

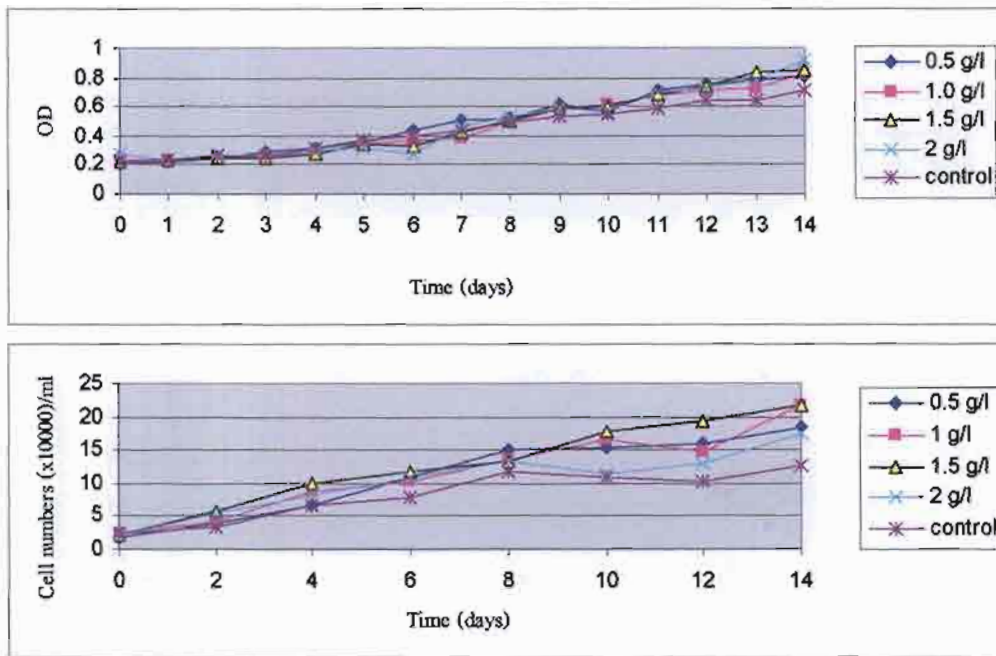
เดชัน (photooxidation) ดังนั้นในการทดลองต่อไป จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสาหร่ายเริ่มต้น ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา แต่ถ้าสาหร่ายเริ่มต้นมีมากเกินไป จะทำให้ผลผลิตไม่ดีเนื่องจากจะเกิดการบดบังแสงกัน ทำให้การสังเคราะห์แสงลดลง และยังเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตอีกด้วย

จากการทดลองในเรื่องของสารอาหารพบว่าปริมาณและสารอาหารที่มีผลทำให้สาหร่ายสไปรูลินาเจริญเติบโตได้ดี ได้แก่ NaHCO_3 8.0 กรัม/ลิตร และ NaNO_3 1.5 กรัม/ลิตร ซึ่งสาหร่ายจะสามารถเจริญได้ดีในสภาพกลางแจ้ง สาหร่ายแต่ละชนิดจะเจริญเติบโตได้เร็วหรือช้าต่างกัน หรือแม้แต่ในการทดลองก็พบว่าถึงแม้จะเป็นสาหร่ายสไปรูลินาเหมือนกัน มาจากการเพาะเลี้ยงแบบเดียวกันในตอนเริ่มต้น แต่ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันก็ทำให้การเจริญเติบโตที่แตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นในการเพาะเลี้ยงในสภาพแวดล้อมและในพื้นที่ต่างๆกัน ควรได้มีการตรวจสอบและวางแผนการผลิตที่เหมาะสมในแต่ละสภาพแวดล้อม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในแต่ละพื้นที่ได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 4.2 ผลของระดับสารอาหารชนิดต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยวัดด้วยการดูดกลืนคลื่นแสงและจำนวนเซลล์

ระดับสารอาหาร (กรัม/ลิตร)	กลางแจ้ง		ห้องปฏิบัติการ	
	การดูดกลืนคลื่นแสง (OD ₅₆₀)	จำนวนเซลล์ (x10 ⁴)/มล.	การดูดกลืนคลื่นแสง (OD ₅₆₀)	จำนวนเซลล์ (x10 ⁴)/มล.
NaNO ₃				
0	0.4235 ^a	9.1386 ^a	0.2044 ^b	5.24 ^a
0.5	0.4879 ^b	10.9571 ^{abc}	0.2086 ^b	5.53 ^{ab}
1	0.4645 ^b	11.5292 ^{bc}	0.2294 ^{bc}	5.3195 ^b
1.5	0.5298 ^c	12.7158 ^c	0.2424 ^c	6.6725 ^a
2	0.483 ^b	10.1883 ^{ab}	0.1492 ^a	3.7667 ^a
NaHCO ₃				
0	0.4830 ^b	13.7441 ^{ab}	0.2580 ^b	5.7572 ^a
4	0.4318 ^a	13.1437 ^a	0.2482 ^b	7.0483 ^b
6	0.4926 ^b	12.0075 ^a	0.2484 ^b	6.8591 ^{ab}
8	0.5713 ^c	16.0900 ^b	0.2443 ^b	7.1625 ^b
10	0.4606 ^{ab}	14.3142 ^{ab}	0.2250 ^a	6.4658 ^{ab}
NPK ^a				
0	0.4393 ^c	9.8850 ^c	0.2037 ^b	5.1150 ^b
0.2	0.3663 ^a	9.7758 ^b	0.2070 ^b	4.9508 ^b
0.4	0.3426 ^b	8.3033 ^b	0.2124 ^b	5.6546 ^b
0.6	0.3638 ^b	9.0600 ^b	0.1911 ^b	5.05667 ^b
0.8	0.2592 ^b	5.2908 ^a	0.1537 ^a	2.5741 ^a
K ₂ HPO ₄				
0	0.4393 ^c	9.8850 ^c	0.2037 ^a	5.1150 ^a
1	0.4608 ^c	10.3242 ^c	0.2443 ^b	6.4658 ^b
3	0.3147 ^{ab}	8.3440 ^a	0.2484 ^b	7.1625 ^b
5	0.3529 ^b	10.0175 ^c	0.2484 ^b	6.8592 ^b
7	0.2828 ^a	8.14 ^a	0.2482 ^b	7.0483 ^b

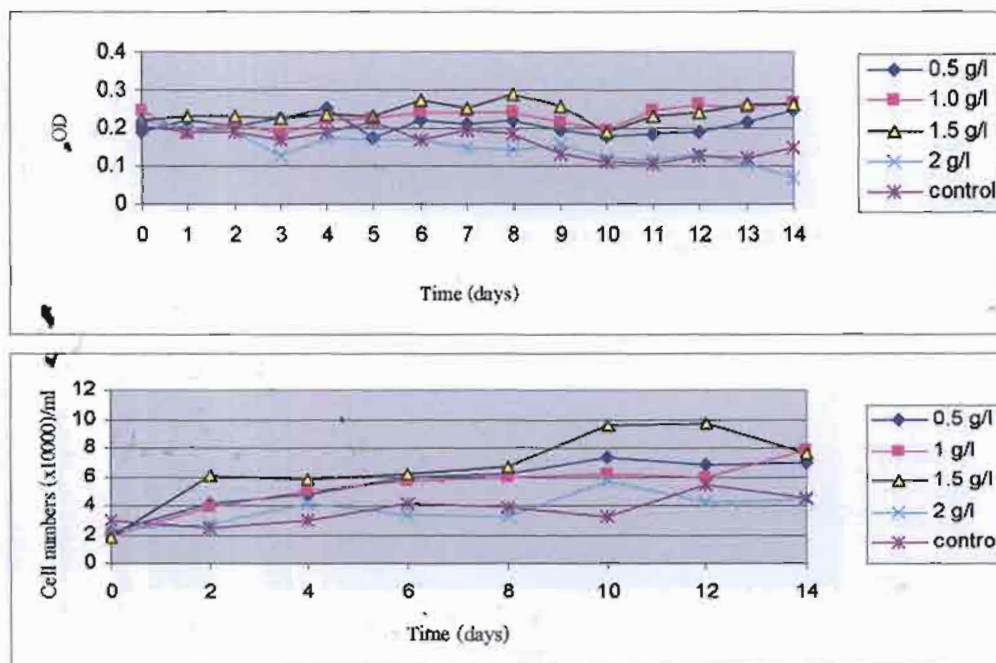
หมายเหตุ: อักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงข้อมูลมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



รูปที่ 4.6 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร NaNO_3 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง

ก. แสดงด้วยค่า OD

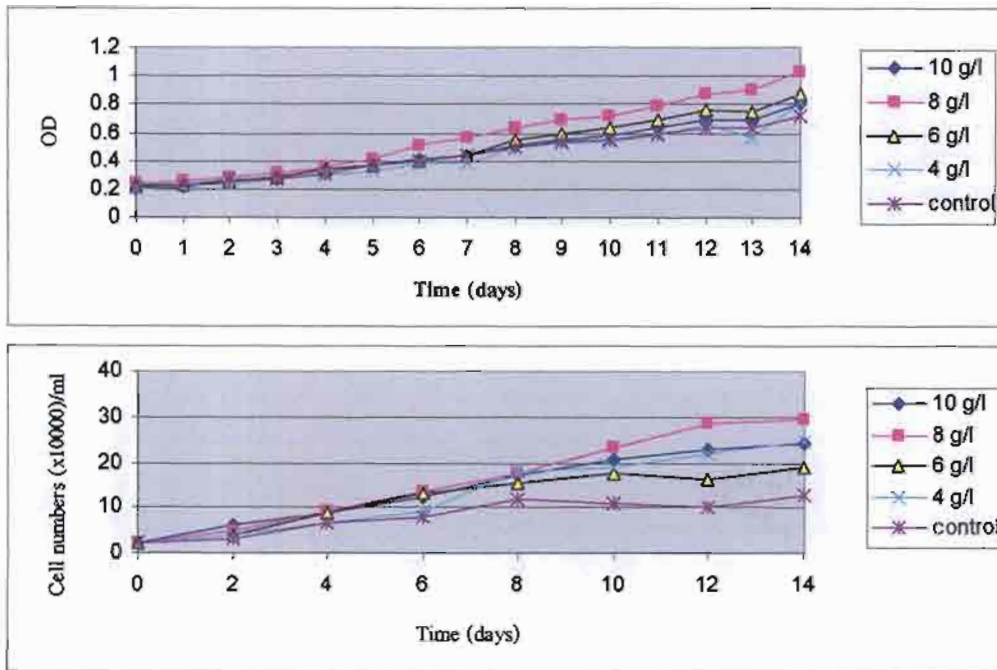
ข. แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.7 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร NaNO_3 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ก. แสดงด้วยค่า OD

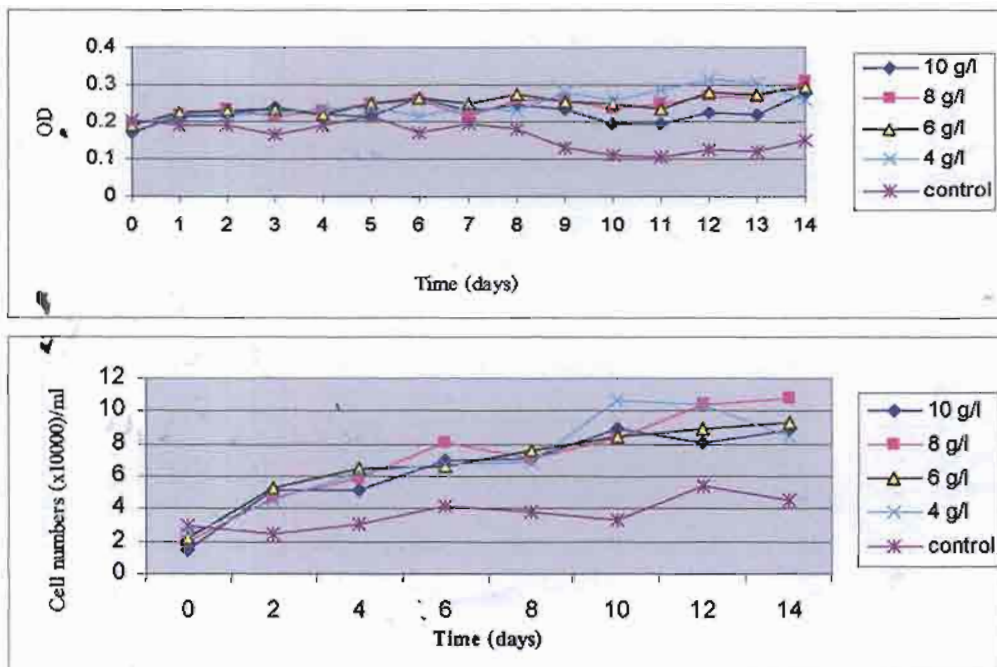
ข. แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.8 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร NaHCO_3 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง

ก.แสดงด้วยค่า OD

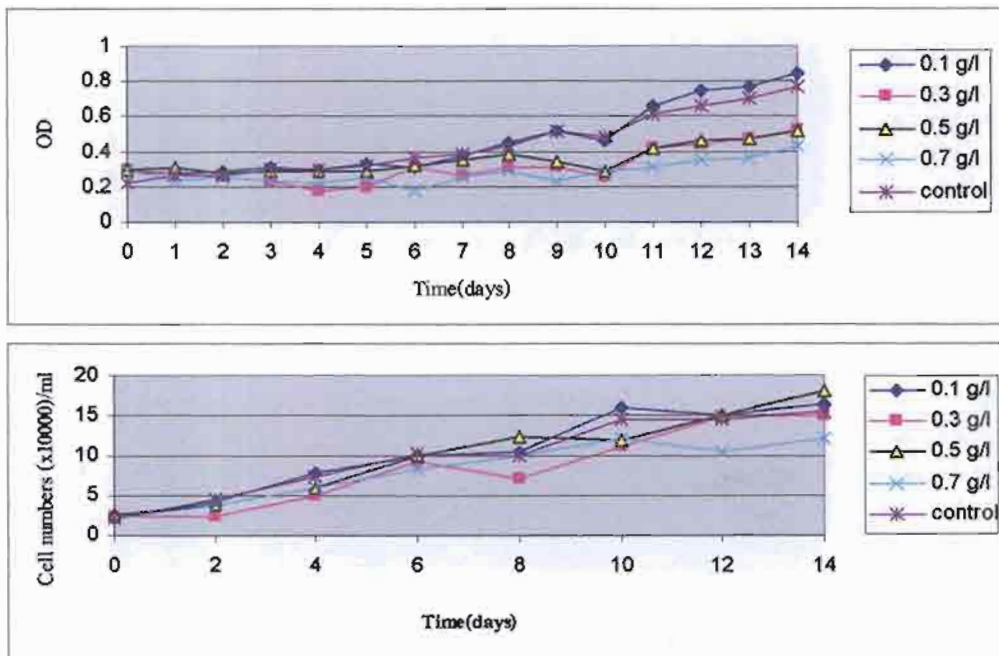
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.9 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร NaHCO_3 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ก.แสดงด้วยค่า OD

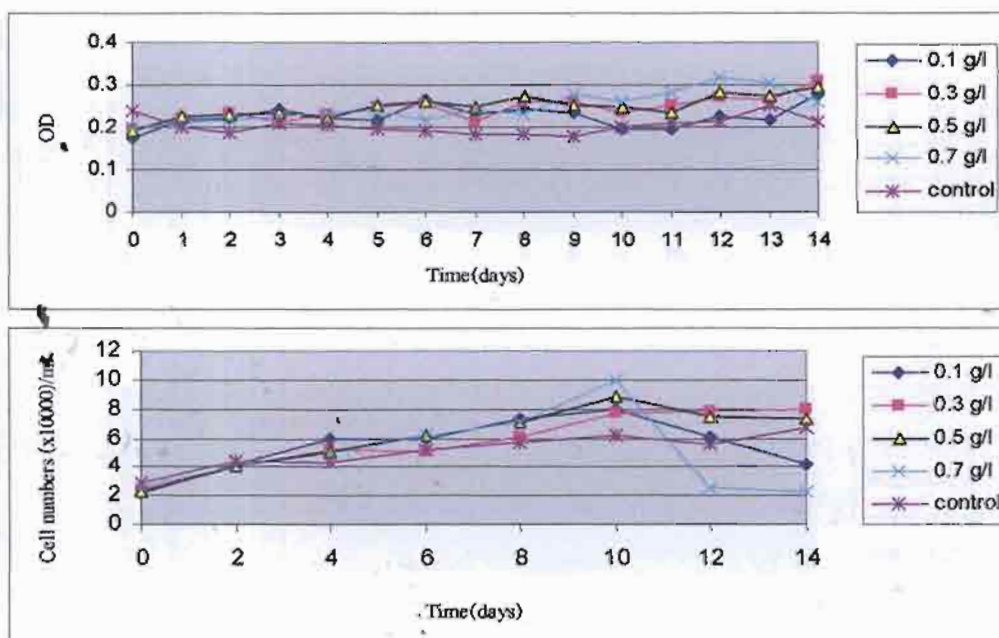
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.10 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร K_2HPO_4 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง

ก.แสดงด้วยค่า OD

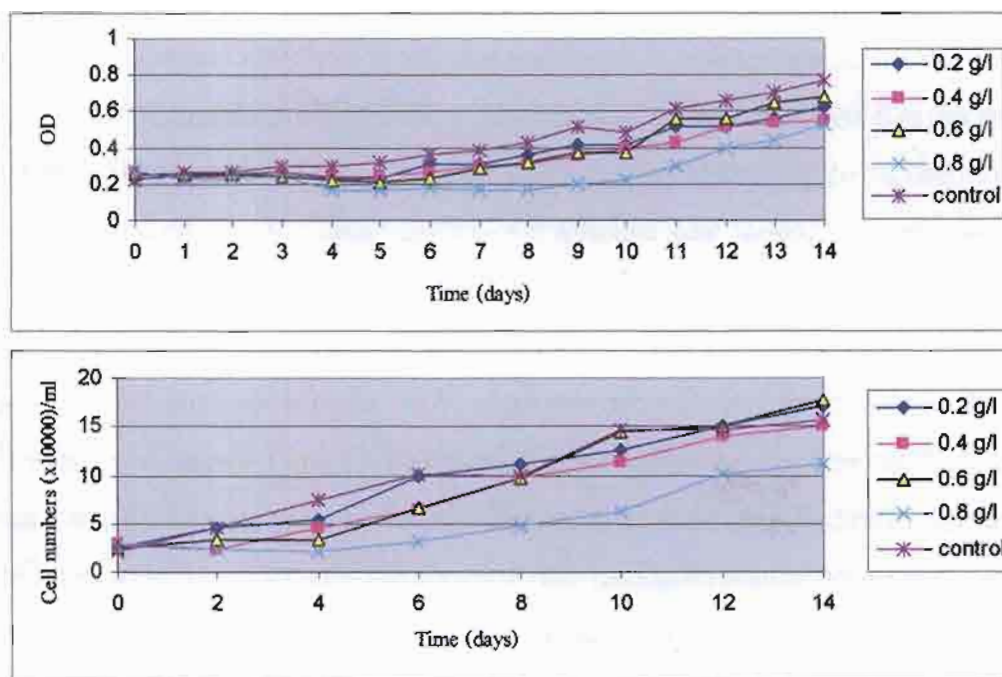
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.11 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร K_2HPO_4 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ก.แสดงด้วยค่า OD

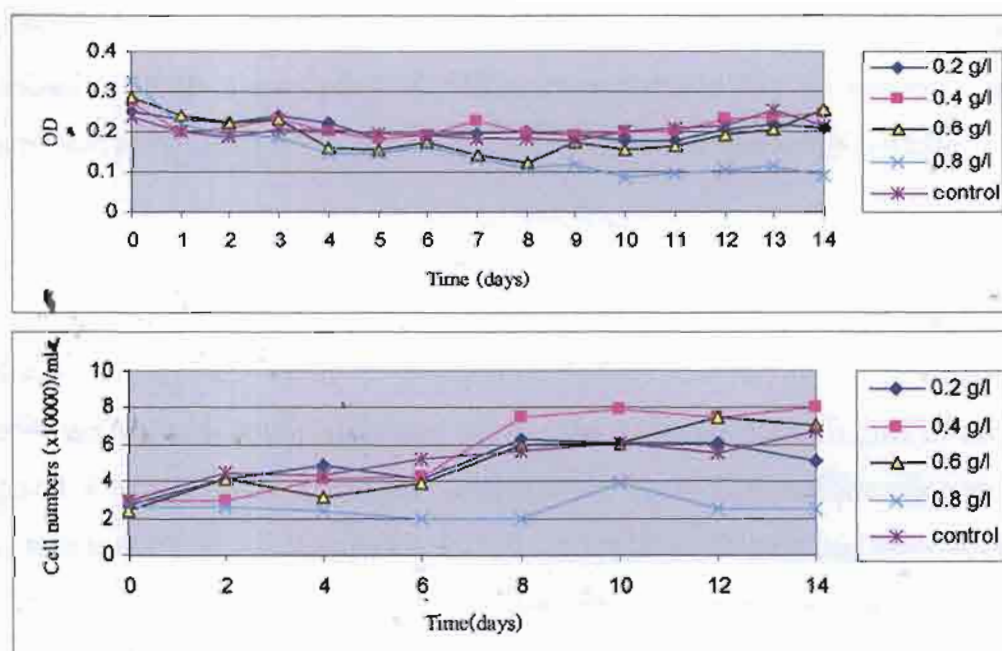
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.12 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร NPK ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง

