอนตัวที่ก้นขวดรูปชมพู่
12 (ppm)	ไม่มีการเจริญเติบโต สาหร่ายมีสีเหลืองใบตอง นอนตัวที่ก้นขวดรูปชมพู่
16 (ppm)	ไม่มีการเจริญเติบโต สาหร่ายมีสีเหลืองใบตอง นอนตัวที่ก้นขวดรูปชมพู่
20 (ppm)	ไม่มีการเจริญเติบโต สาหร่ายมีสีเหลืองใบตอง นอนตัวที่ก้นขวดรูปชมพู่

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ในพระบรมราชูปถัมภ์

ตารางที่ 4.2 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นของตะกั่วตั้งแต่ 0 -50 ppm

ความเข้มข้นของแคดเมียม	อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา
0 (ppm)	สาหร่ายลอยกระจายตัวในอาหาร จากนั้นสาหร่ายที่แข็งแรงจะลอยตัวขึ้นมาอยู่บนผิวน้ำ สาหร่ายมีสีเขียวเข้ม
10 (ppm)	สาหร่ายลอยกระจายตัวในอาหาร จากนั้นสาหร่ายที่แข็งแรงจะลอยตัวขึ้นมาอยู่บนผิวน้ำ สาหร่ายมีสีเขียวเข้ม
20 (ppm)	สาหร่ายลอยกระจายตัวในอาหาร จากนั้นสาหร่ายที่แข็งแรงจะลอยตัวขึ้นมาอยู่บนผิวน้ำ สาหร่ายมีสีเขียวเข้ม
30 (ppm)	สาหร่ายเจริญเติบเติบโตช้า มีสีเขียวอมสีเหลือง สาหร่ายนอนอยู่ที่ก้นขวดรูปชมพู่
40 (ppm)	ไม่มีการเจริญเติบโต สาหร่ายมีสีเหลืองใบตอง นอนตัวที่ก้นขวดรูปชมพู่
50 (ppm)	ไม่มีการเจริญเติบโต สาหร่ายมีสีเหลืองใบตอง นอนตัวที่ก้นขวดรูปชมพู่

การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาเปรียบเทียบกับอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา ที่มีการเจริญเติบโต (รูป 4.1ก) มีลักษณะดังนี้ สาหร่ายสไปรูไลนามีสีเขียวเข้มลอยกระจายตัวในอาหาร แต่ถ้าสาหร่ายสไปรูไลนาที่มีสีเหลืองนอนอยู่ที่ก้นขวดรูปชมพู่ แสดงว่าสาหร่ายสไปรูไลนาตาย (รูป 4.1ข) ในการศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นของแคดเมียมตั้งแต่ 0-20 ppm พบว่า ที่ความเข้มข้น 4 ppm สาหร่ายสไปรูไลนามีการเจริญเติบโตได้ดี ที่ความเข้มข้น 8 ppm มีการเจริญเติบโตได้ช้าและที่ความเข้มข้น 12 16 และ 20 ppm สาหร่ายสไปรูไลนาตาย และในการศึกษาการศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นของตะกั่วตั้งแต่ 0-50 ppm พบว่า ที่ความเข้มข้น 10 และ 20 ppm สาหร่ายสไปรูไลนามีการเจริญเติบโตได้ดี ที่ความเข้มข้น 30 ppm มีการเจริญเติบโตได้ช้า และที่ความเข้มข้น 40 และ 50 ppm สาหร่ายสไปรูไลนาตาย ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมตั้งแต่ 0 - 4 ppm และเลือกความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วตั้งแต่ 0 - 20 ppm ในการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตและการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายสไปรูไลนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ในพระบรมราชูปถัมภ์

รูปที่ 4.1 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา ก) สาหร่ายสไปรูไลนาที่เจริญเติบโต ข) สาหร่ายสไปรูไลนาที่ตาย

4.2 ศึกษาอิทธิพลของแคดเมียมและตะกั่วต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยใช้เครื่อง UV - visible Spectrophotometer

การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาถูกควบคุมโดยปัจจัยของแสง และอุณหภูมิ การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาแบ่งออกเป็น 3 ระยะดังนี้ ระยะ Lag Phase เป็นช่วงวันแรกๆ ที่สาหร่ายสไปรูไลนามีการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ ระยะ Acceleration Phase เป็นช่วงที่สาหร่ายสไปรูไลนามีการแบ่งเซลล์เพิ่มขึ้น และใช้ธาตุอาหารหมดไปอย่างรวดเร็ว ความหนาแน่นของสาหร่ายสไปรูไลนาที่มีมากเกินไปทำให้มีการตายของเซลล์สาหร่ายสไปรูไลนา เนื่องจากอัตราการหายใจที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสงจะลดลง เนื่องจากมีการบดบังแสงกันเองของเซลล์สาหร่ายสไปรูไลนาส่งผลให้มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะลดลง ระยะ Stationary Phase สาหร่ายสไปรูไลนามีการเจริญเติบโตค่อนข้างคงที่ ซึ่งมีความหนาแน่นของเซลล์ค่อนข้างคงที่ด้วยเช่นกัน

4.2.1 การศึกษาอิทธิพลของแคดเมียมต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา

การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา ทำการเลี้ยงภายใต้สภาวะที่ควบคุม อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 10,000 ลักซ์ ระยะเวลา 1 สัปดาห์ โดยทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในอาหารเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 1 2 3 และ 4 ppm และเปรียบเทียบกับสารละลายอาหาร จากนั้นนำสาหร่ายสไปรูไลนาไปวัดความหนาแน่นของสาหร่ายสไปรูไลนาโดยใช้เครื่อง UV-visble spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นของแคดเมียมตั้งแต่ 0-4 ppm

ความเข้มข้นของแคดเมียม (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 560 nm (Abs)
0	1.186
1	1.548
2	1.478
3	1.139
4	1.139

ค่าการดูดกลืนมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของสาหร่ายสไปรูไลนาแบบแปรผันตามกัน ดังนี้ เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายสไปรูไลนามีค่าน้อยลง แสดงว่าอัตราการการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนามีค่าน้อยลง จึงสรุปได้ว่า ปริมาณแคดเมียมมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา ถ้าปริมาณแคดเมียมมีมากทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาน้อยลงจนกระทั่งสาหร่ายตาย

4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของตะกั่วต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา

ในการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยทำการเลี้ยงภายใต้สภาวะที่ควบคุม อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 10,000 ลักซ์ ระยะเวลา 1 สัปดาห์ โดยทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในอาหารเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 4 8 12 16 และ 20 ppm และเปรียบเทียบกับสารละลายอาหาร จากนั้นนำสาหร่ายสไปรูไลนาไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดกลืนของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นของตะกั่วตั้งแต่ 0 – 20 ppm

ความเข้มข้นของแกดเมียม (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 560 nm (Abs)
0	1.153
4	1.080
8	1.066
12	0.948
16	0.908
20	0.908

ค่าการดูดกลืนมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของสาหร่ายสไปรูไลนาแบบแปรผันตามกัน ดังนี้จากตารางที่ 4.4 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเพิ่มมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายสไปรูไลนามีค่าน้อยลง แสดงว่า ปริมาณตะกั่วมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ถ้าปริมาณตะกั่วมีมากทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาน้อยลงจนกระทั่งสาหร่ายตาย

4.3 การศึกษาการดูดซับแคดเมียมของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยใช้เครื่อง AAS

การศึกษาการดูดซับแคดเมียมของสาหร่ายสไปรูไลนาโดยทำการทดลองเลี้ยงสาหร่ายที่มีความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 1 2 3 และ 4 ppm ตามลำดับ เลี้ยงภายใต้สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และความเข้มแสงประมาณ 10,000 ลักซ์ เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมโดยใช้เครื่อง AAS

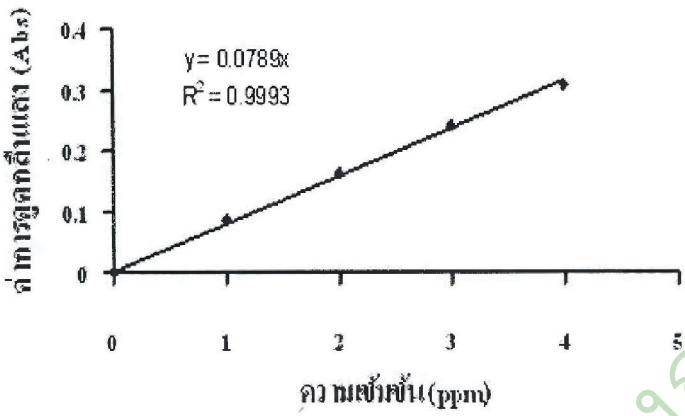
4.3.1 กราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายแคดเมียมมาตรฐานที่ความเข้มข้น1 2 3 และ 4 ppm โดยปิเปตสารละลายแคดเมียมมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 1 2 3 และ 4 มิลลิลิตร ตามลำดับใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรทั้ง 4 ขวดและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตรนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง AAS ได้ค่าการดูดกลืนแสงแสดงในดังตารางที่ 4.5 และได้กราฟมาตรฐานของสารละลาย แสดงในรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.5 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม (Cd) โดยเครื่อง AAS

ความเข้มข้นของแคดเมียม (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
1	0.0832
2	0.1620
3	0.2409
4	0.3094

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์



รูปที่ 4.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0- 4 ppm โดยใช้เครื่อง AAS

4.3.2 วิธีเตรียมตัวอย่าง

เตรียมอาหารปริมาณ 250 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม(II)คลอไรด์ ที่ตามความเข้มข้นดังนี้ 1 2 3 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทำการเติมสาหร่ายสไปรูไลนาปริมาตร 20 มิลลิลิตร จากสารเริ่มต้น จากนั้นทำการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาเลี้ยงภายใต้สภาวะการให้อุณหภูมิที่ 28 องศาเซลเซียสและความเข้มแสงประมาณ 10,000 ลักซ์ เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ นำสาหร่ายสไปรูไลนาที่อบแห้งมา 0.05 กรัม ย่อยด้วยกรดไนตริก และกรดเปอร์คลอริก 3 ต่อ 1มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะแคดเมียมโดยใช้เครื่อง AAS จากนั้นคำนวณหาปริมาณโลหะแคดเมียมที่สาหร่ายสไปรูไลนาสะสมไว้ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 0 – 4 ppm ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ปริมาณแคดเมียมที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับ โดยใช้เครื่อง AAS

