บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อนุกรมวิธานของสาหร่าย

1. คลอเรลลา (*Chlorella* sp.) จัดอยู่ใน

Division Chlorophyta

Class Chlorophyceae (Green Algae)

Order Chlorococcales

Family Oocystaceae

Genus Chlorella (ดังภาพที่ 1)

ภาพที่ 1 ลักษณะเซลล์ของคลอเรลลา (http://www.universe-review.ca/I10-23-chlorella.gif)

จัดอยู่ในพวกยูคาริโอต (Eukaryote) และจัดเป็นแพลงก์ตอนพืชชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเซลล์อยู่เดี่ยว ๆ หรืออาจอยู่รวมกันเป็นกระจุก เซลล์รูปร่างกลมรี ขนาดต่างกันทั้งที่พบในที่เดียวกัน มีคลอโรพลาสต์รูปถ้วยหรือเป็นแผ่นอยู่ริมเซลล์ อาจมีหรือไม่มีไพรีนอยด์ สืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศโดยการแบ่งเซลล์จนได้จำนวน 4 หรือ 8 ซึ่งยังคงรวมตัวกันอยู่ในผนังเซลล์พ่อแม่ (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2542) ส่วนธิดา เพชรมณี (2546) กล่าวถึงลักษณะของคลอเรลลาว่า คลอเรลลาเป็นแพลงก์ตอนพืชในกลุ่มสาหร่ายสีเขียว มีผนังเซลล์หนา เมื่อมีจำนวนมากจะมองเห็นน้ำเป็นสีเขียวตอง เซลล์ส่วนใหญ่เป็นทรงกลม และอาจจะมีเซลล์เป็นรูปรีบ้าง คลอเรลลาเพิ่มจำนวนสูงสุดได้ช้ากว่าไดอะตอม โดยใช้เวลา 4-7 วัน ในสภาพธรรมชาติของประเทศไทยที่อุณหภูมิไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส และมีปริมาณแสงที่เพียงพอ เนื่องจากคลอเรลลามีผนังเซลล์ที่หนาทำให้สัตว์น้ำวัยอ่อนที่กินเข้าไปไม่สามารถย่อยผนังเซลล์ของคลอเรลลาได้ และวิสัย วงศ์สายปิ่น (2536) กล่าวถึง

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ผนังเซลล์ของคลอเรลลาว่า มีความแข็งแกร่งมาก ทำให้สาหร่ายชนิดนี้ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ และทนต่อน้ำย่อยทุกชนิด โดยผนังเซลล์ชั้นนอกประกอบด้วยสารคาโรทีนอยด์โพลีเมอร์ สารตัวนี้จะทำหน้าที่จับกับโลหะหนักหรือสารพิษได้ สารสีสำหรับสังเคราะห์แสงประกอบด้วย สารสีหลัก คือ Chlorophyll a และ b มีแคโรทีนอยด์ประเภท แอลฟาแคโรทีน เบตาแคโรทีน และแกมมาแคโรทีนแคโรทีน ส่วนแซนโธฟิลล์ (Xanthophyll) ชนิดที่มากที่สุดได้แก่ ลูเทอีน (Lutein), ไวโอลาแซนธิน (Violaxanthin) และนีโอแซนธิน (Neoxanthin)

2. สนีเดสมัส (*Scenedesmus* sp.) จัดอยู่ใน

Division Chlorophyta

Class Chlorophyceae (Green Algae)

Order Chlorococcales

Family Scenedesmaceae

Genus Scenedesmus (ดังภาพที่ 2)

ภาพที่ 2 ลักษณะเซลล์ของสนีเดสมัส (http://www.sbs.life.tsukuba.ac.jp/Kasai/Scenedesmus.jpg)

จัดอยู่ในพวกยูคาริโอต (Eukaryote) และจัดเป็นแพลงก์ตอนพืชชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเซลล์เป็นรูปไข่ หรือทรงกระบอก หรือพระจันทร์ครึ่งซีก เซลล์จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มมีชื่อเฉพาะว่า ซีโนเบียม เซลล์ที่อยู่ด้านริมสุดทั้งสองด้านอาจมีหนามยื่นออกมา มีไพรีนอยด์ และนิวเคลียสเซลล์ละ 1 อัน เซลล์มีสีเขียว ไม่มีแฟลกเจลลา และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2546) สำหรับการสืบพันธุ์ของสาหร่ายชนิดนี้นั้น กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์ (2527) กล่าวว่า มีการสืบพันธุ์ทั้งแบบอาศัยเพศ และแบบไม่อาศัยเพศ โดยการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศจะสร้างออโตสปอร์ ส่วนการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ มีการสืบพันธุ์แบบที่เรียกว่า ไอโซแกมัส ถือเป็น

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การรวมตัวของเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้และเพศเมีย ที่มีรูปร่างเหมือนกันแต่ต่างขนาดกัน สาหร่ายชนิดนี้สามารถพบได้ในน้ำจืด และในดิน สารสีสำหรับสังเคราะห์แสงประกอบด้วย มีสารสีสำหรับสังเคราะห์แสงชนิดเดียวกับคลอเรลลา และแองคิสโตเดสมัส

3. แองคิสโตรเดสมัส (*Ankistrodesmus* sp.) จัดอยู่ใน

Division Chlorophyta

Class Chlorophyceae (Green Algae)

Order Chlorococcales

Family Oocystaceae

Genus Ankistrodesmus (ดังภาพที่ 3)

ภาพที่ 3 ลักษณะเซลล์ของแองคิสโตรเดสมัส (http://www.protist.i.hosei.ac.jp/PDB/Images/Chlorophyta/Ankistrodesmus/sp_2.jpg)

จัดอยู่ในพวกยูคาริโอต (Eukaryote) และจัดเป็นแพลงก์ตอนพืชชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเซลล์อยู่เดี่ยว ๆ รูปร่างเซลล์เป็นรูปกระสวย รูปวงเดือน หรือรูปเดียว เซลล์อาจโค้งงอ บิด ไม่มีสารเมือกหุ้มเซลล์ คลอโรพลาสต์เป็นแผ่นรูปรีและอยู่ริมเซลล์จำนวนหนึ่ง 1 แผ่น อาจมีหรือไม่มีไพรีนอยด์ มักพบในบ่อน้ำขนาดเล็ก หรือสระน้ำที่มีบัวชนิดต่าง ๆ ถ้าพบมักมีปริมาณมากจนทำให้น้ำนั้นมีสีเขียว และมีรูปร่างลักษณะคล้ายสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Dactylococcopsis* (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2542) ธิดา เพชรมณี (2546) กล่าวว่า แองคิสโตรเดสมัสเป็นแพลงก์ตอนพืชน้ำจืดในกลุ่มสาหร่ายสีเขียว ลักษณะเซลล์คล้ายพระจันทร์เสี้ยว บางทีอยู่รวมเป็นกลุ่มโดยการแตะกันด้วยด้านหลังของเซลล์ เมื่อเลี้ยงในสภาพธรรมชาติจะมีความทนทานกับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ดีกว่าคลอเรลลา มีสารสีสำหรับสังเคราะห์แสงชนิดเดียวกับคลอเรลลา

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ชีววิทยาของสาหร่าย (Biological of Algae)

