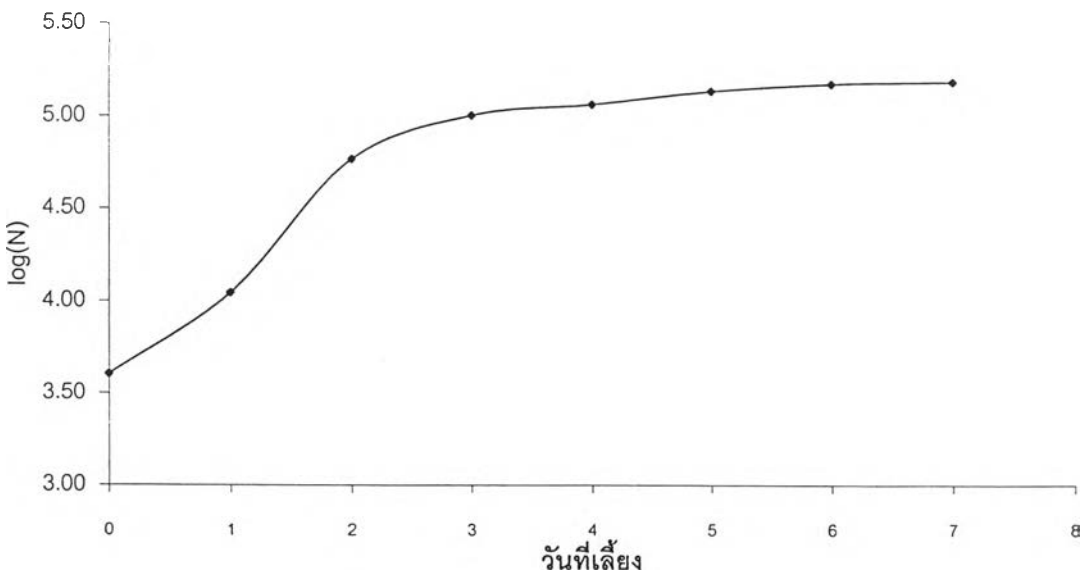
บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1.หาความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้นเพื่อกำหนดจุดเริ่มให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถังปฏิกรณ์ 15 ลิตร

เนื่องจากในสารอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลานั้นมีการเจือปนของคาร์บอน พบว่าอยู่ในรูป Free CO_2 ประมาณ 50 mg CO_2/ml และอยู่ในรูปของ Total Alkalinity ประมาณ 19 mg $CaCO_3$/ml ดังนั้นจึงได้ทำการเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลาด้วยสูตรสารอาหาร NS III ดังภาคผนวก ก ที่ภาวะ ความเข้มแสง 3000 ลักซ์ ความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที ความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นประมาณ 3000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เลี้ยงที่อุณหภูมิห้องโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ช่วงแรกยังไม่ให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลงในถังปฏิกรณ์ เพื่อให้สาหร่ายใช้คาร์บอนในสารอาหารก่อน เมื่อการเติบโตของสาหร่ายเริ่มคงที่ จึงเริ่มให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 พบว่าเซลล์สาหร่ายคลอเรลลาจะเริ่มเข้าสู่ช่วง Stationary phase เมื่อความหนาแน่นเซลล์ประมาณ 100,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ใช้เวลาเลี้ยงประมาณ 3 วัน จึงเริ่มให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



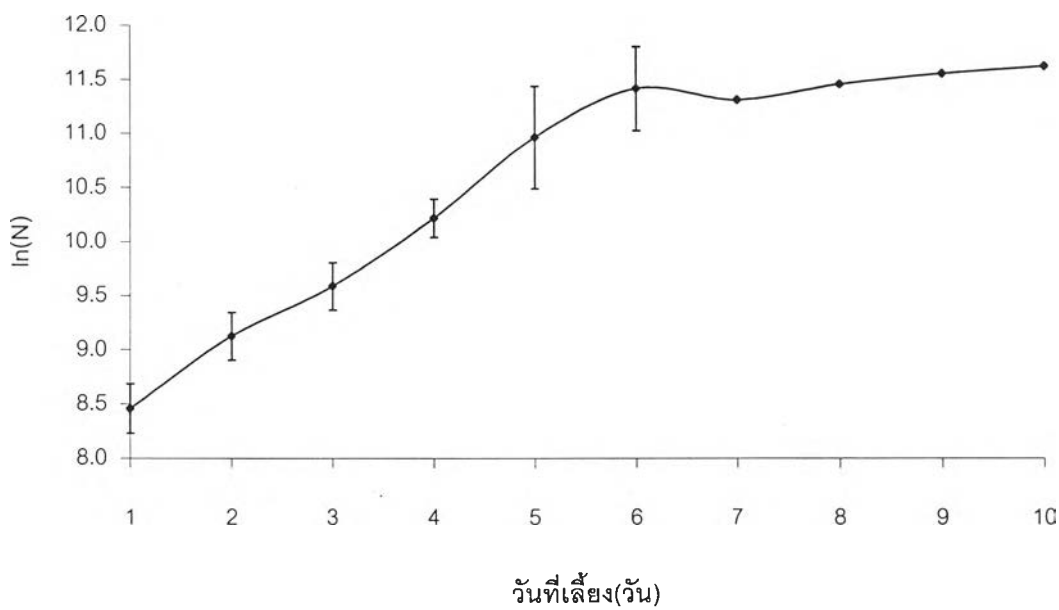
รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเมื่อยังไม่ให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

4.2.การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา เมื่อยังไม่มีการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

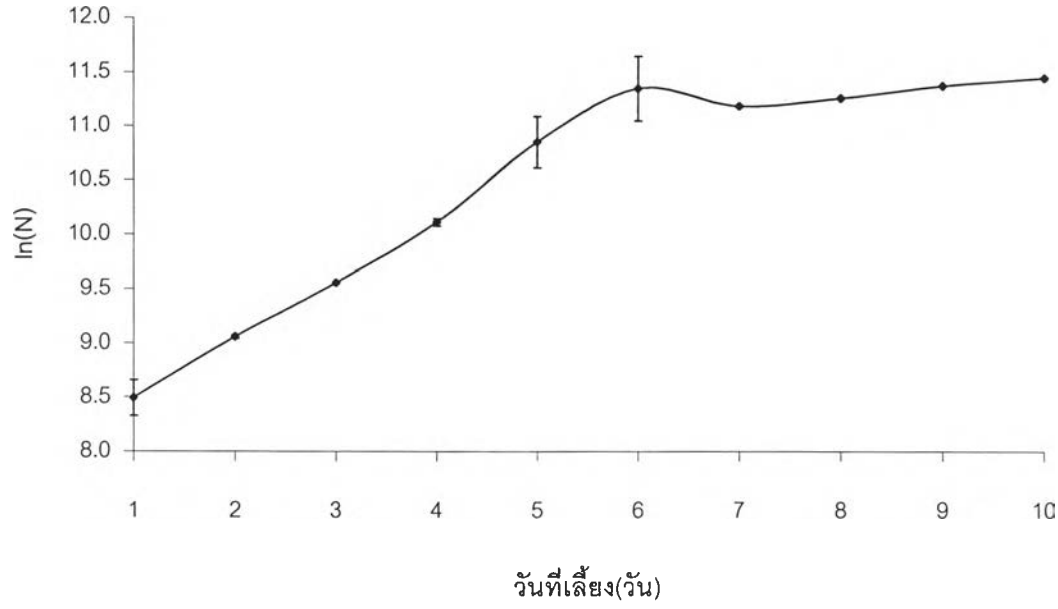
ทำการเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลาด้วยสูตรสารอาหาร NS III ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ใช้ความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นประมาณ 3,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยเปลี่ยนแปลงตัวแปร ดังตารางที่ 4.1 เพื่อทดสอบผลกระทบอันเนื่องจากตัวแปรความเข้มแสงและอัตราการกวนว่ามีผลต่อการเติบโตของสาหร่าย โดยเลี้ยงสาหร่ายจนความหนาแน่นของเซลล์มีค่าเท่ากับ 100,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จึงเริ่มให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลงในถังปฏิกรณ์

ตารางที่ 4.1 การทดสอบผลของแสงและอัตราการกวนต่อการเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา

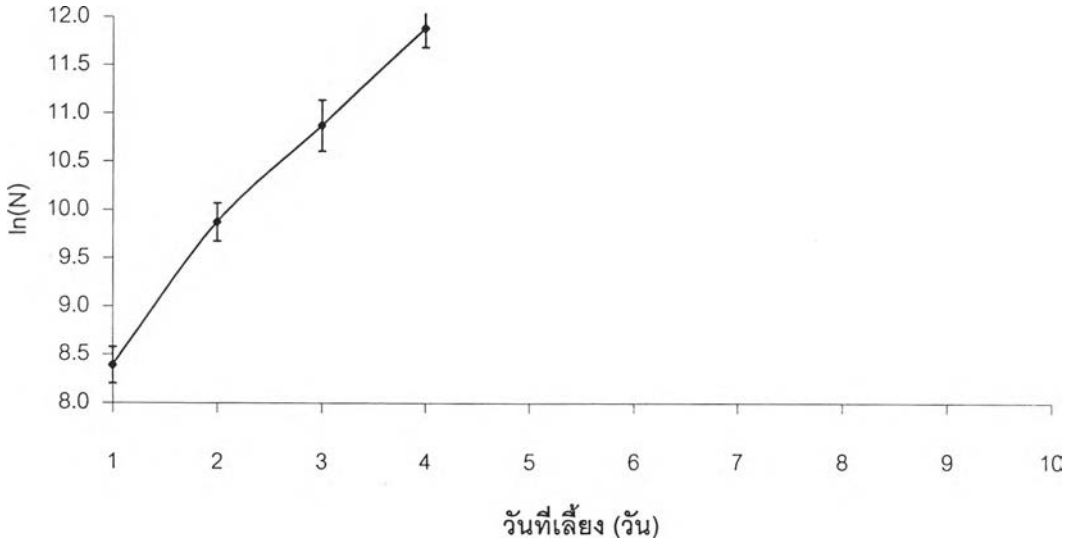
ความเข้มแสง (lux)	ความเร็วรอบการกวน (rpm)
1000	100
1000	200
3000	100
3000	200