ก.แสดงด้วยค่า OD

ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย



รูปที่ 4.13 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในอาหาร NPK ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ก.แสดงด้วยค่า OD

ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย

3. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรในระดับ pilot scales แบบกะ (batch culture)

จากผลการทดลองที่ได้ในขั้นที่ 1 และ 2 พบว่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่มีความเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา คือที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10 % และสารอาหารที่ผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้แก่ NaHCO_3 8.0 กรัม/ลิตร และ NaNO_3 1.5 กรัม/ลิตร ซึ่งสาหร่ายจะสามารถเจริญได้ดีในสภาพกลางแจ้ง จึงได้ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อซีเมนต์กลางแจ้ง เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร พื้นที่ทำการ 100 ลิตร ใช้ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10% และใส่ NaHCO_3 8.0 กรัม/ลิตร และ NaNO_3 1.5 ทำการทดลองเป็นเวลา 16 วัน เก็บตัวอย่างทุก 2 วัน โดยใช้สาหร่ายตั้งต้นเป็น 20% เนื่องจากการทดลองในตอนที่ 1 และ 2 นั้นพบว่า สาหร่ายเริ่มต้นเพียง 10% นั้น สาหร่ายปรับตัวได้ค่อนข้างน้อย และตายไปเป็นจำนวนมากเมื่อเริ่มเลี้ยง ทำให้มีสาหร่ายเหลือรอดอยู่เป็นจำนวนน้อย เซลล์ของสาหร่ายจึงได้รับแสงมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้เซลล์แตก ทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เหลือรอดไม่ดีพอ นอกจากนี้ได้มีการเพิ่มพารามิเตอร์ของน้ำหนักแห้ง (biomass) ของสาหร่ายเพิ่มขึ้นเนื่องจากพบว่าค่า OD และจำนวนเซลล์ของสาหร่าย ไม่สัมพันธ์กันเนื่องจากการแตกตัวเป็นท่อนสั้นๆ ของสาหร่าย ทำให้ค่า OD ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่จำนวนเซลล์เพิ่มมากขึ้น

น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำทิ้งที่ได้มาจากฟาร์มเลี้ยงสุกรจริงๆ ดังนั้นน้ำทิ้งในแต่ละครั้งจะมีความสกปรกของน้ำทิ้งที่ไม่เท่ากัน มีความแปรผันตลอดเวลา ขึ้นกับจำนวนของสุกรที่เลี้ยงในช่วงเวลานั้นๆ ในการนำน้ำทิ้งมาใช้ในการบำบัดและการเพาะเลี้ยงสาหร่ายนั้นพบว่าน้ำทิ้งเริ่มต้นที่ใช้ต้องทำการเจือจางโดยต้องมีการปรับค่าเริ่มต้นของน้ำเสียที่จะเข้าระบบด้วยค่า COD เพื่อให้ได้ค่าเริ่มต้นใกล้เคียงกับน้ำเริ่มต้นเดิมที่ 10 % ของน้ำเสียเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองในตอนที่ 1 เพราะค่า COD เป็นค่าที่สะดวกและรวดเร็วกว่าค่า BOD จะใช้การวิเคราะห์นานถึง 5 วัน ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

3.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้สาหร่ายเริ่มต้น 20% นั้นจะให้ค่า OD ประมาณ 0.31-0.45 ซึ่งค่อนข้างมีความเหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับ *S. maxima* ซึ่งเป็นสาหร่ายสไปรูลินาชนิดหนึ่งนั้นเมื่อวัดค่า OD ที่ความยาวคลื่นแสง 560 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 0.35 (ยวดี, 2544) จากผลการทดลอง (รูป 4.14) พบว่าสาหร่าย ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปนั้นสาหร่ายจะค่อยๆ เจริญเติบโตอย่างช้าๆ ในวันที่ 0-2 วันซึ่งถือว่าเป็นระยะ lag phase หลังจากการปรับตัวในช่วงแรก มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 2-4 ซึ่งถือว่าเป็นระยะ log phase หลังจากนั้นสาหร่ายจะเจริญเติบโตค่อนข้างช้าๆ ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟจำนวนเซลล์และน้ำหนักแห้งของสาหร่ายจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วง 4-8 วัน ซึ่งเป็นช่วง declining phase และจะเริ่มค่อนข้างคงที่ในวันที่ 10-14 ซึ่งเป็นช่วง stationary phase และหลังจากวันที่ 14 เป็นต้นไปพบว่า การเจริญจะลดลง เป็นช่วงของ death phase โดยพบว่าในวันที่ 12 เป็นช่วงที่มีจำนวนเซลล์มากที่สุดคือ 17.8×10^4 เซลล์/มิลลิลิตร มีค่า OD 1.09 และมีน้ำหนักแห้ง 0.69 มิลลิกรัม/ ลิตร

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่าสาหร่ายมีการปรับตัวได้ช้ากว่าในตอนเริ่มต้นการทดลองคือวันที่ 0-4 ซึ่งถือว่าเป็นระยะ lag phase แต่หลังจากที่มีการปรับตัวได้ก็ค่อยๆเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วโดยมีระยะ log phase อยู่ในช่วงวันที่ 4-6 และช่วง stationary phase ในวันที่ 6-12 และสาหร่ายจะเริ่มตายหลังจากวันที่ 12 ของการทดลอง โดยมีจำนวนเซลล์สูงสุดในวันที่ 6 ของการทดลอง คือ 10.8×10^4 เซลล์/มิลลิลิตร มีค่า OD 0.59 และมีน้ำหนักแห้ง 0.29 มิลลิกรัม/ลิตร และจำนวนเซลล์ของสาหร่ายจะลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากวันที่ 12 และในวันที่ 16 ของการทดลองพบว่า สาหร่ายตายหมดซึ่งจะไม่พบจำนวนเซลล์ของสาหร่ายเลย เป็นช่วงของ death phase ในขณะที่ค่า OD และ น้ำหนักแห้งนั้นมีความลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากพบว่าสาหร่ายที่ตายลงยังคงอยู่ในรูปของตะกอนแขวนลอย ซึ่งมีผลกระทบต่อค่า OD และน้ำหนักแห้ง และพบว่ามีสาหร่ายชนิดอื่นขึ้นปะปนเมื่อสาหร่ายสไปรูลินาตายลง

3.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง

COD ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปในนั้นจะทำให้มีอินทรีย์สารเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าน้ำทิ้งเริ่มต้นหลังจากที่ใส่สารอาหารนั้นจะทำให้ค่า COD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารและชุดควบคุมคือที่ 166 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 460 มิลลิกรัม/ลิตร อย่างไรก็ตามพบว่าค่า COD เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ตั้งแต่วันที่ 0-10 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายกำลังเจริญเติบโต และหลังจากนั้นพบว่าค่า COD จะมีค่าค่อนข้างคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลองคือในวันที่ 16 โดยพบว่าค่า COD มีค่า 115 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดลงของค่า COD 30.7% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นที่ไม่มีการเติมสารอาหาร ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.15

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่าค่า COD มีค่าค่อนข้างคงที่ใน 0-4 วันแรกของการทดลอง เนื่องจากสาหร่ายใช้เวลาในการปรับตัวค่อนข้างนานกว่าชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร หลังจากสาหร่ายปรับตัวแล้วพบว่าในวันที่ 6 ของการทดลองค่า COD ลดลงอย่างรวดเร็ว พบว่า COD มีค่า 76 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 54.21% และค่า COD เริ่มเพิ่มขึ้นในวันที่ 8 ของการทดลอง เนื่องจากสาหร่ายเริ่มชะลอการเจริญเติบโตและพบว่าเริ่มมีสาหร่ายตายลงไปยังและหลังจากนั้นค่า COD จะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเนื่องจากการตายของสาหร่ายจากการขาดแคลนอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมพบว่าในระยะแรกๆ นั้นค่า COD ต่ำกว่าชุดควบคุมแต่เมื่อมีการตายของสาหร่ายเกิดขึ้นทำให้ค่า COD เพิ่มขึ้น โดยในวันที่ 10-12 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ได้มีการเติมสารอาหาร

BOD ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปในนั้นจะทำให้มีอินทรีย์สารเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าน้ำทิ้งเริ่มต้นหลังจากที่ใส่สารอาหารนั้นจะทำให้ค่า BOD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารและชุดควบคุมคือที่ 82 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 236.5 มิลลิกรัม/ลิตร อย่างไรก็ตามพบว่าค่า BOD เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ตั้งแต่วันที่ 0-8 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายกำลังเจริญเติบโต และหลังจากนั้นพบว่าค่า BOD จะมีค่าค่อนข้างคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลองคือในวันที่ 16ของการทดลอง โดยพบว่ามีความ

BOD ค่าสุดในวันที่ 12 ของการทดลอง คือ 45 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดค่า BOD 37.0% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่าค่า BOD เริ่มต้น 82 มิลลิกรัม/ลิตร จะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องและมีค่าต่ำสุดในวันที่ 6 ของการทดลอง โดยมีค่า 32 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดค่า BOD 61.0% หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการตายของสาหร่ายเนื่องจากการขาดแคลนอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมพบว่าในระยะแรกๆ นั้นค่า BOD ในระยะ 0-2 วันแรกของการทดลองจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันแต่ในวันที่ 2-6 จะมีค่าที่ต่ำกว่าชุดควบคุมและหลังจากวันที่ 8 พบว่าชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารเริ่มที่จะมีการตายของสาหร่ายเกิดขึ้นทำให้ค่า BOD เพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.16

สารอาหาร สารอาหารที่เพิ่มลงไปคือ โซเดียมไบคาร์บอเนตและ โซเดียมไนเตรทนั้นเป็นแหล่งของไนโตรเจนได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะโซเดียมไบคาร์บอเนตนั้นนอกจากจะแหล่งของไนโตรเจนแล้วพบว่าเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งนำไปใช้ในขบวนการสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถใช้เป็นแหล่งของคาร์บอนและโซเดียม ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นยังช่วยในการเพิ่มค่า pH ได้อีกทางหนึ่งด้วย ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.17

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) พบว่า มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกชุดการทดลอง โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารลงไป แม้ว่าในวันเริ่มต้นจะมีค่ามากกว่าการทดลองในชุดการทดลองอื่นๆ ก็ตามโดยมีค่าเริ่มต้น 12.8 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 8.9 และ 8.67 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากสารอาหารที่เพิ่มลงไปคือ โซเดียมไบคาร์บอเนตและโซเดียมไนเตรทนั้นเป็นแหล่งของไนโตรเจนได้เป็นอย่างดี โดยแอมโมเนียไนโตรเจนจะลดลงอย่างรวดเร็วในระยะ 2 วันแรกของการทดลองในชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร และค่อยๆ ลดลงในระยะ 4 วันแรกของชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร ในขณะที่ชุดควบคุมนั้นปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องและค่อนข้างคงที่หลังจากวันที่ 6 ของการทดลอง จากผลการศึกษาพบว่าในทุกชุดการทดลอง ปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่ลดลงอย่างรวดเร็ว นั้นเนื่องมาจากในระยะแรกนั้นเป็นช่วงการปรับตัว (lag phase) และเจริญเติบโต (log phase) นั้นสาหร่ายใช้แอมโมเนีย-ไนโตรเจนเป็นแหล่งไนโตรเจนก่อน นอกจากนี้แอมโมเนียส่วนหนึ่งจะระเหยขึ้นสู่บรรยากาศและอีกส่วนหนึ่งเมื่ออยู่ในสถานะที่มีออกซิเจนนั้นจะถูกออกซิไดส์เป็นไนเตรท เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าแอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าต่ำสุดในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารคือ 0.71 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดค่าแอมโมเนียไนโตรเจนได้ร้อยละ 91.9 ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 1.59 และ 0.83 มิลลิกรัม/ลิตร ในวันที่ 14 และ 6 ของการทดลอง คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดค่าแอมโมเนียไนโตรเจนได้ร้อยละ 70.1 และ 75.0 ตามลำดับ

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-O}$) พบว่า ในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้นที่สูงมากเมื่อเทียบกับกับชุดการทดลองอื่นๆ คือมีค่าเริ่มต้น 106.23 มิลลิกรัม/ลิตร ใน

ขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 22.31 และ 22.58 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารอาหารที่เพิ่มลงไปนั้นจะเป็นสารอาหารในโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนเตรทมากกว่าในรูปของแอมโมเนียจึงทำให้ค่าเริ่มต้นมีค่ามากกว่าชุดควบคุมค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของแอมโมเนียที่มีค่าไม่แตกต่างจากชุดการทดลองอื่นๆมากนัก จากการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารนั้น ไนเตรทมีค่าสูงมากและค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่เริ่มการทดลองจนถึงวันที่ 8 ทั้งนี้เนื่องจากจากแอมโมเนียได้ถูกออกซิไดมาเป็นไนเตรท จนกระทั่งแอมโมเนียในน้ำทิ้งเริ่มหมดลง และสาหร่ายเริ่มที่จะนำค่าของไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไปใช้ โดยค่าของไนเตรทจะลดลงอย่างมากในวันที่ 8 เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีค่า 11.36 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดไนเตรทในโตรเจนได้ร้อยละ 49.1 ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารมีค่าลดลงเล็กน้อย และมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 6 ของการทดลอง มีค่า 10.11 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดไนเตรทในโตรเจนได้ร้อยละ 54.1 ซึ่งค่าไนเตรทนี้ลดลงเนื่องจากสาหร่ายนำไปใช้อย่างช้าๆ และไม่มีพิษต่อเซลล์ของสาหร่าย ถึงแม้ว่าจะมีอยู่เป็นจำนวนมากก็ตาม (จันทร์พร, 2545) ในขณะที่ชุดควบคุม ปริมาณของไนเตรทในโตรเจนมีค่าสูงขึ้นกว่าเริ่มแรกของการทดลองและค่อยลดลงในระยะสุดท้ายของการทดลอง ซึ่งปริมาณไนเตรทในโตรเจนที่เพิ่มขึ้นในตอนแรกเนื่องจากเนื่องจากการออกซิไดของแอมโมเนีย แต่การลดลงในการลดลงของไนเตรทเหล่านี้เกิดขึ้นโดยขบวนการ denitrification ภายใต้ออกซิเจน

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึง soluble reactive phosphorus (SRP) หรือ orthophosphate พบว่าในตอนเริ่มต้นการทดลองนั้นปริมาณของ SRP นั้นจะไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการทดลองในตอนที่ 2 พบว่าสารอาหารจำพวก ฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรเริ่มต้นนั้นมีเพียงพอต่อความต้องการของสาหร่าย ดังนั้นสารอาหารที่เติมลงไปจึงไม่มีสารประกอบของฟอสฟอรัสอยู่ โดยชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้น 34.29 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 33.81 และ 33.72 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าในระยะ 0-4 วันแรกของการทดลอง นั้น SRP ไม่มีค่าแตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลองคือค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่หลังจากนั้นพบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้นปริมาณของ SRP จะลดลงเรื่อยๆตลอดเวลา ในขณะที่ในชุดการทดลองอื่นๆจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารฟอสฟอรัสในรูปของ SRP มีค่าต่ำสุดในวันสุดท้ายของการทดลองคือ 11.28 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลด SRP ได้ร้อยละ 66.8 ในขณะที่ชุดควบคุมมีค่าไม่แตกต่างจากตอนเริ่มต้นมากนัก และชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่าต่ำสุด 19.45 ในวันที่ 6 ของการทดลองคิดเป็นประสิทธิภาพในการลด SRP ได้ร้อยละ 42.3

ของแข็ง TDS มีค่าสูงมากในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารลงไปโดยมีค่าเริ่มต้น 7925 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 1550 และ 1085 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารนั้นจะมีสารอนินทรีย์ละลายอยู่เป็นจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป จะมีค่าลดลงเนื่องจากถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและการ

เพิ่มจำนวนเซลล์ของสาหร่าย โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารมีค่า 7925 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 1550 และ 1085 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.18

และเมื่อพิจารณาถึง SS ซึ่งเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารมีค่าเริ่มต้น 193.5 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 72 และ 89 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่า SS ลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปจนสิ้นสุดการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า 130.0 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารเกิดการตายของสาหร่ายขึ้น ทำให้ค่าของ SS เพิ่มขึ้นในการทดลองในช่วงสุดท้ายของการทดลอง เนื่องจากเซลล์ของสาหร่ายที่ตายลง ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.19

DO เมื่อพิจารณาถึงค่า DO พบว่าระบบมีประสิทธิภาพมาก และมีออกซิเจนที่เพียงพอ เนื่องจากอากาศที่เติมและจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่ปล่อยออกซิเจนอิสระออกมาละลายละลายอยู่ในน้ำ โดยพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่า DO อยู่ในช่วง 4.47-2.9 มิลลิกรัม/ลิตร ชุดควบคุมมีค่า DO อยู่ในช่วง 3.4-2.4 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่า DO อยู่ในช่วง 4.1-1.4 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่า DO จะเริ่มลดลงเมื่อสาหร่ายเริ่มตาย ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.20

อุณหภูมิ ผลจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิตลอดการทดลองในทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักโดยชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 27.5-28.4 °C ชุดควบคุมอยู่ในช่วง 28.0-29.1 °C และชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่าในช่วง 27.6-29.1 °C

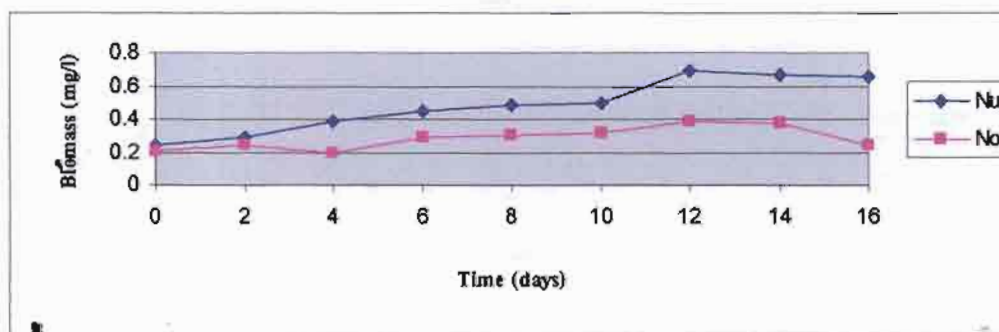
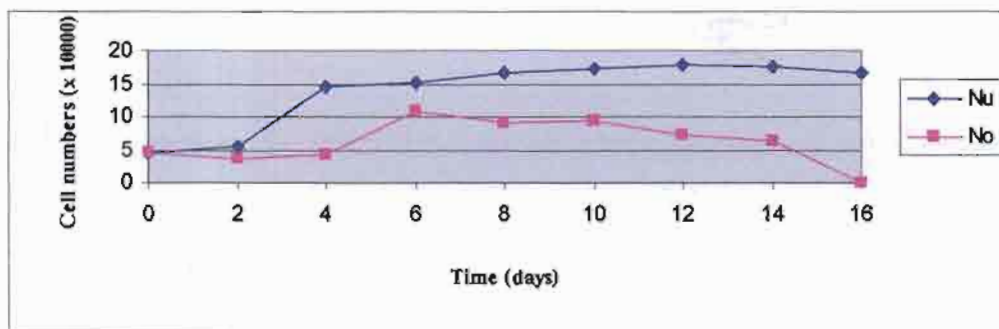
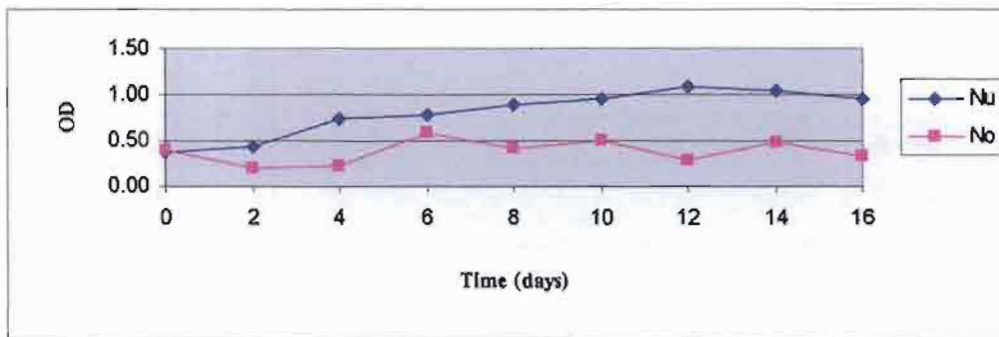
ค่าการนำไฟฟ้า ผลจากการทดลองพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไป โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4118-8365 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1080-1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และ 1465-1560 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ตามลำดับ

pH ผลจากการทดลองพบว่าค่า pH ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารและไม่เติมสารอาหารจะมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยจะอยู่ที่ 10 ± 0.5 ซึ่งเป็น pH ที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลีนา ในขณะที่ชุดควบคุมจะมีค่า pH อยู่ที่ 8.3-7.1

alkalinity ผลจากการทดลองพบว่า alkalinity ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไปและ NaOH ที่ใช้ในการปรับค่า pH เพื่อปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1700-2500 มิลลิกรัม/ลิตร ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 600-1100 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมจะมีค่าอยู่ในช่วง 400-700 มิลลิกรัม/ลิตร