สาหร่าย (Algae) เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก จนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Microscopic Algae: Microalgae) จัดอยู่ในอาณาจักรโพรทิสตา มีลักษณะคล้ายคลึงกับพืช สามารถสร้างอาหารเองได้โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เป็นกลุ่มของพืชที่มีโครงสร้างง่าย ๆ คือ ประกอบด้วยเซลล์เดียว หรือหลายเซลล์ การเรียงตัวของเซลล์ไม่ซับซ้อน ไม่มีเนื้อเยื่อที่ทำหน้าที่เฉพาะจึงไม่มีท่อลำเลียง ไม่มีราก ลำต้น และใบที่แท้จริง (กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์, 2527) และยุวดี พีรพรพิศาล (2546) ได้กล่าวว่า สาหร่ายบางชนิดที่ประกอบด้วยเซลล์พวกพาเรนไคมา (Parenchyma) จะมองดูคล้ายราก ลำต้น และใบ ซึ่งรวมเรียกว่า ทัลลัส (Thallus) ซึ่งเป็นโครงสร้างของสาหร่ายทั้งหมด สาหร่ายที่มีทัลลัสจะมีเซลล์ที่คล้ายคลึงกับเนื้อเยื่อชนิดโฟลเอม (Phloem) และเนื้อเยื่อเมอริสเตม (Meristematic Tissue) แต่ไม่มีไซเลม (Xylem) ส่วนใหญ่จะมีคลอโรฟิลล์ช่วยในการสังเคราะห์แสง

ชนิดของสารที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง มีสารสีหลัก 3 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟิลล์ (Chlorophylls) แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) และไฟโคบิโลโปรตีน (Phycobiloproteins) สารสีแต่ละชนิดมีคุณสมบัติดังนี้ (ลัดดา เอกสมทราเมษฐ์, 2547)

1. คลอโรฟิลล์ (Chlorophylls) เป็นสารสีเขียว ซึ่งเป็นตัวสำคัญในการสังเคราะห์แสงมี 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ บี ซี และดี (Chlorophyll a, b, c, d) ชนิดคลอโรฟิลล์ที่พบในสาหร่ายทุกชนิด คือ คลอโรฟิลล์ เอ ส่วนชนิดอื่นนั้นจะพบในสาหร่ายต่างชนิดกันไป คลอโรฟิลล์ เอ จัดว่าเป็นสารสีสำหรับสังเคราะห์แสงเบื้องต้น (Primary Photosynthetic Pigment) คือสามารถดูดแสงได้ด้วยตัวเอง ส่วนคลอโรฟิลล์ชนิดอื่น ๆ จัดว่าเป็นสารสีสำหรับสังเคราะห์แสงขั้นสอง (Secondary Photosynthetic Pigment) หรือสารสีประกอบ คือทำหน้าที่ดูดพลังงานจากแสงแล้วส่งต่อไปให้คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์ ดังนั้นการสกัดคลอโรฟิลล์จากสาหร่าย จึงใช้เมทานอล (Methanol) ร้อนหรือเย็น อาจใช้สารละลายที่เป็นส่วนผสมของเมทานอล และปิโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether) ในอัตรา 2:1 โดยปริมาตร โดยทั่วไปปริมาณคลอโรฟิลล์ที่พบในสาหร่าย มีประมาณ 0.5-1.5% ของน้ำหนักแห้ง แต่อาจมีปริมาณสูงถึง 6% ในสาหร่ายที่เลี้ยงในที่มีแสงอ่อน ๆ

2. แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) เป็นสารสีประกอบซึ่งมีสีเหลืองหรือส้ม แคโรทีนอยด์จะดูดซึมแสงสีน้ำเงิน และเขียว และปล่อยแสงสีเหลืองและแดงให้ผ่านออกมา จึงเห็นเป็นสีเหลือง ส้ม หรือแดง แคโรทีนอยด์ยังสามารถแบ่งยอกเป็น 3 ชนิด คือ แคโรทีน (Carotenes) พบในสาหร่ายทุกชนิด, แซนโธฟิลล์ (Xanthophylls) และ ไฟโคบิโลโปรตีน (Phycobiloproteins)

3. Phycobiloproteins พบเฉพาะในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และสาหร่ายสีแดงเท่านั้น

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

แคโรทีนอยด์ มีส่วนในการสังเคราะห์แสงโดยเป็นตัวช่วยถ่ายทอดพลังงานรังสีที่ได้รับไปยังคลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์เป็นสารที่ละลายได้ในตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์ และละลายได้ดีในปิโตรเลียมอีเทอร์ ส่วนแซนโธฟิลล์ละลายได้ดีใน 90% เมทานอล ดังนั้นเมื่อนำแคโรทีนอยด์ในน้ำยาปิโตรเลียมอีเทอร์มาเขย่าใน 90% เมทานอล แซนโธฟิลล์จะละลายอยู่ในเมทานอลส่วนแคโรทีนจะยังคงอยู่ในปิโตรเลียมอีเทอร์ตามเดิม อัตราส่วนของปริมารแคโรทีน: ปริมาณแซนโธฟิลล์ในเซลล์สาหร่าย มีประมาณ 3: 2

การสังเคราะห์แสงของสาหร่าย

สรวิศ เผ่าทองศุข (2543) กล่าวถึงการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายว่า สาหร่ายส่วนใหญ่นั้นได้พลังงานมาจากการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) หากสาหร่ายได้รับแสงที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมมีผลทำให้สาหร่ายมีการเจริญช้า ในขณะที่ความเข้มแสงที่สูงมากเกินอาจทำให้เกิดภาวการณ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย เนื่องจากความเข้มแสงที่มากเกินไป (Photoinhibition) ซึ่งส่งผลต่อปริมาณสารสีคาโรทีนอยด์ในคลอเรลลาได้ ในการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายจะใช้พลังงานจากแสงในช่วงคลื่นที่เรียกว่า Photosynthetically Active Radiation (PAR) มีความยาวคลื่นระหว่าง 400-700 nm พลังงานที่ได้จะนำไปใช้ในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ สมการโดยรวมของการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายมีดังนี้

$$6CO_2 + 12H_2O + h\nu \longrightarrow (CH_2O)_6 + 6H_2O + 6O_2$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่าเมื่อสาหร่ายสังเคราะห์แสง จะมีการปล่อยออกซิเจนออกมานอกเซลล์ ดังนั้นการวัดอัตราการปล่อยออกซิเจนจากสาหร่าย (Oxygen Evolution) จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายได้

