บทที่ 5
สรุปและอภิปรายผล

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของโลหะหนักต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียว 3 สายพันธุ์ ที่ระดับความเข้มข้นต่างกันในช่วงเวลา 7 วัน ผลการเจริญเติบโตของสาหร่ายหลังจากได้รับโลหะหนักแต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ โดยสาหร่ายจะได้รับสารสารทั้งหมด 96 ชั่วโมง เพื่อทำการหาค่า EC_{50} ซึ่งทำการทดลองภายในห้องปฏิบัติการในโครงการบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ และสาหร่ายที่ใช้ในการทดลองเป็นสาหร่ายที่ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันค้นคว้าและวิจัยผลิตภัณฑ์อาหารจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ทำให้ทราบถึงความเป็นพิษของโลหะหนักแต่ละชนิดในสาหร่ายสีเขียว ผลของโลหะหนักต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเซลล์ และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการใช้โลหะหนักในสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพเพื่อบ่งบอกการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

1. ผลของโลหะหนักต่อจำนวนเซลล์ของสาหร่าย ที่ระดับความเข้มข้นต่างกันในสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์เมื่อได้รับโลหะหนักในระยะเวลา 7 วัน

1.1 ชนิดของโลหะหนักที่ได้รับต่อจำนวนเซลล์ของสาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์

เมื่อสาหร่ายได้รับ โลหะหนักแต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันพบว่า โลหะหนักแต่ละชนิดมีผลให้จำนวนเซลล์ของสาหร่ายลดลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) โดยที่สารปรอทมีผลยับยั้งจำนวนเซลล์ของสาหร่ายสูงสุด รองลงมาคือ ทองแดง สารหนู แคดเมียม และสารตะกั่ว ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาจำนวนเซลล์เพื่อหาค่าความเป็นพิษของโลหะหนัก (EC_{50}) แต่ละชนิดพบว่า สารปรอทมีความเป็นพิษสูงสุด รองลงมาคือ ทองแดง แคดเมียม สารหนู และสารตะกั่ว ตามลำดับ

1.2 ความเข้มข้นโลหะหนักที่ได้รับต่อการยับยั้งจำนวนเซลล์ของสาหร่าย 3 สายพันธุ์

พบว่า ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักมีผลต่อการยับยั้งจำนวนเซลล์ของสาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์ โดยพบว่า เมื่อสาหร่ายได้รับโลหะหนักแต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลให้จำนวนเซลล์ลดลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ระดับความเข้มข้นโลหะหนักที่ได้รับมีผลต่อการศึกษาการยับยั้งจำนวนเซลล์ โดยที่โลหะหนักแต่ละชนิดมีผลยับยั้งจำนวนเซลล์ตั้งแต่ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5 mg/ l

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

1.3 ผลของสายพันธุ์ของสาหร่ายต่อการยับยั้งจำนวนเซลล์เมื่อได้รับโลหะหนัก

พบว่า สายพันธุ์สาหร่ายมีผลต่อการยับยั้งจำนวนเซลล์ โดยเมื่อได้รับโลหะหนักแต่ละชนิด ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า จำนวนเซลล์ในสาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์หลังจากได้รับโลหะหนักแต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ มีความแตกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) โดยในสาหร่าย *Ankistrodesmus* sp. มีจำนวนเซลล์ลดลงต่ำกว่าในสาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Scenedesmus* sp. ตามลำดับ โดยเมื่อสาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Scenedesmus* sp. ได้รับสารปรอทที่ระดับความเข้มข้น 3 mg/l มีผลให้สาหร่ายทั้ง 2 สายพันธุ์นี้ตายทั้งหมด สำหรับในสาหร่าย *Ankistrodesmus* sp. ได้รับสารปรอทตั้งแต่ 5 mg/ l จึงจะมีผลให้สาหร่ายตายทั้งหมด และจากการศึกษาจำนวนเซลล์เพื่อหาค่าความเป็นพิษของโลหะหนัก (EC_{50}) แต่ละชนิดต่อความไว (Sensitive) ต่อสาหร่ายแต่ละชนิด พบว่า สาหร่าย *Scenedesmus* sp. มีความไวต่อโลหะหนักสูงสุด รองลงมาคือ สาหร่าย *Ankistrodesmus* sp. และสาหร่าย *Chlorella* sp. ตามลำดับ

2. ผลของโลหะหนักต่อปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่าย ที่ระดับความเข้มข้นต่างกันในสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์เมื่อได้รับโลหะหนักในระยะเวลา 7 วัน

2.1 ชนิดของโลหะหนักที่ได้รับต่อปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์

เมื่อสาหร่ายได้รับโลหะหนักแต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันพบว่า โลหะหนักแต่ละชนิดมีผลให้ปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่ายลดลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) โดยที่สารปรอทมีผลยับยั้งจำนวนเซลล์ของสาหร่ายสูงสุด รองลงมาคือ ทองแดง สารหนู แคดเมียม และสารตะกั่ว ตามลำดับ

2.2 ความเข้มข้นโลหะหนักที่ได้รับต่อปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่าย 3 สายพันธุ์