ปริมาณแคดเมียมที่เติมในอาหาร	ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย (Abs)	ปริมาณแคดเมียมที่สาหร่ายที่ดูดซับ
0 ppm	0.0014	0.0177 ppm
1 ppm	0.0063	0.0789 ppm
2 ppm	0.0133	0.1685 ppm
3 ppm	0.0199	0.2522 ppm
4 ppm	0.0248	0.3143 ppm

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น

จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในอาหารมากขึ้นทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายสไปรูไลนาเพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงว่าความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมมีผลต่อการดูดซับโลหะแคดเมียมของสาหร่ายสไปรูไลนา ดังนั้นถ้าน้ำเลี้ยงสาหร่ายมีปริมาณแคดเมียมมาก ทำให้ สาหร่ายสไปรูไลนามีการดูดซับโลหะแคดเมียมได้มากยิ่งขึ้น

4.4 ศึกษาการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยใช้เครื่อง AAS

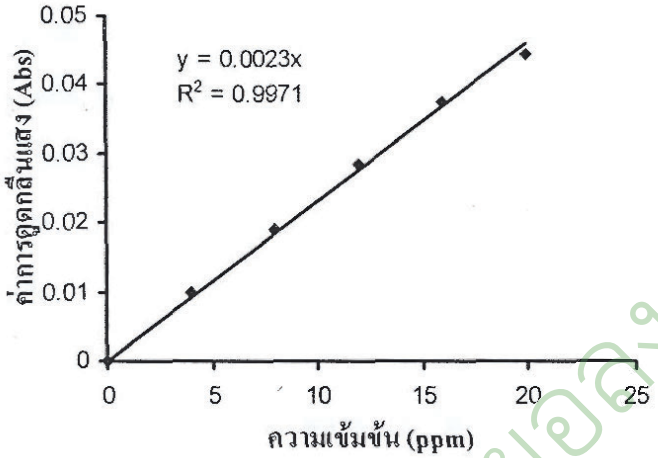
การศึกษาการดูดซับโลหะตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนาโดยทำการทดลองเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา โดยปิเปตสาหร่ายสไปรูไลนาจากเชื้อเริ่มต้นในปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในสารละลายอาหารปริมาตร 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายตะกั่วมาตรฐานลงในสารละลายอาหารเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 4 8 12 16 และ 20 ppm ตามลำดับ เลี้ยงภายใต้สภาวะการให้อุณหภูมิที่ 28 องศาเซลเซียส และความเข้มแสงประมาณ 10,000 ลักซ์ เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วโดยใช้เครื่อง AAS

4.4.1 วิธีเตรียมกราฟมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วมาตรฐานที่ความเข้มข้น 4 8 12 16 และ 20 ppm โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 4 8 12 16 และ 20 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรทั้ง 4 ขวดและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง AAS ได้ค่าการดูดกลืนแสงแสดงตารางที่ 4.7 และได้กราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่ว ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.7 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) โดยเครื่อง AAS

ความเข้มข้นของตะกั่ว (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
4	0.0099
8	0.0191
12	0.0283
16	0.0374
20	0.0445



รูปที่ 4.3 กราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้น 0- 20 ppm โดยใช้เครื่อง AAS

4.4.2 วิธีเตรียมตัวอย่าง

เตรียมอาหารปริมาณ 250 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 4 8 12 16 และ 20 ppm ตามลำดับ ทำการเติมสาหร่ายสไปรูไลนาปริมาตร 20 มิลลิลิตรจากสาหร่ายเริ่มต้น จากนั้นทำการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาเลี้ยงภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียสและความเข้มแสง 10,000 ลักซ์ เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ นำสาหร่ายสไปรูไลนาที่อบแห้งมา 0.05 กรัม ย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตรและกรดเปอร์คลอริค 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะตะกั่วโดยเครื่อง AAS ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ปริมาณตะกั่วที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับโดยใช้เครื่อง AAS

ปริมาณตะกั่วที่เติมในอาหาร	ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย (Abs)	ปริมาณตะกั่วที่สาหร่ายที่ดูดซับ
0 ppm	0.0019	0.8260 ppm
4 ppm	0.0030	1.3043 ppm
8 ppm	0.0075	3.2608 ppm
12 ppm	0.0072	3.1304 ppm
16 ppm	0.0065	2.8260 ppm
20 ppm	0.0090	3.9130 ppm

จากตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในอาหารมากขึ้น ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายสไปรูไลนาเพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงว่าความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในอาหารมีผลต่อการดูดซับโลหะตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนา ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในอาหารเพิ่มมากขึ้นเท่าไหร่สาหร่ายสไปรูไลน่ามีการดูดซับโลหะตะกั่วได้มากยิ่งขึ้น

4.5 ศึกษาการดูดซับแคดเมียมของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยใช้เครื่อง ICP–OES