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกะพบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้นสาหร่ายมีการเจริญเติบโตมากกว่าในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารและชุดควบคุม โดยพบว่าในวันที่ 12 ของการทดลองนั้นเป็นช่วงที่สาหร่ายมีปริมาณสูงที่สุด และมีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำ

ทั้งได้ดีที่สุด ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่า สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในวันที่ 6 ของการทดลองและมีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำทิ้งได้ดีกว่าชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร แต่เมื่อระยะเวลาของการเพาะเลี้ยงเริ่มนานขึ้นพบว่าสาหร่ายจะตายลง



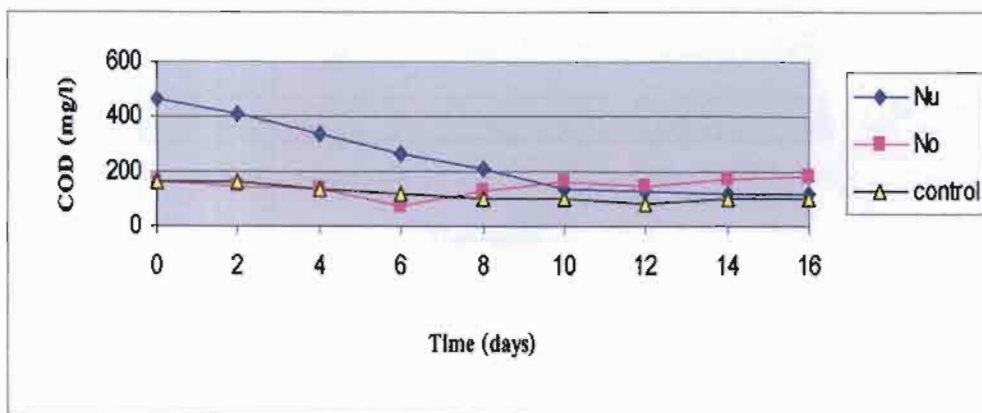
รูปที่ 4.14 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในการเพาะเลี้ยงแบบกะ(bath culture)

ก.แสดงด้วยค่า OD

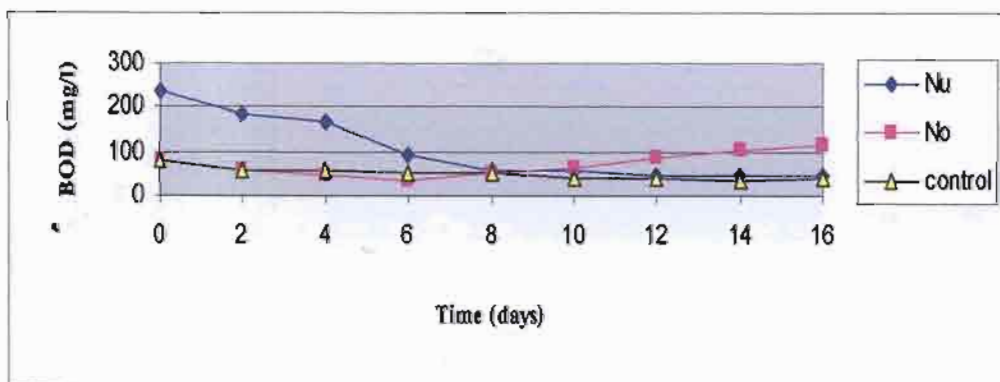
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย

ค. แสดงด้วยน้ำหนักแห้ง

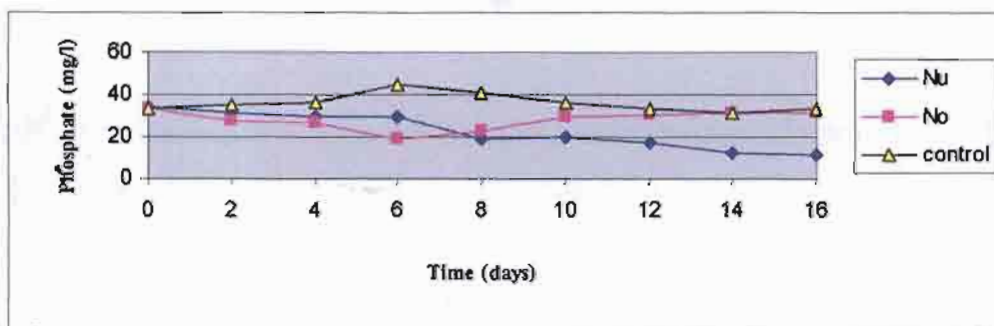
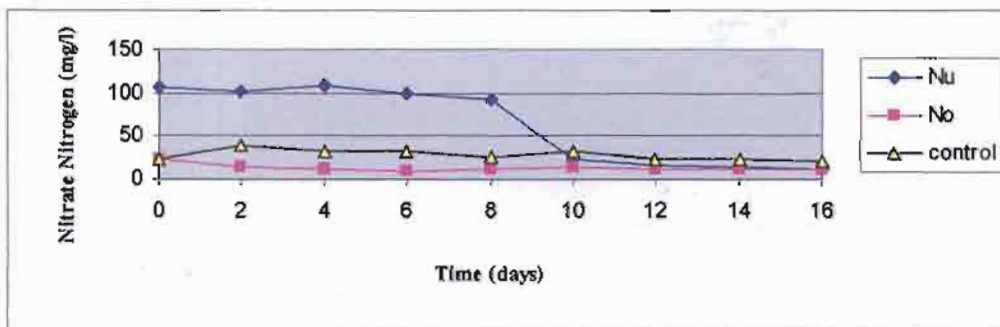
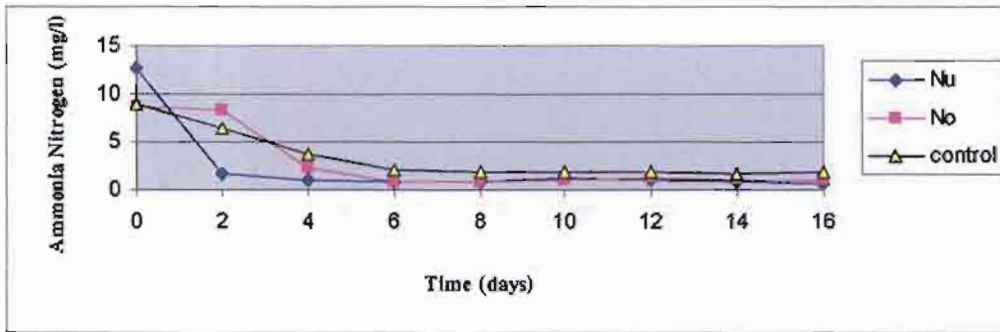




รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)

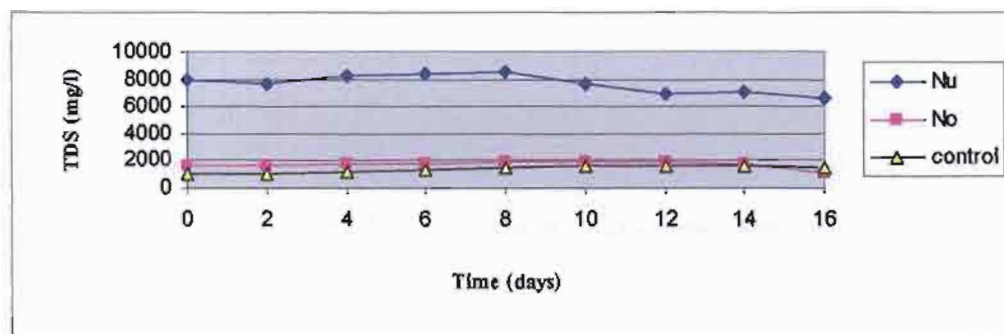


รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลง BOD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)

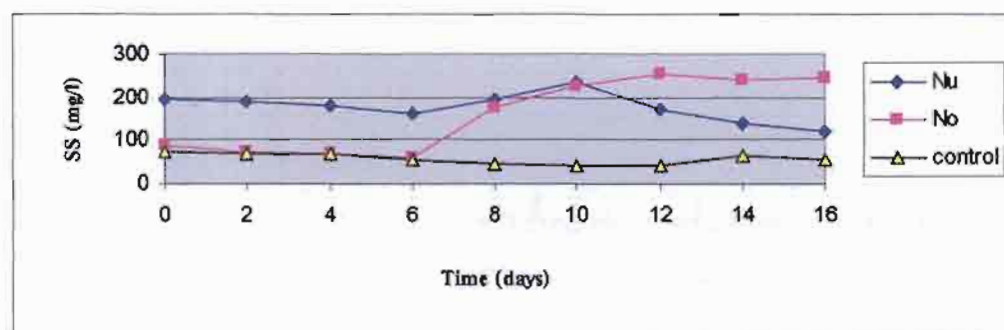


รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารอาหารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)

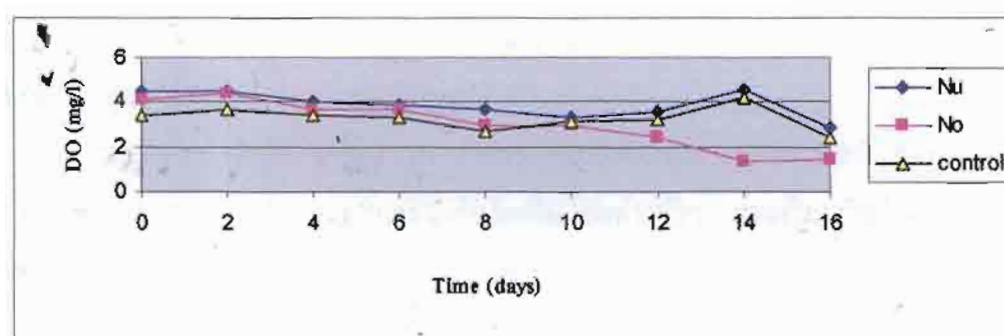
- ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ในโตรเจน
- ข. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ในโตรเจน
- ค. การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูป soluble reactive phosphorus



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลง TDS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกะ (batch culture)



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลง SS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกะ (batch culture)



รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลง DO ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกะ (batch culture)

4. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรในระดับนำร่อง

4.1 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous)

จากการทดลองในหัวข้อที่ 3 ซึ่งเป็นการเพาะเลี้ยงแบบกะ batch culture พบว่า ระยะเวลาในการเก็บกักที่เหมาะสมของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารคือ 12 วัน เนื่องจากเป็นช่วงที่สาหร่ายสามารถปรับตัวได้ดีและมีจำนวนเซลล์สูงที่สุด ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่าระยะเวลาในการเก็บกักที่ดีที่สุดคือ 6 วัน หลังจากนั้นได้ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อเวียน ขนาด 1.4x3.8x0.6 เมตรใช้น้ำตัวอย่าง 2,000 ลิตร แบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous) ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน โดยใช้สาหร่ายเริ่มต้น 20% โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลองคือ ชุดการทดลองที่ 1 เติมสารอาหาร มีระยะเวลาในการเก็บกัก 12 วัน มีอัตราการไหลเข้าของน้ำ 13.8 ลิตร/วัน และชุดการทดลองที่ 2 ไม่เติมสารอาหาร มีระยะเวลาในการเก็บกัก 6 วัน มีอัตราการไหลเข้าของน้ำ 55.5 ลิตร/วัน ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.1.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย

ในชุดการทดลองที่ 1 ที่เติมสารอาหารนั้นพบว่า สาหร่ายค่อยๆเจริญเติบโตขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะในวันที่ 2-8 ของการทดลอง ซึ่งดูได้จากค่า OD จำนวนเซลล์และน้ำหนักแห้งที่มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในวันที่ 12 ของการทดลอง ซึ่งมีโดยมีค่า OD ประมาณ 0.85 มีน้ำหนักแห้ง 0.6251 มิลลิกรัม/ลิตร มีจำนวนเซลล์ 150,000 เซลล์ เมื่อมีการเริ่มถ่ายน้ำออกทุกวันและเติมน้ำเสียเข้าพบว่าสาหร่ายมีจำนวนลดลงตลอดเวลาย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ในวันที่ 18 ของการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีค่า OD ประมาณ 0.266 มีน้ำหนักแห้ง 0.3474 มิลลิกรัม/ลิตร มีจำนวนเซลล์ 18,500 เซลล์/ มิลลิลิตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสาหร่ายส่วนใหญ่ได้สูญหายไปจากระบบพร้อมกับน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ และสาหร่ายที่เหลืออยู่ในระบบมีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างช้า เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ทำให้สาหร่ายมีแนวโน้มที่จะลดลงตลอดการทดลอง

ในชุดการทดลองที่ 2 ไม่เติมสารอาหารนั้นพบว่า สาหร่ายต้องมีการปรับตัวค่อนข้างนานกว่าในชุดการทดลองที่ 1 และการเจริญเติบโตเป็นไปอย่างช้าๆ และเริ่มเจริญได้เร็วในวันที่ 6 ของการทดลอง ซึ่งดูได้จากค่า OD จำนวนเซลล์และน้ำหนักแห้งที่มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีการเจริญมากที่สุดในช่วงวันที่ 6-8 ของการทดลองโดยมีค่า OD ประมาณ 0.55 มีน้ำหนักแห้ง 0.38 มิลลิกรัม/ลิตร มีจำนวนเซลล์ 109,000 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อมีการถ่ายน้ำเข้าออกทุกวัน พบว่าสาหร่ายมีการเจริญเติบโตที่มีแนวโน้มลดลงตลอดเวลาแบบค่อยเป็นค่อยไปอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีค่า OD ประมาณ 0.024 มีน้ำหนักแห้ง 0.0451 มิลลิกรัม/ลิตร มีจำนวนเซลล์ 3,000 เซลล์/ มิลลิลิตร (รูปที่ 4.21)

4.1.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง

COD ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปในนั้นทำให้มีค่า COD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารคือที่ 155 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 440 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่าของ COD เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนถึงวันที่ 12 ของการทดลอง และหลังจากมีการเติมน้ำและสารอาหารเข้าไปในระบบพบว่าค่า COD มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นและคงที่ในระยะสุดท้าย โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 12 คือ 80 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 48.38 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร ซึ่งพบว่าระบบโดยรวมมีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้ประมาณร้อยละ 22.6-31.2 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารซึ่งค่อนข้างต่ำ และในระยะสุดท้ายของการทดลองพบว่าระบบค่อนข้างคงที่ โดยพบว่ามี COD อยู่ระหว่าง 148-172 มิลลิกรัม/ลิตร

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่า COD มีค่าลดลงเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องอย่างช้าๆ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่า COD จะมีค่าค่อนข้างคงที่เกือบตลอดการทดลอง โดยวันที่ 12 และ 22 ของการทดลอง COD มีค่าต่ำสุดคือ 40 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 74.2 % แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อระยะเวลาที่นานขึ้นค่า COD จะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากสาหร่ายได้มีการสูญหายไปจากระบบ และไม่สามารถเจริญเติบโตได้ทัน ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า COD 98 มิลลิกรัม/ลิตร ทั้งนี้เนื่องจากมีสาหร่ายอยู่เป็นจำนวนน้อย เนื่องจากสาหร่ายส่วนมากได้สูญหายไปจากระบบ (รูปที่ 4.22)

BOD ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปในนั้นทำให้มีค่า BOD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารคือที่ 93 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 230 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่าของ BOD เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนถึงวันที่ 12 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายใช้สารอินทรีย์ในการเจริญเติบโตทั้งการเพิ่มขนาดและจำนวนเซลล์ของสาหร่าย โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 12 คือ 61 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 30.0 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารและเมื่อมีการถ่ายน้ำออกจากระบบ และเติมน้ำเสียเพิ่มและสารอาหาร เพิ่มในทุกวันหลังจากวันที่ 12 ของการทดลองพบว่าค่า BOD จะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย และจะเริ่มคงที่ตลอดการทดลอง จากการทดลองพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ได้ประมาณร้อยละ 22.6-31.2 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารซึ่งค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียและสารอาหารที่เพิ่มเข้าไปจะไปทำให้ค่า BOD เพิ่มมากขึ้นและสาหร่ายส่วนมากได้สูญหายจากระบบ

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่า BOD มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับตัวของสาหร่ายที่ยังไม่สามารถปรับตัวได้ โดยพบว่าในวันที่ 6 ของการทดลอง BOD ค่อยๆ ลดลงถึงแม้ว่าจะมีการถ่ายน้ำออกจากระบบ และเติมน้ำเสียเพิ่มในทุกวัน เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกนำมาใช้ในการเจริญของสาหร่ายเป็นส่วนมาก จนกระทั่งในวันที่ 12 ของการทดลอง BOD มีค่าต่ำสุดคือ 36 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 63.2 % ค่า BOD จะเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีค่าต่ำลงและจะค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีค่า BOD 49 มิลลิกรัม/ลิตร ทั้งนี้เนื่องจากมีสาหร่ายอยู่เป็นจำนวนน้อย เนื่องจากสาหร่ายส่วนมากได้สูญหายไปจากระบบ (รูปที่ 4.23)

สารอาหาร จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงแอมโมเนีย ในโตรเจน พบว่า มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกชุดการทดลอง โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารเริ่มต้นมีค่า 13.7 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อมีการถ่ายน้ำออกจากระบบ และเติมน้ำเสียเพิ่มในทุกวันหลังจากวันที่ 12 ของการทดลองพบว่า แอมโมเนียในโตรเจน เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและปรับตัวลดลงเรื่อยๆจะคงที่ในช่วงวันท้ายๆของการทดลองคือวันที่ 22-30 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.5-2.8 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียในโตรเจนประมาณร้อยละ 70.2-66.7 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร แอมโมเนีย ในโตรเจนมีค่าเริ่มต้น 8.4 มิลลิกรัม/ลิตร จากการทดลองพบว่าสาหร่ายจะใช้แอมโมเนียในโตรเจนในการช่วยให้เซลล์เจริญเติบโตในช่วงแรกทำให้มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อมีการถ่ายน้ำออกจากระบบ และเติมน้ำเสียเพิ่มในทุกวันหลังจากวันที่ 6 ของการทดลองพบว่า แอมโมเนียในโตรเจน มีค่าลดลงเล็กน้อย แต่หลังจากวันที่ 10 ของการทดลองจะเริ่มเพิ่มขึ้นและในระยะสุดท้ายของการทดลองจะค่อนข้างคงที่ โดยพบว่าในช่วงวันที่ 24-30 มีค่าอยู่ในช่วง 1.6-1.9 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียในโตรเจนประมาณร้อยละ 77.4-85.7 (รูปที่ 4.24 ก.)

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงไนเตรท ในโตรเจน พบว่า ในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้นที่สูงมาก คือมีค่าเริ่มต้น 112.6 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 22.5 โดยพบว่าในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มการทดลอง เมื่อมีการถ่ายน้ำออกจากระบบ และเติมน้ำเสียเพิ่มในทุกวันหลังจากวันที่ 12 ของการทดลองพบว่าค่าไนเตรทในโตรเจน เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเริ่มคงที่ในวันที่ 22 ถึงสิ้นสุดของการทดลอง โดยมีค่าประมาณ 24.8-28.4 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากกว่าค่าเริ่มต้นที่ไม่ได้เติมสารอาหารและชุดควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากสารอาหารที่เพิ่มเข้าไป และจำนวนสาหร่ายที่มีเป็นปริมาณน้อยในระบบเมื่อเริ่มมีการเอาน้ำออกจากระบบทุกวัน ในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารไนเตรท ในโตรเจนมีค่าเริ่มต้น 22.5 มิลลิกรัม/ลิตรจากการทดลองพบว่าไนเตรทในโตรเจนจะค่อยๆลดลงเล็กน้อย ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณน้ำทิ้งหลังจากวันที่ 6 ของการทดลองพบว่าค่าไนเตรท ในโตรเจนจะค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง โดยหลังจากวันที่ 12 ของการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 8.2-15.4 มิลลิกรัม/ลิตร (รูปที่ 4.24 ข.)

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึง soluble reactive phosphorus (SRP) หรือ orthophosphate พบว่า ในตอนเริ่มต้นการทดลองนั้นปริมาณของ SRP นั้นจะไม่แตกต่างกัน โดยชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้น 42.5 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 50.1 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า SRP ในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะลดลงอย่างต่อเนื่องทีละน้อย ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณน้ำทิ้งหลังจากวันที่ 12 ของการทดลองก็ไม่มีผลกระทบต่อ SRP มากนักแต่อย่างไรก็ตามแต่ในช่วงหลังของการทดลองจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่ามีค่าไม่คงที่ โดยเฉพาะหลังจากวันที่ 6 ของการทดลองที่นำน้ำทิ้งเข้าในระบบทุกวัน พบว่า SRP มี

ค่าผันผวนขึ้นลงเกือบตลอดการทดลอง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากจำนวนสาหร่ายที่ค่อนข้างมีเป็นจำนวนน้อย และความผันผวนของน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่นำเข้าไปในระบบ (รูปที่ 4.24 ค.)