พบว่า ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักมีผลต่อปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์ โดยพบว่า เมื่อสาหร่ายได้รับโลหะหนักแต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำหนักแห้งลดลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ระดับความเข้มข้นโลหะหนักที่ได้รับมีผลต่อปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่าย

2.3 ผลของสายพันธุ์สาหร่ายต่อปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่ายเมื่อได้รับโลหะหนัก

สายพันธุ์ของสาหร่ายทั้ง 3 ชนิดมีผลต่อปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่าย พบว่า ปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่ายทั้งสามมีความแตกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) โดยสาหร่าย *Scenedesmus* sp. มีปริมาณน้ำหนักแห้งสูงกว่าในสาหร่าย *Ankistrodesmus* sp. และสาหร่าย *Chlorella* sp. เนื่องจากสาหร่ายแต่ละชนิดมีขนาดที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้ปริมาณน้ำหนักแห้งที่ได้มีความแตกต่างกัน

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

3. ผลของโลหะหนักต่อปริมาณคลอโรฟิลล์เอของสาหร่าย ที่ระดับความเข้มข้นต่างกันในสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์เมื่อได้รับโลหะหนักในระยะเวลา 7 วัน

3.1 ชนิดของโลหะหนักที่ได้รับต่อปริมาณคลอโรฟิลล์เอของสาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์

เมื่อสาหร่ายได้รับโลหะหนักที่แต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ชนิดของโลหะหนักที่สาหร่ายทั้ง 3 ชนิดได้รับมีผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์เอแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) โดยที่สารปรอทมีผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอลดลงมากที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง แคดเมียม สารหนู และสารตะกั่ว ตามลำดับ

3.2 ความเข้มข้นโลหะหนักที่ได้รับต่อปริมาณคลอโรฟิลล์เอของสาหร่าย 3 สายพันธุ์

พบว่า ระดับความเข้มข้นมีผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) โดยสาหร่ายที่ได้รับโลหะหนักที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้นมีผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอลดลงตามลำดับ โดยโลหะหนักที่มีผลให้คลอโรฟิลล์ถูกทำลายทั้งหมดได้แก่ สารปรอท ที่ระดับความเข้มข้น 3, 5 และ10 mg/ l และทองแดง ที่ระดับความเข้มข้น 5 และ10 mg/ l

3.3 ผลของสายพันธุ์ของสาหร่ายต่อการยับยั้งจำนวนเซลล์เมื่อได้รับโลหะหนัก

เมื่อสาหร่ายได้รับโลหะหนักทั้งห้าชนิด คือ สารปรอท แคดเมียม สารตะกั่ว สารหนู และทองแดง ที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 3, 5 และ10 mg/ l เป็นเวลา 7 วัน พบว่า สาหร่าย *Ankistrodesmus* sp. มีปริมาณคลอโรฟิลล์สูงสุด รองลงมาคือ สาหร่าย *Scenedesmus* sp. และสาหร่าย *Chlorella* sp. ตามลำดับ

4. ผลของโลหะหนักต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเซลล์

พบว่า เมื่อสาหร่ายได้รับสารปรอท มีผลให้ลักษณะเซลล์เปลี่ยนแปลงจากกลุ่มควบคุม คือ เซลล์ขยายขนาดเกิดการโป่งพอง (Swelling Cell) โดยเกิดขึ้นในสาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์ และเมื่อสาหร่ายได้รับสารปรอทที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 3 mg/ l มีผลให้ภายในเซลล์ถูกทำลายคลอโรฟิลล์เกือบทั้งเซลล์

เมื่อสาหร่ายได้รับแคดเมียม มีผลให้เซลล์มีรูปร่างแตกต่างจากเซลล์ที่ไม่ได้รับโลหะหนักคือ ใน *Chlorella* sp. เซลล์ปกติจะมีลักษณะค่อนข้างกลม แต่เมื่อได้รับแคดเมียมมีผลเข้าไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้เซลล์เสียรูปร่างไป และเซลล์ยังถูกทำลายคลอโรฟิลล์ ทำให้เซลล์บางส่วนไม่เป็นสีเขียว

เมื่อสาหร่ายได้รับสารตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้นต่ำไม่มีผลต่อรูปร่างเซลล์ เพียงแต่ทำให้การเจริญลดลงเท่านั้น จากการสังเกตพบว่า เซลล์มักตกตะกอนลงสู่ก้นขวด และจับตัวกันเป็นก้อน แต่เมื่อได้รับที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 10 mg/ l มีผลให้เซลล์ถูกทำลายคลอโรฟิลล์ทั้งเซลล์

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

เมื่อสาหร่ายได้รับสารหนู มีผลให้เซลล์มีสีซีดลง คลอโรฟิลล์ภายในเซลล์ถูกทำลาย และเซลล์บางส่วนไม่คงรูปร่างเดิมเนื่องจากผนังเซลล์ถูกทำลาย

เมื่อสาหร่ายได้รับทองแดง มีผลให้เซลล์มีรูปร่างผิดปกติคือ เซลล์ขยายขนาดขึ้น และเมื่อได้รับที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 3 mg/ l มีผลให้คลอโรฟิลล์ภายในถูกทำลายจนกระทั่งไม่เห็นเป็นสีเขียว

5. ผลของโลหะหนักต่อสายพันธุ์ของสาหร่าย

เมื่อนำสาหร่ายทั้งสามสายพันธุ์เลี้ยงรวมกันในอาหารที่มีโลหะหนักแต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 7 วัน (Growth Competition) พบว่า เมื่อสาหร่ายได้รับโลหะหนัก สาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Ankistrodesmus* sp. มีจำนวนเซลล์ไม่แตกต่างกัน แต่มีความแตกต่างในสาหร่าย *Scenedesmus* sp. กล่าวได้ว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Ankistrodesmus* sp. มีความทนทานต่อโลหะหนักสูงกว่าสาหร่าย *Scenedesmus* sp.