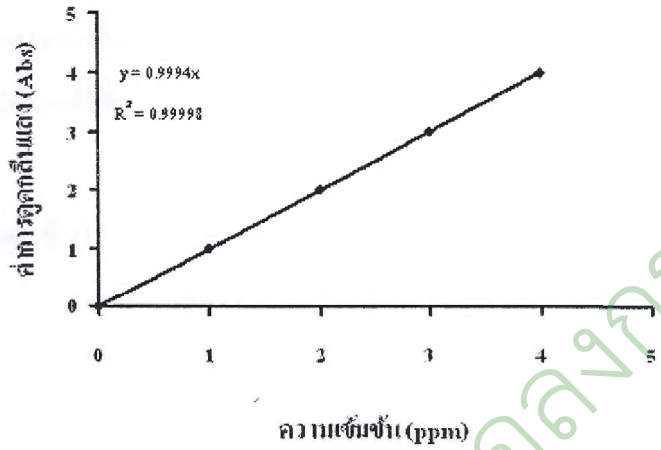
การศึกษาการดูดซับโลหะแคดเมียมของสาหร่ายสไปรูไลนาโดยทำการทดลองเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา โดยปิเปตสาหร่ายสไปรูไลนาในปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในสารละลายอาหารปริมาตร 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายแคดเมียมมาตรฐานลงในสารละลายอาหารเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 1 2 3 และ 4 ppm ตามลำดับ เลี้ยงภายใต้สภาวะการให้อุณหภูมิที่ 28 องศาเซลเซียส และความเข้มแสงประมาณ 10,000 ลักซ์ เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมโดยใช้เครื่อง ICP-OES

4.5.1 วิธีเตรียมกราฟมาตรฐาน

วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐานของโลหะแคดเมียมใช้วิธีเดียวกับหัวข้อที่ 4.3.1 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง ICP–OES ได้ค่าการดูดกลืนแสงแสดงตารางที่ 4.9 และได้กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียม ดังแสดงในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.9 การดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานของแคดเมียม (Cd) โดยเครื่อง ICP–OES

ความเข้มข้นของตะกั่ว (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
1	0.9920
2	2.0100
3	2.9900
4	4.0000



รูปที่ 4.4 กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0-4 ppm โดยใช้เครื่อง ICP – OES

4.5.2 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

วิธีเตรียมตัวอย่างของสาหร่ายสไปรูไลนาที่มีแคดเมียม (II) คลอไรด์ใช้วิธีเดียวกับหัวข้อที่ 4.3.2 นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะแคดเมียมโดยเครื่อง ICP-OES จากนั้นคำนวณหาปริมาณโลหะแคดเมียมที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับไว้ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 0 – 4 ppm ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ปริมาณแคดเมียมที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับ โดยใช้เครื่อง ICP-OES

ปริมาณแคดเมียมที่เติมในอาหาร	ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย (Abs)	ปริมาณแคดเมียมที่สาหร่ายที่ดูดซับ
0 ppm	0.0200	0.0200 ppm
1 ppm	0.0170	0.0170 ppm
2 ppm	0.0270	0.0270 ppm
3 ppm	0.0380	0.0380 ppm
4 ppm	0.2450	0.2451 ppm

จากตารางที่ 4.10 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในอาหารมากขึ้นทำให้ ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายสไปรูไลนาเพิ่มมากขึ้นด้วยแสดงว่าความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในอาหารมีผลต่อการดูดซับโลหะแคดเมียมของสาหร่ายสไปรูไลนา ดังนั้นเมื่อ

ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในอาหารเพิ่มมากขึ้นเท่าไหร่สาหร่ายสไปรูไลน่ามีการดูดซับโลหะแคดเมียมได้มากยิ่งขึ้น

4.6 ศึกษาการดูดซับโลหะตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยใช้เครื่อง ICP-OES

การศึกษาการดูดซับโลหะตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนาโดยทำการทดลองเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา โดยปิเปตสาหร่ายสไปรูไลนาในปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในสารอาหารปริมาตร 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายตะกั่วมาตรฐานลงในสารละลายอาหารเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 4 8 12 16 และ 20 ppm ตามลำดับ เลี้ยงภายใต้สภาวะการให้อุณหภูมิที่ 28 องศาเซลเซียสและความเข้มแสงประมาณ 10,000 ลักซ์ เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วโดยใช้เครื่อง ICP-OES

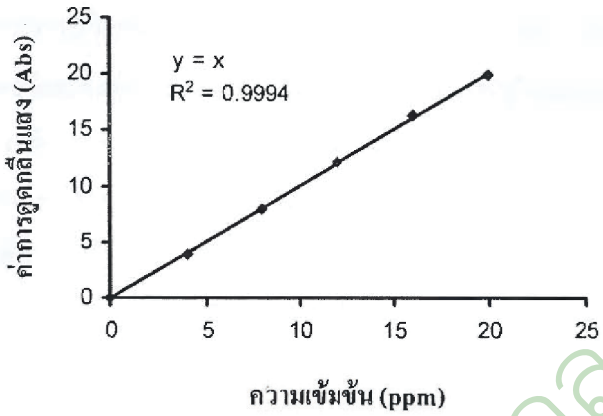
4.6.1 วิธีเตรียมกราฟมาตรฐาน

วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐานของโลหะตะกั่วใช้วิธีเดียวกับหัวข้อที่ 4.4.1 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง ICP–OES ได้ค่าการดูดกลืนแสงแสดงตารางที่ 4.11 และได้กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียม ดังแสดงในรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.11 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) โดยใช้เครื่อง ICP-OES

ความเข้มข้นของตะกั่ว (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
4	3.81
8	7.90
12	12.10
16	16.26
20	19.81

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลยถวายในพระบรมราชูปถัมภ์



รูปที่ 4.5 กราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้น 0- 20 ppm โดยใช้เครื่อง ICP – OES