ของแข็ง TDS มีค่าสูงมากในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารลงไปโดยมีค่าเริ่มต้น 5000 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 3140 มิลลิกรัม/ลิตร จากการศึกษาพบว่า ค่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารลง TDS จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่หลังจากวันที่ 12 ที่มีการนำน้ำทิ้งเข้าไปในระบบทุกวันพบว่า TDS มีความผันผวนค่อนข้างมากเนื่องจากคุณภาพของน้ำทิ้งไม่คงที่ อย่างไรก็ตามในช่วงสุดท้ายของการทดลองตั้งแต่วันที่ 22-30 พบว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าประมาณ 1240-1760 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารนั้น TDS มีแนวโน้มที่จะลดลง และในระยะสุดท้ายของการทดลอง ตั้งแต่วันที่ 24-30 พบว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าประมาณ 620-580 มิลลิกรัม/ลิตร (รูปที่ 4.25)

และเมื่อพิจารณาถึง SS ซึ่งเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารมีค่าเริ่มต้น 218 มิลลิกรัม/ลิตร ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 250 มิลลิกรัม / ลิตร โดยในแต่ละชุดการทดลองจะมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยในชุดที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่าต่ำกว่าชุดที่ใส่สารอาหาร (รูปที่ 4.26)

DO เมื่อพิจารณาถึงค่า DO พบว่าทั้งชุดการทดลองที่เติมสารอาหารและไม่เติมสารอาหารมีค่า DO ค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองโดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.6-4.86 ซึ่งเป็นปริมาณ ออกซิเจนที่เพียงพอ (รูปที่ 4.27)

อุณหภูมิ ผลจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิตลอดการทดลองในทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 25.2-29.4 °C และชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่าในช่วง 25.2-29.2 °C

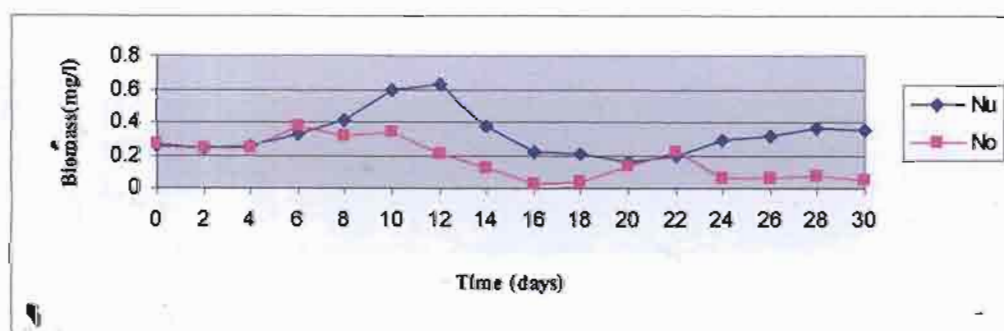
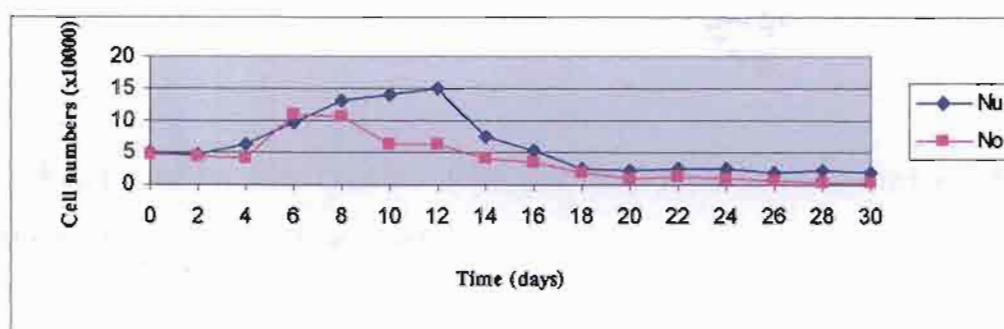
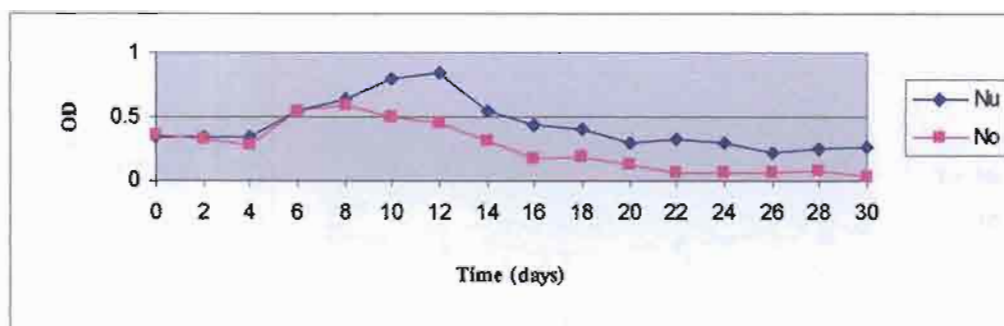
ค่าการนำไฟฟ้า ผลจากการทดลองพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไป โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4900-8300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่าอยู่ในช่วง 1200-3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

pH ผลจากการทดลองพบว่าค่า pH ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารและไม่เติมสารอาหารจะมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยจะอยู่ที่ 10 ± 0.5 ซึ่งเป็น pH ที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

alkalinity ผลจากการทดลองพบว่า alkalinity ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไปและ NaOH ที่ใช้ในการปรับค่า pH เพื่อปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1200-2500 มิลลิกรัม/ลิตร ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 700-1000 มิลลิกรัม/ลิตร

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง ชุดการทดลองทั้งสองชุดการทดลองคือเติมสารอาหารและไม่เติมสารอาหารนั้น ระบบไม่ค่อยมีประสิทธิภาพนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากสาหร่ายส่วนใหญ่

ได้สูญหายไปจากระบบพร้อมกับน้ำทิ้งที่ออกจากระบบในแต่ละวัน อีกทั้งสาหร่ายที่เหลือยู่ในระบบมีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างช้า อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ทำให้สาหร่ายมีแนวโน้มที่จะลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมี OD 0.266 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตอนเริ่มต้น ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารมี OD เพียง 0.024 เท่านั้น อีกทั้ง 2 ชุดการทดลองพบว่าในระยะเวลาที่นานขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งของระบบจะยิ่งลดลง



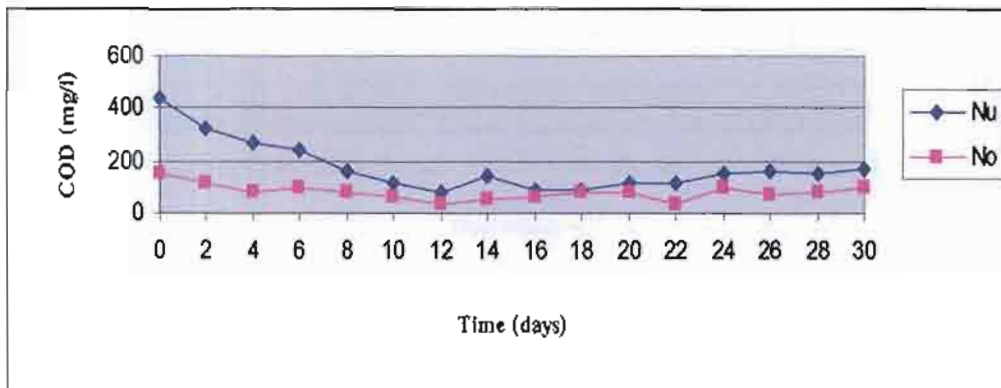
รูปที่ 4.21 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง(semi-continuous culture)

ก.แสดงด้วยค่า OD

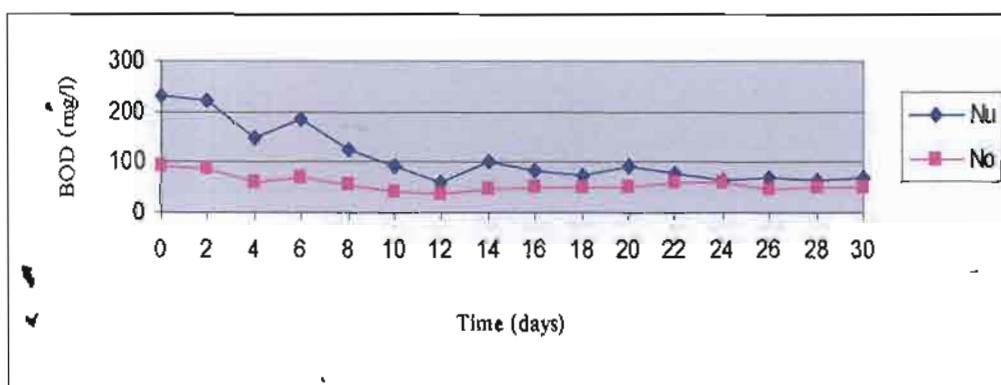
ข.แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย

ค. แสดงด้วยน้ำหนักแห้ง



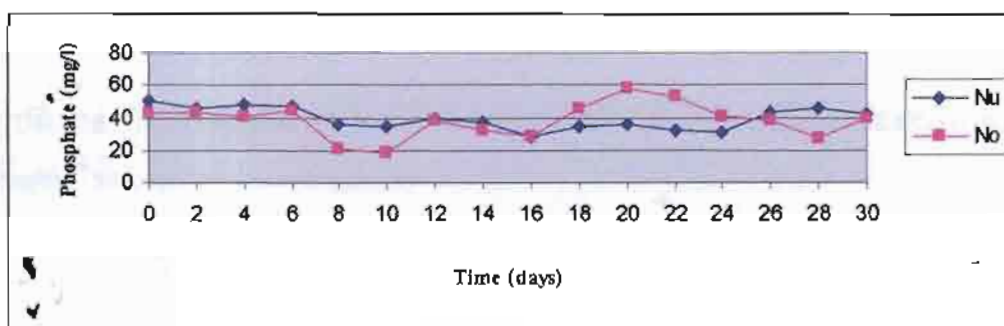
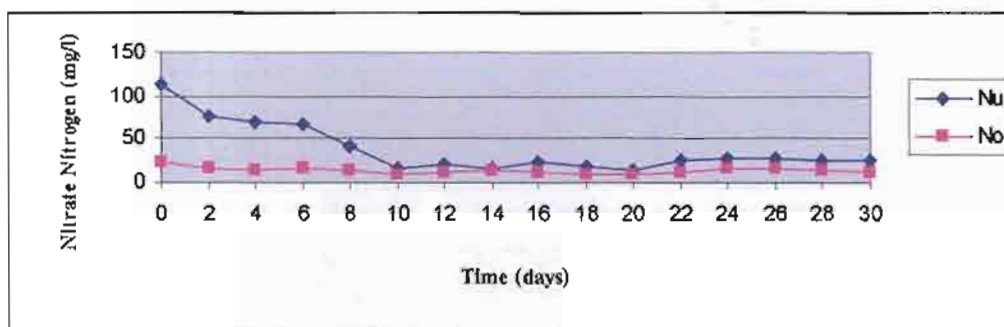
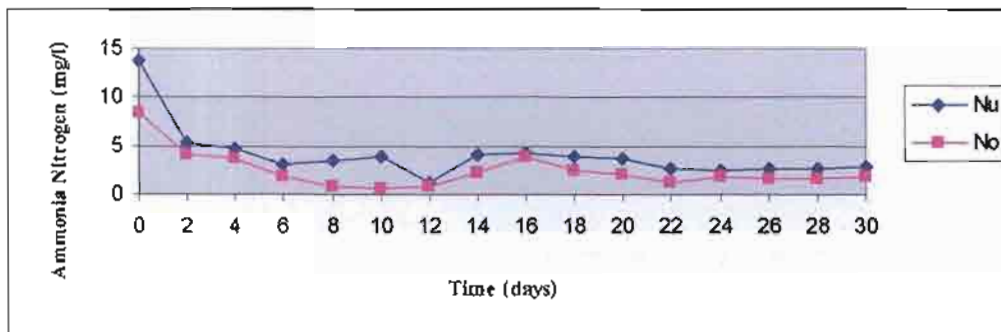


รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)



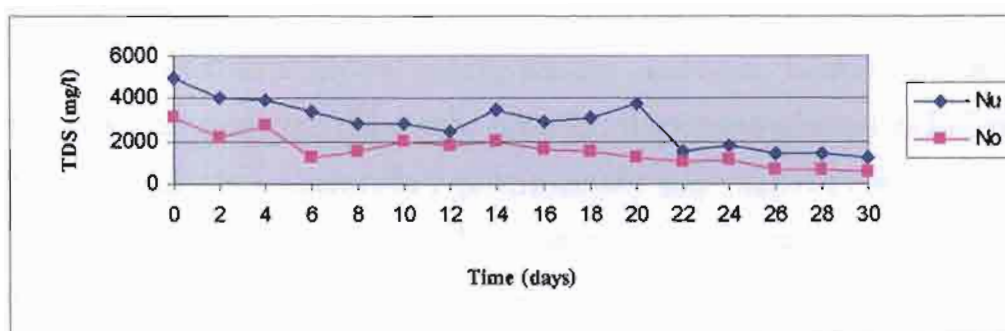
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลง BOD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)



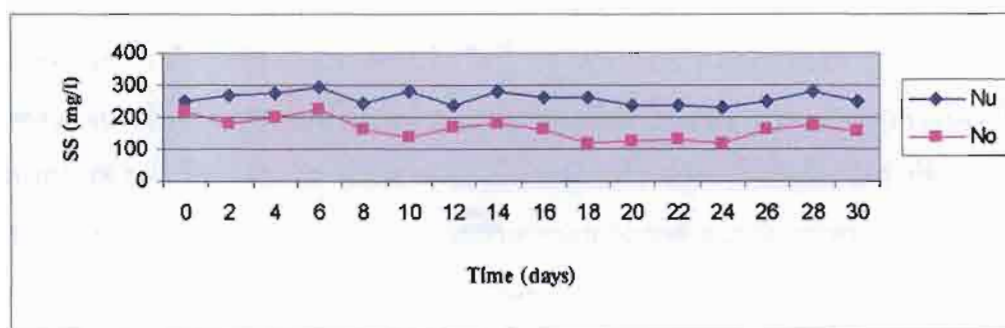


รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารอาหารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)

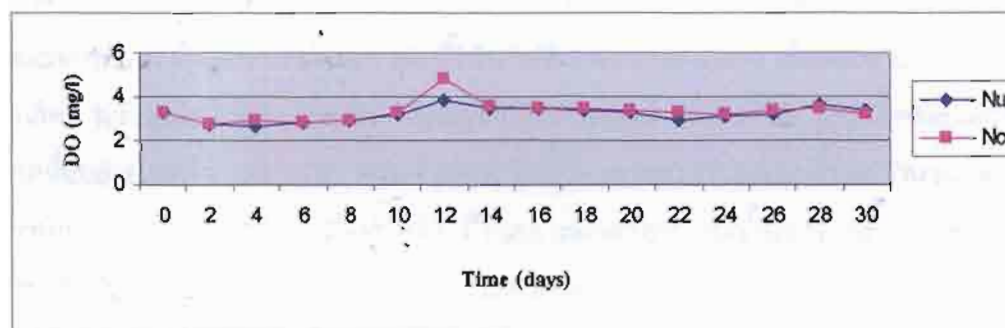
- ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ในโตรเจน
- ข. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ในโตรเจน
- ค. การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูป soluble reactive phosphorus



รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลง TDS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)



รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลง SS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)



รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลง DO ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture)

4.2 การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

เมื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาทำการศึกษาต่อแบบ semi-batch โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อเวียน ขนาด 1.4x3.8x0.6 เมตร ใช้น้ำตัวอย่าง 2,000 ลิตร ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน โดยใช้สาหร่ายเริ่มต้น 20% โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลองคือ ชุดการทดลองที่ 1 เติมสารอาหาร มีระยะเวลาในการเก็บกัก 12 วัน และชุดการทดลองที่ 2 ไม่เติมสารอาหาร มีระยะเวลาในการเก็บกัก 6 วัน ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.2.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย

ในชุดการทดลองที่ 1 เติมสารอาหารลงไปนั้นสาหร่ายจะค่อยๆ เจริญเติบโตอย่างช้าๆ ในวันที่ 0-2 และจะค่อยๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในวันที่ 4-12 และจะเริ่มคงที่ เมื่อเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งและใส่น้ำเสียและสารอาหารที่เหมาะสมได้แก่ NaHCO_3 8.0 กรัม/ลิตร และ NaNO_3 1.5 กรัม/ลิตร ในวันที่ 12 ของการทดลอง พบว่าสาหร่ายมีจำนวนค่อนข้างคงที่ และค่อยๆ เพิ่มขึ้นในวันที่ 18 และเริ่มคงที่ในวันที่ 22 ของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากสารอาหารเริ่มมีจำนวนลดลง และเมื่อทำการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งและใส่น้ำเสียและสารอาหารที่เหมาะสมลงไปในวันที่ 24 พบว่าจำนวนเซลล์ของสาหร่ายยังคงลดลง จากการทดลองพบว่าในรอบการเพิ่มปริมาณน้ำทิ้งเพาะเลี้ยงครั้งที่ 2 จะมีจำนวนเซลล์สาหร่ายสูงที่สุดในวันที่ 22 ของการทดลอง โดยมีค่า OD ประมาณ 1.0 มีน้ำหนักแห้ง 0.965 มิลลิกรัม/ลิตร มีจำนวนเซลล์ 325,500 เซลล์/มิลลิลิตร (รูปที่ 4.28) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อเวียนแบบกึ่งกะนั้นสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าในบ่อกลมที่เพาะเลี้ยงแบบกะ โดยดูจากจำนวนเซลล์ของสาหร่าย ค่า OD และน้ำหนักแห้งที่มีปริมาณมากขึ้นกว่าในการทดลองในบ่อกลมแบบกะ ทั้งนี้เนื่องมาจากการได้รับแสงและการกวนที่ต่อเนื่องและอย่างทั่วถึงกันทั้งบ่อ ทำให้สาหร่ายมีอัตราสังเคราะห์แสงได้มากกว่า และมีความต่อเนื่องที่ยาวนานทำให้สาหร่ายปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้มากกว่าการทดลองแบบกะในการทดลอง pilot scale

ในชุดการทดลองที่ 2 ไม่เติมสารอาหารพบว่าสาหร่ายมีจำนวนเซลล์ลดลงในตอนแรกและเมื่อปรับตัวได้ก็ค่อยๆ เจริญเติบโตอย่างช้าๆ ในวันที่ 6 ของการทดลอง เมื่อเติมน้ำเสียลงไปเพิ่ม พบว่าจำนวนเซลล์ของสาหร่ายลดลง และค่อยๆ เพิ่มขึ้นในวันที่ 8 ของการทดลอง เมื่อเติมน้ำเสียลงไปในวันที่ 12 พบว่าเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยดูจากจำนวนเซลล์ของสาหร่าย และน้ำหนักแห้งที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ค่า OD ค่อนข้างคงที่ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นแต่จำนวนโดยมีเส้นสายที่ไม่ยาวนาน แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายปรับตัวได้ในสภาพแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวนานกว่าที่มีสารอาหาร อย่างไรก็ตามพบว่าสาหร่ายที่เจริญเติบโตขึ้นนี้จะเป็เซลล์สาหร่ายที่ไม่บิดเป็นเกลียวคือจะมีสายตรงและมีสีเขียวอมเหลือง เมื่อทำการเติมน้ำเสียเพิ่มในวันที่ 18 ของการทดลองพบว่าสาหร่ายลดปริมาณลงอย่างรวดเร็วจนในวันที่ 28 ไม่พบเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลินาเลย แต่เมื่อพิจารณาค่าของ OD และน้ำหนักแห้งกลับพบว่ายังมีค่าที่สูงอยู่ทั้งนี้เนื่องมาจากเซลล์ของสาหร่ายที่ตายลงปะปนและแขวนลอยอยู่เป็นตะกอน ซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นตะกอนสีน้ำตาลลอยอยู่เป็นจำนวนมาก