จากผลการวิจัยที่ได้พบว่า การเจริญของสาหร่ายไม่ว่าจะทำการวัดค่าการเจริญด้วยการนับจำนวนเซลล์ ปริมาณน้ำหนักแห้ง และปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ ค่าการเจริญที่ได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อได้รับโลหะหนัก และค่าการเจริญมีแนวโน้มลดลงสูงขึ้นเมื่อได้รับโลหะหนักในระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้น กล่าวได้ว่า จำนวนเซลล์ มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำหนักแห้ง และปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ในสาหร่าย

อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า โลหะหนักทั้ง 5 ชนิด มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสามสายพันธุ์ ทั้งจำนวนเซลล์ ปริมาณน้ำหนักแห้ง และคลอโรฟิลล์เอ โดยที่เมื่อได้รับโลหะหนักที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลงตามลำดับ เนื่องจากโลหะหนักมีผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงในพืช (Sheoran & Singh, 1992 cited in Lu, Chau, & Zhang, 2000) สาหร่ายสีเขียว และพวก Cyanobacteria และทำให้เกิดการยับยั้งกระบวนทำงานต่าง ๆ ในเซลล์ โดยเฉพาะการแบ่งเซลล์ (Cell Division) เป็นต้น

ผลของชนิดโลหะหนักต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

พบว่า โลหะหนักที่สาหร่ายได้รับ ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันมีผลต่อการเจริญของสาหร่าย โดยที่มีผลให้การเจริญลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระดับความเป็นพิษของโลหะหนัก ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า สารปรอทมีความเป็นพิษสูงสุด รองลงมาคือ ทองแดง สารหนู แคดเมียม และสารตะกั่ว ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Akira et al. (2005) ได้ทำการศึกษาผลของโลหะหนัก 5 ชนิดต่อสาหร่ายทะเล *Cylindrotheca* sp. และ LPP Group ด้วยการวัดปริมาณ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

คลอโรฟีลล์เอ ที่ 72 ชั่วโมง พบว่า สารหนูแสดงความเป็นพิษสูงกว่าสารตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และพลวง (As > Pb = Cu = Cd > Sb) และ John et al. (1977) พบว่า แคดเมียมแสดงความเป็นพิษสูงสุด รองลงมาคือ ทองแดง สารปรอท และสารตะกั่ว ตามลำดับ ซึ่งทำการศึกษาในสาหร่ายน้ำจืด (*Chlorella vulgaris*) เมื่อได้รับโละหนักเป็นเวลา 33 วัน แต่ Devi and Devi (1981) พบว่า ตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ (0.1-1.0 mg/ l) ไม่มีผลต่อการเจริญของสาหร่าย แต่ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/ l มีผลให้สาหร่ายบางชนิดตาย Fathi and Omair (2006) ศึกษาการเจริญของ *Scenedesmus bijuga* พบว่า แคดเมียมมีผลให้การเจริญของสาหร่ายชนิดนี้ต่ำสุด และ Mohammed and Makert (2006) กล่าวว่า ผลความเป็นพิษของโลหะหนักมีความแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้น ชนิดของสิ่งมีชีวิตและช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลองด้วย และ Moreno et al. (2000) ยังกล่าวอีกว่า การที่สาหร่ายได้รับโลหะหนักเป็นผลให้การเกิดกระบวนการเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ช้าลง เนื่องจากโลหะเข้าจับกับเซลล์ที่ผิวภายนอกหรือเข้าไปสะสมในเซลล์ด้วยการ absorption ซึ่งจะสามารถดูดซับได้มาหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของโลหะที่อยู่ใน media

