

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายดูนาเลียเอลลา *Dunaliella salina* ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ
เพื่อการผลิตเบตาแคโรทีน



นายนรินทร์ ธำรงถนัณฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางชีวภาพ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2540

ISBN 974-638-455-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**CULTIVATION OF *Dunaliella salina* IN BIOREACTOR
FOR β -CAROTENE PRODUCTION**

Mr. NARIN THARATABHAND

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Biotechnology**

Program of Biotechnology

Graduate School

Chulalongkorn University

1997

ISBN 974-638-455-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพาะเลี้ยงสาหร่ายดุนาลิเอลลา (*Dunaliella salina*) ด้วยเครื่อง
 ปฏิกรณ์ชีวภาพเพื่อการผลิตเบตาแคโรทีน
โดย นายนรินทร์ ธารัตถพันธ์
ภาควิชา เทคโนโลยีทางชีวภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

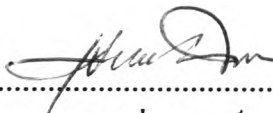


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

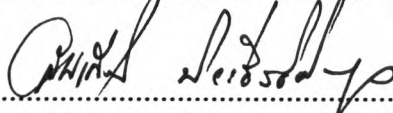
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ปุณณะพยัคฆ์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ปิยะธีรธิตวิตรกุล)



..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ไทยถาวร เลิศวิทยาประสิทธิ์)

นรินทร์ ธารัตตพันธุ์ : การเพาะเลี้ยงสาหร่ายดุนาลิเอลลา *Dunaliella salina* ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ
เพื่อการผลิตเบตาแคโรทีน (CULTIVATION OF *DUNALIELLA SALINA* IN BIOREACTOR FOR
BETA-CAROTENE PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษา : ศ. ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต
133 หน้า. ISBN 974-638-455-4

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายดุนาลิเอลลา (*Dunaliella salina*) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพขนาดเล็กเพื่อการผลิตเบตาแคโรทีน แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ 1) การทดลองเพื่อหาภาวะเหมาะสมในการเจริญของสาหร่ายดุนาลิเอลลาในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพขนาดเล็ก 2) การทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายดุนาลิเอลลาแบบเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous harvesting) ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพขนาดเล็ก

การทดลองเพื่อหาภาวะเหมาะสมทำโดยการปรับเปลี่ยนความเค็ม ความเข้มแสง คาบการให้แสงในรอบวัน ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอัตราการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้อาหารเลี้ยงสาหร่ายตามสูตร J/1 พบว่าความเค็ม 220 ppt ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ คาบการให้แสงในรอบวันแบบ 12:12 ชั่วโมง (สว่าง:มืด) ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.5 และอัตราการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายดุนาลิเอลลาด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพขนาดเล็ก โดยจะให้ผลผลิตและปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ดีที่สุด กล่าวคือ 35.73 pg/cell

การทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายดุนาลิเอลลาแบบเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่อง แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ 1) การเก็บเกี่ยวผลผลิตโดยกำหนดปริมาตรการเก็บที่แน่นอน 2) การทดลองเพาะเลี้ยงโดยใช้มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญจำเพาะและค่าร้อยละของการเก็บเกี่ยว การเก็บเกี่ยวผลผลิตโดยกำหนดปริมาตรที่แน่นอนทำโดยการปรับเปลี่ยนปริมาตรการเก็บ 6 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ของปริมาตรทั้งหมด พบว่าปริมาตรการเก็บเกี่ยวร้อยละ 30 ของปริมาตรทั้งหมด เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องแบบกำหนดปริมาตรการเก็บที่แน่นอน โดยจะให้ผลผลิตและปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ดีที่สุด กล่าวคือ 26.96 pg/cell

การทดลองเพาะเลี้ยงโดยใช้มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญจำเพาะและค่าร้อยละของการเก็บเกี่ยว แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ 1) การเก็บเกี่ยวผลผลิตแบบทุกวัน 2) การเก็บเกี่ยวผลผลิตแบบทุก 2 วัน พบว่าการเจริญ และการเก็บเกี่ยวผลผลิตแบบทุกวันและทุกสองวันของสาหร่ายดุนาลิเอลลาสอดคล้องกับเวลาการแบ่งเซลล์เป็นสองเท่า และสามารถยืนยันความน่าเชื่อถือและความถูกต้องของมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญจำเพาะและค่าร้อยละของการเก็บเกี่ยวได้ โดยการเก็บเกี่ยวผลผลิตทั้งแบบทุกวันและทุกสองวันสามารถรักษาระดับการผลิตให้คงที่ได้ทั้งผลผลิตและปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ 30.91 และ 32.74 pg/cell ตามลำดับ

ภาควิชา
สาขาวิชา เทคโนโลยีทางชีวภาพ
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C726909 : MAJOR BIOTECHNOLOGY

KEY WORD: *DUNALIELLA SALINA* / BIOREACTOR / CULTURE / BETA-CAROTENE

NARIN THARATABHAND : CULTIVATION OF *DUNALIELLA SALINA* IN BIOREACTOR FOR BETA-CAROTENE PRODUCTION.