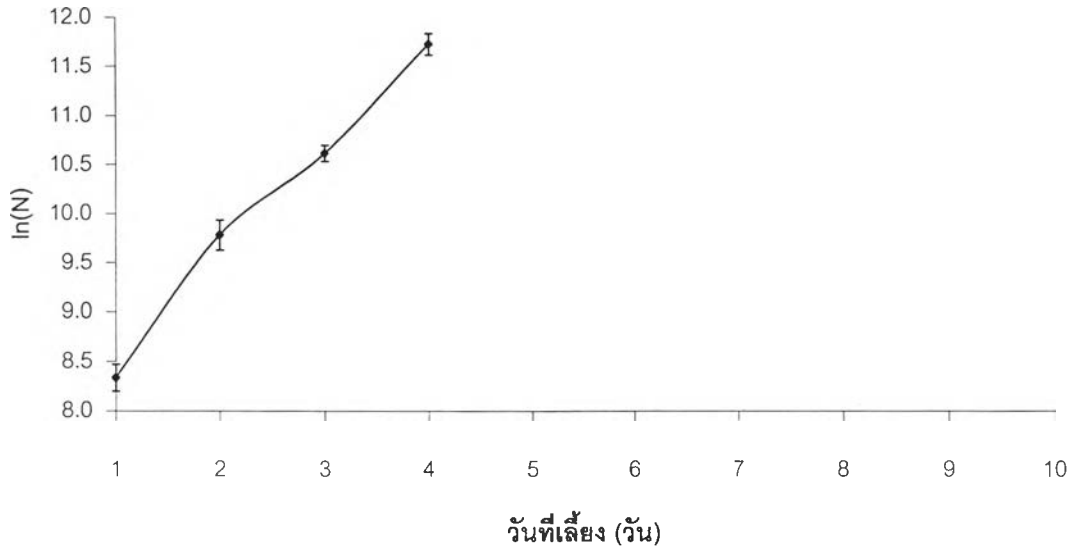
รูปที่ 4.2 จำนวนสาหร่ายคลอเรลลาเลี้ยงที่ภาวะความเข้มแสง 1000 ลักซ์ ความเร็วรอบการกวน 100 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.3 จำนวนสาหร่ายคลอเรลลาที่ภาวะความเข้มแสง 1000 ลักซ์ ความเร็วรอบการกวน 200 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.4 จำนวนสาหร่ายคลอเรลลาที่ภาวะความเข้มแสง 3000 ลักซ์ ความเร็วรอบการกวน 100 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.5 จำนวนสาหร่ายคลอเรลลาที่ภาวะความเข้มแสง 3000 ลักซ์ ความเร็วรอบการกวน 200 รอบต่อนาที

ผลการเลี้ยงสาหร่ายที่ความเข้มแสง 1000 ลักซ์ ความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.2 และผลที่ความเข้มแสง 1000 ลักซ์ ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.3 จากรูปทั้งสองพบว่า ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายมีค่าประมาณ 100,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 9 วัน

สำหรับผลการเลี้ยงสาหร่ายที่ความเข้มแสง 3000 ลักซ์ ความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และ ผลที่ความเข้มแสง 3000 ลักซ์ ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที แสดงไว้ดังรูปที่ 4.5 รูปทั้งสองแสดงว่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเท่ากับ 100,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ภายในเวลาเพียง 3 วัน

จากการทดลองทั้ง 4 ชุด นี้จะเห็นสาหร่ายเติบโตได้ดีมากในภาวะที่ความเข้มแสงสูง ผลการทดลองจากรูปที่ 4.2 – 4.5 ถูกนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตสูงสุด เกิดขึ้นในกรณีของความเข้มแสง 3000 ลักซ์ และอัตราการกวน 100 รอบ/นาที ค่าสัมประสิทธิ์มีค่า 1.48 ซึ่งสัมประสิทธิ์นี้มีค่าสูงกว่า กรณีของความเข้มแสง 1000 ลักซ์ถึง 1 เท่า

ตารางที่ 4.2 ค่าประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่ายที่ภาวะต่าง ๆ

ความเข้มแสง (lux)	ความเร็วรอบการกวน (rpm)	ค่าประสิทธิ์การเติบโตของคลอเรลลา (day^{-1})
1000	100	0.7451
1000	200	0.7413
3000	100	1.4834
3000	200	1.4434

นำผลการทดลองจากตารางที่ 4.2 มาวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรอิสระต่อค่าประสิทธิ์การเติบโต โดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานที่ว่า

H_0 : ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีผลต่อค่าประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่าย

H_1 : ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อค่าประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่าย

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความเข้มของแสง , อัตราเร็วในการกวน

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นของค่าประสิทธิ์การเติบโตโดยการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและความเร็วรอบในการกวน

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.9997
R Square	0.9994
Adjusted R Square	0.9981
Standard Error	0.0181
Observations	4

ANOVA

	Df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	2	0.5191	0.2596	790.9875	0.0251
Residual	1	0.0003	0.0003		
Total	3	0.5195			

	Coefficients	*Standard Error*	*T Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*
Intercept	0.4160	0.0339	12.2740	0.0495	-0.0146	0.8466
I	3.6E-04	9.06E-06	39.7557	0.0160	0.0002	0.0005
V	-0.0002	0.0002	-1.2082	0.4401	-0.0026	0.0021

เมื่อ I คือความเข้มแสง

V คือความเร็วรอบในการกวน

จากตารางการกระจายแบบ F พบว่าค่าสถิติ F ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าค่าสถิติ F ที่เปิดจากตารางแสดงว่าสมมติฐาน H_0 ถูกปฏิเสธกล่าวคือ ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่ายที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบค่าสถิติและความน่าจะเป็นของค่าสถิติ T เพื่อทดสอบว่าควรจะใช้ค่าคงที่ และตัวแปรอิสระใดมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการและจะถูกใช้ในสมการพยากรณ์โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่าย

H_1 : ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่าย

การวิเคราะห์ทำโดยพิจารณาค่าสถิติ T-Stat จากการทดลองเทียบกับค่าที่เปิดจากตารางสถิติหรือค่าความน่าจะเป็น P-Value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในที่นี้จะวิเคราะห์จากค่าความน่าจะเป็นโดยเลือกค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ตามตารางที่ 4.3 พบว่า ตัวแปรความเข้มแสงกับค่า intercept มีค่าความน่าจะเป็นน้อยกว่า 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปสมการที่นำมาใช้ในการพยากรณ์ การตอบสนอง ได้ดังนี้ $\mu = 3.6E\text{-}04I + 0.4160$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่ายและ I คือ ความเข้มแสง

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่ายที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณ

ความเข้มแสง (lux)	ความเร็วรอบการกวน (rpm)	สัมประสิทธิ์การเติบโตจากการทดลอง (day^{-1})	สัมประสิทธิ์การเติบโตจากการคำนวณ (day^{-1})
1000	100	0.7451	0.7761
1000	200	0.7413	0.7761
3000	100	1.4834	1.4962
3000	200	1.4434	1.4962

จากผลการวิเคราะห์ตัวแปร เมื่อแทนค่าดังสมการ $\mu = 0.0003601I + 0.4159691$ เพื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่าย ดังตารางที่ 4.4 จะได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองเมื่อยังไม่มีการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ความเข้มของแสง

4.3.การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา เมื่อมีการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

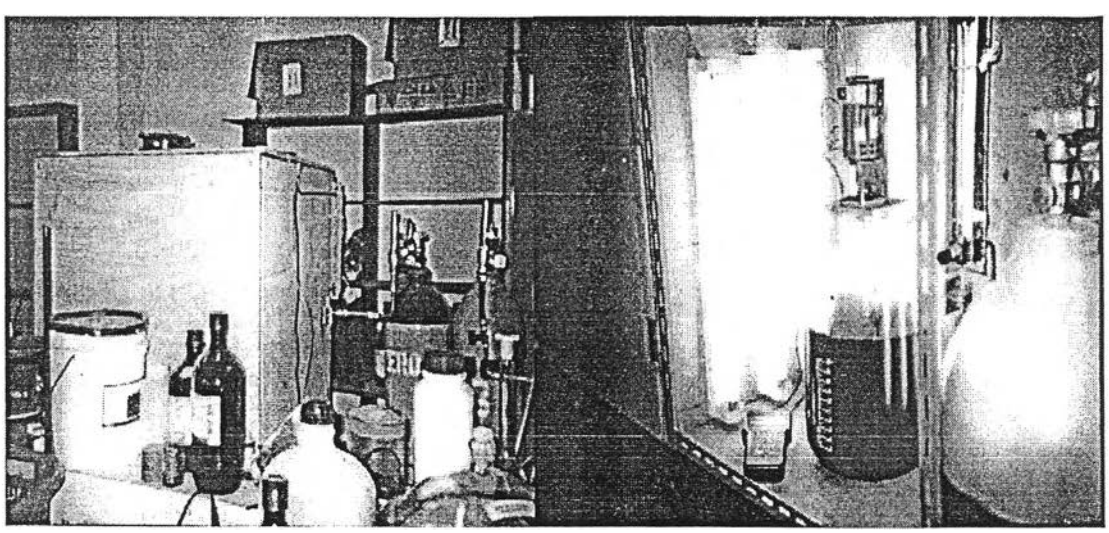
เมื่อได้ค่าความหนาแน่นของเซลล์เริ่มต้นที่จะเริ่มเลี้ยงโดยให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร แล้ว จึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา โดยที่จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือเพื่อจะหาภาวะที่เหมาะสมในการเลี้ยงคลอเรลลา โดยที่ต้องการใช้แก๊สที่ปล่อยมาจากการเผาไหม้ ซึ่งมีส่วนประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ประมาณ 10 – 20 % เพราะฉะนั้นจึงได้ทำการศึกษาตัวแปรของ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีความเข้มข้น 10% และ 20 % ตัวแปรตัวอื่น ๆ ที่ต้องการศึกษาได้แก่ อัตราการป้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยศึกษาที่อัตราการป้อน 6 และ 12 ลิตรต่อชั่วโมง, ความเข้มของแสงที่ 1,000 และ 3,000 ลักซ์, ความเร็วรอบในการกวน 100 และ 200 รอบต่อนาที

เนื่องจากตัวแปรที่ต้องการศึกษามีอยู่หลายตัวแปร และการทดลองแต่ละครั้งต้องใช้เวลานาน ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองแบบ Full Factorial ได้ ในการทดลองนี้จึงได้ทำการทดลองแบบ Two-Level Fractional Factorial ซึ่งจากการออกแบบการทดลองจะได้ชุดการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5