ผลของสายพันธุ์สาหร่ายต่อการเจริญของสาหร่าย

เมื่อสาหร่ายได้รับโลหะหนักแต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ มีผลให้การเจริญของสาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์ลดลงแตกต่างกัน โดยการศึกษาครั้งนี้ พบว่า สาหร่าย *Scenedesmus* sp. มีการเจริญลดลงสูงกว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Ankistrodesmus* sp. แต่ Devi and Devi (1981) ได้ศึกษาผลของแคดเมียม สารตะกั่ว และนิกเกิลต่อการเจริญของสาหร่าย 3 สายพันธุ์ พบว่า สารตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/ l มีผลให้สาหร่าย *Ankistrodesmus falcatus* ตาย ในขณะที่สาหร่าย *Scenedesmus bliquus* และ*Chlorococcum* spp. ยังมีชีวิตแต่อย่างไรก็ตามการเจริญของสาหร่ายทั้งสองก็มีอัตราการเจริญที่ลดลง กล่าวได้ว่า สาหร่ายแต่ละสายพันธุ์มีความทนทานต่อโลหะหนักได้ต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเจริญที่ลดลงอย่างแตกต่างกัน สาหร่ายแต่ละสายพันธุ์อาจมีการเจริญช้าหรือเร็วต่างกัน ทำให้จำนวนเซลล์ที่เกิดขึ้นในช่วงที่ทำการทดลองมีความหนาแน่นต่างกัน ซึ่งเป็นผลให้แสดงผลออกมาได้ชัดเจนเมื่อได้รับโลหะหนักที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน โดย Moreno et al. (2000) กล่าวว่า สาหร่ายที่มีความหนาแน่นเซลล์ที่ต่ำกว่า จะสามารถสะสมโลหะหนักได้สูงกว่าในระดับความเข้มข้นโลหะหนักที่ได้รับเท่ากัน

ผลของระดับความเข้มข้นโลหะหนักต่อการเจริญของสาหร่าย

เมื่อสาหร่ายได้รับโลหะหนักแต่ละชนิด ที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้น มีผลให้การเจริญของสาหร่ายลดลงตามลำดับ แต่ Fathi and Omair (2006) พบว่า เมื่อสาหร่าย *Scenedesmus bijuga* ได้รับทองแดงที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (10^{-9} M) มีผลให้ปริมาณคลอโรฟีลล์เอ และจำนวนเซลล์ของ

สาหร่ายสูงกว่ากลุ่มควบคุม (Control) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Mohammed and Makert (2006) พบว่า เมื่อสาหร่าย *Sc. quadricauda* (Turp) ได้รับทองแดงที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ1.5 mg/ l มีผลให้การเจริญของสาหร่ายค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้น และการทดสอบค่าความเป็นพิษของ Moreno et al. (2000) พบว่า ความเป็นพิษของทองแดงขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นที่ได้รับ ซึ่งมีผลต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย เนื่องจากทองแดงจัดเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญของสาหร่าย หากได้รับในปริมาณที่เหมาะสมจึงมีผลการการเจริญสูงขึ้น แต่เมื่อได้รับในระดับที่สูงหรือต่ำเกินอาจส่งผลต่อการเจริญของสาหร่ายได้ หรืออาจมีผลให้สาหร่ายบางชนิดตายได้ แต่จากการศึกษาในครั้งนี้ใช้ระดับความเข้มข้นของทองแดงที่สูงเกินระดับความต้องการของสาหร่ายจึงมีผลให้การเจริญลดลงทั้งหมด

ผลของโลหะหนักต่อจำนวนเซลล์ของสาหร่าย

1. ผลของโลหะหนักต่อจำนวนเซลล์ของสาหร่ายสารปรอท

สารปรอทแสดงความเป็นพิษต่อสาหร่ายสูงสุดคือ มีผลให้การเจริญลดลงต่ำสุด โดยสังเกตจากค่า EC_{50} ที่ 96 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 0.49 mg/ l (*Chlorella*) 0.32 mg/ l (*Scenedesmus*) และ 0.51 mg/ l (*Ankistrodesmus*) แต่ในงานวิจัยของ John et al. (1977) สามารถหาค่า EC_{50} ของสารปรอท ($HgCl_2$) ใน *C. vulgaris* ได้เท่ากับ 1.03 mg/ l ซึ่งค่าที่ได้นั้นมาจากการแบ่งเซลล์ หลังจากได้รับสารปรอทเป็นเวลา 33 วัน และพบว่า *C. vulgaris* สามารถกลับคืนสู่สภาพปกติ (Recovery) ได้เมื่อได้รับสารปรอท ที่ระดับความเข้มข้น 2.4 mg/ l วรวิทย์ ชีวาพร (2539) ได้สรุปเกี่ยวกับผลของสารปรอทว่า สารปรอทที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ (20 μM) สามารถแสดงผลต่อการเจริญของแพลงก์ตอนพืช และไดอะตอม ซึ่งมีผลให้การเจริญลดลง

2. ผลของโลหะหนักต่อจำนวนเซลล์ของสาหร่ายแคดเมียม

จากผลการศึกษาค่า EC_{50} ที่ 96 ชั่วโมงในสาหร่ายทั้งสามพันธุ์ มีค่าเท่ากับ 1.8 mg/ l แต่ John et al. (1977) สามารถหาค่า EC_{50} ของแคดเมียมใน *C. vulgaris* ได้เท่ากับ 0.06 mg/ l ค่าที่ได้นั้นมาจากการแบ่งเซลล์หลังจากที่ได้รับสารปรอทเป็นเวลา 33 วัน และ Devi and Devi (1981) พบว่า เมื่อ *Ankistrodesmus falcatus*, *Scenedesmus bliquus* และ *Chlorococcum* spp. ได้รับแคดเมียม ($CdSO_4$) ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1-1.0 mg/ l มีผลต่อการเจริญของสาหร่ายทั้งสามพันธุ์ แต่เมื่อได้รับสูงกว่า 5 mg/ l มีผลให้สาหร่ายตาย และค่า EC_{50} ของแคดเมียม ($CdCl_2$) ใน *C. saccharophila, Navicula incerta* และ *Nitzschia closterium* มีค่าเท่ากับ 0.105 mg/ l 3.008 mg/ l และ 0.476 mg/ l ตามลำดับ (Joseph et al., 1982) ต่อมา Yap et al. (2004) ได้ค่า EC_{50} ของ Pb เท่ากับ 1.40 mg/ l โดยทำการศึกษาในสาหร่ายสีน้ำตาล (*Isochrysis galbana*) อย่างไรก็ตาม Ioanna