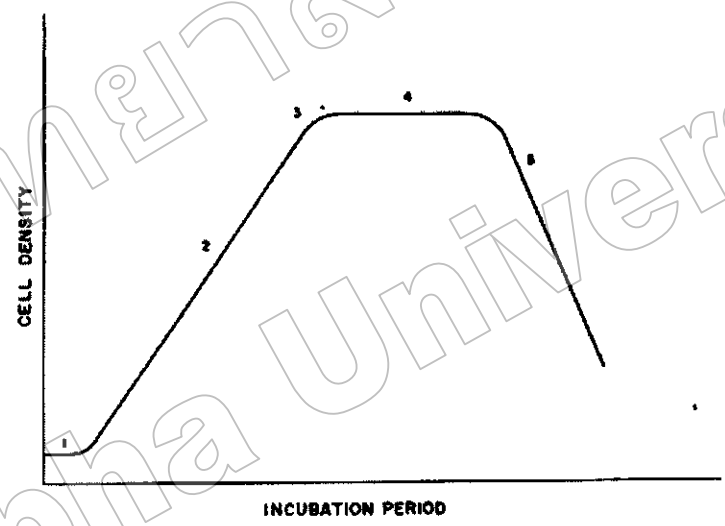
ลัดดา เอกสมทราเมษฐ์ (2547) กล่าวว่า สาหร่ายสามารถสังเคราะห์อาหารด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสง และเกี่ยวข้องกับการสะสมอาหารพวกคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลาสติดซึ่งเป็นออร์แกเนลล์ที่พบในไซโทพลาสซึมของเซลล์ยูคาริโอต จำแนกตามโครงสร้าง หน้าที่ และชนิดรงควัตถุ ได้ 3 ชนิดคือ คลอโรพลาสต์ โครโมพลาสต์ และลิวโคพลาสต์ ในสาหร่ายจะมีคลอโรพลาสต์อยู่เป็นพลาสติดสีเขียว พบมากในเนื้อเยื่อพืชที่มีสีเขียว มีรงควัตถุชนิดคลอโรฟิลล์อยู่มาก ทำหน้าที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์แสง และใน ค.ศ. 1894 Thomas Engelmam ยืนยันว่าคลอโรพลาสต์เป็นบริเวณที่มีการสังเคราะห์แสงในระบบแสงที่สอง (PSII) ของยูคาริโอต และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ซึ่งเปลี่ยนแปลงมาจากแบคทีเรียสีม่วงโดยมีการเจริญของสายพอลิเพบไทด์ (Polypeptide) ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการแยกน้ำเกิดเพิ่มขึ้น

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การเจริญเติบโตของสาหร่าย

ลักษณะการเจริญเติบโตของสาหร่าย ดูได้จากกราฟดังแสดงใน ภาพที่ 4 โดยลัดดา วงศ์รัตน์ (2542) ได้แบ่งการเจริญเติบโตของสาหร่ายไว้ 5 ระยะ คือ

1. ระยะปรับตัว (Lag Phase or Inductional Phase)
2. ระยะเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Phase)
3. ระยะเฉื่อย (Retardation Phase or Declining Relative Growth)
4. ระยะคงที่ (Stationary Phase)
5. ระยะตาย (Death Phase)



ภาพที่ 4 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของสาหร่าย (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2542)

1. ระยะปรับตัว (Lag Phase) เป็นระยะที่เซลล์ปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่ เช่น แสง อุณหภูมิ และธาตุอาหาร เป็นต้น ในระยะนี้จะไม่มีการแบ่งตัว ฉะนั้น ถ้าเซลล์ที่ไม่สามารถปรับตัวได้จะตายลง การที่สาหร่ายจะผ่านระยะปรับตัวนี้เร็วมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเซลล์ และความอุดมสมบูรณ์ของอาหารที่เลี้ยง ถ้าสภาพทั้งสองอย่างเหมาะสมจะเข้าสู่ระยะที่ 2 เร็วขึ้น

2. ระยะเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Phase) เป็นระยะที่สาหร่ายเจริญเติบโต และแพร่ขยายพันธุ์อย่างรวดเร็วระยะนี้จะนานเท่าใดขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหารและคุณสมบัติทางฟิสิกส์เคมีของสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความเข้มแสง ช่วงที่ได้รับแสง รวมทั้งผลผลิตนอกเซลล์

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ของสาหร่าย สภาวะรวมของสิ่งแวดล้อม ลักษณะการเจริญเติบโตในระยะนี้เป็นแบบที่รวดเร็วในระยะแรก และจะค่อย ๆ ช้าลงตามลำดับ

3. ระยะเฉื่อย (Retardation Phase or Declining Relative Growth) เป็นช่วงที่เซลล์มีการเจริญเติบโตช้าลงเพราะขาดอาหาร เช่น ไนโตรเจน เหล็ก คาร์บอน หรือออกซิเจน เนื่องจากปริมาณเซลล์เกิดการหนาแน่นเกินไป การเสียสมดุลของ pH เพราะเกิดแอมโมเนียมากขึ้น หรือแสงสว่างลดลงเนื่องจากเซลล์เกิดการบังกันเอง (Auto-Shading)

4. ระยะคงที่ (Stationary Phase) เป็นระยะที่การเจริญเติบโตหยุดนิ่งเนื่องจากธาตุอาหารลดน้อยลง และเกิดสารพิษจากขบวนการเมตาบอลิซึมหรือการสลายตัวของเซลล์เพิ่มมากขึ้น

5. ระยะตาย (Death Phase) เป็นระยะที่เซลล์หยุดการเจริญเติบโตโดยสิ้นเชิงเนื่องจากธาตุอาหารหมดลง เซลล์จะเริ่มตายและการตายจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และรวดเร็วขึ้น

โลหะหนัก (Heavy Metals)

โลหะหนักมีหลายชนิดแต่ชนิดที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐานอาหารส่วนใหญ่จะมี 3 ชนิด ได้แก่ ปรอท แคดเมียม และตะกั่ว อันตรายของโลหะเหล่านี้ เกิดเนื่องจากโลหะเหล่านี้เมื่อเข้าไปในสิ่งมีชีวิต จะไปรบกวนการทำงานของเซลล์โดย

1. ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิด
2. แทนที่โลหะสำคัญของเอนไซม์ ทำให้เอนไซม์ทำงานได้น้อยลงหรือไม่ได้เลย
3. เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชีวโมเลกุล

มลิวรรณ บุญเสนอ (2545) กล่าวว่า โลหะเป็นธาตุที่มีทั้งคุณ และโทษต่อคน ซึ่งในอดีตคนใช้ประโยชน์จากโลหะหลายชนิด เช่นการใช้ปรอทเพื่อรักษาโรค เหล็ก และสังกะสีใช้ทำภาชนะ ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้โลหะอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้แคดเมียม และตะกั่วทำแบตเตอรี่ ใช้โครเมียมเคลือบอุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ การที่มีการใช้โลหะหนักอย่างมากมายนี้เองทำให้โลหะกระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและสะสมในสิ่งมีชีวิตและห่วงโซ่อาหารเป็นจำนวนมาก นอกจากโลหะจะมีประโยชน์แล้วก็ยังมีโทษด้วย เช่นกรณีที่ปรอททำให้เกิดโรคมินามาตะ (Minamata Disease) หรือแคดเมียมทำให้เกิดโรคอิไตอิไต (Itai-Itai Disease) เป็นต้น

โลหะหนัก เช่น ปรอท แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว ซึ่งมาจากน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ โรงงานทำแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นสารที่สะสมได้ในวงจรอาหาร และเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ดังแสดงโลหะหนักในน้ำเสีย ตารางที่ 1 (ปราณี พันธุมสินชัย, 2538)

ในทางพิษวิทยาโลหะที่เป็นพิษต่อระบบชีวภาพเรียกว่า โลหะหนัก ซึ่งตามนิยามแล้วโลหะหนักคือ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

1. สารมีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 และ 5

2. เมื่อพิจารณาตำแหน่งบนตารางธาตุ (Periodic Table) โลหะหนักได้แก่ ธาตุที่มีอะตอมมิคนัมเบอร์ระหว่าง 22-33 และระหว่าง 40-52 รวมทั้งธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์ (Lanthanide Series) และกลุ่มแอคติไนด์ (Actinide Series)

3. สารมีผลต่อระบบชีวเคมีของพืชและสัตว์

โดยทั่วไปร่างกายสามารถสะสมโลหะหนักไว้ปริมาณหนึ่งโดยไม่เป็นอันตราย (ตารางที่ 2)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ตารางที่ 1 โลหะหนักในน้ำเสีย (Filice & Brossean, 1993 อ้างถึงใน ปราณี พันธุมสินชัย, 2538)