ในน้ำนั้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีสาหร่ายชนิดอื่นๆ ขึ้นปะปนในบ่อเพาะเลี้ยงด้วย ซึ่งมีผลต่อค่า OD และน้ำหนักแห้งเป็นอย่างมาก จากการศึกษพบว่าสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในน้ำเสียแต่เพียงอย่างเดียววันนั้นมีระยะเวลาในการปรับตัวที่ยาวนานและค่อนข้างจำกัด เนื่องจากขาดแคลนสารอาหารต่างๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต โดยเฉพาะการแสดงอาการของโรค chlorosis ซึ่งพืชจะมีอาการซีด เหลือง และตายในที่สุด ซึ่งอาการ chlorosis นี้มักเกิดในพืชหรือสาหร่ายที่ขาดคาร์บอนไดรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง (De Loura, et.al., 1987 อ้างโดยจันทร์พร, 2545) เป็นที่น่าสังเกตว่า อาการซีดเหลืองเหล่านี้ไม่ได้เกิดกับชุดการทดลองที่ใส่สารอาหาร ถึงแม้ว่าในการทดลองจะไม่ได้ใส่สารอาหารจำพวกไนโตรเจนเข้าไปก็ตาม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาหร่ายสไปรูลินาในชุดที่เติมสารอาหารนั้นสาหร่ายได้รับสารอาหารจำเป็นอื่นๆ จึงไม่ได้แสดงอาการของการซีดเหลืองออกมา ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารจะมีความอ่อนแอมาก จึงเปิดโอกาสให้สาหร่ายชนิดอื่นๆ เจริญเติบโตขึ้นปะปนได้ง่าย ซึ่งจะได้นำกล่าวต่อไปในเรื่องของการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในการเพาะเลี้ยง

4.2.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง

COD ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปในนั้นทำให้มีค่า COD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารคือที่ 160 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 440 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่าของ COD เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องโดยเฉพาะในวันที่ 2-12 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายใช้สารอินทรีย์ในการเจริญเติบโตทั้งการเพิ่มขนาด โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 12 โดยพบว่าค่า COD มีค่า 103.5 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 35.3 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารและเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า COD จะเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียและสารอาหารที่เพิ่มเข้าไปจะไปทำให้ค่า COD เพิ่มมากขึ้นและเมื่อสาหร่ายซึ่งกำลังขาดแคลนอาหารได้รับสารอาหารเข้าไปจึงใช้สารอาหารในการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และจะค่อยๆ คงที่เมื่อสารอินทรีย์ถูกใช้หมดลงโดยมีค่าคงที่ในวันที่ 20 และมีค่าต่ำสุดในวันที่ 24 คือ 102 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 36.3 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารและเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า COD จะเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่า COD มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับตัวของสาหร่ายที่ยังไม่สามารถปรับตัวได้ โดยพบว่าในวันที่ 6 COD มีค่า 98 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 38.8 % และเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า COD จะเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง และเมื่อมีการเติมน้ำเสียและสารอาหารเพิ่มในวันที่ 12 ซึ่งสาหร่ายจะเจริญอย่างรวดเร็วพบว่าในวันที่ 16 COD มีค่า 66 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 58.8 % และในวันที่ 18 เมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า COD จะเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องแต่ไม่มากนัก แม้ว่าสาหร่ายสไปรูลินาจะเริ่มตายทั้งนี้เนื่องจาก

พบว่ามิสสาร่ายชนิดอื่นขึ้นมาทดแทนและในวันที่ 28 ของการทดลองไม่พบสาหร่ายสไปรูลินาเลย (รูปที่ 4.29)

BOD ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอาหารลงไปนั้นทำให้มีค่า BOD เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใส่สารอาหารคือที่ 92 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 229 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่าของ BOD ลดลงอย่างรวดเร็วจากวันเริ่มต้นการทดลองจนถึงวันที่ 10 ของการทดลองและจะเริ่มคงที่ โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 12 ของการทดลองโดยมีค่า 42 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 54.3% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร และเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า BOD จะเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง และค่อนข้างคงที่ในวันที่ 20 ของการทดลอง BOD มีค่าต่ำสุดในวันที่ 22 โดยพบว่าค่า 48 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 47.8 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหารและเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารพบว่าในวันต่อมาค่า BOD จะเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร พบว่า BOD มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับตัวของสาหร่ายที่ยังไม่สามารถปรับตัวได้ และเมื่อมีการเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งพร้อมทั้งเติมน้ำเสียและสารอาหารในวันที่ 6, 12 และ 18 พบในวันต่อมาค่า BOD จะเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง และค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 16 ของการทดลองโดยมีค่า BOD 31.1 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 66.2 % แต่อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเนื่องจากสาหร่ายเริ่มตาย (รูปที่ 4.30)

สารอาหาร จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงแอมโมเนีย ในโตรเจน พบว่า มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ในทุกชุดการทดลอง โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารเริ่มต้นมีค่า 13.2 มิลลิกรัม/ลิตร และลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 0-6 และหลังจากนั้นจะคงที่ และเมื่อเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งและเติมน้ำเสียและสารอาหารเพิ่มในวันที่ 12 พบว่ามีค่าแอมโมเนียในโตรเจน เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และระบบจะเข้าสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็วกว่าตอนเริ่มแรกเนื่องจากระบบค่อนข้างที่จะสมดุลโดยมีค่าต่ำคือ 0.7 คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียในโตรเจนร้อยละ 92.3 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร ในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่าสาหร่ายจะใช้แอมโมเนียในโตรเจนในการช่วยให้เซลล์เจริญเติบโตในช่วงแรกก็จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องโดยมีค่าเริ่มต้น 9.12 มิลลิกรัม/ลิตร แต่เมื่อมีการเติมน้ำเสียเพิ่มในวันที่ 6 ของการทดลอง พบว่าทำให้ค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนและระบบต้องใช้เวลาเพื่อจะให้เข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้ง เนื่องจากในช่วงนี้พบว่าสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงยังเติบโตได้น้อย เนื่องจากต้องการระยะเวลาในการปรับตัวที่ยาวนานกว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร แต่อย่างไรก็ตามพบว่าหลังจากเติมน้ำเสียในวันที่ 12 และ 18 ของการทดลองพบว่าค่า แอมโมเนียในโตรเจนลดลงอย่างต่อเนื่องโดยมีค่าต่ำสุด 0.75 คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียในโตรเจนร้อยละ 91.9 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าหลังจากวันที่ 22 ของการทดลองนั้นจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการตายของสาหร่าย (รูปที่ 4.32 ก.)

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึงไนเตรท ไนโตรเจน พบว่า ในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้นที่สูงมาก คือมีค่าเริ่มต้น 118.85 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 22.6 โดยพบว่าในชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มการทดลองและลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 4-10 ของการทดลอง และจะเริ่มคงที่ในวันที่ 10 ของการทดลอง ซึ่งจะมีค่าต่ำสุดคือ 12.55 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการลดค่าไนเตรทไนโตรเจนได้ร้อยละ 44.15 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร แต่เมื่อเอาน้ำออกครึ่งหนึ่งและเติมน้ำทิ้งและสารอาหารเข้าไปใหม่ทำให้ ไนเตรท ไนโตรเจน มีค่าเพิ่มสูงขึ้นแต่ก็จะกลับเข้าสู่สมดุลได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่าลดลงเล็กน้อยและไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักตลอดการทดลอง เนื่องจากการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่มีไม่มากนักแต่ละจะลดลงอย่างมากในช่วงที่สาหร่ายเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วคือหลังจากได้รับน้ำเสียครั้งที่ 2 คือในวันที่ 12 และ 18 เนื่องจากสาหร่ายมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 20 ของการทดลองหลังจากมีการเติมน้ำเสียครั้งที่ 3 คือมีค่า ไนเตรทไนโตรเจน 5.75 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดค่าไนเตรทไนโตรเจนได้ร้อยละ 74.8 อย่างไรก็ตามพบว่าจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อใกล้สิ้นสุดการทดลองเนื่องจากการตายของสาหร่าย (รูปที่ 4.31 ข.)

จากการทดลองเมื่อพิจารณาถึง soluble reactive phosphorus (SRP) หรือ orthophosphate พบว่า ในตอนเริ่มต้นการทดลองนั้นปริมาณของ SRP นั้นจะไม่แตกต่างกัน โดยชุดการทดลองที่เติมสารอาหารมีค่าเริ่มต้น 43.8 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 43.5 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า SRP ในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะลดลงและจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ในวันที่ 12 ของการทดลอง เมื่อเติมน้ำเสียและสารอาหารลงไปในวันที่ 12 และ 24 ของการทดลองพบว่าจะมีค่า SRP เพิ่มขึ้นและจะลดลงโดยใช้เวลาน้อยกว่าในระยะเริ่มแรก โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 20 ของการทดลองโดยมีค่า 13 มิลลิกรัม/ลิตร หรือมีประสิทธิภาพในการลด SRP ร้อยละ 70.1 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่ยังไม่ได้มีการเติมสารอาหาร ในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร SRP ลดลงอย่างสม่ำเสมอในช่วงแรกของการทดลองแต่ละจะลดลงมากในช่วงที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตได้ดีคือหลังจากได้รับน้ำเสียครั้งที่ 2 คือในวันที่ 12 ของการทดลอง และจะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อได้รับน้ำเสียเพิ่มขึ้น โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 20 ของการทดลองโดยมีค่า 15.48 มิลลิกรัม/ลิตร หรือมีประสิทธิภาพในการลด SRP ร้อยละ 64.48 (รูปที่ 4.31 ค.)

ของแข็ง TDS มีค่าสูงมากในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารลงไปโดยมีค่าเริ่มต้น 6800 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 1210 มิลลิกรัม/ลิตร จากการศึกษาพบว่าค่า TDS จะมีค่าลดลงเล็กน้อยและค่อนข้างคงที่ แม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณน้ำเสียและสารอาหารในวันที่ 12 ของการทดลองก็ แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ในระยะสุดท้ายของการทดลอง ชุดที่ไม่เติมสารอาหารจะมีค่า TDS สูงขึ้นเนื่องจากการตายของสาหร่าย (รูปที่ 4.32)

และเมื่อพิจารณาถึง SS ซึ่งเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ชุมการทดลองที่ใส่สารอาหารมีค่าเริ่มต้น 193 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่า 120 และ 170 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยในแต่ละชุดการทดลองจะมีค่าลดลง และจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมน้ำทิ้งเข้าไปในระบบ โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารจะมีการขึ้นลงของ SS ตลอดเวลาเมื่อมีการเติมน้ำทิ้งเข้าไปในระบบ (รูปที่ 4.33)

DO เมื่อพิจารณาถึงค่า DO พบว่าระบบมีประสิทธิภาพมาก และมีออกซิเจนที่เพียงพอ เนื่องจากอากาศที่เติมและจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่ปล่อยออกซิเจนอิสระออกมาละลายละลายอยู่ในน้ำ โดยพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่า DO อยู่ในช่วง 3.9-6.8 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่า DO อยู่ในช่วง 3.1-6.4 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่า DO จะเริ่มลดลงเมื่อสาหร่ายเริ่มตาย (รูปที่ 4.34)

อุณหภูมิ ผลจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิตลอดการทดลองในทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยชุดการทดลองที่ใส่สารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 25.3-29.0 °C และชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารจะมีค่าในช่วง 25.2-28.9 °C

ค่าการนำไฟฟ้า ผลจากการทดลองพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารค่อนข้างมาก เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไป โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5,000-6,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอาหารมีค่าอยู่ในช่วง 1,000-2,100 $\mu\text{S}/\text{cm}$

pH ผลจากการทดลองพบว่าค่า pH ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารและไม่เติมสารอาหารจะมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยจะอยู่ที่ 10 ± 0.5 ซึ่งเป็น pH ที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

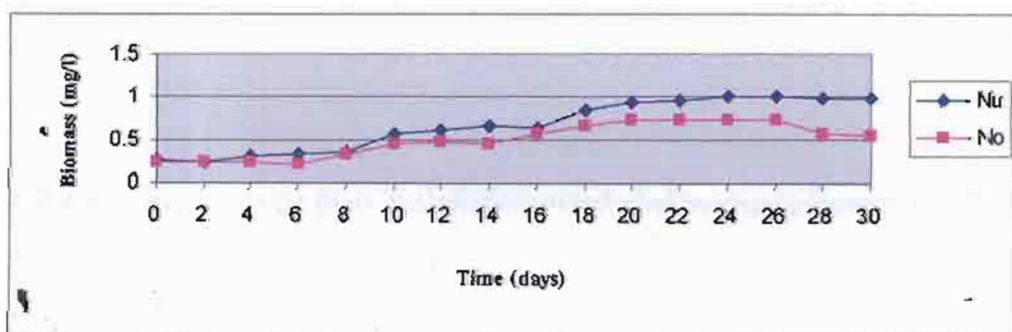
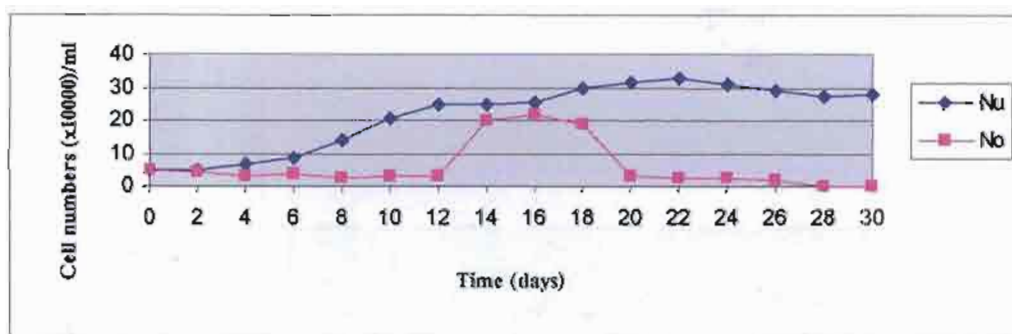
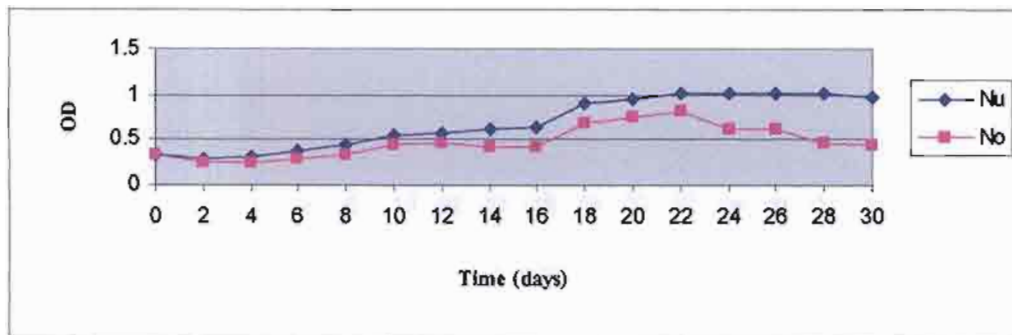
alkalinity ผลจากการทดลองพบว่า alkalinity ของชุดการทดลองที่เติมสารอาหารจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากสารอาหารที่เติมลงไปและ NaOH ที่ใช้ในการปรับค่า pH เพื่อปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1,200-2,500 มิลลิกรัม/ลิตร ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารจะมีค่าอยู่ในช่วง 500-900 มิลลิกรัม/ลิตร

ในการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะพบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้นสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งดูได้จากค่า OD จำนวนเซลล์และน้ำหนักแห้ง พบว่าหลังจากระบบเริ่มปรับตัวแล้วระบบจะค่อนข้างคงที่ และเมื่อมีการเติมน้ำทิ้งเข้าไปในระบบ ระบบสามารถที่จะปรับตัวได้อย่างรวดเร็วเพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุล ในขณะที่ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งมีขึ้นลงบ้างเล็กน้อยเมื่อมีการเติมน้ำเข้าไปในระบบ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ได้เติมสารอาหาร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่าระบบมีการปรับตัวค่อนข้างช้า และเมื่อมีการเติมน้ำเสียเข้าไปในครั้งที่ 3 ของการทดลอง สาหร่ายตายลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสาหร่ายที่ได้มีความอ่อนแอ โดยมีสีเหลืองซีด และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าไม่มีสาหร่ายสไปรูลินาเหลืออยู่เลย แต่พบสาหร่ายชนิดอื่นขึ้นปะปน.

จากการทดลองในทุกระบบพบว่าชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้นมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้น้อยกว่าในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร เนื่องจากน้ำเสียเมื่อได้รับสารอาหารที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในส่วนที่เป็นธาตุอาหารที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าสาหร่ายจะนำสารอาหารเหล่านี้ไปใช้ในการเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนขึ้น ซึ่งจะทำให้สารอาหารเหล่านี้ลดลงไปบ้างก็ตาม แต่ก็ยังคงหลงเหลืออยู่ในระบบ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งได้ไม่ด้นัก เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร อย่างไรก็ตามพบว่า น้ำทิ้งที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วยสาหร่ายสไปรูลินานั้นมีคุณภาพน้ำทิ้งไม่เกินค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร (กลุ่มงานควบคุมมลภาวะฟาร์มปศุสัตว์, 2545) ไม่ว่าจะเพาะเลี้ยงด้วยระบบแบบใดก็ตาม

จากการทดลองในทุกระบบพบว่าสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงโดยส่วนมากจะเป็นเส้นตรง ไม่ค่อยเป็นเกลียว และในบางครั้งก็แตกหักเป็นท่อนสั้นๆ ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารนั้นพบว่าสาหร่ายค่อนข้างมีความอ่อนแอมากกว่าชุดที่เติมสารอาหาร โดยพบว่า มีระยะในการปรับตัวค่อนข้างนานกว่าชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร พบการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นๆ และมีสีค่อนข้างเหลืองเนื่องจากขาดสารอาหาร

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรนั้นจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการลดต้นทุนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อนำมาเป็นอาหารเสริมในสัตว์ เนื่องจากมีการคัดสรรอาหารที่มีความจำเป็นน้อยและไม่มีความสำคัญออก แล้วเสริมด้วยสารอาหารที่มาจากธรรมชาติลงไปแทน ซึ่งพบว่าในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเหล่านี้มีสารอาหารที่มีคุณค่าต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายอยู่มาก ซึ่งสามารถใช้ทดแทนสารสังเคราะห์ที่มีราคาแพงได้ และยังถือได้ว่าเป็นการช่วยในการบำบัดน้ำทิ้งอีกครั้งก่อนปล่อยออกสู่ลำน้ำตามธรรมชาติ แม้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดอาจจะไม่มากนักก็ตามที่



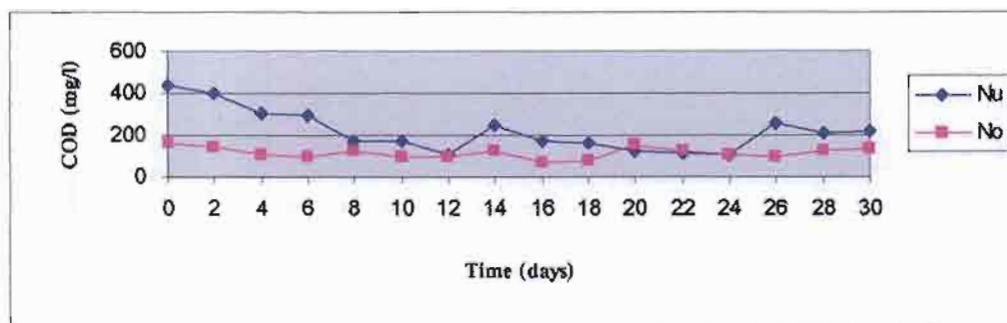
รูปที่ 4.28 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