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

and Joseph (1991) พบว่า Cd ที่ระดับความเข้มข้น 0.34 μM มีผลให้การเจริญของสาหร่ายทะเล (*Dunaliella minuta*) ลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ และDe Filippis, Hampp, and Ziegler (1981) ศึกษาผลของ Cd, Zn และ Hg ต่อการเจริญของ *Euglena* ซึ่งโลหะหนักเข้าไปมีผลยับยั้งการสร้างเอนไซม์ NADP-Oxidoreductase ทำให้เซลล์สร้าง NADPH ได้น้อยลง ผลที่ตามมาคือต้องการใช้ Sulfhydryl Group (-Sd Group) ในการเกิดปฏิกิริยา และโลหะหนักชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะแคดเมียมซึ่งเป็นตัวต้านที่มีแรงต้านต่อการเข้าจับของกลุ่ม -Sd Group แคดเมียมเป็นตัวขัดขวางที่บริเวณเยื่อเซลล์ (Membrane) และขัดขวางเซลล์ไม่ให้สร้างกลไกลดความเป็นพิษออกจากเซลล์ แคดเมียมเป็นสารที่มีแรงต่อการขัดขวางการสร้างฟอสฟอรัสสูง โดยที่ Cd^{2+} จะเข้าจับกับประจุลบที่มีความจำเป็นสำหรับกระบวนการสร้างฟอสเฟต (Phosphorylation) ที่บริเวณ Active Site หรือแคดเมียมอาจจะเข้าไปบล็อกอย่างอิสระที่บริเวณ active site โดยกลุ่มไดซัลไฟด์ที่อยู่ในเอนไซม์สามารถเข้าจับกับ Cd^{2+} ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ (Earl, Miriam, Sanadi, & Louise, 1956 cited in Valle & Ulmer, 1972)

3. ผลของโลหะหนักต่อจำนวนเซลล์ของสาหร่ายสารตะกั่ว

จากผลการศึกษาค่า EC_{50} ที่ 96 ชั่วโมงในสาหร่ายทั้งสามพันธุ์ มีค่าเท่ากับ 8.1 mg/ l (*Chlorella*) 7.1 mg/ l (*Scenedesmus*) และ 6.0 mg/ l (*Ankistrodesmus*) อย่าไรก็ตาม Yap et al. (2004) ได้ค่า EC_{50} ของ Pb เท่ากับ 1.40 mg/ l โดยทำการศึกษาในสาหร่ายสีน้ำตาล (*Isochrysis galbana*) สาเหตุที่ทำให้การเจริญของสาหร่ายลดลงนั้นเกิดจากสาหร่ายสามารถสังเคราะห์แสงลดลง โดย Nygard and Ekalund (1999) ได้ศึกษาผลของ lead ($PbCl_2$) ต่อการสังเคราะห์แสงและการหายใจของสาหร่าย (*Fucus visiculosus*) พบว่า $PbCl_2$ ที่ระดับความเข้มข้น 30 mg/ l มีผลทำให้ค่าการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis Capacity) ลดลงถึง 69 เปอร์เซ็นต์ (เมื่อเทียบกับ Control) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าตะกั่วมีผลในการยับยั้งการสังเคราะห์แสง อย่างไรก็ตามสารตะกั่วนั้นมีผลยับยั้งการเจริญของ *Chlamydomonas* เมื่อมีปริมาณ Pb^{2-} สูงกว่า Phosphate ที่อยู่ในอาหาร (media) เนื่องจากเซลล์ไม่สามารถดึงฟอสเฟตจากอาหารที่มี Pb^{2+} ทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายลดลง (Heinz & Jerry, 1978) สำหรับ Thomas (1976) ทำการศึกษาผลของสารตะกั่วต่อการเจริญของสาหร่ายขนาดเล็ก พบว่า สารตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 0.5 mg/ l แสดงความเป็นพิษต่อสาหร่าย *Chlorella pyrenoidosa* Chick, *C. ellipsoidea* Gerneck, *C. vulgaris* Beij, *Scenedesmus* sp., *Sc. Obtusiusculus* Chodat และ *Selenastrum capricornutum* แต่ที่ระดับความเข้มข้น 1 mg/ l จึงจะแสดงความเป็นพิษต่อสาหร่าย *Scenedesmus* spp. และ *Ankistrodesmus* sp. แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายทั้งสองสายพันธุ์นี้มีความทนทานกว่าสายพันธุ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง และสรุปว่า ความไว (Sensitive) ต่อสารตะกั่วขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสาหร่ายที่ใช้ทดสอบ ร่วมกับความสามารถของการ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ดูดซับฟอสเฟตของสาหร่าย ภายใต้สภาวะที่มีปริมาณฟอสเฟตอย่างจำกัด ซึ่งฟอสเฟตเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อความเป็นพิษของสารตะกั่วต่อสาหร่ายบางชนิด