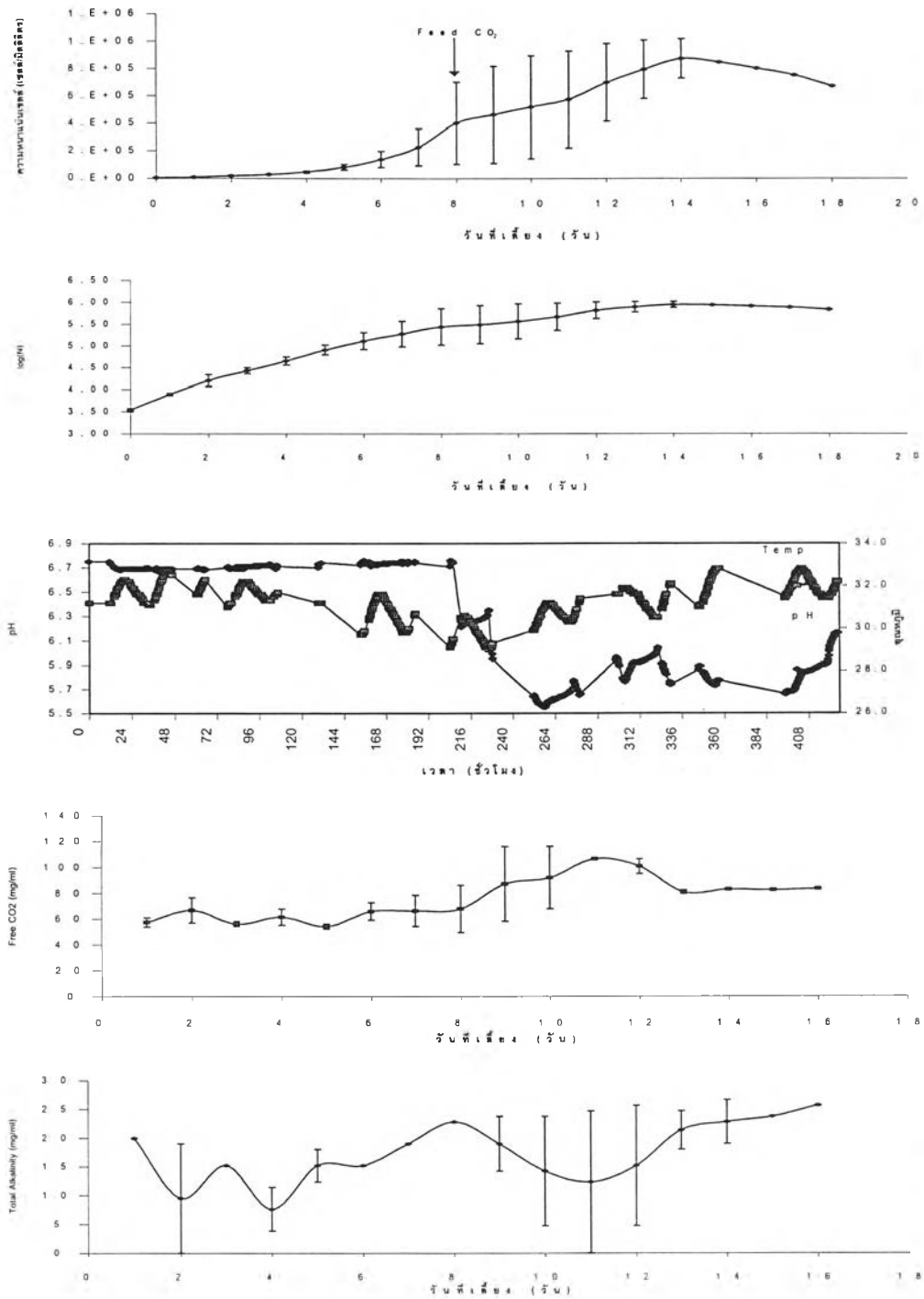
ตารางที่ 4.5 **แผนการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ** Two-Level Fractional Factorial

การทดลองที่	ความเข้มแสง (lux)	อัตราการป้อน CO_2 (L/hr)	ความเข้มข้น CO_2 (%)	ความเร็วรอบของการกวน (rpm)
R1	1000	6	10	100
R2	1000	12	10	200
R3	1000	6	20	200
R4	1000	12	20	100
R5	3000	6	10	200
R6	3000	12	10	100
R7	3000	6	20	100
R8	3000	12	20	200

โดยจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองดังรูปข้างล่าง



ได้ทำการทดลองเปลี่ยนภาวะการทดลองตามตารางที่ 4.5 ด้วยวิธีการสุ่มลำดับการทดลอง จะได้ผลดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 ถึง 4.13



รูปที่ 4.6 การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ที่ภาวะ ความเข้มแสง 1000 ลักซ์ ความเข้มข้น CO_2 10 % อัตราการป้อนแก๊สผสม CO_2 6 L/hr และความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที

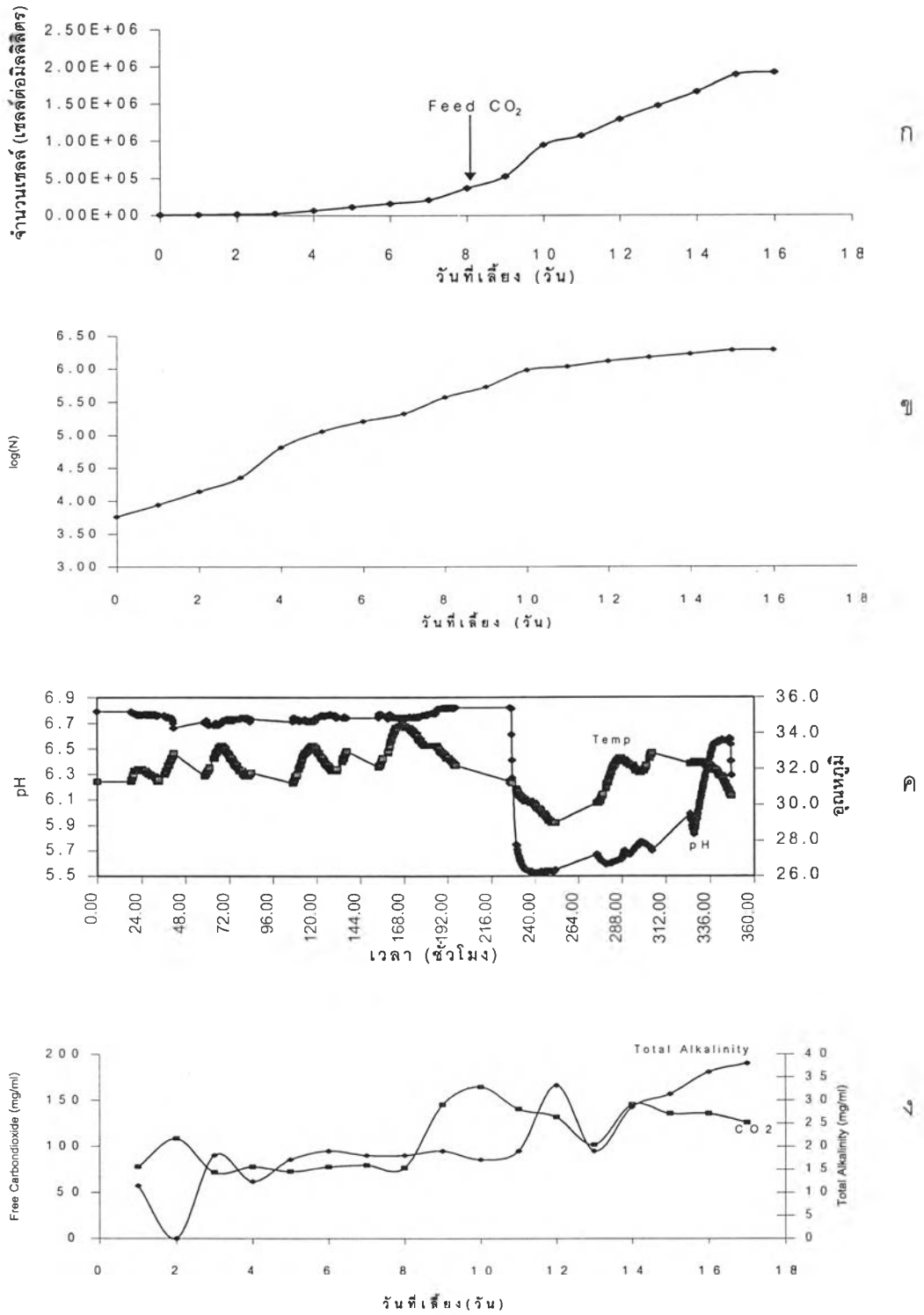
ก. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ณ. เวลาต่าง ๆ

ข. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ในรูป ลอกาลิทึม ณ. เวลาต่าง ๆ