Metal	Residential	Commercial	Industry
Copper	Root Killer	Auto Body Shops	Manufacturers of Electrical
	Algicides	Cooling Tower	Equipment
	Foods	Printers	
		Linen Suppliers	
Mercury	Paints	Paints & Wallpaper	Genernal Medical and
	Photo Wastes	Photo Shop	Surgical Hospital
	Auto Fluids	Auto Services	Lamp Manufactures
	Foods (Meats,	Metal Manufactures	
	Vegetables	Laboratories Dentists	
	and Grains)		
Lead	Paints	Sheet Metal Shops	Hospital
	Photo Processors	Auto Services	Radiator Repair Shops
	Auto Fluids	Equipment Renters	Linen Supplier
	Home Plumbing	Painting Services	Car Washs
Silver	Photo Wastes	Photo Shop	Photochemical Suppliers
	Personal Care		Hospitals
	Products	Motion Picture Industry	
	Polishers		
Zinc	Paints	Auto Services	Hospitals
	Auto Fluids	Printers	Sausage Manufactures
	Water Heaters		Laundries and Linen
			Suppliers

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ตารางที่ 2 ปริมาณโลหะหนักที่ร่างกายสะสมโดยไม่เป็นอันตราย (Hammond & Belile, 1980 อ้างถึงใน มลิวรรณ บุญเสนอ, 2545)

ชนิดของโลหะหนัก	ปริมาณที่ร่างกายสะสมได้โดยไม่เป็นอันตราย (มก.)
Antimony	< 90
Arsenic	< 100
Cadmium	30
Chromium	< 6
Cobalt	1
Copper	100
Germanium	trace
Iron	4100
Lead	120
Manganese	20
Mercury	trace
Molybdenum	9
Nickel	< 10
Niobium	100
Silver	< 1
Tellurium	600
Tin	30
Titanium	< 15
Uranium	0.02
Vanadium	30
Zinc	2300
Zirconium	250

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

รายละเอียดเกี่ยวกับโลหะหนัก

1. ปรอท (Hg)

2. แคดเมียม (Cd)

3. ตะกั่ว (Pb)

4. สารหนู (As)

5. ทองแดง (Cu)

1. ปรอท (Hg)

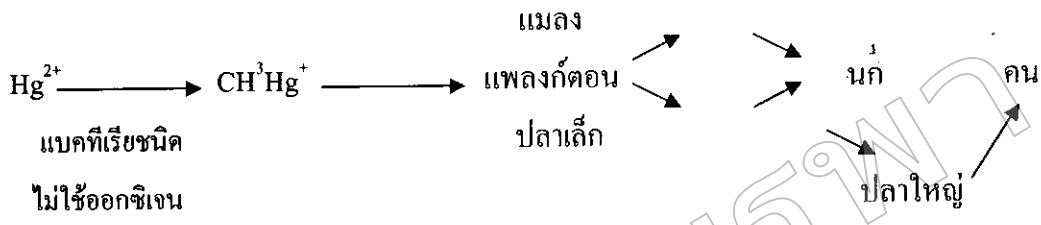
ปรอท มีชื่อภาษาอังกฤษว่า Mercury มีสูตรโมเลกุลคือ Hg ปรอทบริสุทธิ์มีสถานะเป็นของเหลว มีมวลอะตอม 200.7 ความถ่วงจำเพาะ 13.545 จุดหลอมเหลว - 38.87°C และมีจุดเดือดที่ 356.9°C (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) ซึ่งสูงมากจะเห็นได้ว่าปรอทมีความดันไอต่ำมาก (ประมาณ 2.4×10^{-6} บรรยากาศที่ 25°C) โดยปกติปรอทจะไม่เกาะติดวัตถุ เช่น กระเบื้องปูพื้นปรอทจะแตกกระจายออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ได้อย่างง่ายดาย ยากแก่การรวบรวมเป็นหยดอีกครั้ง ปรอทในสถานะของเหลวเป็นมีความเป็นพิษไม่มากนัก แต่ไอปรอทมีความเป็นพิษสูงถึงแม้ปรอทจะเป็นของเหลว แต่ก็แสดงสมบัติความแวววาวของโลหะ อย่างไรก็ตามปรอทก็ยังขาดคุณสมบัติที่ดีของโลหะทั่วไป เช่น มีความต้านทานไฟฟ้าสูง และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันทั่วไป ปรอทสามารถเกิดโลหะเจือกับโลหะอื่น ๆ เช่น ทองแดง (Cu) เงิน (Ag) ทองคำ (Au) และโลหะอัลคาไล เช่น Na, K โลหะเจือที่ได้เรียกว่า อะมัลกัม (Amalgam) (แนพพ์ ไบรอัน, 2544 ก) สารประกอบของปรอทมีเลขออกซิเดชันได้ทั้ง +1 และ+2 เมื่อเลขออกซิเดชันเป็น +1 เรียกสารนั้นว่า Mercurous เมื่อเป็น +2 เรียกว่า Mercuric

การใช้ประโยชน์

ปรอทเป็นโลหะที่คนคุ้นเคยและนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่สมัยโบราณ คือ ใช้เป็นส่วนประกอบของยารักษาโรคซิฟิลิส ปัจจุบันใช้ทำเทอร์โมมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ และเป็นส่วนประกอบของยาแดงรักษาแผลสด นอกจากประโยชน์ที่กล่าวนี้ปรอทยังเป็นที่รู้จักกันดีในเรื่องที่ทำให้คนญี่ปุ่นเสียชีวิตและพิการไปถึง 1200 คน เนื่องจากบริโภคปลาที่มีสารปรอทปนเปื้อนเข้าไป จากการศึกษาที่มาของปรอทในปลาบริเวณอ่าวมินามาตะพบว่า โรงงานในบริเวณนั้นเป็นผู้ปล่อยน้ำเสียซึ่งมีสารปรอทปนเปื้อนออกมา น้ำที่ถูกปล่อยออกมานั้นมีปรอทซึ่งอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ (Inorganic Mercury) และเมื่อสารนี้ตกลงไปสู่ก้นอ่าวจะถูกแบคทีเรียชนิดที่ไม่มีออกซิเจนเปลี่ยนรูปให้ปรอทไปอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ (Organic Mercury) ดังภาพที่ 5 สารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่นี้สามารถสะสมในปลาและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ รวมทั้งเป็นพิษต่อร่างกายด้วย แสดงให้เห็นว่าปรอทสามารถเปลี่ยนรูป (Transform) ไปเป็นสารประกอบที่มีความเป็นพิษเพิ่มขึ้น

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ทั้งยังเป็นโลหะหนักเพียงตัวเดียวที่ทำให้เกิด Biomagnification หรือ การสะสมสารพิษเพิ่มขึ้นตามลำดับชั้นในห่วงโซ่อาหารอีกด้วย



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนรูปของปรอทโดยอาศัยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจน และการสะสมในห่วงโซ่อาหาร (Spio & Stigliani, 1980 อ้างถึงใน มลิวรรณ บุญเสนอ, 2545)

รูปของปรอท (แนพพ์ ไบรอัน, 2544ก)

1. รูปของธาตุ (Hg^0) ธาตุปรอทที่พบในธรรมชาติมีความดันไอสูง ดังนั้นในบรรยากาศทั่วไปที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส จะพบไอปรอทสูงถึง 18 มก. /ลบ. ม. และปรอทยังอยู่ในสภาวะที่เป็นอะตอมเดี่ยวด้วย (Monoatomic State) ทำให้มีขนาดเล็กมาก เมื่อคนหายใจเอาไอปรอทเข้าไปจะสามารถเข้าไปถึงถุงลมปอดได้อย่างง่ายดาย