4.6.2 วิธีเตรียมตัวอย่าง

วิธีเตรียมตัวอย่างของสาหร่ายสไปรูไลนาที่มีสารละลายตะกั่วในอาหารสำหรับเลี้ยงใช้วิธีเดียวกับหัวข้อที่ 4.3.2 นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะแคดเมียมโดยเครื่อง ICP-OES จากนั้นคำนวณหาปริมาณโลหะตะกั่วที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับไว้ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 0 – 20 ppm ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ปริมาณตะกั่วที่สาหร่ายสไปรูไลนาดูดซับ โดยใช้เครื่อง ICP-OES

ปริมาณแคดเมียมที่เติมในอาหาร	ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย (Abs)	ปริมาณแคดเมียมที่สาหร่ายที่ดูดซับ
0 ppm	0.1570	0.1570 ppm
4 ppm	0.1340	0.1340 ppm
8 ppm	0.5960	0.5960 ppm
12 ppm	0.9510	0.9510 ppm
16 ppm	1.3810	1.3810 ppm
20 ppm	1.5890	1.5890 ppm

จากตารางที่ 4.12 พบว่า เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในอาหารมากขึ้น ทำให้ ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายสไปรูไลนาเพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงว่า ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในอาหารมีผลต่อการดูดซับโลหะตะกั่วของสาหร่ายสไปรูไลนา ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในอาหารเพิ่มมากขึ้น สาหร่ายสไปรูไลนามีการดูดซับโลหะตะกั่วได้มากยิ่งขึ้น

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ในพระบรมราชูปถัมภ์

4.7 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนาตามท้องตลาด

4.7.1 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสไปรูไลนาตามท้องตลาด

การศึกษาการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมโดยนำสาหร่ายสไปรูไลนาตามท้องตลาด 3 ตัวอย่าง ชั่งสาหร่ายสไปรูไลนาตัวอย่างละ 0.5 กรัม ทำการย่อยด้วยกรดไนตริกและกรดเปอร์คลอริก ในอัตรา 3 ต่อ 1 มิลลิลิตร ให้ความร้อน 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปกรอง ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS และ ICP–OES ได้ผลดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ปริมาณแคดเมียม (ppm) ในอาหารเสริมจากสาหร่ายสไปรูไลนาตามท้องตลาด

ตัวอย่างที่	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ค่าเฉลี่ย AAS (ppm)	ค่าเฉลี่ย ICP-OES (ppm)
	AAS	ICP - OES	AAS	ICP - OES	AAS	ICP-OES		
1	N.d.	0.0040	N.d.	0.0020	N.d.	0.0020	N.d.	0.0020
2	N.d.	0.0340	N.d.	0.0350	N.d.	0.0380	N.d.	0.0350

N. d. = Not detected

จากตารางที่ 4.13 พบว่าตัวอย่างของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ทำการตรวจวัดด้วย เครื่อง AAS ตรวจไม่พบโลหะแคดเมียมทั้ง 2 ตัวอย่าง แต่ตรวจด้วยเครื่อง ICP–OES พบว่ามีปริมาณแคดเมียมแต่มีในปริมาณที่น้อยมาก และตัวอย่างที่ตรวจพบแคดเมียมในปริมาณมากที่สุดคือ ตัวอย่างที่ 2 เท่ากับ 0.035 ppm ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของแคดเมียมในวารสารอาหารและยา พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่รับรอง

4.7.2 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนาตามท้องตลาด

การศึกษาการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วโดยนำสาหร่ายสไปรูไลนาตามท้องตลาด 2 ตัวอย่าง ชั่งสาหร่ายสไปรูไลนาตัวอย่างละ 0.5 กรัม ทำการย่อยด้วยกรดไนตริกและกรดเปอร์คลอริก ในอัตรา 3 ต่อ 1 มิลลิลิตร ให้ความร้อน 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปกรอง ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS และ ICP–OES ได้ผลดังตารางที่ 4.14

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ใบพระบรมราชูปถัมภ์

ตารางที่ 4.14 ปริมาณตะกั่ว (ppm) ในอาหารเสริมจากสาหร่ายสไปรูไลนาตามท้องตลาด

ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย
	AAS	ICP-OES	AAS	ICP-OES	AAS	ICP-OES	AAS	ICP-OES
1	0.0051	0.152	0.0046	0.149	0.0058	0.147	0.0051	0.149
2	0.0046	0.147	0.0047	0.137	0.0058	0.142	0.0050	0.142

จากตารางที่ 4.14 พบว่าตัวอย่างของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ทำการตรวจวัดด้วย เครื่อง AAS และเครื่อง ICP-OES พบว่ามีปริมาณตะกั่วน้อยมาก และตัวอย่างที่ตรวจพบตะกั่วในปริมาณมากที่สุดคือ ตัวอย่างที่ 1 เท่ากับ ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของแคดเมียมในวารสารอาหารและยา พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่รับรอง