ค. การเปลี่ยนแปลง pH และอุณหภูมิ ในถังปฏิกรณ์ ณ. ช่วงเวลาต่าง ๆ

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในถังปฏิกรณ์

จ. การเปลี่ยนแปลงค่าอัลคาลินิตีที่ละลายในถังปฏิกรณ์



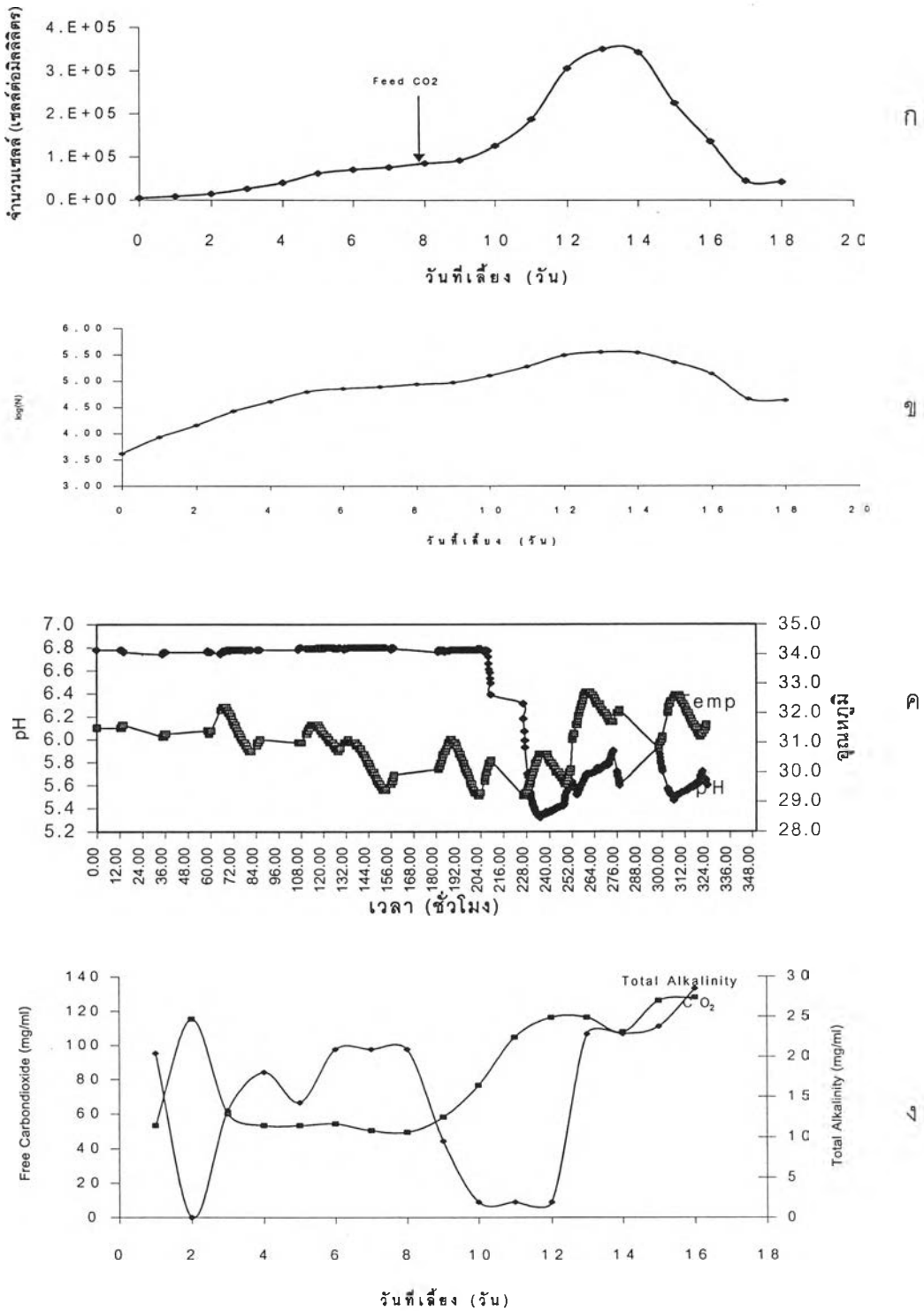
รูปที่ 4.7 การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ที่ภาวะ ความเข้มแสง 1000 ลักซ์ ความเข้มข้น CO_2 10 % อัตราการป้อนแก๊สผสม CO_2 12 L/hr และความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที

ก. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ณ. เวลาต่าง ๆ

ข. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ในรูป ลอกาลิทึม ณ. เวลาต่าง ๆ

ค. การเปลี่ยนแปลง pH และอุณหภูมิ ในถังปฏิกรณ์ ณ. ช่วงเวลาต่าง ๆ

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าอัลคาลินิตีและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในถังปฏิกรณ์



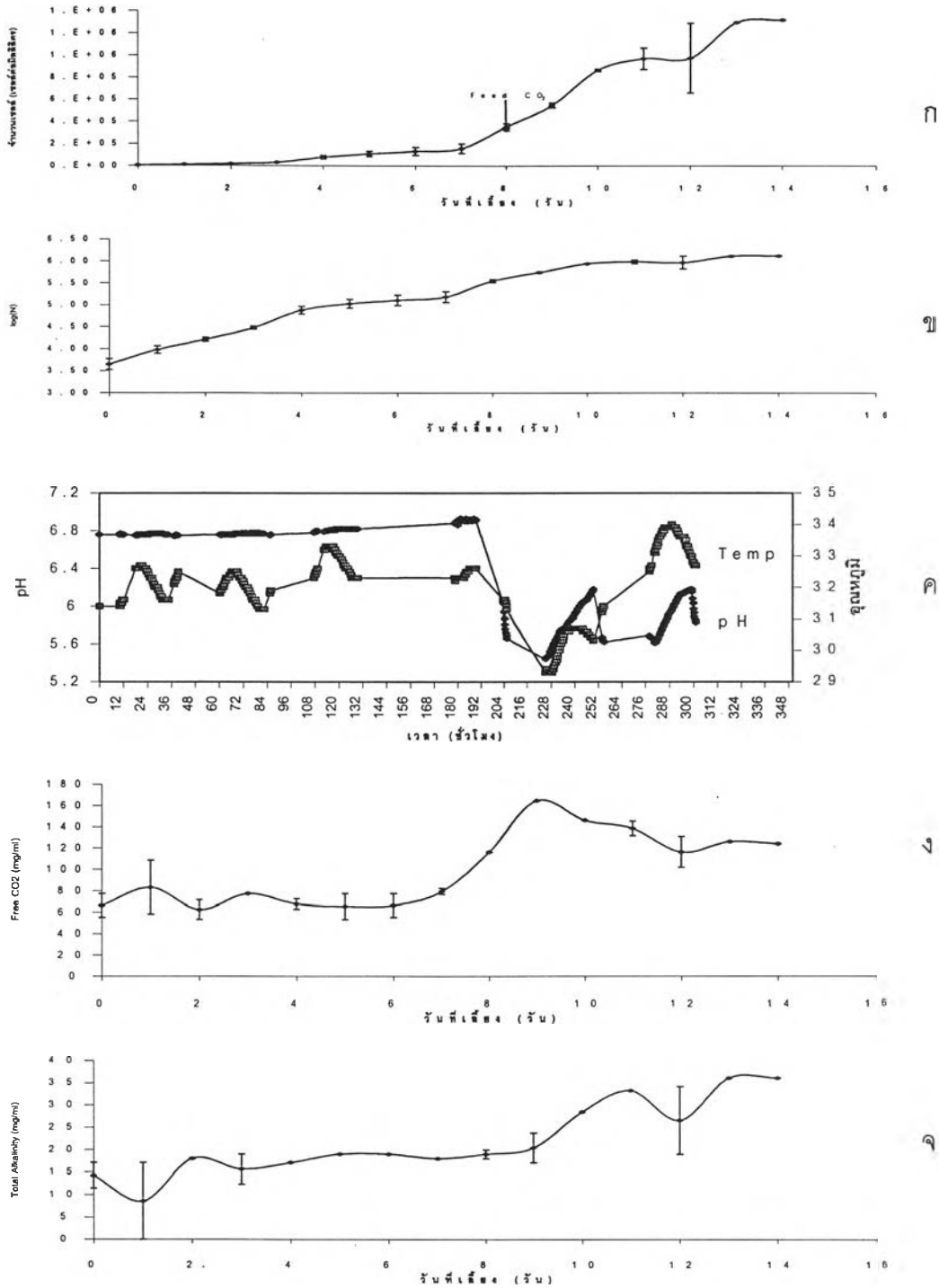
รูปที่ 4.8 การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ที่ภาวะ ความเข้มแสง 1000 ลักซ์ ความเข้มข้น CO_2 20 % อัตราการป้อนแก๊สผสม CO_2 6 L/hr และความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที

ก. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ณ. เวลาต่าง ๆ

ข. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ในรูป ลอกาลิทึม ณ. เวลาต่าง ๆ

ค. การเปลี่ยนแปลง pH และอุณหภูมิ ในถังปฏิกรณ์ ณ. ช่วงเวลาต่าง ๆ

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าอัลคาลินิตีและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในถังปฏิกรณ์



รูปที่ 4.9 การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ที่ภาวะ ความเข้มแสง 1000 ลักซ์ ความเข้มข้น CO_2 20 % อัตราการป้อนแก๊สผสม CO_2 12 L/hr และความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที

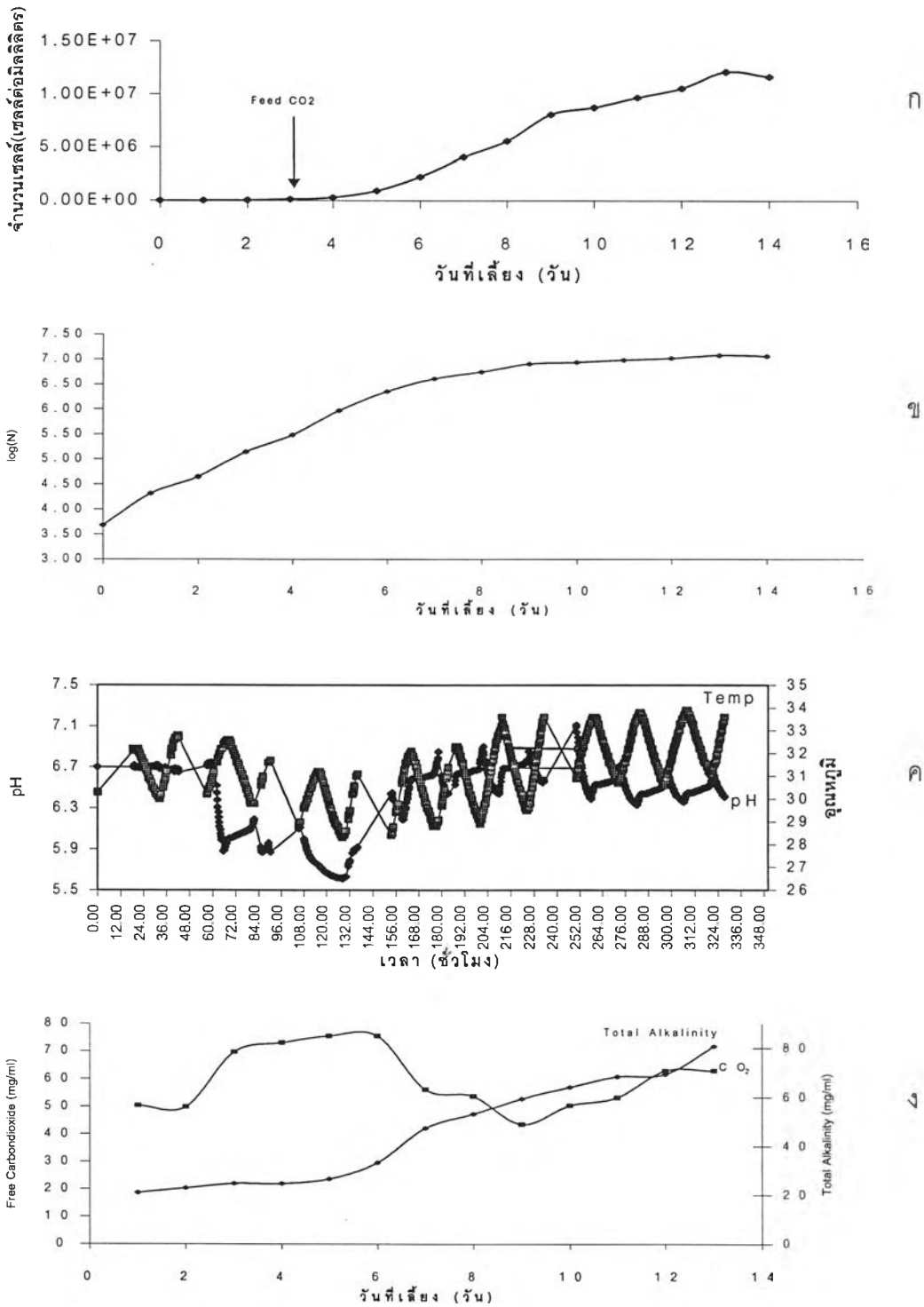
ก. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ณ. เวลาต่าง ๆ