4. ผลของโลหะหนักต่อจำนวนเซลล์ของสาหร่ายสารหนู

จากผลการศึกษาค่า EC_{50} ที่ 96 ชั่วโมงในสาหร่ายทั้งสามพันธุ์ มีค่าเท่ากับ 2.2 mg/ l (*Chlorella*) 2.3 mg/ l (*Scenedesmus*) และ 2.1 mg/ l (*Ankistrodesmus*) สำหรับการเจริญของ *Tetraselmin chui* ซึ่งเป็นสาหร่ายทะเลลดลง เมื่อได้รับ Arsenate ที่ระดับความเข้มข้น 10-30 mg/ l แต่เมื่อได้รับที่ระดับความเข้มข้น 0.01, 0.1 และ1 mg/ l มีผลการเจริญไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม (Bottino et al., 1978) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ได้เนื่องจากสารหนูมีผลเข้าไปขัดขวางการสร้างพลังงาน ATP

5. ผลของโลหะหนักต่อจำนวนเซลล์ของสาหร่ายทองแดง

จากผลการศึกษาค่า EC_{50} ที่ 96 ชั่วโมงในสาหร่ายทั้งสามพันธุ์ มีค่าเท่ากับ 1.5 mg/ l (*Chlorella*) 1.3 mg/ l (*Scenedesmus*) และ 1.6 mg/ l (*Ankistrodesmus*) ตามลำดับ สำหรับงานวิจัยของ Ioanna and Joseph (1991) พบว่า Cu ที่ระดับความเข้มข้น 7.57 µM มีผลให้การเจริญของสาหร่ายทะเล (*Dunaliella minuta*) ลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ (EC_{50}) ที่ 96 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม Bhumi et al. (2004) ศึกษาถึงอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. พบว่า ค่า EC_{50} ของ Cu^{2+} เท่ากับ 10 µmol/ l ได้จากการวัดค่า Absorbance ที่ 663 nm ทุกวันเป็นเวลา 7 วัน Yap et al. (2004) ได้ค่า EC_{50} ของ Cu เท่ากับ 0.91 mg/ l โดยทำการศึกษาในสาหร่ายสีน้ำตาล (*Isochrysis galbana*)

สังเกตเห็นว่าค่าความเป็นพิษที่ได้นั้นอยู่ในระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้ อาจเป็นผลเนื่องมา จากเป็นสาหร่ายต่างชนิดกัน และทดลองในสภาวะที่ต่างกัน รวมทั้งวิธีการวัดการเจริญที่ต่างกันด้วย ทำให้ค่าที่ได้จากผลการทดลองแตกต่างจากเอกสารที่ค้นคว้า อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่าการเจริญของสาหร่ายแต่ละชนิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อได้รับโลหะหนักแต่ละชนิด และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อได้รับโลหะหนักที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้น นอกจากนั้นโลหะหนักยังแสดงผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะเซลล์ออกมาได้อย่างชัดเจน และเป็นไปตามผลการวิจัยที่ได้ทำการค้นคว้า ซึ่งจะกล่าวต่อไป

ผลของโลหะหนักต่อปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่าย

ปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่ายทั้งสามสายพันธุ์ ลดลงต่ำกว่ากลุ่มควบคุม (Control) เมื่อได้รับโลหะหนักแต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5 mg/ l สำหรับผลการศึกษาการเจริญของสาหร่ายของ ศศิพินทุ์ นรเศรษฐพันธุ์ (2540) พบว่า สารปรอท แคดเมียม และทองแดง ความเข้มข้นตั้งแต่ 1 ppm (mg/ l) มีผลให้ปริมาณน้ำหนักแห้งของ *Chlorella* sp. และลดลง ปริมาณน้ำหนักแห้งของ *Scenedesmus* sp. ลดลงเมื่อได้รับสารปรอท แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ตั้งแต่

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ระดับความเข้มข้น 1, 1, 10 และ 15 ppm (mg/ l) ตามลำดับ แต่สารตะกั่วไม่มีผลต่อการเจริญของ *Chlorella* sp. และ *Scenedesmus* sp. ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้