THESIS ADVISOR : PROF. PIAMSAK MENASVETA, Ph.D.

133 p. : ISBN 974-638-455-4

Cultivation of *Dunaliella salina* in bioreactor for beta-carotene production was carried out in 2 experiments, i.e. (1) to study the optimal conditions for growth and beta-carotene production, (2) to study the cultivation using semi-continuous harvesting method.

For first experiment, *D. salina* was cultured in J/1 medium by at varying of salinities, light intensities, diurnal cycles, pH levels and CO₂ flow rates. The results revealed that 220 ppt of salt concentration, 20,000 lux of light intensity, 12:12 hours (light:dark) of diurnal cycle, pH at 7.5 and 1.5 ml./min. CO₂ flow rate gave the higher production and carotenoid content (35.73 pg/cell).


In the second experiment, cultivation of *D. salina* using semi-continuous system was carried out in 2 sub-experiments, i.e. (1) fixed volume harvesting, (2) harvesting by using standard relationship between specific growth rate and percentage of harvesting. The objective of first sub-experiment was to find the optimal harvesting volume. *D. salina* was cultured in J/1 medium at varying of the harvesting volume in 6 levels i.e. 5, 10, 15, 20, 25 and 30 percent of total volume. The result indicated that the volume of harvesting at 30 percent of total volume gave the higher production and carotenoid content (26.96 pg/cell).

In the second sub-experiments, cultivation of *D. salina* by using standard relationship of specific growth rate and percentage of harvesting was carried out in 2 experiments, i.e. (1) everyday harvesting, (2) every 2 day harvesting. The result indicated that the growth and the everyday and every 2 day harvestings are accordance with the doubling time of cell and could be prove by the cultivation method. Both everyday and every 2 day harvestings are able to maintain the constant production levels of cell production and carotenoid contents (30.91 and 32.74 pg/cell, respectively).

ภาควิชา.....

สาขาวิชา..... เทคโนโลยีทางชีวภาพ

ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อนิสิต..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนแก่ผู้เขียนเพื่อใช้ในการศึกษาและงานวิจัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โดยโครงการเมธีวิจัยอาวุโส สกว. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยบางส่วน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีอันเนื่องมาจากการให้คำปรึกษา การให้ความคิดเห็น การชี้แนะ ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่แก้ไขปัญหามาจาก ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้เขียน ผู้ซึ่งเสียสละเวลา และเป็นกำลังใจอย่างดียิ่งตลอดมา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ปิยะธีรธิตวิรกุล ผู้ซึ่งช่วยให้คำแนะนำต่างๆ การดูแลเอาใจใส่ และกำลังใจที่ติดตลอดระยะเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.हरषा ปุณณะพยัคฆ์ ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ปิยะธีรธิตวิรกุล และอาจารย์ ดร.ไทยถาวร เลิศวิทยาประสิทธิ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าอย่างยิ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมกับให้ความคิดเห็นเสนอแนะ ตลอดจนช่วยตรวจสอบรายละเอียดต่างๆ ในวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณหัวหน้าภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาอำนวยความสะดวกในระหว่างการทำงานในห้องปฏิบัติการโดยตลอด

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ชวเดช ที่กรุณาอนุเคราะห์ในการออกแบบและอนุญาตให้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ และอาจารย์ ดร.อานนท์ สนิทวงศ์ ณ อยุธยา ที่กรุณาอนุเคราะห์อุปกรณ์เสริมเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ สำหรับการทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอด

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวิวงศ์ ศรีบุรี ที่กรุณาให้คำแนะนำพิเศษ รวมทั้งประสบการณ์ต่างๆ มาโดยตลอด

ขอขอบคุณคุณสรวิศ เผ่าทองสุข และคุณทรงกฤษณ์ ประภักดิ์ สำหรับโอกาสที่ดีในชีวิตที่มอบให้ผู้เขียน รวมถึงการให้คำปรึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ๆ นักวิจัย เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคน ที่ร่วมทำงานในโรงเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล รวมถึงผู้ที่มีได้กล่าวนามข้างต้นทุกๆ ท่านที่คอยให้กำลังใจในระหว่างทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณน้ำและคุณยาย สำหรับการสนับสนุนและกำลังใจอันสำคัญและยิ่งใหญ่แก่ผู้เขียน จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีทุกประการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฅ

บทที่

1	บทนำ	1
2	การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
3	อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	22
4	ผลการทดลอง	37
5	วิจารณ์ผลการทดลอง	88
6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	98
	รายการอ้างอิง.....	100
	ภาคผนวก ก.....	105
	ภาคผนวก ข.....	112
	ภาคผนวก ค.....	113
	ภาคผนวก ง	114
	ภาคผนวก จ.....	115
	ภาคผนวก ฉ.....	116
	ภาคผนวก ช.....	126
	ประวัติผู้เขียน	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ฉ-1 ความหนาแน่นเซลล์สำหรับยาดูนาลีเอลลาหลังจากคำนวณด้วย สมการการเก็บเกี่ยวผลผลิตทุกวัน.....	117
ฉ-2 ความหนาแน่นเซลล์สำหรับยาดูนาลีเอลลาหลังจากคำนวณด้วย สมการการเก็บเกี่ยวผลผลิตทุกสองวัน	122

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนผังแสดงอนุกรมวิธานของสาหร่ายดูนาเลียเอลลา (<i>Dunaliella salina</i>) 5
2.2	ลักษณะของสาหร่ายดูนาเลียเอลลาชนิดต่าง ๆ..... 6
2.3	รูปร่างสาหร่ายดูนาเลียเอลลา (<i>Dunaliella salina</i>) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 8
2.4	สูตรโครงสร้างของเบตาแคโรทีนทั้งชนิด all-trans และ 9-cis beta-carotene 14
2.5	ผังแนวทาง (pathway) ขั้นตอนการสังเคราะห์เบตาแคโรทีนทั้งชนิด all-trans และ 9-cis beta-carotene ในสาหร่ายดูนาเลียเอลลา 17
3.1	แผนผังระบบการทำงานและส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 26
3.2	กราฟมาตรฐานการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายดูนาเลียเอลลาทั้งต่อเนื่อง แบบเก็บเกี่ยวทุกวัน 35
3.3	กราฟมาตรฐานการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายดูนาเลียเอลลาทั้งต่อเนื่อง แบบเก็บเกี่ยวทุกสองวัน 35
4.1	การเจริญของสาหร่ายดูนาเลียเอลลาในภาวะความเค็มระดับต่าง ๆ 38
4.2	อัตราการเจริญเฉลี่ยของสาหร่ายดูนาเลียเอลลาในภาวะความเค็มระดับต่าง ๆ 39
4.3	ปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ยของสาหร่ายดูนาเลียเอลลาที่เจริญในความเค็ม ระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่ 40
4.4	ปริมาณคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดูนาเลียเอลลาที่เจริญในความเค็ม ระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่ 41
4.5	สัดส่วนปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดูนาเลียเอลลา ที่เจริญในความเค็มระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่ 42
4.6	การเจริญของสาหร่ายดูนาเลียเอลลาในภาวะความเข้มแสงระดับต่าง ๆ 44
4.7	อัตราการเจริญเฉลี่ยของสาหร่ายดูนาเลียเอลลาในภาวะความเข้มแสงระดับต่าง ๆ 45
4.8	ปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ยของสาหร่ายดูนาเลียเอลลาที่เจริญใน ความเข้มแสงระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่ 46
4.9	ปริมาณคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดูนาเลียเอลลาที่เจริญใน ความเข้มแสงระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่ 47
4.10	สัดส่วนปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดูนาเลียเอลลา ที่เจริญในความเข้มแสงระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่ 48