ข. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ในรูป ลอกาลิทึม ณ. เวลาต่าง ๆ

ค. การเปลี่ยนแปลง pH และอุณหภูมิ ในถังปฏิกรณ์ ณ. ช่วงเวลาต่าง ๆ

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในถังปฏิกรณ์

จ. การเปลี่ยนแปลงค่าอัลคาลินิตีที่ละลายในถังปฏิกรณ์



รูปที่ 4.10 การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ที่ภาวะ ความเข้มแสง 3000 ลักซ์ ความเข้มข้น CO_2 10 % อัตราการป้อนแก๊สผสม CO_2 6 L/hr และความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที

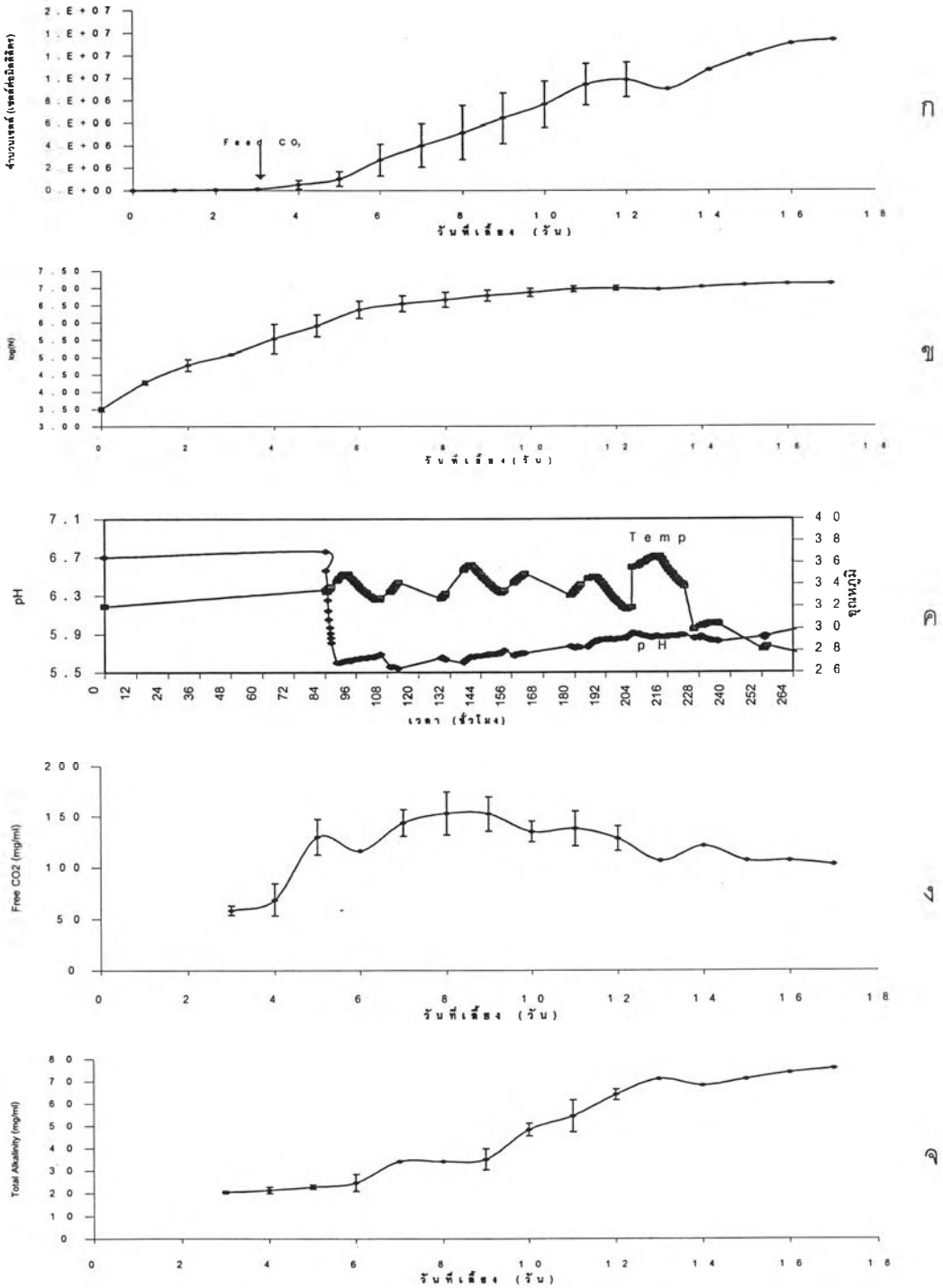
ก. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ณ. เวลาต่าง ๆ

ข. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ในรูป ลอกาลิทึม ณ. เวลาต่าง ๆ

ค. การเปลี่ยนแปลง pH และอุณหภูมิ ในถังปฏิกรณ์ ณ. ช่วงเวลาต่าง ๆ

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าอัลคาลินิตีและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในถังปฏิกรณ์

I19861928



รูปที่ 4.11 การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ที่ภาวะ ความเข้มแสง 3000 ลักซ์ ความเข้มข้น CO_2 10 % อัตราการป้อนแก๊สผสม CO_2 12 L/hr และความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที

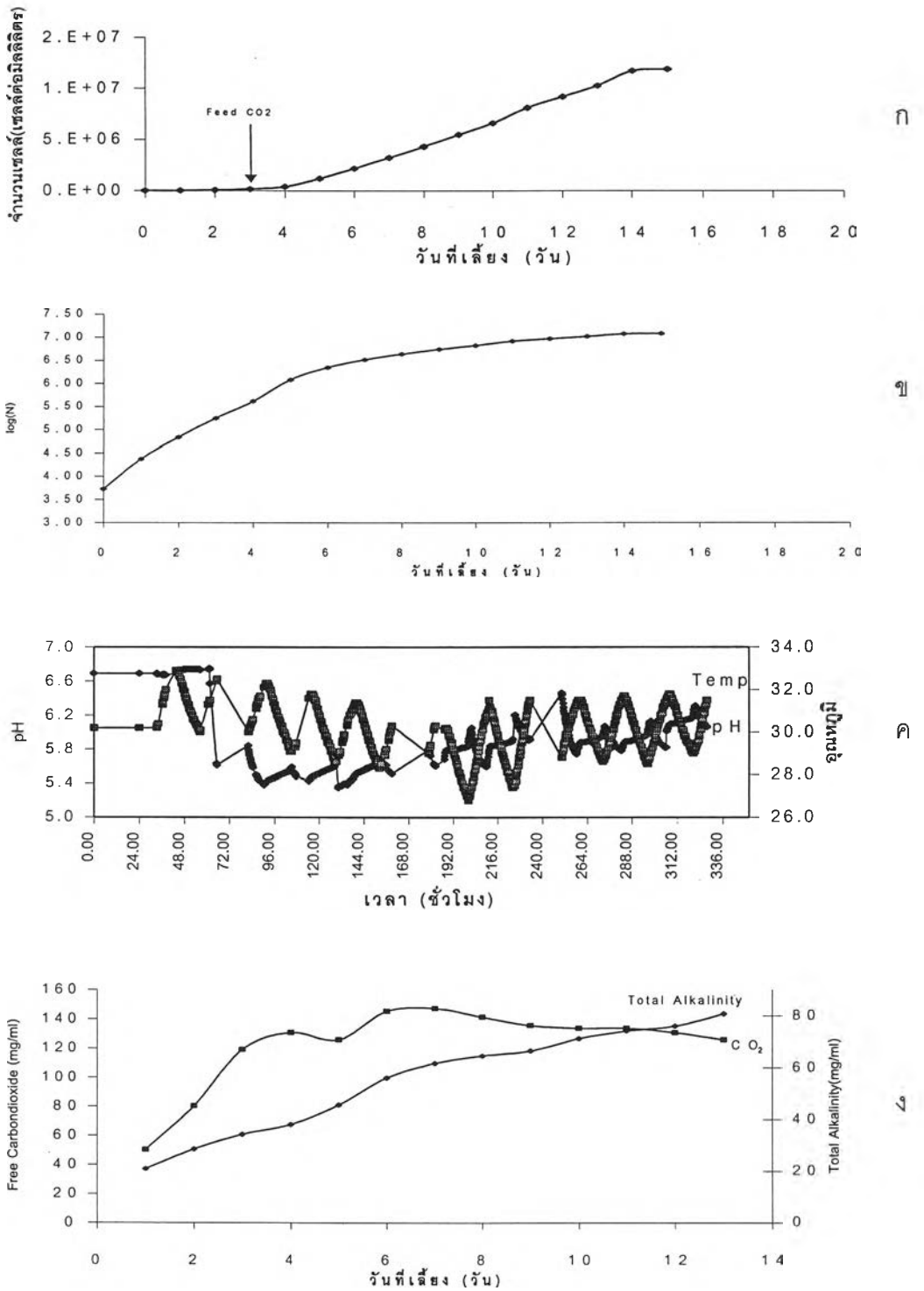
ก. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ณ. เวลาต่าง ๆ