มหาวิทยาลัยราชภัฏวิทยาลัยอัลกุรอาน ในพระบรมราชูปถัมภ์

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยทำการศึกษาอิทธิพลของแคดเมียมและตะกั่วที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา โดยทำการเลี้ยงสาหร่ายที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่วแตกต่างกัน พบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมในอาหารตั้งแต่ 8 ppm สาหร่ายสไปรูไลนาตายและความเข้มข้นของตะกั่วในอาหาร 30 ppm สาหร่ายสไปรูไลนามีการเจริญเติบโตช้าเมื่อเพิ่มปริมาณขึ้นสาหร่ายสไปรูไลนาตาย ดังนั้นการเจริญเติบโตของสาหร่ายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่ว จึงทำการทดลองเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในอาหารในช่วง 0-4 ppm และความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารในช่วง 0-20 ppm และทำการตรวจสอบการเจริญเติบโต โดยการวัดความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสไปรูไลนาด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่วมากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสไปรูไลนาลดลง แต่ค่าความหนาแน่นของสาหร่ายไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ยังศึกษาการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วของาหร่ายสไปรูไลนาอีกด้วย

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนาที่ดูดซับด้วยเครื่อง AAS และเครื่อง ICP-OES พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแคดเมียมและตะกั่วลงในอาหารเลี้ยงสาหร่ายเพิ่มมากขึ้น ทำให้สาหร่ายดูดซับแคดเมียมและตะกั่วเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในการเลี้ยงสาหร่ายต้องไม่มีแคดเมียมและตะกั่วในบ่อเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาเพราะสาหร่ายสไปรูไลนาสามารถดูดซับแคดเมียมและตะกั่วได้

จากการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนาที่ขายตามท้องตลาด จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง AAS และเครื่อง ICP-OES พบว่าในการตรวจวัดด้วยเครื่อง AAS ไม่สามารถตรวจวัดหาปริมาณแคดเมียมได้ ส่วนเครื่อง ICP-OES สามารถตรวจพบแคดเมียมและตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนาทั้ง 2 ตัวอย่าง โดยพบว่าตัวอย่างที่ 1 มีปริมาณแคดเมียมน้อยกว่าตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 1 มีปริมาณตะกั่วมากกว่าตัวอย่างที่ 2 เมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาและสาหร่ายสไปรูไลนาที่ขายตามท้องตลาดนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในวารสารอาหารและยา พบว่าผลการวิเคราะห์ที่ตรวจพบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของแคดเมียมและตะกั่วที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา ซึ่งผลที่ได้พบว่าสาหร่ายสไปรูไลนาเจริญเติบโตดีในช่วงความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0-4 ppm และในช่วงความเข้มข้นของตะกั่ว 0-20 ppm และปริมาณแคดเมียมและตะกั่วที่ตรวจวัดได้ไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองถึงอิทธิพลของโลหะชนิดอื่นๆ ต่อไป

ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะควรใช้เครื่อง ICP-OES เพราะเครื่อง ICP-OES สามารถวัดปริมาณโลหะในหน่วย ppb ได้ ซึ่งถือว่าเป็นหน่วยที่มีปริมาณโลหะน้อยมากและสามารถตรวจวิเคราะห์โลหะได้หลายชนิดในเวลาเดียวกัน

มหาวิทยาลัยราชภัฏไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

บรรณานุกรม

กิตติ โพธิปีทมะ ไพรินทร์ กปิลานนท์ และสมโภชน์ น้อยจินดา. **การผลิตแคโรทีนอยด์ด้วยวิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา.** กรุงเทพฯ: ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร ม.เกษตรศาสตร์, 2545.

เจียมจิตต์ บุษสม วทม. ทัสนี สรสุชาติ ภ.บ., M.Agr(Fd.Tech). **ความลับของสาหร่ายเกลียวทอง** กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติจัดแปลและจักพิมพ์, 2531.

จุไรรัตน์ เกิดดอนแฝก, **ภัยมืดจากสารพิษ**, สำนักอนามัยกรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์เค.ยู.บุ๊คเซ็นเตอร์, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2531.

ณัฐฐา งามจินดาสกุล และสุภัทร์ จันทร์วรชัยกุล. **การผลิตและอายุการเก็บบิสกิตสาหร่ายสไปรูไลนา.** กรุงเทพฯ: สาขาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544.

ดนัย ลิมปดนัย. **ซึ่งค้นคว้ามาจากงานศึกษาของ Herikson 1997 และ Nakayama 1981.** กรุงเทพฯ, 2550.

ธิดา เพชรมณี. **คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน.** สงขลา: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง จังหวัดสงขลา, 2548.

นัทธีรา สรรมณี, **เคมีสิ่งแวดล้อม**, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2541.

ประกอบ บุญยงค์. **โลหะวิทยา 2** กรุงเทพฯ. ประกอบเมไตร, 2542.

ประเสริฐ คุจคา. **โลหะทั่วไป.** สถาบันราชภัฏนครปฐม. กรุงเทพฯ, 2542.

พิณทิพย์ น้อมไสว. (2541). **การศึกษากลไกควบคุมการสังเคราะห์ไฟโคไซยานินโดยแสงในระดับโมเลกุลของสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis* C1).** กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์เทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

พิพัฒน์ นพคุณ จินตนา กิจเจริญวงศ์ และสุธาทิพย์ วิทย์ชัยวุฒิวงศ์. **แคดเมียมในอาหารทะเล.** กรุงเทพฯ: วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2541.

เพ็ญจันทร์ วงศ์ทวีสุข **การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง** วิทยานิพนธ์ วท.ม. สายวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ,สจธ., 2533

มารศรี เรืองจิตชัชวาลย์ และบุษยา บุญนาค. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.