ก. แสดงด้วยค่า OD

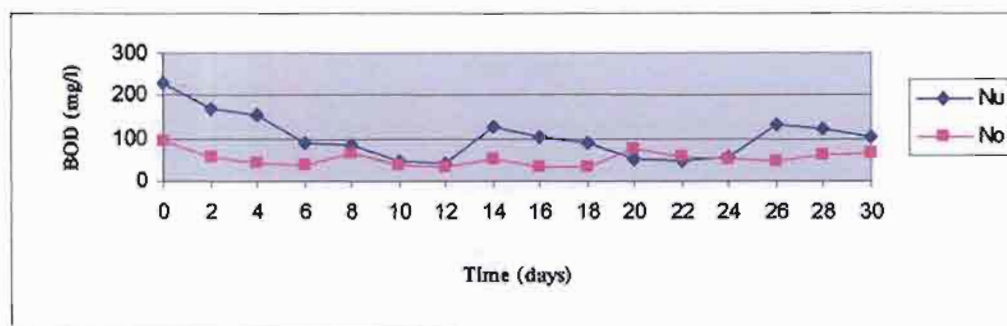
ข. แสดงด้วยจำนวนเซลล์ของสาหร่าย

ค. แสดงด้วยน้ำหนักแห้ง



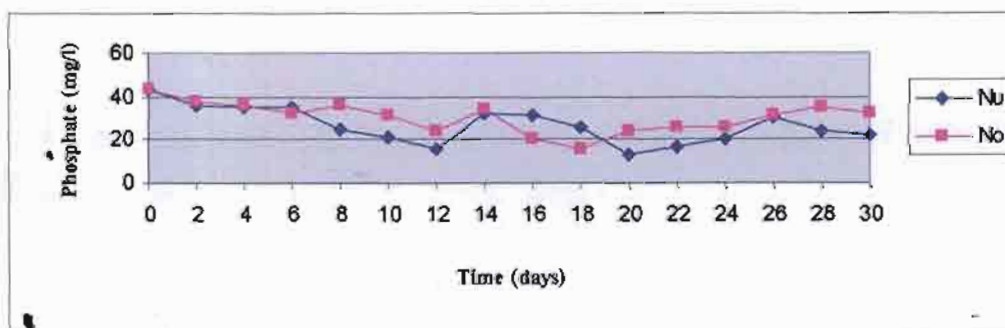
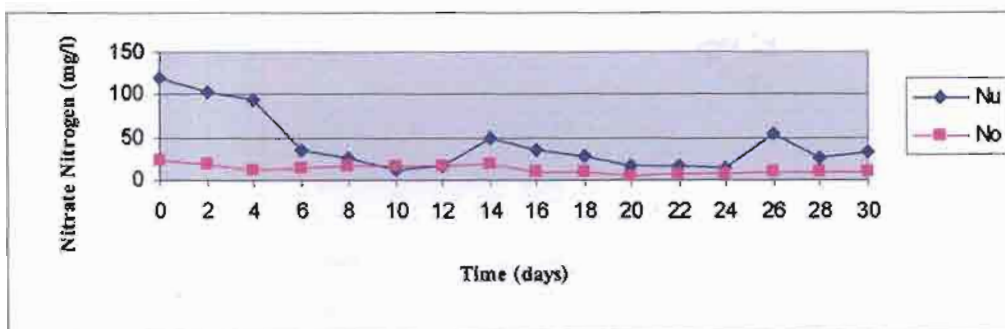
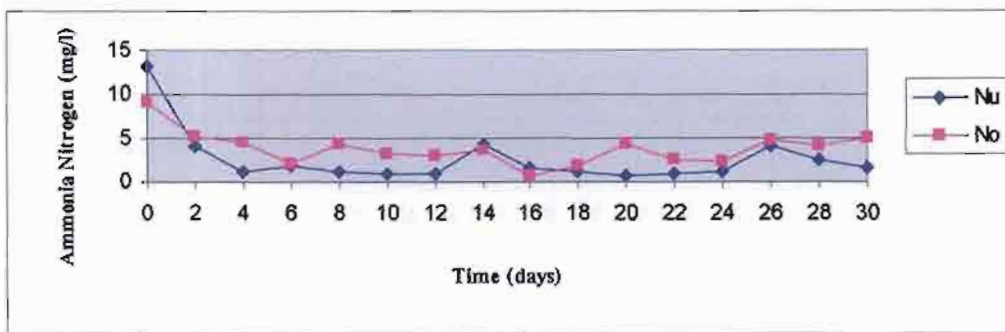


รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)



รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลง BOD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

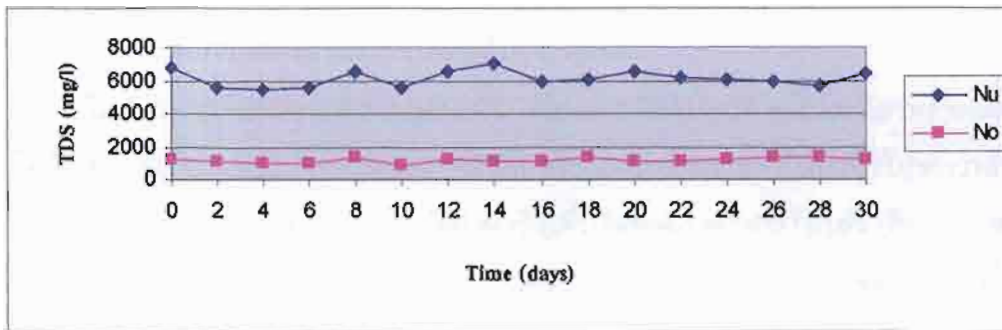




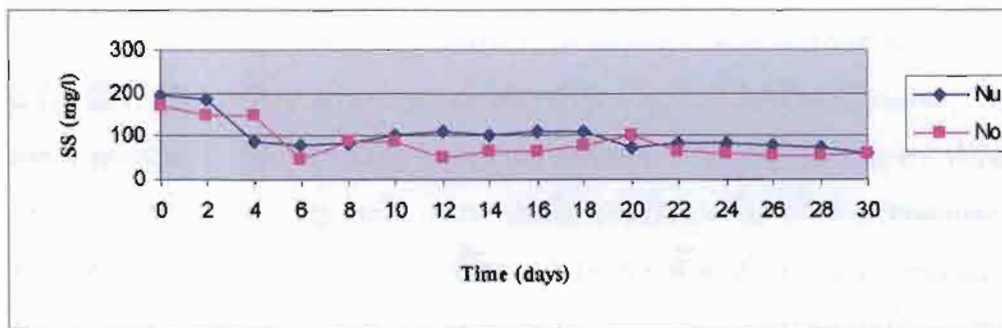
รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารอาหารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

- ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ไนโตรเจน
- ข. การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ไนโตรเจน
- ค. การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูป soluble reactive phosphorus

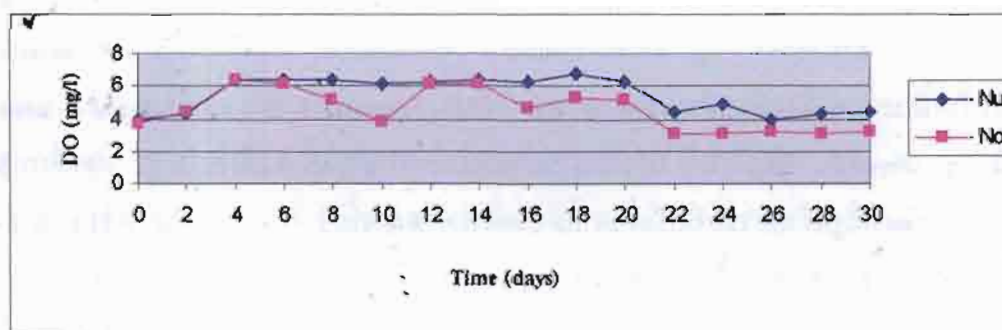




รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลง TDS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)



รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลง SS ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)



รูปที่ 4.34 การเปลี่ยนแปลง DO ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

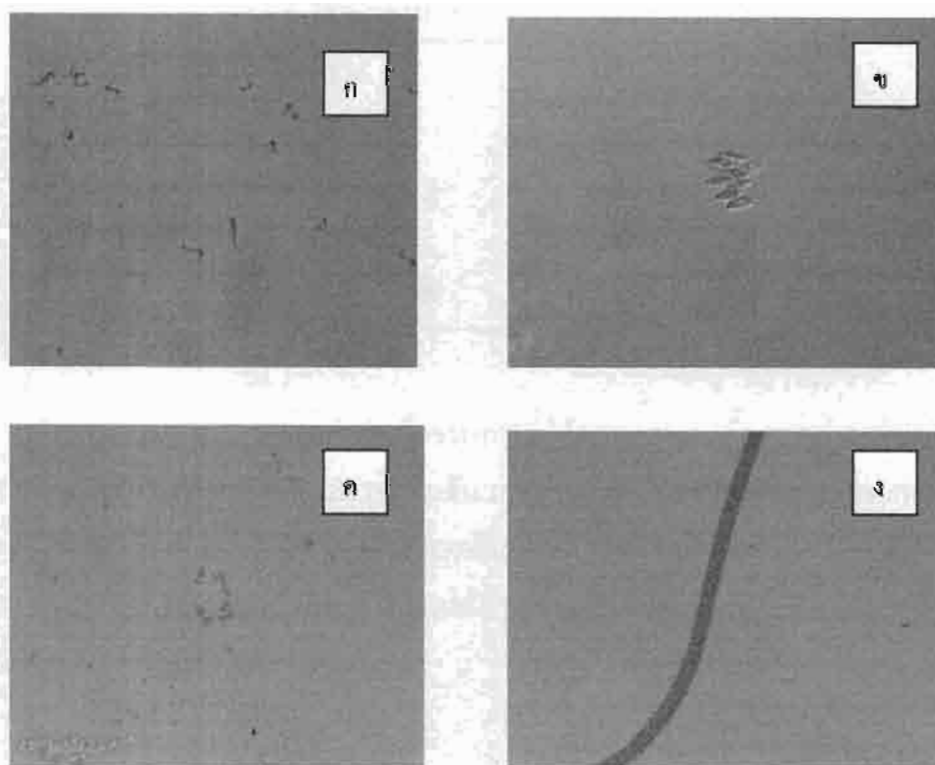
5. การปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นในการทดลอง

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินานั้น เนื่องจากน้ำทิ้งโดยทั่วไปจะมีสาหร่ายและ จุลินทรีย์ ชนิดอื่นๆ ปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจุลินทรีย์และสาหร่ายเหล่านี้โดยทั่วไปพบว่าถ้าสามารถเจริญเติบโตได้ดี จะมีผลกระทบอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาที่จะทำการเพาะเลี้ยงรวม ทั้งมีผลกระทบต่อการทดลอง ดังนั้นในตอนเริ่มต้นการทดลองจึงได้ทำการกำจัดจุลินทรีย์อื่นๆ ก่อน โดย ในตอนที่ 1 ในการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของน้ำทิ้งต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้น ได้ทำการฆ่าเชื้อโดยการต้มน้ำให้เดือดประมาณ 10 นาทีแล้วทิ้งไว้ให้เย็นก่อนนำมาทำการทดลอง และเมื่อทำการทดลองในระดับ pilot scale และระบบนําร่อง ซึ่งต้องใช้น้ำตัวอย่างจำนวนมาก จึงทำการฆ่าเชื้อโดยใช้ sodium metabisulfite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.2 กรัม/ลิตร ทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ก๊าซซัลเฟอร์ระเหยแล้ว นำมาส่งดูด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อให้แน่ใจว่าไม่พบสาหร่ายชนิดอื่นๆ แล้วจึงนำน้ำตัวอย่างมาใช้ในการทดลอง

จากการทดลองพบว่า เมื่อเริ่มทำการทดลอง ไม่พบการปนเปื้อนของสาหร่ายในทุกความเข้มข้น เนื่องจากจุลินทรีย์และสาหร่ายต่างๆ ได้ถูกกำจัดด้วยการต้มให้เดือดแล้ว แต่พบว่าในระยะ 6-7 วันของการทดลองพบว่าเริ่มมีการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นๆ เกิดขึ้น แต่ไม่มากนักในทุกความเข้มข้นของน้ำทิ้ง แต่เมื่อเวลาผ่านไป ชนิดและการปนเปื้อนจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการทดลองแบบ pilot scale คือการทดลองแบบกะ (batch culture) และแบบนําร่องคือ กึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous culture) และ กึ่งกะ (semi-batch culture) ก็จะพบปัญหาของการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นๆ เช่นเดียวกัน โดยสาหร่ายที่พบเป็นจำนวนมากได้แก่ *Monoraphidium* sp., *Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp., และ *Oscillatoria* sp. ดังรูป 4.35 และพบว่ายังมีอีกหลายชนิดที่ขึ้นปะปน เช่น *Micractinium* sp., *Nitzschia* sp., *Ankistrodesmus* sp. และ *Kirchneriella* sp. ซึ่งในการทดลองของอัญชลี (2546) พบว่ามีการปนเปื้อนขึ้นในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในน้ำเสียจากบ่อปรับเสถียรภาพจากระบบก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร ในตัวอย่างน้ำที่ไม่มีการเติมสารอาหารเช่นกัน โดยสาหร่ายที่ปนเปื้อนได้แก่ *Chlorella* sp., *Scenedesmus* spp., *Ankistrodesmus* sp., *Chlamydomonas* sp., *Fragilaria* sp., *Navicula* sp. และ *Autacoseira* sp. นอกจากนี้ Gantar et al., (1991) พบว่าสาหร่ายสไปรูลินาที่ถูกเพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเจือจาง 50 เปอร์เซ็นต์นั้นจะถูกจำกัดโดยสาหร่ายคั้งเดิม ที่สำคัญคือ *Chlorella* sp. เมื่อเลี้ยงได้เพียง 11 วัน ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการใส่สารอาหารที่เหมาะสมเพื่อให้สาหร่ายสไปรูลินาเติบโตได้

จากการศึกษาพบว่าการปนเปื้อนของสาหร่ายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาของการเพาะเลี้ยงนานขึ้น ซึ่งการปนเปื้อนเหล่านี้ส่งผลกระทบอย่างมากต่อ OD น้ำหนักแห้งของสาหร่าย รวมทั้งประสิทธิภาพของระบบ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสาหร่ายที่พบส่วนมากนั้นเป็นตัวช่วยในการบำบัดน้ำทิ้งและพบได้ทั่วไปในระบบบำบัดน้ำเสียอยู่แล้ว (สมทิพย์, 2541) ได้ทำการรวบรวมสาหร่ายชนิดต่างๆ ในระบบบำบัดน้ำเสียหลายชนิดด้วยกัน (Gantar et al., 1991) และไม่เป็นอันตรายต่อการนำมาเป็นอาหารสัตว์อีกด้วย จากการทดลองพบว่าการปนเปื้อนนี้นั้นจะพบมาก โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ไม่ได้ใส่สารอาหาร ทั้งนี้เนื่องจาก

สาหร่ายสไปรูลินาที่ไม่ได้รับสารอาหารจะมีความอ่อนแอ ทำให้สาหร่ายชนิดอื่นๆเจริญเติบโตขึ้นมาแทนที่ได้โดยง่าย ซึ่งสาหร่ายที่ปนเปื้อนเหล่านี้มักจะเป็นสาหร่ายคั้งเค็มที่มีอยู่ในน้ำทิ้งในบริเวณนั้นอยู่แล้ว ถ้าสาหร่ายสไปรูลินาที่เพาะเลี้ยงอ่อนแอลง หรือสารอาหารไม่เพียงพอต่อความต้องการ สาหร่ายคั้งเค็มเหล่านี้ก็จะเจริญเติบโตขึ้นมาได้ (Gantar et al., 1991) เนื่องจากในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติพบว่าสาหร่ายสไปรูลินา มักจะอยู่ปะปนกับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินอื่นๆ อยู่เสมอ (ยวดี, 2542) จากการทดลองพบว่ามีการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดอื่นๆ อยู่เสมอ โดยเฉพาะเมื่อเวลาผ่านไปในวันท้ายๆ ของการทดลอง โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร แต่อย่างไรก็ตามพบว่าในบางครั้งในชุดควบคุม ที่มีเพียงน้ำทิ้งเพียงอย่างเดียวเมื่อเวลาผ่านไปก็จะพบว่ามีสาหร่ายชนิดต่างๆ เจริญเติบโตขึ้น จนในบางครั้งสาหร่ายที่ปนเปื้อนเหล่านี้จะมีผลต่อการทดลองด้วยเช่นกัน ดังนั้นการตรวจสอบการปนเปื้อนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากในการเพาะเลี้ยง ถ้าต้องการนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ต่อไป.



รูปที่ 4.35 สาหร่ายที่ปนเปื้อนที่พบเป็นจำนวนมากจากการทดลอง

ก. *Monoraphidium* sp.

ข. *Scenedesmus* sp.

ค. *Chlorella* sp.

ง. *Oscillatoria* sp.

6. องค์ประกอบและคุณค่าทางโภชนาการ

เมื่อทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบกะ (batch culture) แล้ว เมื่อสิ้นสุดการทดลองได้นำสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงได้ไปทำการอบแห้งและนำสาหร่ายแห้งที่ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณค่าทางโภชนาการ ณ ภาควิชาเทคโนโลยีทางสัตว์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จากการตรวจวัดพบว่ามีคุณค่าทางโภชนาการได้ผลการตรวจวัดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของสาหร่ายสไปรูลินาที่ได้จากการเพาะเลี้ยงแบบ batch culture คัดย่น้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร ความเข้มข้น 20%

องค์ประกอบ	ร้อยละของน้ำหนักแห้ง	
	ใส่สารอาหาร	ไม่ใส่สารอาหาร
สิ่งแห้ง	90.36	92.06
โปรตีน	55.88	50.25
เส้นใย	0.85	0.73
เถ้า	14.17	19.70
ไขมัน	6.75	2.17

ปริมาณสารอาหารและคุณค่าทางโภชนาการที่ได้จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรความเข้มข้น 10% พบว่ามีปริมาณคุณค่าทางโภชนาการที่สูง โดยเฉพาะ โปรตีนที่มีถึง 55.88 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเติมสารอาหารที่จำเป็นและมีค่า 50.25เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ใส่สารอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอาหารและการเพาะเลี้ยงโดยใช้น้ำทิ้งอื่น หรือสูตรอาหารมาตรฐาน เช่น Zarrouk (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลีนา จากการเพาะเลี้ยงในอาหารที่ต่างชนิดกัน

องค์ประกอบ อาหาร	ความชื้น	เถ้า	เยื่อใย	โปรตีน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรต	อ้างอิง
Zarrouk	4.95	6.44	1.92	63.35	0.12	22.97	บริษัท กรีนไคมอนด์ ,2541
น้ำกากส่าหลัก ความเข้มข้น 5%	5.76	6.05	7.38	68.63	6.57	12.99	Peerapompisal et al.,1999
น้ำทิ้งโรงงาน แปรงมัน สำหรับหลัง	8.17	8.93		52.5			นฤมล และคณะ , 2532
น้ำทิ้งจากบ่อ หมักก๊าซชีวภาพ มูลสุกร ความเข้มข้น 50%	6.01	32	0.05	48.9	1.38	11.47	จงกล,2543
น้ำทิ้งจากบ่อ บำบัดหอพัก ความเข้มข้น 100 %	8.52± 1.37	9.13± 0.65	0.22± 0.06	45.11± 2.33	3.72± 0.48	33.29± 2.41	จงกล,2545

สรุปผลการทดลอง

สภาวะที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรคือ ในสภาพกลางแจ้ง ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10 เปอร์เซ็นต์ สารอาหารที่เหมาะสมคือ NaHCO_3 8 กรัม/ลิตร และ NaNO_3 ที่ปริมาณ 1.5 กรัม/ลิตร

การเพาะเลี้ยงแบบกะ (batch) พบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้นสาหร่ายมีการเจริญเติบโตมากกว่าในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารและชุดควบคุม โดยมีระยะเก็บกักที่เหมาะสม 12 วัน ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่า มีระยะเวลาในการเก็บกัก 6 วัน โดยมีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำทิ้งได้ดีกว่าชุดการทดลองที่เติมสารอาหาร

การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous) พบว่าระบบไม่ค่อยมีประสิทธิภาพนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากสาหร่ายส่วนใหญ่ได้สูญหายไปจากระบบพร้อมกับน้ำทิ้งที่ออกจากระบบในแต่ละวัน อีกทั้งสาหร่ายที่เหลืออยู่ในระบบมีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างช้า อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมทำให้สาหร่ายมีแนวโน้มที่จะลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าสาหร่ายเหลืออยู่น้อยกว่าตอนเริ่มต้น

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch) พบว่าในชุดการทดลองที่เติมสารอาหารนั้น สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี ระบบค่อนข้างมีความคงที่ ปรับตัวได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุล แต่อย่างไรก็ตามพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหาร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอาหารพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งได้ดีกว่าเนื่องจากไม่มีสารอาหารที่เพิ่มเข้าไปในระบบ

เมื่อนำสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงได้มาหาปริมาณสารอาหารและคุณค่าทางโภชนาการที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีปริมาณคุณค่าทางโภชนาการที่สูงโดยเฉพาะโปรตีนที่มีถึง 55.88 เปอร์เซ็นต์เมื่อมีการเติมสารอาหารที่จำเป็น และมีค่า 50.25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่เติมสารอาหาร

จากการทดลองในการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกรโดยใช้สาหร่ายสไปรูลินา พบว่า ระบบการเพาะเลี้ยงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือแบบกึ่งกะ (semi-batch) น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาในการเก็บกัก 12 วัน และควรมีการเติมสารอาหารคือ NaHCO_3 ที่ปริมาณ 8 กรัม/ลิตร และ NaNO_3 ที่ปริมาณ 1.5 กรัม/ลิตร เพื่อช่วยในการเจริญเติบโตของสาหร่าย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับระบบของการบำบัดน้ำเสียอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีผลพลอยได้คือสาหร่ายสไปรูลินาซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้เป็นอาหารเสริมสำหรับสุกรภายในฟาร์ม