2. รูปของสารอนินทรีย์ (Inorganic Mercury) ปรอทในรูปสารประกอบอนินทรีย์ มีทั้งที่มีออกซิเดชั่นสเตท 1+ และ 2+ คือ Hg^{1+} และ Hg^{2+} ปรอทรูป Hg^{2+} จะไวต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ มากกว่าและเป็นพิษมากกว่าปรอท Hg^{1+}

3. รูปของสารอินทรีย์ (Organic Mercury) ปรอทสามารถเกาะกับอะตอมของคาร์บอนของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ดี เช่น Alkyl Mercury และ Phenyl Mercury เป็นต้น สารพวกนี้มีคุณสมบัติที่ละลายได้ดีในไขมัน ทำให้เคลื่อนผ่านเมมเบรนของเซลล์ และสะสมในร่างกายได้ดี ปรอทในรูปสารอินทรีย์จะมีความคงทนมากน้อยเพียงใดขึ้นกับความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับปรอท ดังนั้นจากโครงสร้างของสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ จึงพบว่าความคงทนของสารในธรรมชาติจะลดลงจาก Alkyl Mercury เป็น Phenyl Mercury และ Alkoxy Alkyl Mercury ตามลำดับ

ปรอท เป็นของเหลวระเหยเป็นไอได้ง่ายในภาวะปกติ ลักษณะภายนอกมีสีเงินสามารถไหลได้จึงเรียกว่า "เงินที่ไหลได้ (Fluid Silver)" ปรอทพบมากในแหล่งที่มีการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง โลหะ โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ ในอุตสาหกรรมที่มีการใช้สารประกอบของปรอท นอกจากนี้ยังใช้ในวงการแพทย์ เช่นเป็นสารอุดฟัน ไอปรอทที่เข้าสู่ร่างกาย จะถูกดูดซึมเข้าสู่ระบบหมุนเวียนโลหิตทันที และกระจายไปยังสมองและส่วนอื่น ๆ ของร่างกายได้รวดเร็ว การได้รับสาร

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ปรอทสะสมเป็นเวลานานจะทำให้มีอาการมือ และใบหน้าเกิดอาการบวมและเจ็บ บางคนอาจเกิดอาการเหน็บชาบางส่วนจนเป็นอัมพาต โรคที่เกิดจากปรอท เรียกว่า โรคมินามาตะ

ความเป็นพิษของปรอท

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือ ปรอทเป็นสารที่อันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ มีผลยับยั้งการสังเคราะห์ คลอโรฟิลล์ของสาหร่าย ทำให้เซลล์มีสีขาวซีด

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

ความคงตัวทางเคมีปรอทมีความเสถียรภายใต้สภาวะปกติของการใช้ และการเก็บ สารที่เข้ากันไม่ได้คือ อะเซทิลีน แอมโมเนีย เอทิลีนออกไซด์ คลอรีนไดออกไซด์ เอไซด์ โลหะคาร์บอนิล โลหะออกไซด์ เมทิลไซเลน ลิเทียม รูบิเดียม ออกซิเจน สารออกซิไดซ์รุนแรง สำหรับสภาวะที่ควรหลีกเลี่ยงได้แก่ ความร้อน เปลวไฟ แหล่งจุดติดไฟ โลหะ และในสารที่เข้ากันไม่ได้ ในที่อุณหภูมิสูงจะเกิดไอพิษจากการสลายตัว และไม่เกิดอันตรายจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

2. แคดเมียม (Cadmium)

แคดเมียม ลักษณะเป็นผงสีเทาหรือโลหะสีเงิน มีสถานะเป็นของแข็งสามารถละลายได้ในกรดไนตริก สูตรโมเลกุลคือ Cd มีมวลอะตอม 112.40 ความถ่วงจำเพาะ 8.6 จุดหลอมเหลว 321°C และมีจุดเดือดที่ 765°C (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) ในธรรมชาติแคดเมียมจะเป็นธาตุที่อยู่ร่วมกับสังกะสีและตะกั่ว ดังนั้นในการถลุงแร่จึงได้ธาตุทั้งสามออกมาพร้อมกัน และแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำ อาหาร และในยาสูบเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมในกระเพาะอาหารแล้วจึงแพร่กระจายไปที่ตับ ม้าม และลำไส้ และสะสมเพิ่มขึ้นในปริมาณสูงจะทำให้เกิดมะเร็ง ไตทำงานผิดปกติ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง ปวดกระดูกสันหลัง แขนขา ซึ่งจะทำให้ไตพิการได้

การใช้ประโยชน์

สำหรับแคดเมียมนี้นิยมนำมาใช้ทำอัลลอย และเคลือบโลหะต่าง ๆ รวมทั้งยังนำมาทำแบตเตอรี่นิเกิลแคดเมียม และพลาสติกด้วย เป็นโลหะมีสีเงิน มีอยู่น้อยตามธรรมชาติ โดยทั่วไปแคดเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมจะพบในแหล่งทำเหมืองสังกะสี และตะกั่ว ในอุตสาหกรรมยาสูบ และบุหรี่ พลาสติก และยาง นอกจากนี้ยังนิยมใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ อุปกรณ์ไฟฟ้า โลหะผสม อะไหล่รถยนต์ โลหะผสมในอุตสาหกรรมเพชรพลอยอีกด้วย

รูปของแคดเมียม

แคดเมียมจะไม่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ (Alkyl Compound หรือ Organometallic Compound) เช่นเดียวกับสารตะกั่วหรือปรอท แต่แคดเมียมจะอยู่ในรูปของเกลือต่าง ๆ ที่มี

การละลายน้ำต่างกัน เกลือของแคดเมียม เช่น แคดเมียมไนเตรต แคดเมียมซัลเฟตจะละลายน้ำได้ดี แต่แคดเมียมไฮดรอกไซด์ และแคดเมียมคาร์บอเนตจะไม่ละลายน้ำ แคดเมียมออกไซด์มีความดันไอสูงจึงระเหยได้ดี และเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

สารที่เข้ากันไม่ได้นั้นสามารถทำปฏิกิริยารุนแรงกับกรด และให้ก๊าซไวไฟออกมา เช่น ไฮโดรเจน แคดเมียมสามารถทำปฏิกิริยารุนแรงกับสารออกซิไดซ์อย่างแรง สำหรับอันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์นั้นจะไม่เกิดขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

ความเป็นพิษของแคดเมียม

ความเป็นพิษของแคดเมียมเป็นที่ทราบกันมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1858 เมื่อคนงานในเหมืองป่วยเพราะสูดแคดเมียมเข้าไป แต่พิษของแคดเมียมกลายเป็นเรื่องโด่งดังไปทั่วโลกโรคที่เกิดจากพิษของแคดเมียมเรียกว่า โรคอิไต-อิไต (Itai Itai Disease) แปลว่า เจ็บ เจ็บ ผู้ป่วยจะมีอาการปวดตามกล้ามต่อมาพบว่าสาเหตุของโรคเกิดจากการที่ชาวบ้านบริโภคข้าวที่มีแคดเมียมปนเปื้อนเข้าไป สาเหตุที่ข้าวมีแคดเมียมปนเปื้อนเนื่องจากน้ำที่นำมาใช้ปลูกข้าวนั้นผ่านมาจากเหมืองแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วนั่นเอง สำหรับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อรั่วไหลลงสู่น้ำจะเกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ เป็นพิษต่อแหล่งน้ำดื่ม

3. ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่ว เป็นโลหะจัดอยู่ในหมู่ IV ของตารางธาตุ สูตรโมเลกุลคือ Pb มีจุดหลอมเหลว 327.4°C และมีจุดเดือดที่ 1740°C มีความถ่วงจำเพาะ 11.35 กรมควบคุมมลพิษ (2547) จัดตะกั่วเป็นโลหะหนัก ตะกั่วเป็นธาตุที่ไม่มีประโยชน์สำหรับร่างกายทั้งในพืช และสัตว์ ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นพิษอย่างแรงต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตรวมทั้งมนุษย์ด้วย ธาตุนี้มีการกระจายทั่วไปในสิ่งแวดล้อมธรรมชาติ เปลือกโลกของเรามีตะกั่วโดยเฉลี่ยประมาณ 10 -15 ppm โดยตะกั่วที่ปรากฏเป็นธาตุอิสระมีน้อยมาก คือที่พบในเปลือกโลกเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของสารประกอบ ตัวอย่างแร่ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบได้แก่ แร่ Gelenite หรือ Galena ซึ่งเป็นซัลไฟด์ของตะกั่ว (PbS) แร่ Cerussite ($PbCO_3$) เป็นต้น

การใช้ประโยชน์

ส่วนเกี่ยวข้องกับระบบเมตาโบลิซึม และยังเป็นพิษต่อร่างกาย หากได้รับเข้าสู่ร่างกายในปริมาณสูง โดยปกติตะกั่วรวมทั้งโลหะหนักอื่น ๆ ถึงแม้จะปรากฏทั่วไปในธรรมชาติ แต่ส่วนใหญ่ฝังลึกในที่ที่ห่างไกลจากผู้คน ดังนั้นตะกั่วที่มีในสิ่งแวดล้อมจึงมีปริมาณไม่สูงพอที่จะก่ออันตรายกับคน และสัตว์ แต่มนุษย์เรานี่เองที่เป็นต้นเหตุที่ทำให้สารนี้แพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากตะกั่วสามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้เช่น ใช้ในการสังเคราะห์สาร TEL (Tetraethyl Lead)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

เป็นสารที่เติมเพื่อเพิ่ม Octane Number, ใช้ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี และใช้ในงานอื่น ๆ ได้แก่ งานบัดกรี ทำโลหะเจือ ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมการผลิตกรดซัลฟุริก กระสุนปืน และเคยใช้ผสมกับสีทาบ้าน เป็นต้น จากการนำตะกั่วมาใช้งานหลายชนิดในปริมาณมาก ทำให้สิ่งแวดล้อมมีตะกั่ว และสารประกอบของตะกั่วกระจายทั่วไปทั้งในอากาศในน้ำและดิน ตลอดจนพืชผัก อาหารอื่น ๆ ที่เรารับประทาน (แนพพ์ ไบรอัน, 2544 ข)

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่ร่างกายไม่ต้องการกล่าวคือ ไม่มีร่างกายคนเราสามารถทนต่อตะกั่วในปริมาณหนึ่ง มีการวิจัยพบว่าคนทั่วไปมีตะกั่วในเลือด 0.25 ppm โดยไม่เกิดอาการเป็นพิษ แต่ถ้ารับเข้าไปมากกว่า 0.8 ppm จะเกิดอาการเป็นพิษอย่างฉับพลัน เช่น เกิดอาการปวดท้องอย่างรุนแรง อุจาระมีสีดำ ความจำเสื่อมตื่นเต้นง่าย และทำอันตรายต่อไต

รูปของตะกั่ว รูปของตะกั่วในธรรมชาติมี 2 รูป คือ

1. รูปของสารอนินทรีย์ (Inorganic Lead) อยู่ในรูปของเกลือหรือออกไซด์ของตะกั่ว
2. รูปของสารอินทรีย์ (Organic Lead) พบมากได้แก่ Tetraethyl Lead และ Tetra Methyl Lead

สารเหล่านี้มาจากน้ำมันที่มีสารตะกั่วผสมอยู่ตะกั่วจากน้ำมันจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมครอนจึงทำให้สารตะกั่วนี้สามารถกระจายไปได้ไกลกว่า 30 กิโลเมตร ถึงแม้ในปัจจุบันจะเลิกใช้น้ำมันที่มีสารตะกั่วผสมแล้วก็ตามแต่ปริมาณของฝุ่นตะกั่วที่พบก็ยังคงมีอยู่ไม่น้อย (อำนาจ เจริญศิลป์, 2544)

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

ความคงตัวทางเคมีโดยปกติสารนี้มีความเสถียร ไม่เกิดอันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ สำหรับสารที่เข้ากันไม่ได้ และต้องหลีกเลี่ยงคือ กรดแก่ เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริค และกรดซัลฟลูริค สารออกซิไดซ์อย่างแรง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาจากการสลายตัวอย่างรุนแรง และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ TRIOXANE จะทำให้เกิดการระเบิดจากความร้อน คลื่นสั่นสะเทือนโซเดียมเอไซด์ จะทำให้เกิด LEAD AZID เป็นสารประกอบที่ไม่เสถียร สามารถระเบิดได้ ไตรฟลูออไรด์ทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรง และสามารถทำให้ระเบิดได้กับผงตะกั่ว และใน ZIRCONIUM จะลุกติดไฟได้เมื่อได้รับการกระทบกระแทกจากค้อน (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

ความเป็นพิษของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นโลหะที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญตัวหนึ่ง ถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมสี และพลาสติก เป็นต้น แบตเตอรี่หรือถ่านไฟฉายซึ่งใช้แล้วและถูกทิ้งอยู่ตามกองขยะเป็นแหล่งที่มาสำคัญของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

แพร่กระจายเข้าสะสมในพืชและสัตว์ และในที่สุดก็เข้ามาสู่คน กรมควบคุมมลพิษ (2549) ให้ความหมายของตะกั่วว่า เป็นโลหะสีเทาเข้ม ค่อนข้างอ่อน เกิดอยู่ในแร่หลายชนิดที่สำคัญ คือ กาลีนา (PbS) การถลุงตะกั่วมักได้โลหะเงินออกมาด้วยเล็กน้อย ตะกั่วสะสมในร่างกาย และยังทำลายสุขภาพของคนเราได้เมื่อมีมากถึงระดับหนึ่ง โดยพิษของตะกั่วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดเลือดแดง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อระบบประสาท และทำให้เกิดอันตรายต่อไตได้

4. สารหนู (Arsenic)

สารหนู เป็นธาตุกึ่งโลหะ มีสถานะเป็นของแข็ง ผลึก มีสีเทา มันวาว ซึ่งสามารถละลายได้ในกรดไนตริก กรดอะซิติก เอทานอล สูตรโมเลกุลคือ As มีมวลอะตอม 74.92 ความถ่วงจำเพาะ 5.727 จุดหลอมเหลว 814°C และมีจุดเดือดที่ 613°C (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) ได้มีรายงานการพบสารหนูในบ่อน้ำใช้บริโภค บริเวณอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ในปี พ.ศ. 2530 และอำเภอบันนังสตาร์ จังหวัดยะลา สารหนูที่พบเป็นสารหนูที่ปนเปื้อนในดิน มีปริมาณตั้งแต่ 21-16,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สารหนูที่พบในอำเภอร่อนพิบูลย์ ส่วนใหญ่อยู่ร่วมกับสายแร่ดีบุก โดยสารหนูจะอยู่ในรูปของอาร์ซีโนไพไรต์ (Arsenopyrite; FeAsS) หรือในรูปอื่นซึ่งมีซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบ การแพร่กระจายของสารหนูในพื้นที่ เกิดจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ดีบุก ทำให้สารหนูในรูปอาร์ซีโนไพไรต์ ที่ปนอยู่กับสายแร่ถูกขุดออกมาด้วย ในกระบวนการแยกแร่ออก อาร์ซีโนไพไรต์ถูกแยกออกมากับหางแร่และทิ้งไว้ ทำให้เกิดการออกซิเดชันกับอากาศ และน้ำทำให้สารหนูที่อยู่ในแร่ แพร่กระจายออกมาสู่แหล่งน้ำ (วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา และนิตินัย ขำมาลัย, 2547)