ผลของโลหะหนักต่อปริมาณคลอโรฟิลล์เอของสาหร่าย

ในการวิเคราะห์คลอโรฟิลล์เอ จะทำหลังจากที่สาหร่ายได้รับโลหะเป็นเวลา 7 วัน พบว่าคลอโรฟิลล์เอของสาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์มีแนวโน้มลดลง เมื่อได้รับโลหะหนักที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5 mg/ l โดย Singh, Khare, and Bisen (1989) ได้กล่าวถึงผลของสารปรอทว่า มีผลยับยั้งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยแสง ในระบบแสงที่ 2 (PSII) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเรืองแสง (Fluorescence) ของคลอโรฟิลล์ และในระบบแสงที่ 2 นี้จะมีความไวต่อสารปรอทสูง ทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง จากผลการเรืองแสงของคลอโรฟิลล์ได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ สำหรับงานวิจัยของ Lue et al. (1980) พบว่าแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 5 μM มีผลต่อจำนวนเซลล์ และปริมาณคลอโรฟิลล์ของ *C. ellipoidea* เพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากเอนไซม์หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเมแทบอลิซึมของเซลล์ ส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงเช่นเดียวกับสารปรอท และยับยั้งการหายใจของเซลล์เมื่อได้รับแคดเมียมที่ระดับ 1 μg/ l ในไดอะตอม (*Cylindrotheca closterium*) (Lehman & Concelos, 1979 cited in Devi & Devi, 1981) อย่างไรก็ตาม Akira et al. (2005) พบว่า ความเป็นพิษของ Cu (II), Pb (II) และ Cd (II) มีความใกล้เคียงกันคือมีค่า IC_{50} ที่ระดับสูงสุดอยู่ที่ Pb เท่ากับ 21.4 mg/ l และค่า IC_{50} ของ As ที่ระดับต่ำสุดอยู่ที่ 1.6-9.5 mg/ l ซึ่งได้จากการวิเคราะห์คลอโรฟิลล์เอ และวัดค่าการเรืองแสงในคลอโรฟิลล์ อย่างไรก็ตาม Devi and Devi (1981) กล่าวว่า $PbCl_2$ ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (0.1-1.0 mg/ l) ไม่มีผลให้การเจริญของสาหร่าย แต่เมื่อได้รับที่ 10 mg/ l มีผลให้การเจริญลดลง (*Ankistrodesmus falcatus, Scenedesmus bliquus* และ *Clorococcum* spp.) ซึ่งวัดจากค่าการดูดกลืนแสง (OD) ของรงควัตถุ และพบว่า สารตะกั่ว ($PbCl_2$) มีความเป็นพิษต่ำกว่าแคดเมียม ($CdSO_4$) จากงานวิจัยที่กล่าวจะเห็นว่าเราสามารถหาระดับความเป็นพิษที่มีต่อสาหร่ายได้จากปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เปลี่ยนแปลง หลังจากได้รับโลหะหนักได้ ซึ่งเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถประเมินผลความเป็นพิษของโลหะหนักหรือสารพิษอื่น ๆ ได้

ผลของโลหะหนักต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเซลล์

1. ผลของสารปรอทต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเซลล์

พบว่า สารปรอทแสดงผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะเซลล์คือ เซลล์มีรูปร่างผิดปกติจากกลุ่มที่ไม่ได้รับปรอท มีการโป่งพองของเซลล์ ขยายขนาดใหญ่ขึ้น และภายในเซลล์ยังถูกทำลายคลอโรฟิลล์เกือบทั้งเซลล์ ซึ่งได้ผลตรงกับวรวิทย์ ชีวาพร (2539) ซึ่งกล่าวไว้ว่า เซลล์ที่ได้รับสารปรอทเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างเซลล์มีรูปร่างผิดปกติหรือการที่เซลล์มีขนาด

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ใหญ่กว่าปกติ เนื่องจากช่วงที่มีการแบ่งเซลล์เกิดความผิดพลาดในการเข้าจับในเซลล์ (Uncoupling) ในช่วงที่มีการแบ่งตัวไม่สามารถแยกออกจากเซลล์แม่ได้ มีผลทำให้เซลล์เกิดการขยายขนาดขึ้น ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีเซลล์กำลังเจริญเติบโต และได้รับสารปรอทของ *Isochrysis galbana* เช่นเดียวกับแคดเมียมที่มีผลให้เกิด Uncoupling เพราะแคดเมียมไอออนเป็นสารที่มีแรงในการแย่งจับสูง จะเข้าไปแทนที่แคตไอออนซึ่งมีความเป็นเป็นต่อกระบวนการฟอสโฟรีเลชัน ที่ Active Site ของเซลล์ (Earl et al., 2007) และ Lu et al. (2000) ยังกล่าวถึงสารปรอทว่าเป็นสารที่แสดงความเป็นพิษสูงซึ่งส่งผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) ทั้งในปฏิกิริยาแสงและปฏิกิริยามืด (Light and Dark Reactions) ในปฏิกิริยามืดหรือในช่วงที่ไม่มีแสง ปรอทจะเข้าไปยับยั้งการตรึง CO_2 (De Filippis & Ziegler, 1993) ส่วนในปฏิกิริยาแสงหรือในช่วงที่ได้รับแสง ปรอทจะเข้าทำลายในส่วนของระบบแสงที่ 1 (PSI) และ Ferredoxin- NADP-Oxidoreductase (Honeycutt & Krogmann, 1972) ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาในระบบแสงที่ 1 ลดลง และสารปรอทยังยับยั้งระบบแสงที่ 2 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการส่งผ่านอิเล็กตรอนในระบบ ทำให้การสร้างพลังงานถูกยับยั้ง โดยยับยั้งการเคลื่อนย้ายพลังงานจาก Phycobilisomes ไปสู่ศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสงที่ 2 (PS II Reaction Center) (Murthy, Sabat, & Mohanty, 1989)