บรรณานุกรม

- กาญจนภาชน์ ถั่วมนโนมต์. 2527. สาหร่าย. กรุงเทพฯ: คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 343 น.
- กลุ่มงานควบคุมมลภาวะฟาร์มปศุสัตว์ กองสัตว์รักษ์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2545. โครงการพัฒนาระบบการจัดการฟาร์มสุกรที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหามลภาวะจากฟาร์มสุกร. สุกรสาส์น. ปีที่ 28, 112 (เมย.-มิย.).
- จกกล พรหมยะ. 2543. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *spirulina platensis* ในน้ำทิ้งจากหม้อหมักก๊าซ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์. เชียงใหม่.
- _____. 2545. รายงานผลการวิจัย การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *spirulina platensis*(Nordsted) Geiteler เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำจากบ่อบำบัดน้ำเสียจากหอพักนักศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้. เชียงใหม่.
- จิระพรรณ สุขศรีงาม, 2537. โปรตีนธรรมชาติจากสาหร่ายเกลียวทอง. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒมหาสารคาม. 13(2):43-47.
- จิระพรรณ สุขศรีงาม, สนอง จอมเกาะ, กาญจนา พงษ์พิณณ, เสาวลักษณ์ พิมพ์ภูลาด และ สนองภัทร จันทรเพ็ญ. 2539. การวิจัยและพัฒนาเพื่อประโยชน์และกำจัดของเสียจากโรงงานขนมจีน: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 72 น.
- จรูญ ติโตรรงค์. 2531. การนำ Chlorella sp. (K3) ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงน้ำกากส่าเหล้าเพื่อเป็นอาหารของ *Moina macrocopa* Straus เชียงใหม่: วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาชีววิทยามหาบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- จันทพร ทองเอกแก้ว. 2545. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง(*Spirulina* sp.) ในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเนื้อสัตว์. วารสารวิชาการ ม.อบ. 4 (2):1-9.
- ✓ เขียมจิตร บุญสม. 2532. ความลับของสาหร่ายเกลียวทอง: ผลทางการรักษาโรคที่นายแพทย์ชาวญี่ปุ่นค้นพบ. งานแปลลำดับที่ 105. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ทศพร ชงทอง. 2529. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนโดยใช้สาหร่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 150 น.
- นฤมล จิยโชค, บุญยา บุญนาค และมรกต ดันติเจริญ. 2532. การผลิตสาหร่ายเกลียวทองจากน้ำทิ้งโรงงานแป้งมันสำปะหลังในระดับโรงงานต้นแบบ. คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- นฤมล ศุภจรรยา, บุญยา มุนนาค และพิสมัย ภูวสินทิษฐ์. 2529. การผลิตสาหร่ายเกลียวทองจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังในระดับห้องปฏิบัติการสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 34-37. ในรายงานการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีศูนย์พันธุกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ. กรุงเทพฯ: ศูนย์พันธุกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ. สาหร่ายเกลียวทอง. กรุงเทพฯ: บริษัท.
- บานชื่น ชลสวัสดิ์. 2532. การใช้สาหร่ายเกลียวทองเป็นส่วนประกอบของอาหารผสมสำหรับเลี้ยงวิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการประมง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บริษัทกรีนไดมอนด์ จำกัด. 2541. คุณค่าทางโภชนาการของ จีดี-1 สาหร่ายเกลียวทอง. เอกสาร เผยแพร่ปฏิพันธ์ นันทขว้าง. 2543. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *spirulina platensis* ในบ่อเพาะเลี้ยงจำลองด้วยน้ำเชียงใหม่. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 60 หน้า
- พฤตัส จันตาเดช. 2546. การใช้สาหร่าย *spirulina platensis* ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มโคนม. ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่
- พิมพ์พรณ ตันสกุล แลอรักข์ จันทศิลป์. 2531. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *spirulina platensis* ในบ่อน้ำทิ้งจากโรงงานยางพารา. วารสารสงขลานครินทร์. 10 (2): 149-155; เมษายน-มิถุนายน.
- เพ็ญรัตน์ หงษ์วิทยากร. 2545. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเป็นอาหารโปรตีนสำหรับปลา. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.matichon.co.th/techno> (20 สิงหาคม 2548).
- มารศรี เรืองจิตต์ชาวลย์. 2546. สาหร่ายสไปรูลินา. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.digital.lib.kmutt.ac.th> (20 สิงหาคม 2548).
- ยวดี พืชรพพิศาล. 2542. สาหร่าย. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 216 น.
- ยวดี พืชรพพิศาล. 2544. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา. โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย สาหร่ายสไปรูลินาในเขตจังหวัดเชียงใหม่และลำพูน. มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- ยวดี พืชรพพิศาล. วิทยาลัยเทคโนโลยีพณิชยการ, เสกสรร ศาสตร์รักษา, สาครพรมบัติแก้ว และมานพ 2535. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง (*spirulina platensis*) ในน้ำกากส่าเหล้าในระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อม. เชียงใหม่ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 73 หน้า.
- ลักขณา เหล่าไพบุลย์, พัฒนา เหล่าไพบุลย์, สามารถ มูลอามาตย์ และวิไลศนา โพธิ์ศรี. 2540. ผลของการทำแห้งต่อปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ในสาหร่ายเกลียวทอง. รายงานวิจัยภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- ลักดา วงศ์รัตน์. 2544. คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 127 น.

- วิวัฒน์ ชวนะนิกุล. 2543. สถานการณ์การเลี้ยงสัตว์และปัญหาสิ่งแวดล้อมของฟาร์มสุกร. สุกรสาส์น ปีที่ 27 ฉบับที่ 105 (กค-กย)
- วิชากรณ์ พรหมณะ. 2543. การศึกษาสำหรับ *spirulina platensis* ในอาหารสุกรเล็ก (น้ำหนัก 20-30 กิโลกรัม) ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต. คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- สถาบันประมงน้ำจืดแห่งชาติ. 2530. สาหร่ายเกลียวทอง. กรมประมง. กรุงเทพฯ.
- สมชาย กิจสุวรรณกุล. 2531. การเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการระหว่างสาหร่าย *spirulina platensis* 2 ลักษณะ. ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สมทิพย์ คำนัรวันดิษฐ์. 2541. น้ำเสีย: การควบคุมและการบำบัด. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา. 325 หน้า
- สมเกียรติ สุวรรณศิริ. 2542. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง *spirulina platensis* ในระดับอุตสาหกรรม ขนาดย่อมด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- สรวิศ เผ่าทองสุข. 2543. ศักยภาพการวิจัยและการพัฒนาเพื่อการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายในประเทศ ไทย: เอกสารเผยแพร่ชุดโครงการ "อุตสาหกรรมสัตว์น้ำ" สกว. ชุดที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- สุชาติ อิงธรรมจิตร. 2529. สาหร่ายเกลียวทอง (สไปรูลินา). วารสารการประมง. 32,2(พฤศจิกายน):615-621.
- สุวีรรณ เบญจรงค์. 2536. การใช้สาหร่ายเกลียวทองเป็นอาหารแกะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาสัตวบาล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุวิมล จิระอำไพรัตน์. 2536. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทองในน้ำทิ้งจากโรงงานขนมนมจืด. ปริญญานิพนธ์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. มหาสารคาม.
- สุชาติ อิงธรรมจิตร, เข็มจิตต์ บุญสม, เฉลิมวรรณ คงสงวนชัย, บรรจง โคกกระเทียม และ ชัยประดิษฐ์ แก้วประจำ. 2531. การทดลองเบื้องต้นในการใช้น้ำจากกองปลาสดเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina* sp.). กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยประมงน้ำจืด. 9 น.
- สุพรีดรีม. 2549. การใช้สาหร่ายสไปรูลินาในการเพาะเลี้ยงกุ้ง. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://seed.net/suprederm/spirulina> (20 สิงหาคม 2549).
- สมถรรณ ชุ่มเชื้อ. 2542. สาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina* spp.). วารสารมหาสารคาม. 18(1-2): 47-53.
- สมณทิพย์ บุญนาค. 2529. สาหร่ายเกลียวทอง. วิทยาศาสตร์ มข. 14(3): 153-159

- เสกสรร ถาวรดี. 2536. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทองในน้ำทิ้งจากโรงงานขนมจีนผสมกับสูตรอาหาร Zarrouk. มหาสารคาม. วิทยานิพนธ์เกษตรศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มหาสารคาม
- สำนักงานปศุสัตว์จังหวัด. 2550. สถิติจำนวนสุกรในประเทศไทยแสดงรายภาค ปี 2536-2545. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.dld.go.th> (1 มีนาคม 2550).
- อัญชลี เชื้อนเพชร. 2546. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *spirulina platensis* ในระดับนำร่องด้วยน้ำเสียในบ่อปรับเสถียรภาพจากระบบก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสุกร วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 105 น.
- โอภาส วิชชุไกรภพ. 2533. ผลของสาหร่าย *spirulina* spp. ที่มีต่อการเจริญเติบโตและสีของไข่นก. การค้นคว้าเชิงอิสระเชิงวิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาการสอนชีววิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- Choubert, G.C. 1979. Tentative utilization of Spirulina algae as a source of carotenoid pigments for rainbow trout. Aquaculture. 18: 135-143.
- Chiu, R.J., H.I. Liu, C.C. Chen, Y.C. Chi, P. Soong and P.L. Hao. The cultivation of *Spirulina platensis* on fermented swine manure. Cited by P. Chung. 1980. Animal wastewater Treatment and Utilization. 1980: 435-450.
- Gantar, M., Z. Obrecht and B. Dalmacija. 1991. Nutrient removal and algal succession during the growth of *Spirulina platensis* and *Scenedesmus quadricauda* on swine wastewater. Bioresource Technology. 36(2): 167-171.
- Hill, C. 1980. The Secrets of *Spirulina*. University of the Trees Press, Boulder Creek California. 218 p.
- Nakamura, H. 1982 *Spirulina* Food for Hunger World a Pioneer's Story in Aquaculture. University of the Trees Press. Boulder Creek, California. 215 P.
- PaGilla, K.R. Kim, H. and Cheunbarn, T. 2000 Aerobic Thermophilic and anaerobic mesophilic Treatment of swine waste. Wat. Res. 34(10): 2747-2753.
- Peerapompisal, Y, S. Chansiriphotha and S. Prreongkarn. 1999. Nutritional Value of *spirulina platensis* Cultivated in Sugar Cane Molasses Distillery Slops. Proceeding on the 5 th Asia-Pacific Biochemical Engineering Conference, 15-18 November 1999. Phuket Arcadia Hotel, Phuket, Thailand. P.254.
- Richmond, A. (1986) In CRC Handbook of Microalgal Culture (edited by Richmond, A.), CRC press, Inc., Boca Raton, Florida, p. 216.

Stanley, J.G. and J.B. Jones 1976. Feeding algae of fish, Aquaculture. 7(March):219-228.

Venkataraman, L.V. 1983. Bluegreen Alga: *spirulina* . Central Food Technological Research Institute, Mysore, India.

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่เพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในสภาพกลางแจ้ง

ความเข้มข้น	OD								จำนวนเซลล์ (x10000)/มิลลิลิตร							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14
0%	0.12	0.16	0.18	0.21	0.12	0.20	0.18	0.11	2.5	2.43	2.89	2.35	1.236	1.2	1.13	1.25
10%	0.25	0.26	0.29	0.37	0.42	0.45	0.35	0.34	2.39	3.18	6.72	7.83	11.68	10.83	10.229	12.56
20%	0.31	0.31	0.32	0.36	0.33	0.34	0.35	0.33	2.6	3.24	5.23	6.12	5.87	4.22	4.52	2.7
40%	0.41	0.42	0.36	0.23	0.23	0.25	0.22	0.22	2.5	1.25	1.33	0.07	0	0	0	0
60%	0.62	0.58	0.31	0.25	0.32	0.34	0.24	0.27	2.55	2.58	0.9	0.12	0.07	0	0	0
80%	0.79	0.75	0.63	0.67	0.59	0.51	0.55	0.59	2.5	0	0	0	0	0	0	0
100%	0.86	0.86	0.84	0.79	0.78	0.67	0.74	0.64	2.65	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 2 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่เพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในสภาพห้องปฏิบัติการ

ความเข้มข้น	OD								จำนวนเซลล์ (x10000)/มิลลิลิตร							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14
0%	0.12	0.16	0.18	0.21	0.12	0.20	0.18	0.11	2.55	2.54	1.83	1.12	0.75	0	0	0
10%	0.25	0.26	0.22	0.19	0.24	0.21	0.23	0.27	2.6	2.41	3.01	4.16	3.83	3.2	0.54	0.45
20%	0.31	0.29	0.32	0.16	0.20	0.12	0.23	0.25	2.6	1.35	0.95	1.5	1.35	1	0	0
40%	0.41	0.32	0.35	0.12	0.22	0.12	0.22	0.22	2.5	2.55	0.9	0	0	0	0	0
60%	0.62	0.28	0.22	0.15	0.12	0.14	0.22	0.26	2.5	1.2	0.9	0	0	0	0	0
80%	0.79	0.78	0.75	0.65	0.69	0.49	0.58	0.52	2.6	0	0	0	0	0	0	0
100%	0.86	0.76	0.81	0.65	0.78	0.69	0.66	0.60	2.75	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย BOD (มิลลิกรัม/ลิตร)ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน

ความเข้มข้น	กลางแจ้ง								ห้องปฏิบัติการ							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14
0%	8.1	5.5	4.2	13.2	22.1	19.2	17	20.3	8.1	5.1	4.4	13.2	7.5	19.6	17.4	20
10%	98	97.1	86.2	67.1	33	40.3	53	55.3	98	86.3	71.1	75.2	81.5	54	61	65.1
20%	159.2	148.2	109.3	98	119	112.4	91	99.1	159.2	161.1	129.1	128.5	112	136	115.2	112.9
40%	398.4	318	320.1	205.7	332	355.1	349.5	352.6	398.4	387.2	358	312.4	335.6	345.1	395.2	402.1
60%	588.1	578.2	412	356.3	357.4	339	418.3	502.4	588.1	601.2	587	565	458	432	578	598.6
80%	870.2	701.4	586.8	637.65	655.2	780.5	691.6	683.2	870.2	774.4	642	638.5	744.6	732.2	749	769.5
100%	870	852	743.4	910.8	870	1002	958.8	1182.3	870	882.5	882.2	890.2	912.4	887	932.1	1118

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ย Ammonia nitrogen (มิลลิกรัม/ลิตร)ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน

ความเข้มข้น	กลางแจ้ง								ห้องปฏิบัติการ							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14
0%	7.3	8.3	3.4	3.9	1.4	1.3	1.5	2	7.3	7.4	4.4	4.9	3.5	3.3	4.6	4.5
10%	11.5	7.3	3.7	2.1	1.73	0.32	0.52	0.75	11.5	11.3	10.2	5.1	3.2	3.2	4.2	4.6
20%	20.8	12.8	4.1	2.7	0.4	1.8	2.7	1.4	20.8	15.2	14.5	12.7	10.4	11.8	12.7	11.4
40%	35	19.6	8.7	8.2	8.9	10.2	12.8	15.8	35	33.6	25.2	27.8	28.9	30.2	32.2	35.8
60%	65	32.1	25.7	24.3	42.3	52.6	66.5	68.2	65	52.1	55.7	44.3	42.5	45.3	56.2	66.7
80%	82.2	74.1	92	78	76.8	96.3	101.2	94.2	82.2	85.2	90.2	81.3	87.6	75.2	110.3	107.6
100%	108.1	105	82.1	108.6	72.1	85.3	97.4	120	108.1	111	132.4	109.6	102.3	92.6	95.8	99.6

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ย Nitrate nitrogen (มิลลิกรัม/ลิตร)ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน

ความเข้มข้น	กลางแจ้ง														ห้องปฏิบัติการ			
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14		
0%	7	7	5	9	15	10	9	8	7	7	5	9	15	10	9	8		
10%	25	22.5	22.5	20.1	17.4	13.35	15.6	14.5	25	22.5	22.5	20.1	22.5	23.2	20.6	18.9		
20%	44	46.8	32.1	20.7	25.4	38.6	39.2	34.5	44	45.2	44.2	35.9	36.5	39.8	40.3	44.5		
40%	90	92.1	85.4	75.4	66.3	89	85.4	79.5	90	91.2	89.5	78.6	81.3	92	85.4	79.5		
60%	147	104.5	92.8	98.5	101.2	98.3	86.4	102.2	147	150	148.9	139.8	142	135.4	106.3	153.2		
80%	225	246.1	250.3	232	245.2	256.1	223.3	228.1	224.5	223.6	256	239.4	230.8	248.9	252.3	250.6		
100%	270	278.3	266.3	263	250.4	279.6	280.1	290.3	270.1	280.2	288.1	275.9	271	278.1	285.5	291.7		

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ย Phosphate (มิลลิกรัม/ลิตร)ของน้ำทิ้งความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วัน

ความเข้มข้น	กลางแจ้ง														ห้องปฏิบัติการ			
	วันที่ 0	วันที่ 10	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14		
0%	25	27	31.7	26.3	27.1	26.9	28.2	24	25	26	31	26	27	26	28	24		
10%	43.0	42.0	41.0	44.0	21.0	24.0	25.3	21.0	43.0	42.3	42.0	43.5	39.2	35.1	25.6	34.8		
20%	75	70	65.1	52.6	36	46.1	52	49.4	75	74	71.3	69.4	61.5	66.2	65.4	64.2		
40%	152	150	144.3	138	152	158	159.2	168	152	148	140	134	137	140	158	171		
60%	250	250	251.7	307	315	320	314.2	318	250	236	258	417	316	366	371	326.4		
80%	312	329	335.1	318.4	363	374	356.1	339	312	342	346	349	359	376	378	365.3		
100%	390	410	415.3	439.6	472	458.6	460.9	446	390	427	433	439	473	458	460	446.2		

ตารางที่ 7 ผลของระดับสารอาหารชนิดต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วันแสดงด้วยค่า OD

ระดับสารอาหาร	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 8	วันที่ 9	วันที่ 10	วันที่ 11	วันที่ 12	วันที่ 13	วันที่ 14
NaNO₃															
กลางแจ้ง															
control	0.21	0.23	0.27	0.26	0.32	0.36	0.40	0.43	0.49	0.54	0.55	0.59	0.64	0.64	0.72
0.5 g/l	0.21	0.22	0.25	0.29	0.32	0.36	0.43	0.51	0.51	0.62	0.56	0.71	0.75	0.78	0.81
1.0 g/l	0.23	0.23	0.24	0.26	0.28	0.35	0.37	0.39	0.49	0.59	0.61	0.67	0.71	0.72	0.82
1.5 g/l	0.22	0.25	0.25	0.25	0.28	0.38	0.45	0.5	0.5	0.63	0.66	0.81	0.8	0.93	1.04
2 g/l	0.28	0.22	0.28	0.27	0.3	0.32	0.28	0.47	0.53	0.6	0.57	0.7	0.73	0.79	0.92
ห้องปฏิบัติการ															
control	0.2	0.19	0.19	0.17	0.19	0.22	0.17	0.2	0.18	0.13	0.11	0.11	0.13	0.12	0.15
0.5 g/l	0.19	0.20	0.21	0.23	0.25	0.18	0.22	0.21	0.22	0.19	0.18	0.19	0.19	0.22	0.25
1.0 g/l	0.25	0.22	0.22	0.19	0.22	0.23	0.24	0.24	0.24	0.21	0.19	0.25	0.26	0.25	0.27
1.5 g/l	0.22	0.21	0.23	0.23	0.24	0.23	0.28	0.25	0.29	0.26	0.19	0.23	0.24	0.26	0.26
2 g/l	0.22	0.21	0.19	0.13	0.18	0.17	0.17	0.15	0.14	0.16	0.12	0.12	0.13	0.11	0.07
NaHCO₃															
กลางแจ้ง															
control	0.21	0.23	0.27	0.26	0.32	0.36	0.40	0.43	0.49	0.54	0.55	0.59	0.64	0.64	0.72
4 g/l	0.2	0.22	0.23	0.27	0.3	0.32	0.38	0.39	0.49	0.52	0.54	0.58	0.67	0.57	0.82
6 g/l	0.22	0.23	0.26	0.28	0.33	0.37	0.40	0.44	0.55	0.6	0.64	0.69	0.76	0.75	0.87
8 g/l	0.24	0.25	0.28	0.32	0.36	0.41	0.51	0.57	0.64	0.69	0.71	0.8	0.87	0.91	1.03
10 g/l	0.2	0.22	0.25	0.27	0.32	0.37	0.41	0.44	0.5	0.55	0.58	0.63	0.7	0.69	0.8
ห้องปฏิบัติการ															
control	0.2	0.19	0.19	0.17	0.19	0.22	0.17	0.2	0.18	0.13	0.11	0.11	0.13	0.12	0.15
4 g/l	0.2	0.21	0.22	0.23	0.23	0.24	0.22	0.24	0.23	0.28	0.26	0.28	0.32	0.31	0.26
6 g/l	0.19	0.23	0.23	0.23	0.22	0.25	0.26	0.25	0.27	0.25	0.25	0.24	0.28	0.27	0.3
8 g/l	0.2	0.22	0.23	0.21	0.23	0.25	0.26	0.21	0.26	0.26	0.24	0.25	0.27	0.27	0.31
10 g/l	0.17	0.22	0.22	0.241	0.22	0.216	0.264	0.23	0.24	0.23	0.19	0.2	0.23	0.22	0.28

ตาราง (ต่อ)