รูปที่	หน้า
4.11	การเจริญของสาหร่ายดุนาไลเอลลาในภาวะการให้คาบแสงระดับต่าง ๆ 50
4.12	อัตราการเจริญเฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาในภาวะการให้คาบแสงระดับต่าง ๆ51
4.13	ปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เจริญในภาวะการให้คาบแสงระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่..... 52
4.14	ปริมาณคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เจริญในภาวะการให้คาบแสงระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่..... 53
4.15	สัดส่วนปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เจริญในภาวะการให้คาบแสงระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่..... 54
4.16	ระดับ pH ที่เปลี่ยนแปลงในรอบวัน ขณะทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายดุนาไลเอลลาเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีเซลล์สาหร่าย (ไม่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) 56
4.17	การเจริญของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เจริญในภาวะ pH เริ่มต้นระดับต่าง ๆ 58
4.18	อัตราการเจริญเฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาในภาวะ pH เริ่มต้นระดับต่าง ๆ 59
4.19	ปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เจริญใน ภาวะ pH เริ่มต้นระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่ 60
4.20	ปริมาณคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เจริญใน ภาวะ pH เริ่มต้นระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่ 61
4.21	สัดส่วนปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เจริญในภาวะ pH เริ่มต้นระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และคงที่..... 62
4.22	ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงในรอบวันของระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายดุนาไลเอลลาภายในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ ที่ภาวะการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1.5 มิลลิลิตรต่ออนาที 64
4.23	ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงในรอบวันของระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายดุนาไลเอลลาภายในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ ภายหลังจากหยุดให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระดับ 1.5 มิลลิลิตรต่ออนาที 65
4.24	การเจริญของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เพาะเลี้ยงในระบบที่มีการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศระดับต่าง ๆ..... 67
4.25	อัตราการเจริญเฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เพาะเลี้ยงในภาวะการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระดับต่าง ๆ..... 68
4.26	ปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เพาะเลี้ยงในระบบที่มีการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และแบบคงที่..... 69

รูปที่	หน้า
4.27 ปริมาณคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เพาะเลี้ยงในระบบที่มีการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และแบบคงที่.....	70
4.28 สัดส่วนปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เพาะเลี้ยงในระบบที่มีการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับอากาศระดับต่าง ๆ ในช่วงการเจริญแบบทวีคูณ และแบบคงที่.....	71
4.29 การเจริญและการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เจริญในระบบเพาะเลี้ยงแบบกำหนดปริมาตรการเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องที่แน่นอน	73
4.30 อัตราการเจริญเฉลี่ยของสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เพาะเลี้ยงแบบกำหนดปริมาตรการเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องที่แน่นอน	74
4.31 ร้อยละของการเก็บเกี่ยวสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เพาะเลี้ยงแบบกำหนดปริมาตรการเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องที่แน่นอน	75
4.32 ปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เพาะเลี้ยงแบบกำหนดปริมาตรการเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องที่แน่นอน.....	77
4.33 ปริมาณคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เพาะเลี้ยงแบบกำหนดปริมาตรการเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องที่แน่นอน.....	78
4.34 สัดส่วนปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เพาะเลี้ยงแบบกำหนดปริมาตรการเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องที่แน่นอน.....	79
4.35 การเจริญและการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เพาะเลี้ยงเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องโดยใช้มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญจำเพาะและค่าร้อยละของการเก็บเกี่ยวแบบเก็บเกี่ยวทุกวัน	81
4.36 การเจริญและการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เพาะเลี้ยงเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องโดยใช้มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญจำเพาะและค่าร้อยละของการเก็บเกี่ยวแบบเก็บเกี่ยวผลผลิตทุกสองวัน	82
4.37 อัตราการเจริญเฉลี่ยของสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เพาะเลี้ยงเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องโดยใช้มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญจำเพาะและค่าร้อยละของการเก็บเกี่ยวแบบเก็บเกี่ยวผลผลิตทุกวันและทุกสองวัน	83
4.38 ร้อยละ (ต่อวัน) ของการเก็บเกี่ยวสาหร่ายดุนาเลียเอลลาที่เพาะเลี้ยงเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องโดยใช้มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญจำเพาะและค่าร้อยละของการเก็บเกี่ยวแบบเก็บเกี่ยวผลผลิตทุกวันและทุกสองวัน.....	84

รูปที่	หน้า
4.39 ปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เพาะเลี้ยงเก็บเกี่ยว ผลผลิตกึ่งต่อเนื่องโดยใช้มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญจำเพาะ และค่าร้อยละของการเก็บเกี่ยวแบบเก็บเกี่ยวผลผลิตทุกวันและทุกสองวัน	85
4.40 ปริมาณคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลาที่เพาะเลี้ยงเก็บเกี่ยว ผลผลิตกึ่งต่อเนื่องโดยใช้มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญจำเพาะ และค่าร้อยละของการเก็บเกี่ยวแบบเก็บเกี่ยวผลผลิตทุกวันและทุกสองวัน	86
4.41 สัดส่วนปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อคลอโรฟิลล์เฉลี่ยของสาหร่ายดุนาไลเอลลา ที่เพาะเลี้ยงเก็บเกี่ยวผลผลิตกึ่งต่อเนื่องโดยใช้มาตรฐานความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราการเจริญจำเพาะและค่าร้อยละของการเก็บเกี่ยวแบบเก็บเกี่ยว ผลผลิตทุกวันและทุกสองวัน	87