รักชนก มุสิกเจียรนันท์. **การเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทองในสภาวะกลางแจ้งเพื่อผลผลิตเซลล์ ไฟโคไซยานิน และกรดแกมม่าลิโนลินิค.** กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์ วท.ม.สายวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สจธ.98 หน้า, 2539.

รัตนา ชัยกล้าหาญ มารศรี เรืองจิตชัชวาล บุษยา บุนนาคการ และมรกต ตันติเจริญ. **เพาะเลี้ยง *Spirulina platensis* ด้วยน้ำหมักมูลไก่**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญ, 2545.

รุ่งนภา พิทักษ์ตันสกุล. **ความหลากหลายของสาหร่ายน้ำจืดในแหล่งน้ำยูโทรฟิคและสภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของ Microcystis aeruginosa Kutzing.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ, 2543

ลัดดา วงศ์รัตน์. **คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน.** คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2539

ลัดดา วงศ์รัตน์. **คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน.** คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2543

วรนันท์ ศุภพิพัฒน์. **อาหารโภชนาการและสารเป็นพิษ**, หน่วยโภชนาการเชิงการทดลอง ศูนย์วิจัย คณะแพทยศาสตร์ โรงพยาบาลรามาธิบดี มหาวิทยาลัยมหิดล: สำนักพิมพ์ แสงการพิมพ์, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2538

วันเพ็ญ ภูติจันทร์. **วิทยาสหร่าย (Phycology).** กรุงเทพฯ: ดอเดียนสโตร์, 2549

วุฒิพร พรหมขุนทอง และสิริพันธ์ วราภรณ์. **สไปรูลินา (*spirulina*) โปรตีนแหล่งใหม่ของมนุษย์.** สงขลา: ว.สงขลานครินทร์.8(1) : 99 -103, 2539.

สุชาดา ชินะจิตร. อันตรายจากสารเคมี. โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น): 2535

สุชาดา ชินะจิตร. **พิษภัยใกล้ตัว.** พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), 2545

สุมาลี ดุลยอนุกิจ. **ผลของระดับความเข้มข้นต่างๆ ของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในสูตรอาหาร Zarrouk ต่อการเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง (Spirulina sp).** กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์ วท.ม. วิทยาศาสตร์การประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 140 หน้า, 2536.

สิริผกา สุวรรณภูมิ. **Elemental Speciation by LC-ICP-MS เครื่องมือที่เหมาะ สำหรับงานวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อม**, LAB.TODAY, ปีที่ 3 ฉบับที่ 19 มิถุนายน 2547; 53-57

โอภาส คำฝึกฝน. **การศึกษาปริมาณโลหะหนัก (ตะกั่วและแคดเมียม) ในน้ำทิ้ง สาขามลพิษสิ่งแวดล้อม** คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี, 2546

CIFERRI, O. ***Spirulina*, the edible microorganism**. *Microbiol. Rev* 47:551-578 **1983**.

Delpeuch F,et al. **Consumption as food and nutritional composition of blue green algae among populations in the Kanem region of Chad**. Ann. Nutr. Aliment. 1976

Fadoul L. Les algues bleues du Kanem. **Rapport de mission par L Fadoul**, A Avrem et G Le Guedes (experts de la division de la nutrition, FAO). 1971

Fox, D. **Health benefits of *Spirulina* and proposal for a nutrition test on children suffering from kwashiorkor and marasmus**. In: Doumengue, F., Durand-Chastel, H., Toulemont, A., Eds.*Spiruline* alguedevie. Bulletin de l'Institut Océanographique Monaco, Musée Océanographique. Numéro spécial 12:179-185 1993.

Nakamura H., ***Spirulina*: Food for a Hungry World, a Pioneer's Story in Aquaculture**, California : University of the Tree Press, 1982.

Richmond, A. **In CRC Handbook of Microalgal Cultuer (edited by Richmond, A.)**, CRC press, Inc., Boca Raton, Florida,p. 1986

Venkataraman LV. **A monograph on spilurina platensis-biotechnology and application**. New Delhi : Dept. of Science and Technology. 1983.

Trainor,F.R. **Introductory Phycology.John Wiley & Sons Ino.**, New York. 1978

ภาคผนวก

1. การกำหนดคุณภาพหรือมาตรฐานของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ใช้เป็นอาหารเสริม ตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุข

ตารางที่ ก.1 คุณภาพหรือมาตรฐานของอาหารเสริมจากสาหร่ายสไปรูไลนา

ตัวอย่าง	ปริมาณสูงสุดที่ให้มีได้ (ppm)			
	Lead	Mercury	Cadmium	Arsenic
Aquatic Animals	-	น้อยกว่า 1.0	-	-
Single Cell Protein	น้อยกว่า 5.0 ppm	น้อยกว่า 0.1 ppm	น้อยกว่า 1.0 ppm	น้อยกว่า 2.0 ppm
Chlorella	น้อยกว่า 20 ppm			
Spirulina	น้อยกว่า 20 ppm			น้อยกว่า 2.0 ppm

ที่มา (วารสารอาหารและยา : 2549)

ตารางที่ ก.2 ปริมาณโลหะตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนา วัดค่า 3 ครั้ง โดยเทคนิค AAS