ระดับการอาหาร	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 8	วันที่ 8	วันที่ 9	วันที่ 10	วันที่ 11	วันที่ 12	วันที่ 13	วันที่ 14
NPK															
กลายร่าง															
control	0.22	0.26	0.27	0.30	0.30	0.31	0.37	0.39	0.43	0.52	0.49	0.62	0.66	0.70	0.77
0.2 g/l	0.23	0.24	0.25	0.26	0.23	0.23	0.31	0.31	0.37	0.42	0.42	0.52	0.52	0.56	0.63
0.4 g/l	0.26	0.23	0.24	0.26	0.24	0.24	0.26	0.30	0.31	0.35	0.40	0.43	0.52	0.54	0.55
0.6 g/l	0.26	0.25	0.25	0.24	0.22	0.21	0.24	0.29	0.31	0.37	0.38	0.56	0.56	0.64	0.68
0.8 g/l	0.28	0.22	0.23	0.24	0.17	0.16	0.18	0.16	0.17	0.20	0.22	0.30	0.39	0.44	0.53
หึ่งปฏิบัติการ															
control	0.24	0.21	0.19	0.21	0.20	0.20	0.19	0.18	0.18	0.18	0.20	0.21	0.21	0.25	0.21
0.2 g/l	0.25	0.23	0.22	0.24	0.22	0.18	0.19	0.19	0.20	0.19	0.18	0.18	0.20	0.22	0.21
0.4 g/l	0.27	0.20	0.21	0.23	0.20	0.18	0.19	0.23	0.19	0.19	0.20	0.20	0.23	0.24	0.24
0.6 g/l	0.28	0.24	0.23	0.23	0.16	0.15	0.17	0.14	0.12	0.17	0.16	0.17	0.19	0.21	0.25
0.8 g/l	0.33	0.22	0.19	0.19	0.15	0.14	0.16	0.13	0.11	0.12	0.09	0.10	0.18	0.11	0.09
K₂HPO₄															
กลายร่าง															
control	0.22	0.26	0.27	0.30	0.3	0.32	0.37	0.39	0.43	0.52	0.49	0.62	0.66	0.7	0.77
0.1 g/l	0.29	0.28	0.29	0.30	0.3	0.33	0.31	0.37	0.45	0.51	0.46	0.65	0.75	0.77	0.84
0.3 g/l	0.29	0.28	0.26	0.23	0.17	0.20	0.30	0.27	0.31	0.31	0.26	0.42	0.44	0.48	0.52
0.5 g/l	0.3	0.3	0.28	0.29	0.28	0.28	0.32	0.35	0.39	0.34	0.29	0.42	0.46	0.48	0.52
0.7 g/l	0.3	0.23	0.25	0.23	0.22	0.25	0.18	0.26	0.29	0.23	0.29	0.31	0.35	0.37	0.43
หึ่งปฏิบัติการ															
control	0.24	0.21	0.19	0.21	0.2	0.20	0.19	0.18	0.18	0.18	0.2	0.21	0.21	0.25	0.21
0.1 g/l	0.17	0.22	0.22	0.24	0.22	0.22	0.25	0.23	0.24	0.23	0.19	0.2	0.23	0.22	0.28
0.3 g/l	0.2	0.22	0.23	0.21	0.23	0.25	0.26	0.21	0.26	0.26	0.24	0.25	0.27	0.27	0.31
0.5 g/l	0.19	0.23	0.23	0.23	0.22	0.25	0.26	0.25	0.27	0.25	0.25	0.24	0.28	0.27	0.3
0.7 g/l	0.2	0.21	0.22	0.23	0.23	0.24	0.22	0.24	0.23	0.28	0.26	0.28	0.32	0.31	0.26

ตารางที่ 8 ผลของระดับสารอาหารชนิดต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina platensis* ในระยะเวลาเพาะเลี้ยง 14 วันแสดงด้วยจำนวนเซลล์

ระดับสารอาหาร	กลางแจ้ง							ห้องปฏิบัติการ								
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8	วันที่ 10	วันที่ 12	วันที่ 14
NaNO ₃																
control	2.39	3.2	6.725	7.839	11.7	10.83	10.23	12.6	2.91	2.41	3.01	4.16	3.83	3.25	5.44	4.575
0.5 g/l	1.83	3.9	6.48	10.72	15	15.36	15.88	18.5	2.17	4.14	4.8	5.88	6.14	7.42	6.78	6.917
1.0 g/l	2.36	4.1	8.753	10.31	13.7	16.7	14.61	21.8	1.92	3.83	5.05	5.67	5.99	6.19	5.97	7.933
1.5 g/l	1.97	5.8	9.973	11.88	13.1	17.69	19.42	21.8	1.75	6.08	5.75	6.22	6.67	9.6	9.7	7.607
2 g/l	2.03	5.5	8.278	10.72	13.2	11.42	12.9	17.4	2.33	2.77	4.08	3.36	3.28	5.67	4.31	4.333
NaHCO ₃																
control	2.39	3.2	6.725	7.839	11.7	10.83	10.23	12.6	2.91	2.41	3.01	4.16	3.83	3.25	5.44	4.575
4 g/l	2.25	3.9	6.477	9.057	17.9	18.92	22	24.6	2.42	4.59	6.22	6.79	6.88	10.7	10.4	8.417
6 g/l	2.08	4.1	9	13.2	15.2	17.5	16.11	18.9	2.25	5.22	6.5	6.64	7.54	8.44	8.94	9.35
8 g/l	2	4.9	9.25	13.83	17.7	23.42	28.36	29.3	2	4.67	5.86	8.11	7.14	8.33	10.4	10.83
10 g/l	2.05	6.3	8.833	12.27	17.2	20.75	22.96	24.2	1.5	5.11	5.13	7.03	7.08	9	8.09	8.777
NPK																
control	2.1	4.6	7.46	10.14	10	14.61	14.58	15.6	2.9	4.43	4.33	5.2	5.64	6.13	5.57	6.72
0.2 g/l	2.41	4.5	5.353	10.07	11.1	12.53	15	17.2	2.68	4.11	4.9	4.15	6.32	6.15	6.12	5.177
0.4 g/l	2.89	2.4	4.507	6.453	9.74	11.34	14.08	15.1	2.94	2.91	4.16	4.2	7.57	7.89	7.53	8.033
0.6 g/l	2.47	3.2	3.227	6.523	9.7	14.37	15.1	17.9	2.48	4.11	3.18	3.89	6.05	6.13	7.52	7.09
0.8 g/l	2.57	2.3	2.093	3.107	4.65	6.197	10.29	11.1	2.56	2.6	2.4	2.02	2.1	2.33	1.44	1.463
K ₂ HPO ₄																
control	2.1	4.6	7.46	10.14	10	14.61	14.58	15.6	2.9	4.43	4.33	5.2	5.64	6.13	5.57	6.72
0.1 g/l	2.26	4.2	7.8	10.15	10.4	16.2	15.13	16.4	1.5	5.11	5.13	7.03	7.08	9	8.09	8.777
0.3 g/l	2.44	2.3	4.503	9.33	7.22	11.24	14.69	15	2	4.67	5.86	8.11	7.14	8.33	10.4	10.83
0.5 g/l	2.63	3.9	6.04	10.02	12.5	12.01	14.9	18.1	2.25	5.22	6.5	6.64	7.54	8.44	8.94	9.35
0.7 g/l	2.19	3.8	5.977	8.37	10.1	12.17	10.41	12.2	2.42	4.59	6.22	6.79	6.88	10.7	10.4	8.417

ตารางที่ 9 ผลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกะ (batch culture)

น้ำทิ้งความเข้มข้น 10%+ สารอาหาร													
วันที่	OD (mg/l)	cell ($\times 10^6$ cells/ml)	Biomass (mg/l)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)	Ammonia (mg/l)	Nitrate nitrogen (mg/l)	SRP (mg/l)	TDS (mg/l)	SS (mg/l)	DO (mg/l)	temp (°C)	conductivity (μ S/cm)
0	0.38	4.5	0.2025	166	82	8.67	22.58	33.73	1550	89	4.1	28.2	1560
2	0.20	3.5	0.245	145	57	8.43	13.59	27.81	1655	75	4.4	28.5	1595
4	0.21	4.25	0.2	135	46.5	2.24	10.49	26.45	1788	67	3.7	28.4	1895
6	0.59	10.8	0.2925	76	32	0.83	10.11	19.45	1760	61	3.7	27.6	2210
8	0.42	9	0.3075	125	49.5	0.86	12.52	22.94	1883	176	2.9	28.4	2305
10	0.29	9.5	0.315	160	61.5	1.00	14.87	29.78	1960	227	2.9	29.1	2460
12	0.59	7.25	0.39	148	84.5	1.33	11.98	30.29	1880	255	2.4	28.6	2390
14	0.49	6.25	0.37	172	105	1.04	12.20	31.51	1808	238	1.4	28.1	1465
16	0.32	0	0.24	185	115	1.04	12.05	31	1778	246	1.4	28.5	1570
น้ำทิ้งความเข้มข้น 10%+ สารอาหาร + สารฟอส													
วันที่	OD (mg/l)	cell ($\times 10^6$ cells/ml)	Biomass (mg/l)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)	Ammonia (mg/l)	Nitrate nitrogen (mg/l)	SRP (mg/l)	TDS (mg/l)	SS (mg/l)	DO (mg/l)	temp (°C)	conductivity (μ S/cm)
0	0.37	4.65	0.2375	460	236.5	12.80	106.23	34.29	7925	194	4.5	28.2	4118
2	0.44	5.55	0.285	410	182	1.59	101.72	31.78	7583	191	4.5	28.0	6490
4	0.74	14.5	0.3825	340	166	0.95	107.54	29.34	8258	182	4.0	28.1	7645
6	0.79	15.25	0.445	260	91	0.81	98.38	29.17	8438	162	3.9	27.5	8035
8	0.89	16.75	0.485	206	58.5	0.85	92.15	18.82	8583	195	3.7	28.0	8315
10	0.96	17.25	0.495	140	55.5	1.22	23.54	19.58	7680	236	3.4	28.1	8365
12	1.09	17.8	0.69	128	45	1.11	16.80	16.73	6980	171	3.6	28.3	7915
14	1.05	17.5	0.6625	122	48	0.84	13.74	12.67	7025	139	4.6	28.0	7575
16	0.95	16.8	0.65	115	49	0.72	11.36	11.28	6552	122	2.9	28.1	8020

ตารางที่ 9 (ต่อ)

บันทึกความชื้น 10%

วันที่	OD (mg/l)	cell ($\times 10^6$ cell/cm)	Biomass (mg/l)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)	Ammonia (mg/l)	Nitrate nitrogen (mg/l)	SRP (mg/l)	TDS (mg/l)	SS (mg/l)	DO (mg/l)	temp (°C)	conductivity (μ S/cm)	alkalinity (mg/l)	pH
0	-	-	-	166	82	8.90	22.04	33.80	1085	72	3.4	28.3	1410	700	8.4
2	-	-	-	160	60	6.44	39.38	34.85	995	70	3.7	29.0	1080	700	8.3
4	-	-	-	140	60	3.80	31.67	36.52	1155	68	3.4	28.1	1410	500	7.8
6	-	-	-	120	52	2.06	32.96	44.89	1385	56	3.3	28.0	1700	500	7.1
8	-	-	-	100	51	1.92	24.82	41.26	1495	46	2.7	28.1	1660	400	7.1
10	-	-	-	100	40	1.88	32.53	36.52	1670	40	3.1	29.0	1670	500	7.1
12	-	-	-	80	38	1.84	23.97	33.46	1685	41	3.2	29.0	1460	500	7.1
14	-	-	-	100	37	1.59	22.68	31.78	1660	63	4.2	29.1	1385	500	7.2
16	-	-	-	100	39	1.89	19.69	32.91	1505	57	2.4	29.0	1505	500	7.7

ตารางที่ 10 ผลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi- continuous culture)

น้ำที่ความเข้มข้น 10%+ สาหร่าย															
วันที่	OD (mg/l)	cell (x10 ⁶ cells/ml)	Biomass (mg/l)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)	Ammonia (mg/l)	Nitrate mg/ml	SRP (mg/l)	TDS (mg/l)	SS (mg/l)	DO (mg/l)	temp (°C)	conductivity (µS/cm)	alkalinity (mg/l)	pH
0	0.36	4.7	0.27	155	93	8.4	22.5	42.5	3140	218	3.26	25.40	2100	900	10.1
2	0.33	4.4	0.2465	120	90	4.2	17	42.5	2170	182	2.76	26.10	2200	700	10
4	0.28	4.2	0.2431	80	62	3.7	15	41	2760	200.5	2.94	26.50	2500	800	9.8
6	0.55	10.9	0.2103	96	70	1.9	15.4	44	1230	223.8	2.86	28.4	1900	700	9.9
8	0.59	10.5	0.312	80	54	0.8	14.9	21	1460	164.5	2.94	27.2	1500	700	9.6
10	0.5	6.3	0.3451	60	42	0.7	10	18.2	1970	139	3.3	26.1	1400	800	9.7
12	0.46	6.2	0.38	40	36	0.8	12.1	37.8	1800	168.5	4.86	26.2	1600	900	10.1
14	0.32	4.2	0.1231	56	48	2.2	14.2	32.5	1960	183.5	3.59	26.7	1200	1000	10.4
16	0.169	3.4	0.03	64	53	3.9	11.3	28	1630	165.6	3.46	27.3	1500	700	10.2
18	0.18	1.8	0.0412	80	52	2.4	8.2	46	1530	118	3.45	28.1	2500	900	9.8
20	0.129	1	0.132	80	49	2.1	9.1	58	1240	122	3.4	29.2	3000	800	9.6
22	0.07	1.2	0.213	40	62	1.2	12	52.4	1040	129.3	3.24	28.4	2600	800	9.4
24	0.064	0.8	0.064	96	58	1.8	15.4	40.1	1120	121.6	3.14	28.6	2200	700	10.2
26	0.058	0.7	0.0551	74	48	1.6	17	38	620	163.5	3.33	26.4	2400	700	10.1
28	0.076	0.4	0.0678	80	50	1.7	13.2	26.7	680	174.2	3.48	25.2	2100	700	10.1
30	0.024	0.3	0.0451	98	52	1.9	12	39	580	155.2	3.21	27.1	2200	900	10

ตารางที่ 10 (ต่อ)

น้ำที่ความเข้มข้น 10%-สารวัด+สารอาหาร															
วันที่	OD (mg/l)	cell (x10 ⁶ cells/ml)	Biomass (mg/l)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)	Ammonia (mg/l)	Nitrate nitrogen (mg/l)	SRP (mg/l)	TDS (mg/l)	SS (mg/l)	DO (mg/l)	temp (°C)	conductivity (μS/cm)	alkalinity (mg/l)	pH
0	0.35	4.9	0.2516	440	230	13.7	112.6	50.1	5000	250	3.31	25.2	7200	2400	10.4
2	0.34	4.8	0.2422	320	222	5.3	75.2	45.2	4040	270	2.7	26.2	8300	2500	10.1
4	0.345	6.2	0.2508	270	150	4.7	70.1	48.3	3960	276	2.6	26.9	8000	2500	10.2
6	0.54	9.6	0.3217	240	186	3	66.1	46.4	3370	294.3	2.78	28.2	7000	2500	10.1
8	0.64	13	0.4115	160	125	3.4	42.5	36.1	2830	243.8	2.94	28.1	7000	2100	10
10	0.79	14.2	0.5963	120	92	4	16.8	34.1	2800	278.5	3.19	26	4900	2000	9.9
12	0.85	15	0.6251	80	61	1.3	20.4	39.6	2460	239.5	3.83	26.5	5700	1500	9.9
14	0.55	7.6	0.3791	146	102	4.1	15.6	36.5	3460	278.5	3.48	26.9	7500	1600	10.1
16	0.43	5.2	0.214	86	85	4.4	22.3	28.3	2890	263	3.42	26.7	6300	1800	10.4
18	0.399	2.4	0.211	94	76	3.9	19	34.2	3120	260.2	3.38	28.4	6500	1500	10
20	0.295	2.2	0.1632	112	91	3.8	13	36.2	3740	239.5	3.31	29.4	6500	1700	9.5
22	0.322	2.6	0.2	120	78	2.6	26.5	32.1	1480	239.5	2.91	29.1	7000	2100	9.8
24	0.29	2.5	0.2941	148	64	2.5	28.4	30.5	1760	230.2	3.07	28.4	7500	2100	9.8
26	0.226	1.9	0.3141	162	70	2.7	28	42.5	1400	252.3	3.21	25.8	7000	2500	9.7
28	0.248	2.2	0.3678	148	65	2.7	26.3	46.1	1380	280	3.62	25.4	7000	2100	10
30	0.266	1.8	0.3474	172	71	2.8	24.8	42.2	1240	248	3.38	28.2	7000	1900	10.1

ตารางที่ 11 ผลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาแบบกึ่งกะ (semi-batch culture)

น้ำที่ความเข้มข้น 10%+ สาหร่าย															
วันที่	OD (mg/l)	cell (x10 ⁶ cells/ml)	Biomass (mg/l)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)	Ammonia (mg/l)	Nitrate subgoes (mg/l)	SRP (mg/l)	TDS (mg/l)	SS (mg/l)	DO (mg/l)	temp (°C)	conductivity (µS/cm)	alkalinity (mg/l)	pH
0	0.341	4.75	0.23	160	92	9.12	22.6	43.5	1210	170	3.7	28.9	1000	800	10.2
2	0.252	4.25	0.23	142	56	5.25	18.75	37.75	1077.5	150	4.4	25.6	1500	700	9.6
4	0.252	3.25	0.24	104	41	4.5	12.5	36.42	982.5	149	6.4	25.2	1500	800	9.7
6	0.281	3.75	0.22	98	37.4	2.02	13.2	32.25	995	45	6.2	26.6	2100	900	9.8
8	0.339	2.25	0.325	128	64.8	4.25	15.25	35.6	1300	89	5.2	26.4	1500	700	9.6
10	0.439	3	0.4425	94	38.8	3.1	15.35	31.52	895	87	3.8	27.7	1000	800	9.9
12	0.466	3.25	0.4725	95	32.8	2.9	16.3	23.7	1195	51	6.1	28.1	1000	700	9.6
14	0.412	20	0.45	121	50.2	3.58	17.8	33.8	1130	64	6.1	27.3	1000	500	9.5
16	0.42	21.7	0.5725	66	31.1	0.75	9.32	20.19	1105	66	4.6	27.3	900	700	10.1
18	0.674	19	0.6625	79	32.5	1.8	8.85	15.48	1295	79	5.3	26.7	1000	700	10.3
20	0.739	3	0.73	148	73.8	4.32	5.75	23.7	1130	100	5.1	27.6	1000	700	9.8
22	0.818	2.5	0.715	128	58.5	2.5	7.45	25.8	1090	65	3.1	27.3	1500	800	9.5
24	0.623	2.25	0.7225	105	52.2	2.3	6.05	26.29	1253	60	3.1	27.9	1000	600	9.6
26	0.621	1.75	0.7165	98	46.8	4.7	9.5	31.2	1329	56	3.2	27.6	1000	700	10.1
28	0.461	0	0.556	120	61	4.1	9.8	35.2	1320	55	3.1	27.2	1100	700	10
30	0.446	0	0.535	132	65	5.1	8.5	32.1	1218	62	3.2	28.1	1200	600	10

ตารางที่ 11 (ต่อ)

น้ำเลี้ยงความเข้มข้น 10%+ สารโปรตีน+ สารอาหาร															
วันที่	OD (mg/l)	cell (x10 ⁶ cell/ml)	Biomass (mg/l)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)	Ammonia (mg/l)	Nitrate nitrogen (mg/l)	SRP (mg/l)	TDS (mg/l)	SS (mg/l)	DO (mg/l)	temp (°C)	conductivity (µS/cm)	alkalinity (mg/l)	pH
0	0.34	4.60	0.2525	440	229	13.2	118.85	43.8	6800	193	3.9	29.0	6500	2000	10.4
2	0.29	4.75	0.2375	400	170	4.125	103.75	35.6	5620	186	4.3	25.6	6000	2500	10
4	0.32	6.50	0.305	308	154	1.25	93.8	35.12	5418	89	6.4	25.3	6000	2300	9.9
6	0.37	8.25	0.335	292	90	1.75	34.2	35.25	5535	79	6.4	26.7	6000	2000	9.7
8	0.43	14.00	0.355	176	85	1.05	26.05	25.35	6520	81	6.4	26.3	6500	2400	9.5
10	0.54	20.75	0.565	174	45	0.81	12.55	21.5	5635	103	6.1	28.0	6500	2300	9.5
12	0.57	24.75	0.615	103.5	42	0.82	15.7	15.24	6335	109	6.3	28.2	6500	2300	10.1
14	0.61	25.00	0.646	250	125	4.25	48.9	32.55	7010	103	6.4	27.5	6000	2500	10
16	0.64	25.75	0.635	175	105	1.7	35.2	31.21	5929	109	6.2	27.5	5000	1600	9.9
18	0.89	30.00	0.85	161	88	1.05	28.9	25.5	6075	110	6.8	26.9	5000	1700	9.7
20	0.96	31.50	0.935	125	52	0.7	15.9	13	6500	72	6.3	27.7	5500	1500	9.5
22	1.00	32.50	0.965	118	48	0.8	16.69	16.3	6200	83	4.4	27.5	6000	1300	9.5
24	1.01	31.00	1.005	102	54	1.2	13.4	20.4	6065	82	4.9	27.9	6000	1300	9.6
26	1.02	29.00	1.0175	259	132	4.01	52.8	30.2	5920	79	4.0	27.9	6000	1300	10
28	1.01	27.50	0.991	205	122	2.4	25.4	23.7	5660	72	4.4	28.1	6000	1200	10.1
30	0.97	28.00	0.98	215	102	1.5	32.5	22.5	6425	62	4.4	28.2	5000	1400	9.8