การใช้ประโยชน์

ส่วนใหญ่จะใช้ในทางการเกษตร เช่น ยาฆ่าแมลง ยาปราบศัตรูพืช ยาฆ่าเชื้อรา เป็นต้น (Metelev, Kanaev, & Dzasokhova, 1983) สารหนูในรูปของธาตุจะใช้เป็นส่วนผสมของโลหะอัลลอยด์ เช่น ผสมกับตะกั่วในแบตเตอรี หรือในรูปของแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide) สำหรับเคลือบสีในนาฬิกาดิจิตอล หรือใช้เป็น Light-Emitting Diode สำหรับเครื่องมือต่าง ๆ (วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา และนิตินัย ขำมาลัย, 2547)

รูปของสารหนู

สารหนู หรือ อาร์ซีนิกในธรรมชาติเกิดเป็นออกไซด์ ซึ่งมักจะรวมอยู่กับแร่ธาตุ อื่น ๆ กลายเป็นรูปสารประกอบทั้งในน้ำและดินมักพบในการทำเหมือง รูปแบบของสารหนูจะพบร่วมกันแร่ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีซัลไฟด์ โดยพบอยู่ในรูปของ Sulfide Realgar หรือ Orpiment โดยจะพบมากที่สุดในรูปของ Arsenopyrite ออกไซด์ของสารหนูในรูป Arsenic Trioxide (AsO_3) (วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา และนิตินัย ขำมาลัย, 2547)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

ความคงตัวทางเคมีซึ่งปกติสารนี้จะมีความเสถียร ในสารที่เข้ากันไม่ได้คือ สารออกซิไดส์ ในสภาวะที่ควรหลีกเลี่ยงคือ อากาศ ความร้อน สำหรับสารเคมีอันตรายที่เกิดจากการเผาไหม้และการสลายตัวกับสารนี้คือ อาเซนิกออกไซด์ สารหนูจะไม่เกิดอันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

ความเป็นพิษของสารหนู

สารหนู และสารประกอบสารหนูที่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์จะมีความเป็นพิษมากกว่าสารประกอบอนินทรีย์ สารหนูใช้ในอุตสาหกรรมด้านการเกษตร อุตสาหกรรมย้อมผ้า เมื่อได้รับเข้าสู่ร่างกายโดย

1. ทางเดินหายใจ ทำให้ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อเมื่อสูดหายใจเข้าไปบ่อย ๆ นาน ๆ ทำให้เยื่อบุกั้นจมูกทะลุ และอาจเกิดมะเร็งที่ปอดได้

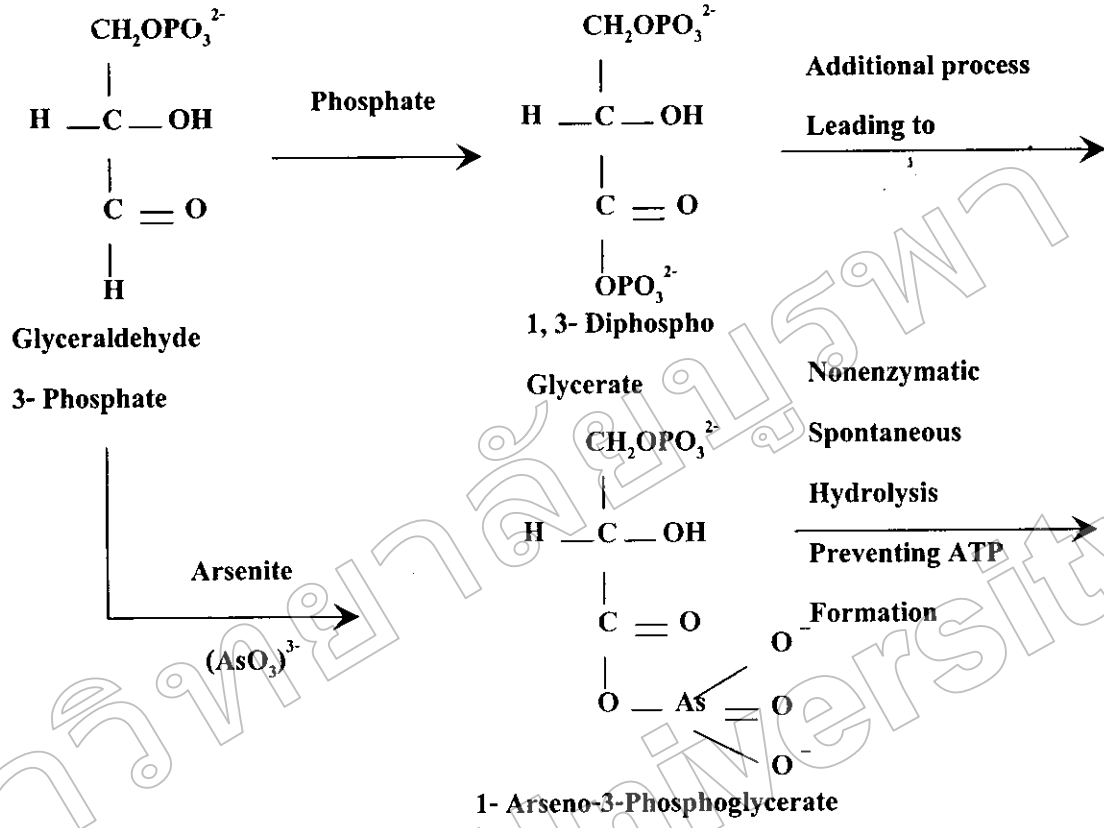
2. ทางผิวหนัง ทำให้เกิดระคายเคือง ถ้าเกิดการอักเสบบวมแดงเป็นตุ่มแข็งใสพองเป็นอาการเรื้อรังจะทำให้เป็นมะเร็งที่ผิวหนังได้

3. ทางตา จะเกิดอาการตาแดง อักเสบ แต่ถ้าสารหนูเข้าทำลายระบบประสาทอาจทำให้เกิดอาการแขนขาชาและอาจเป็นอัมพาตได้

4. ทางอาหาร ถ้าได้รับปริมาณมากอาจทำให้เกิดการทำลายระบบสมอง และทำลายตับ เกิดอาการตับอักเสบได้ ในบางรายมีโปรตีนขับออกมาทางปัสสาวะ