2. ผลของแคดเมียมต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเซลล์

แคดเมียมมีผลให้เซลล์มีรูปร่างที่ผิดปกติคือ บริเวณกลางเซลล์มีรูปร่างโป่งพองขึ้น (Swelling Cell) แสดงผลคล้ายกับสารปรอท และเมื่อได้รับที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 1 mg/ l มีผลให้เซลล์บางส่วนถูกทำลายคลอโรฟีลล์เกือบทั้งเซลล์ รวมทั้งผนังเซลล์ ซึ่งสอดคล้องกับ William, Jame and Don (1980) ซึ่งแบ่งกลุ่มผลของโลหะหนักที่แสดงต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเซลล์ในไดอะตอมชนิดหนึ่ง โดยสารปรอท แคดเมียม และสารตะกั่ว จัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งมีผลไปรบกวนการแบ่งเซลล์ ทำให้เซลล์เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน แต่ผลหลัก ๆ คือ ทำให้เซลล์ขยายขนาดโตขึ้น เซลล์เกิดการโค้งงอ (Bent) และไม่เรียงตัวกัน ซึ่งจะสังเกตได้ในช่วงของการแบ่งเซลล์ ทำให้เซลล์มีรูปร่างผิดปกติ และจารึก จันทรวงศ์ (2533) รายงานว่า แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 6 ppm มีผลให้คลอโรพลาสต์แตกออกเป็นกลุ่ม ๆ และผนังเซลล์ถูกทำลายทำให้รูปร่างเซลล์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

3. ผลของสารตะกั่วต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเซลล์

Stewart (1997 cited in Devi & Devi 1981) กล่าวว่า Pb ที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 10 mg/ l ไม่แสดงผลต่อโครงสร้างการขยายพันธุ์ของเซลล์ (Reproductive Structures) ยังมีนักวิจัยบางท่านที่เห็นว่า Pb มีผลต่อการแบ่งเซลล์ และการยืดขยายตัวของเซลล์ (Cell Elongation) ซึ่งพบในสาหร่ายน้ำเค็ม (*Tiffaniella*) ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองที่ได้ แต่เมื่อได้รับที่ระดับความเข้มข้นสูง

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

กว่า 3 mg/ l ก็มีผลให้เซลล์มีสีซีดจางลงเล็กน้อย แต่ลักษณะเซลล์ยังคงปกติ เนื่องจากสารตะกั่วจะแสดงผลต่อการเจริญที่ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4. ผลของสารหนูต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเซลล์

พบว่า สารหนูมีผลให้เซลล์ถูกทำลายคลอโรฟีลล์ เซลล์มีสีซีดกว่าปกติ เนื่องจากสารหนูมีผลไปยับยั้งการสร้างพลังงาน ATP ในเซลล์ แต่ในงานวิจัยของ William et al. (1980) พบว่า สารหนู (As III) มีผลให้เซลล์แตกออก (Lysis) เมื่อได้รับสารหนูที่ระดับความเข้มข้น 1 μM

5. ผลของทองแดงต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเซลล์

พบว่า ทองแดงมีผลให้เซลล์มีขนาดโตขึ้นเช่นเดียวกับในสารปรอท และแคดเมียม และเซลล์ยังถูกทำลายคลอโรฟีลล์เกือบทั้งเซลล์ คล้ายกับการแตกออกของคลอโรพลาสต์ในเซลล์ ส่วนในงานวิจัยของ William et al. (1980) กล่าวว่า ทองแดงมีผลให้เกิดการแบ่งเซลล์ผิดปกติ โดยไม่สามารถสร้างไคติน (Chitin) ที่จุดศูนย์กลางเซลล์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ เนื่องจากไม่สามารถแบ่งเซลล์ได้ปกติ แต่ยังสามารถเจริญได้ทำให้เซลล์ไม่สามารถแยกออกจากเซลล์แม่ได้ ส่งผลให้เซลล์มีการโป่งพองขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันมีการวิจัยที่ใช้สาหร่าย เพื่อที่จะนำเป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ เนื่องจากสาหร่ายเป็นผู้ผลิตขั้นต้นที่มีความสำคัญต่อห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศ ที่สามารถแสดงผลที่ชัดเจนต่อการได้รับกับสารพิษ อีกทั้งยังสามารถพบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำ ดิน จากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าอาจใช้ข้อมูลจากการศึกษาข้างต้น เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการศึกษาหาความเป็นพิษของโลหะหนักหรือในสารเคมีชนิดอื่น ๆ ในสาหร่ายชนิดได้ เพื่อมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพของระบบนิเวศได้ นอกจากนี้จึงควรศึกษาถึงสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญของสาหร่ายแต่ละชนิด ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบจากโลหะหนักตัวอื่น ที่อาจมีผลต่อการยับยั้งการเจริญของสาหร่าย ควรมีการศึกษาถึงปัจจัยอื่น ๆ เช่น ค่าพีเอช ความเข้มแสงที่ได้รับ เป็นต้น นอกจากนั้นควรมีการศึกษาระดับสารพิษที่สะสมอยู่ในเซลล์ควบคู่ไปด้วย และควรมีการเก็บตัวอย่างจากแหล่งที่มีโลหะหนักเจือปนอยู่จริง เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบต่อไป และอาจมีการศึกษาผลถึงห่วงโซ่อาหารในลำดับถัดไปด้วย

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University