ข. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ในรูป ลอกาลิทึม ณ. เวลาต่าง ๆ

ค. การเปลี่ยนแปลง pH และอุณหภูมิ ในถังปฏิกรณ์ ณ. ช่วงเวลาต่าง ๆ

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในถังปฏิกรณ์

จ. การเปลี่ยนแปลงค่าอัลคาลินิตีที่ละลายในถังปฏิกรณ์



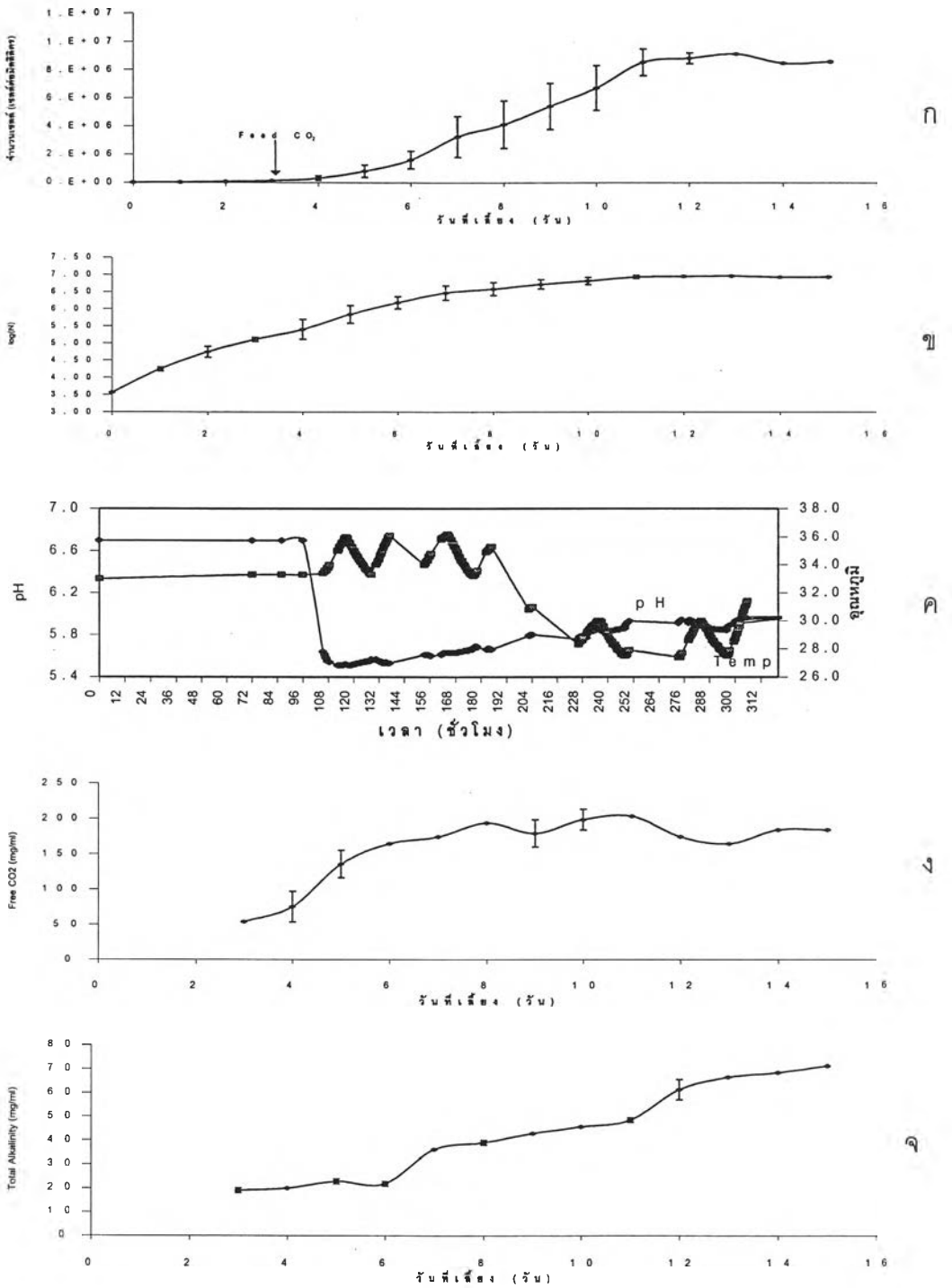
รูปที่ 4.12 การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ที่ภาวะ ความเข้มแสง 3000 ลักซ์ ความเข้มข้น CO_2 20 % อัตราการป้อนแก๊สผสม CO_2 6 L/hr และความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที

ก. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ณ. เวลาต่าง ๆ

ข. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ในรูป ลอกาลิทึม ณ. เวลาต่าง ๆ

ค. การเปลี่ยนแปลง pH และอุณหภูมิ ในถังปฏิกรณ์ ณ. ช่วงเวลาต่าง ๆ

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าอัลคาลินิตีและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในถังปฏิกรณ์



รูปที่ 4.13 การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ที่ภาวะ ความเข้มแสง 3000 ลักซ์ ความเข้มข้น CO_2 20 % อัตราการป้อนแก๊สผสม CO_2 12 L/hr และความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที

ก. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ณ. เวลาต่าง ๆ

ข. การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ในรูป ลอกาลิทึม ณ. เวลาต่าง ๆ

ค. การเปลี่ยนแปลง pH และอุณหภูมิ ในถังปฏิกรณ์ ณ. ช่วงเวลาต่าง ๆ

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในถังปฏิกรณ์

จ. การเปลี่ยนแปลงค่าอัลคาลินิตีที่ละลายในถังปฏิกรณ์

จากผลการทดลอง ดังแสดงในรูป 4.6 – 4.13 กราฟแสดงจำนวนเซลล์ในแต่ละวันที่เลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลาและการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นเซลล์ การเปลี่ยนแปลงของค่า pH และการเปลี่ยนแปลงของค่าคาร์บอนไดออกไซด์อิสระและ Total Alkalinity ในกรณีของความเข้มแสง 1000 ลักซ์ จะสังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของสาหร่ายในช่วงก่อนให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นการเติบโตของสาหร่ายเป็นไปอย่างช้า ๆ แต่เมื่อเริ่มให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณวันที่ 9 ของการเลี้ยง จำนวนเซลล์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วปรับเข้าสู่ภาวะคงตัว สำหรับกรณีของความเข้มแสง 3000 ลักซ์ การเปลี่ยนแปลงในช่วงก่อนและหลังที่จะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์การเติบโตของสาหร่ายจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว ดังเห็นได้จากรูปที่ 4.10 – 4.13 พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln(N) (เมื่อ N คือจำนวนเซลล์) กับวันที่เลี้ยง จะเห็นว่าสาหร่ายจะเริ่มเข้าสู่ Stationary phase ประมาณวันที่ 12 ของการเลี้ยง

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและ pH ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในเวลากลางวันซึ่งมีการให้แสง และอุณหภูมิลดลงเมื่อหยุดการให้แสง ส่วนค่า pH ก่อนที่จะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมากหรือเกือบจะคงที่ เมื่อเริ่มให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ค่า pH จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และการเปลี่ยนแปลงของค่า pH พบว่าจะมีค่าลดลงในเวลากลางวันเนื่องจากมีการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่เวลากลางคืนไม่มีการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ค่า pH จะเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่ามีกิจกรรมการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในเวลากลางคืนด้วยเช่นกัน จึงทำให้มีคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายลดลงทำให้ pH เพิ่มขึ้น ช่วงปลายของการเลี้ยงสาหร่ายจะพบว่าค่า pH เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนเซลล์ ซึ่งอาจหมายถึงการดึงคาร์บอนไดออกไซด์จากสารละลายไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Free CO_2 และ Total Alkalinity ก่อนจะให้แก๊สนั้นการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนไดออกไซด์อิสระมีค่าลดลงเล็กน้อยหรือเกือบจะคงที่ หลังจากให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อิสระจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกของการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เมื่อวันของการเลี้ยงผ่านไปนานขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์อิสระมีค่าลดลง และเกือบคงที่ ค่า Total alkalinity จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดการเลี้ยง ซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย ซึ่งจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์อิสระลดลงและค่า Total Alkalinity เพิ่มขึ้น

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่ายในภาวะต่าง ๆ ของการทดลองทั้งแปดการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งพบว่าการทดลอง R6 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตสูงสุด คือ 1.158 ต่อวันและการทดลอง R3 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตต่ำสุดคือ 0.494 ต่อวัน ซึ่งจากการทดลองของ สมรลักษณ์ แจ่มแจ้ง (2542) เลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลาในห้องปฏิบัติการที่

เข้มแสง 3000 ลักซ์ อุณหภูมิเฉลี่ย 30 องศาเซลเซียส ช่วงมืดและช่วงสว่าง เท่ากับ 12 และ12 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยใช้น้ำแข็งแห้ง 5 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอนให้แก่สาหร่าย ได้สัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลาเท่ากับ 1.39±0.12 ต่อวัน

ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่ายที่ภาวะต่าง ๆ

การทดลองที่	ความเข้มแสง lux	อัตราการป้อน CO_2 L/hr	ความเข้มข้น CO_2 %	ความเร็วรอบการกวน rpm	สัมประสิทธิ์การเติบโต (day^{-1})
R1	1000	6	10	100	0.635
R2	1000	12	10	200	0.577
R3	1000	6	20	200	0.494
R4	1000	12	20	100	0.657
R5	3000	6	10	200	1.118
R6	3000	12	10	100	1.158
R7	3000	6	20	100	1.081
R8	3000	12	20	200	1.024

นำผลการทดลองจากตารางที่ 4.6 มาวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรอิสระ ต่อสัมประสิทธิ์การเติบโต โดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานที่ว่า

H_0 : ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่าย

H_1 : ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่าย

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความเข้มของแสง, อัตราการป้อน CO_2, ความเข้มข้นของ CO_2 และความเร็วรอบในการกวน

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 **ข้อมูลวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์การเติบโตโดยการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง, อัตราการป้อน CO_2, ความเข้มข้นของ CO_2 และความเร็วรอบในการกวน**