ครั้งที่	ความเข้มข้นสารละลายตะกั่ว	ปริมาณโลหะตะกั่ว (ppm)			ค่าเฉลี่ย (ppm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	4 ppm	0.0027	0.0036	0.0029	0.0031
	8 ppm	0.0064	0.0065	0.0064	0.0064
	12 ppm	0.0065	0.0071	0.0059	0.0065
	16 ppm	0.0062	0.0059	0.0065	0.0062
	20 ppm	0.0085	0.0079	0.0085	0.0083
2	4 ppm	0.0029	0.0025	0.0034	0.0029
	8 ppm	0.0078	0.0076	0.0077	0.0077
	12 ppm	0.0074	0.0076	0.0074	0.0074
	16 ppm	0.0069	0.0065	0.0067	0.0067
	20 ppm	0.0085	0.0079	0.0085	0.0083

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ในพระบรมราชูปถัมภ์

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

ครั้งที่	ความเข้มข้นสารละลายตะกั่ว	ปริมาณโลหะตะกั่ว (ppm)			ค่าเฉลี่ย (ppm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
3	4 ppm	0.0032	0.0027	0.0031	0.0030
	8 ppm	0.0084	0.0090	0.0085	0.0086
	12 ppm	0.0078	0.0076	0.0077	0.0077
	16 ppm	0.0070	0.0064	0.0069	0.0067
	20 ppm	0.0106	0.0105	0.0109	0.0106

ตารางที่ ก.3 ปริมาณโลหะตะกั่วในสาหร่ายสไปรูไลนา วัดค่า 3 ครั้ง โดยเทคนิค ICP-OES

ครั้งที่	ความเข้มข้นสารละลายตะกั่ว	ปริมาณโลหะตะกั่ว (ppm)			ค่าเฉลี่ย (ppm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	4 ppm	0.220	0.253	0.195	0.222
	8 ppm	0.231	0.260	0.203	0.231
	12 ppm	0.378	0.383	0.379	0.380
	16 ppm	1.711	1.710	1.712	1.711
	20 ppm	0.930	0.934	0.938	0.934
2	4 ppm	0.192	0.197	0.195	0.194
	8 ppm	0.658	0.668	0.669	0.665
	12 ppm	1.027	1.035	1.038	1.033
	16 ppm	1.178	1.184	1.192	1.184
	20 ppm	1.705	1.728	1.716	1.716
3	4 ppm	0.189	0.177	0.199	0.188
	8 ppm	0.890	0.892	0.895	0.892
	12 ppm	1.440	1.443	1.441	1.441
	16 ppm	1.247	1.252	1.249	1.249
	20 ppm	2.118	2.115	2.112	2.118

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

ตารางที่ ก.4 ปริมาณโลหะแคดเมียมในสาหร่ายสไปรูไลนา วัดค่า 3 ครั้ง โดยเทคนิค AAS

ครั้งที่	ความเข้มข้นสารละลายแคดเมียม	ปริมาณแคดเมียม(ppm)			ค่าเฉลี่ย (ppm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	0 ppm	0.0005	0.0019	0.0017	0.0014
	1 ppm	0.0037	0.0043	0.0046	0.0042
	2 ppm	0.0110	0.0120	0.0120	0.0120
	3 ppm	0.0045	0.0041	0.0054	0.0047
	4 ppm	0.0177	0.0188	0.0181	0.0182
2	0 ppm	0.0005	0.0019	0.0017	0.0014
	1 ppm	0.0099	0.0087	0.0075	0.0087
	2 ppm	0.0170	0.0150	0.0170	0.0170
	3 ppm	0.0068	0.0066	0.0057	0.0064
	4 ppm	0.0369	0.0373	0.0393	0.0378
3	0 ppm	0.0005	0.0019	0.0017	0.0014
	1 ppm	0.0063	0.0054	0.0067	0.0061
	2 ppm	0.0110	0.0120	0.0110	0.0110
	3 ppm	0.0063	0.0062	0.0069	0.0064
	4 ppm	0.0189	0.0188	0.0182	0.0186

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น

ตารางที่ ก.5 ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสไปรูไลนา วัดค่า 3 ครั้ง โดยใช้เครื่อง ICP-OES

ครั้งที่	ความเข้มข้นสารละลายแคดเมียม	ปริมาณแคดเมียม(ppm)			ค่าเฉลี่ย (ppm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	0 ppm	0.002	0.002	0.002	0.002
	1 ppm	0.0270	0.0030	0.0210	0.0170
	2 ppm	0.0040	0.0330	0.0450	0.0270
	3 ppm	0.0150	0.0320	0.0690	0.0380
	4 ppm	0.1090	0.2520	0.3760	0.2450
2	0 ppm	0.0005	0.0019	0.0017	0.0014
	1 ppm	0.0099	0.0087	0.0075	0.0087
	2 ppm	0.0170	0.0150	0.0170	0.0170
	3 ppm	0.0068	0.0066	0.0057	0.0064
	4 ppm	0.0369	0.0373	0.0393	0.0378
3	0 ppm	0.0005	0.0019	0.0017	0.0014
	1 ppm	0.0063	0.0054	0.0067	0.0061
	2 ppm	0.0110	0.0120	0.0110	0.0110
	3 ppm	0.0063	0.0062	0.0069	0.0064
	4 ppm	0.0189	0.0188	0.0182	0.0186

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ใบพรรณ ปรีชาญาณ