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.9950
R Square	0.9901
Adjusted R Square	0.9768
Standard Error	0.0421
Observations	8

ANOVA

	Df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	4	0.5297	0.1324	74.8052	0.0025
Residual	3	0.0053	0.0018		
Total	7	0.5351			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*
Intercept	0.5116	0.0842	6.0790	0.0089	0.2438	0.7794
I	2.5235E-04	1.49E-05	16.9638	0.0004	0.0002	0.0003
C	0.0036	0.0050	0.7315	0.5175	-0.0122	0.0194
F	-0.0058	0.0030	-1.9456	0.1469	-0.0152	0.0037
V	-0.0008	0.0003	-2.6700	0.0757	-0.0017	0.0002

เมื่อ I คือความเข้มแสง

C คือความเข้มข้น CO_2

F คืออัตราการป้อน CO_2

V คือความเร็วรอบในการกวน

จากตารางการกระจายแบบ F พบว่าค่าสถิติ F ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าค่าสถิติ F ที่เปิดจากตารางแสดงว่าสมมติฐาน H_0 ถูกปฏิเสธกล่าวคือ ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่ายที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบค่าสถิติและความน่าจะเป็นของค่าสถิติ T เพื่อทดสอบว่าควรจะใช้ค่าคงที่ และตัวแปรอิสระใดมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการและจะถูกใช้ในสมการพยากรณ์โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่าย

H_1 : ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่าย

การวิเคราะห์ทำโดยพิจารณาค่าสถิติ T-Stat จากการทดลองเทียบกับค่าที่เปิดจากตารางสถิติหรือค่าความน่าจะเป็น P-Value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในที่นี้วิเคราะห์จากค่าความน่าจะเป็นโดยเลือกค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ตามตารางที่ 4.7 พบว่าตัวแปรความเข้มแสงกับค่า intercept มีค่าความน่าจะเป็นน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปสมการที่นำมาใช้ในการพยากรณ์ได้ดังนี้ $\mu = 0.00025235I + 0.5116$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่ายและ I คือความเข้มแสง

จากการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองพบว่า ความเข้มแสงเป็นเพียงปัจจัยเดียวที่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การเติบโตของสาหร่าย โดยที่ความเข้มแสง 1000 ลักซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.9 การเติบโตของสาหร่ายจะช้ามาก และค่าความหนาแน่นเซลล์สูงสุดจะได้ประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในขณะที่ความเข้มแสง 3000 ลักซ์ ดังแสดงในรูป 4.10-4.13 การเติบโตจะรวดเร็วมากในช่วงแรก แต่พอประมาณวันที่ 10 ของการเลี้ยง กระบวนการเริ่มเข้า stationary phase การเติบโตของสาหร่ายช้าลง ในช่วงเวลานี้จำนวนเซลล์ในเครื่องปฏิกรณ์มีเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งความหนาแน่นเซลล์ประมาณ 10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ทำให้เซลล์เกิดการบังแสงสว่างซึ่งกันและกันทำให้รับแสงได้ไม่เพียงพอ นอกจากเมื่อจำนวนเซลล์เพิ่มมากขึ้น สารอาหารหลักที่ไม่ได้ถูกเพิ่มเข้าไปในถังปฏิกรณ์ อาจจะเป็นตัวจำกัดการเติบโตของสาหร่าย จึงทำให้กระบวนการสร้างเซลล์เข้าสู่ช่วง stationary phase

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของการทดลองทั้งหมดนั้นเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยค่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยสำหรับทุกการทดลอง มีค่าประมาณ 30.9 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าต่างจากค่าเฉลี่ยของแต่ละการทดลองไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีค่าสูงขึ้นในช่วงกลางวัน และจะมีค่าลดลงในเวลากลางคืน เพราะว่าการทดลองให้แสงเป็นเวลา 12 ชั่วโมงในเวลากลางวัน นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิภายในกล่องที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลา มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิห้องประมาณ 2 องศาเซลเซียสที่ความเข้มแสง 3000 ลักซ์ และมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิห้องประมาณ 1 องศาเซลเซียสที่ความเข้มแสง 1000 ลักซ์

เมื่อเริ่มให้แก๊ส CO_2 นั้นปรากฏว่าค่า pH ของทุกการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่าในทางลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยค่า pH ก่อนที่จะให้แก๊ส CO_2 แต่ละการทดลองมีค่าประมาณ 6.7 เมื่อให้แก๊ส CO_2 ค่า pH ลดต่ำที่สุดเท่ากับ 5.37 ที่การทดลอง R7 แต่เมื่อเวลาผ่านไปค่า pH ของอาหาร

เลี้ยงเชื้อมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้ ไนโตรเจนในรูปของ NO_3^- และการใช้ฟอสเฟตในรูป $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-} ดังสมการ (Peter G. Brewer and Joel C. Goldman. 1976.)

$$106\ CO_2 + 138\ H_2O + 16\ NO_3^- \rightarrow (CH_2O)_{106}(NH_3)_{16} + 16\ OH^- + 138O_2$$

$$H_2PO_4^- + H_2O \Leftrightarrow H_3PO_4 + OH^-$$

$$HPO_4^{2-} + 2H_2O \Leftrightarrow H_3PO_4 + 2OH^-$$

$$PO_4^{3-} + 3H_2O \Leftrightarrow H_3PO_4 + 3OH^-$$

การใช้ไนโตรเจนและฟอสเฟตนั้นทำให้ อาหารเลี้ยงเชื้อมีค่า Total Alkalinity เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มไฮดรอกซิลไอออน ส่งผลให้ค่า pH เพิ่มสูงขึ้นด้วย

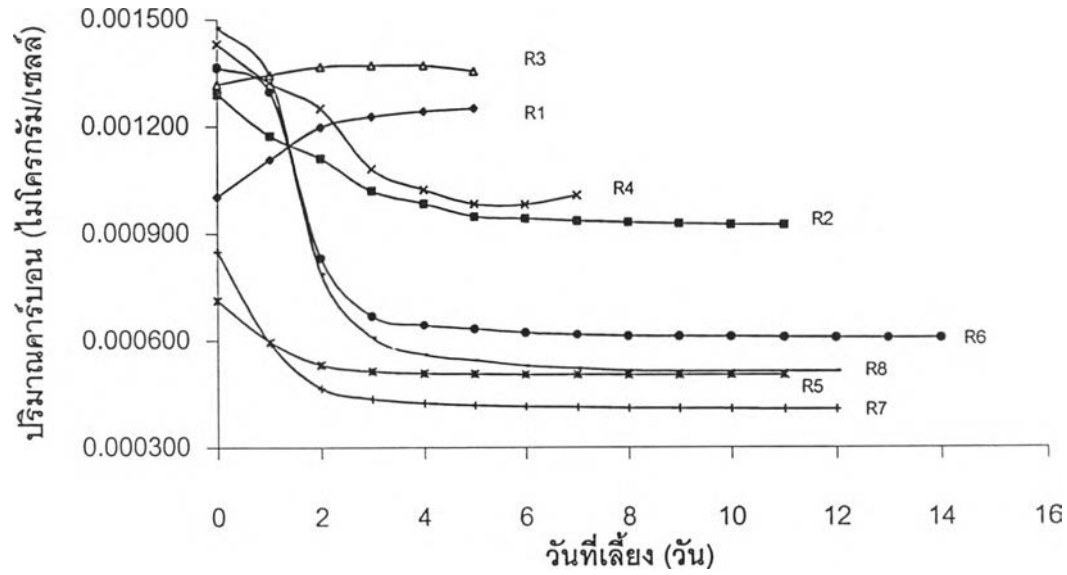
การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์อิสระในเครื่องปฏิกรณ์ จากการทดลองพบว่า ก่อนที่จะให้แก๊ส CO_2 นั้นการเปลี่ยนแปลงในทุกการทดลองมีค่าน้อยมาก แต่เมื่อเริ่มให้แก๊ส CO_2 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์อิสระที่ละลายในอาหารเลี้ยงเชื้อของทุกการทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเซลล์สาหร่ายเพิ่มมากขึ้นปริมาณ CO_2 อิสระมีค่าลดลง

จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของ CO_2 และอัตราการป้อน CO_2 ไม่มีผลต่อการทดลองทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณ CO_2 ที่ให้ไม่ได้ดึงให้ค่า pH ของสารละลายลดต่ำจนเป็นอันตรายต่อสาหร่าย ดังปรากฏว่าการเปลี่ยนแปลงของ pH อยู่ในช่วง 5.37 - 6 เป็นช่วงค่า pH ที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา ซึ่งอยู่ในช่วง pH 5.5 – 6 (Hirata. S. และคณะ 1996). ในขณะเดียวกันปริมาณ CO_2 อาจมากเกินพอที่สาหร่ายจะใช้หมด จึงไม่มีผลต่ออัตราการเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลา

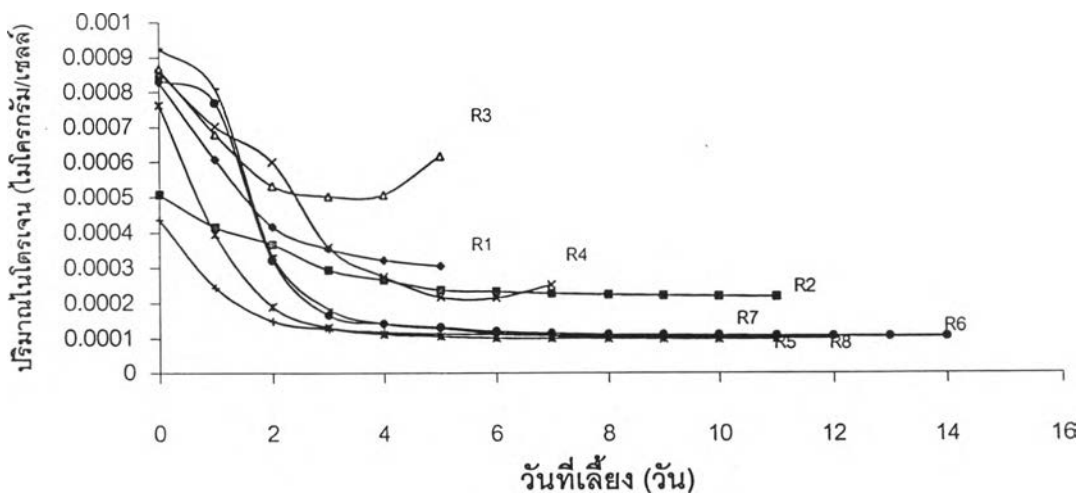
ผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าสอดคล้องกับการทดลองของ Hanagata. N. และคณะ 1992 ซึ่งทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ CO_2, อัตราการป้อน CO_2, อุณหภูมิ และความเข้มแสง ต่อการเติบโตของสาหร่าย โดยปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้น CO_2 จากการทดลองที่ภาวะความเข้มแสง 3000 ลักซ์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่า ที่ความเข้มข้น 10 และ 20 % CO_2 Chlorella มีการเติบโตได้เท่ากัน โดยมีค่า Doubling Time เท่ากับ 18 ชั่วโมง จากการศึกษาผลของอัตราการป้อน CO_2 พบว่า ที่อัตราการป้อน 0.1, 0.5, 1.0 l gas l^{-1}culture min^{-1} นั้นการเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลาไม่ต่างกัน และจะโตดีที่สุดที่อัตราการป้อน 2.0 l gas l^{-1}culture min^{-1} สำหรับปัจจัยอุณหภูมิ จากการทดลองที่ภาวะความเข้มแสง 3000 ลักซ์ ความเข้มข้น 20% CO_2 พบว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส สาหร่ายเติบโตดีกว่าที่ 30 องศาเซลเซียสและ สาหร่ายเติบโตดีกว่าที่ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับการเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีผลให้เกิด Lag phase ถึง 5 วัน ในขณะที่ถ้าเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส สาหร่ายคลอเรลลาจะไม่สามารถโตได้ สำหรับปัจจัยความเข้มแสง จากการ

ทดลองพบว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นอัตราการเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลาจะเพิ่มมากขึ้น และจะสูงที่สุดที่ความเข้มแสงเท่ากับ 10,000 ลักซ์

4.4.การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน และไนโตรเจนในเซลล์ของสาหร่ายคลอเรลลา เมื่อมีการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนต่อเซลล์ ในเซลล์สาหร่าย



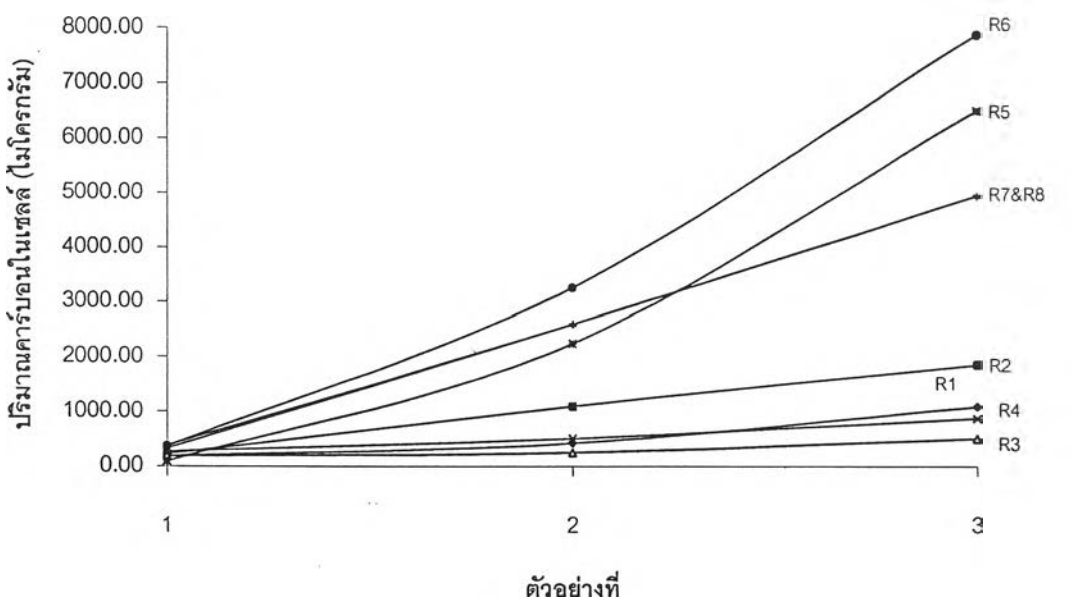
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนต่อเซลล์ ในเซลล์สาหร่าย

รูปที่ 4.14-4.15 **แสดงการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนและไนโตรเจนในเซลล์สาหร่าย พบว่าช่วงแรกปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนต่อเซลล์มีค่าสูงมาก และการเปลี่ยนแปลง มีแนวโน้มลดลงตามเวลา จนมีค่าคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับที่** Beaker 1994 **กล่าวไว้ว่าในกระบวนการเติบโตของสาหร่ายนั้น สาหร่ายจะเริ่มสะสมคาร์บอนและไนโตรเจนในช่วง** acceleration phase **เพื่อใช้สร้างองค์ประกอบทางเคมีเพื่อการสังเคราะห์แสง โดยสร้างรงควัตถุสังเคราะห์แสง คลอโรฟิลด์ เอ และบี และมีการสร้างเอนไซม์ คาร์บอนิก แอนไฮเดรส (CA) เพื่อใช้ในการนำพา CO_2 เข้าสู่เซลล์**

4.5.การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายคลอเรลลา

ทำการหาปริมาณคาร์บอนที่สาหร่ายใช้ โดยการสุ่มตัวอย่างมา 50 ml จากถังปฏิกรณ์ที่เวลาเดียวกันทุกวัน จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร อบด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำกระดาษกรองที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย CHN Analyser

จากผลการวิเคราะห์ CHN Analyser



รูปที่ 4.16 ปริมาณคาร์บอนในเซลล์ที่ได้จากการวิเคราะห์ CHN Analyser โดยศูนย์เครื่องมือ

ตารางที่ 4.8 ปริมาณคาร์บอนในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาต่าง ๆ

ปริมาณคาร์บอน (ไมโครกรัม/50มิลลิลิตรตัวอย่าง)								
การให้แก๊ส	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
วันเริ่มให้แก๊ส	186.73	226.79	180.25	271.56	86.89	364.93	321.92	382.60
ช่วงเวลาครึ่งทาง	415.59	1084.47	245.94	502.47	2226.67	3253.12	2580.41	2580.41
วันที่ปริมาณเซลล์สูงสุด	1081.23	1840.24	500.41	861.22	6463.83	7851.08	4920.47	4920.47
ปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นในชีวมวล	894.50	1613.45	320.16	589.66	6376.94	7486.15	4598.55	4537.88

เมื่อ ปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นในชีวมวล = วันที่ปริมาณเซลล์สูงสุด – วันเริ่มให้แก๊ส

นำผลการทดลองจากตารางที่ 4.8 มาวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรอิสระ ต่อปริมาณคาร์บอนในเซลล์สาหร่ายโดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานที่ว่า

H_0 : ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนในเซลล์สาหร่าย

H_1 : ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อปริมาณคาร์บอนในเซลล์สาหร่าย

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความเข้มของแสง, อัตราการป้อน CO_2, ความเข้มข้นของ CO_2 และความเร็วรอบในการกวน

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นของปริมาณคาร์บอนในเซลล์สาหร่ายโดยการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง, อัตราการป้อน CO_2, ความเข้มข้นของ CO_2 และความเร็วรอบในการกวน

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.9858
R Square	0.9718
Adjusted R Square	0.9342
Standard Error	719.1895
Observations	8

ANOVA

	Df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	4	53514582.1434	13378645.5359	25.8658	0.0116
Residual	3	1551700.6483	517233.5494		
Total	7	55066282.7917			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*
Intercept	284.8137	1438.3790	0.1980	0.8557	-4292.7546	4862.3820
I	2.4477	0.2543	9.6264	0.0024	1.6385	3.2569
F	84.8747	84.7573	1.0014	0.3904	-184.8611	354.6105
C	-158.1202	50.8544	-3.1093	0.0529	-319.9617	3.7213
V	-1.8011	5.0854	-0.3542	0.7466	-17.9852	14.3831

เมื่อ I คือความเข้มแสง

C คือความเข้มข้น CO_2

F คืออัตราการป้อน CO_2

V คือความเร็วรอบในการกวน

จากตารางการกระจายแบบ F พบว่าค่าสถิติ F ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าค่าสถิติ F ที่เปิดจากตารางแสดงว่าสมมติฐาน H_0 ถูกปฏิเสธกล่าวคือ ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อปริมาณคาร์บอนในเซลล์สาหร่ายที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบค่าสถิติและความน่าจะเป็นของค่าสถิติ T เพื่อทดสอบว่าควรจะใช้ค่าคงที่ และตัวแปรอิสระใดมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการและจะถูกใช้ในสมการพยากรณ์โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนในเซลล์สาหร่าย

H_1 : ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อปริมาณคาร์บอนในเซลล์สาหร่าย

การวิเคราะห์ทำโดยพิจารณาค่าสถิติ T-Stat จากการทดลองเทียบกับค่าที่เปิดจากตารางสถิติหรือค่าความน่าจะเป็น P-Value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในที่นี้วิเคราะห์จากค่าความน่าจะเป็นโดยเลือกค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ตามตารางที่ 4.9 พบว่าตัวแปรความเข้มแสงมีค่าความน่าจะเป็นน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปสมการที่นำมาใช้ในการพยากรณ์ได้ดังนี้ $m_C = 2.4477I$ เมื่อ m_C คือ ปริมาณคาร์บอนในเซลล์สาหร่ายและ I คือความเข้มแสง อย่างไรก็ตาม ค่าความเข้มข้น CO_2 มีค่า P-value ใกล้เคียงกับค่า 0.05 จึงอาจมีความเป็นไปได้ที่ปัจจัยนี้อาจมีผลกระทบ

จากการทดลองพบว่า R6 เป็นภาวะที่มีชีวมวลเกิดขึ้นมากที่สุด คิดเป็นปริมาณคาร์บอนได้เท่ากับ 7486.15 ไมโครกรัมคาร์บอนต่อ 50 มิลลิลิตรสาหร่าย และ R3 เป็นการทดลองที่มีชีวมวลเกิดขึ้นต่ำสุด คิดเป็นปริมาณคาร์บอนได้เท่ากับ 320.16 ไมโครกรัมคาร์บอนต่อ 50 มิลลิลิตรสาหร่าย