พิษของสารหนูเป็นที่รู้จักกันอย่างมากในปลายปี 2530 ที่อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ชาวบ้านหลายครัวเรือนขุดน้ำใต้ดินมาใช้ทำให้เกิดโรคที่เรียกว่า ไข้ดำ ซึ่งผิวของคนเป็นโรคนี้ จะมีผิวดำคล้ำ โรคผิวหนังเป็นผื่นแดงและคันบางรายมีอาการผิวหนังเป็นสะเก็ด อาการโดยทั่วไปจะมีอาการอ่อนเพลียมือและเท้าช้า ในบางรายที่เป็นมากจะแสดงอาการคล้ายโรคมะเร็งผิวหนังมีเซลล์ผิวหนังมีการเปลี่ยนแปลงชัดเจน นอกจากนี้ยังสลายเม็ดเลือดแดงทำให้มีอาการของโรคโลหิตจางอีกด้วย ดีบุก สำหรับผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมคือ เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ใต้น้ำ อาจทำให้เกิดผลกระทบในระยะยาวต่อสภาพของสิ่งแวดล้อมใต้น้ำ มีความสามารถในการย่อยการสลายตัวทางชีวภาพได้ยาก Metelev et al. (1983) กล่าวว่า สารหนูจะแสดงความเป็นพิษออกมาอย่างช้า ๆ ในปลา และแสดงความเป็นพิษต่ออวัยวะ (Organisms) ส่วนต่าง ๆ ของสัตว์น้ำ นอกจากนี้สารหนูยังมีผลต่อกระบวนการสร้าง ATP เนื่องจากสารหนูมีคุณสมบัติทางเคมีที่คล้ายคลึงกับธาตุฟอสฟอรัส (P) ดังนั้นจึงสามารถเข้าไปสอดแทรกในขบวนการทางเคมีที่เกี่ยวเนื่องกับธาตุฟอสฟอรัส คือ ในขบวนการผลิตสาร ATP (Adenosine Triphosphate)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 6 การเกิด Arsenolysis แทนที่กระบวนการ Phosphorylation ของสารหนูในกระบวนการสร้าง ATP (วรวิทย์ ชีวาพร, 2547)

ขั้นตอนสำคัญในการสร้าง ATP คือ การผลิตสาร 1,3 Diphosphoglycerate จาก Glyceraldehyde 3-Phosphate ดังภาพที่ 6 สารหนูเข้าไปรวมตัวกับ Glyceraldehydes 3-Phosphate เป็น 1- Arseno -3-Phosphoglycerate ดังนั้นจะเห็นว่า ขบวนการฟอสฟอรีเลชั่น (Phosphorylation) จะถูกแทนที่โดยขบวนการอาซีโนไลซีส (Arsenolysis) ซึ่งขั้นสุดท้ายจะเกิดการสลายตัวเป็น 3-Phosphoglycerate และเกลืออาซีเนท (Arsenate) (วรวิทย์ ชีวาพร, 2547) ทำให้การสร้าง ATP ในเซลล์ถูกรบกวนซึ่งส่งผลต่อไปยังการกระบวนการต่าง ๆ ในเซลล์ทำให้การเจริญของเซลล์ลดลง เมื่อถูกปนเปื้อนด้วยสารหนู

5. ทองแดง (Copper)

ทองแดง เป็นโลหะทรานซิชัน มีสถานะเป็นของแข็ง สูตรโมเลกุลคือ Cu มีมวลอะตอม 63.546 จุดหลอมเหลว 1084.62°C และมีจุดเดือดที่ 2562°C ทองแดง (Copper) เป็นโลหะที่มีความหนาแน่น จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง พบได้ตามธรรมชาติ ทั้งในดิน หิน น้ำและอากาศ อาจอยู่ในรูปธาตุอิสระหรือสารประกอบ เช่น Cu_2O, Cu_2S, CuF, $CuSO_4$, $CuFeS_2$ เป็นต้น ทองแดงเป็น

ตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดีรองจากเงิน ปัจจุบันจึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น ใช้ผลิตลวด สายไฟ ท่อน้ำ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์รบกวนต่างๆ การทำสีย้อม เป็นต้น ส่งผลให้มีการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งเราอาจได้รับทองแดงจากการหายใจ การน้ำดื่ม การบริโภคอาหารในชีวิตประจำวัน ทองแดงมีความจำเป็นต่อร่างกายสิ่งมีชีวิตถ้าได้รับในปริมาณที่เหมาะสมกับร่างกาย โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระดูกและกล้ามเนื้อ (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2548)

การใช้ประโยชน์

สารประกอบหลายชนิดของทองแดงถูกใช้อย่างแพร่หลายทางการเกษตร เช่น ใช้กำจัดศัตรูพืช ป้องกันโรคพืช และเป็นธาตุอาหารของพืช ใช้ทางการแพทย์ ส่วนประกอบของยารักษาโรค สัตวแพทย์ และสัตว์น้ำ เช่น Algicides (Metelev et al., 1983) ทองแดงเป็นโลหะที่นำมาใช้ประโยชน์มาก ร้อยละ 50 นำมาใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า โลหะผสม ยากันแมลงในอุตสาหกรรมทอผ้า

รูปของทองแดง

ทองแดงส่วนมากพบในรูปของแร่สีดำคือ คอปเปอร์ออกไซด์ มีคุณสมบัติเป็นเป็นตัวรีดิวซ์ หรือคอปเปอร์ซัลไฟด์ (แนพพ์ ไบรอัน, 2544 ค)

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

ความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของทองแดง โลหะส่วนมากมักถูกกัดกร่อนเมื่ออยู่ในอากาศชื้นหรือดินที่เปียกชื้น ทองแดงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างต่ำ การที่ทองแดงมีความว่องไวต่ำ หมายถึง วัตถุที่ทำด้วยทองแดงสามารถวางไว้ภายนอกได้โดยที่ไม่เกิดการกัดกร่อน (แนพพ์ ไบรอัน, 2544 ค)

ความเป็นพิษของทองแดง

การเกิดพิษของทองแดงขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับ และสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดีแล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่ตับและสมอง (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2548) และ Morsi, Corradi, and Gorbi (1998) กล่าวถึงความเป็นพิษของทองแดงที่มีต่อสาหร่ายว่า มีผลเข้าไปทำลาย Plasma Membrane ในเซลล์ ผลที่ตามมาคือ K^+ เกิดการไหลออกนอกเซลล์ทำให้ไม่สามารถดูดซับธาตุอาหารหรือดูดซับได้ลดลง และการสังเคราะห์แสงของเซลล์ลดลง ทำให้เกิดการยับยั้งการสร้างเอนไซม์ต่าง ๆ รวมถึงการเกิดปฏิกิริยามืด (Dark Reactions) ของกระบวนการสังเคราะห์แสง หรือการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ของเซลล์สาหร่าย มีผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงตามไปด้วย และนิตย์ ศกุนรักษ์

(2542) กล่าวว่า หากในเซลล์มีปริมาณ Cu มากจะส่งผลให้ขาดธาตุเหล็ก (Fe) ผลตามมาก็คือ หากพืชขาดธาตุเหล็กจะมีผลต่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เนื่องจากเอนไซม์ที่ทำหน้าที่กระตุ้นปฏิกิริยาการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์นั้นต้องใช้ Fe^{++}

ความเป็นพิษของโลหะหนัก (Toxicity)

ความเป็นพิษ (Toxicity) หมายถึงอาการที่แสดงออกมาในลักษณะที่ส่อให้เห็นถึงอันตรายซึ่งเกิดขึ้นต่อมนุษย์หรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่ได้รับสารพิษเข้าไป (สมชัย ภัทรธนานันท์, 2539) พฤติกรรมของสารเคมีหรือสารพิษในสิ่งแวดล้อมนั้นมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างทั้งสภาพของสิ่งแวดล้อมเอง และจากสมบัติต่าง ๆ ของสารในสิ่งแวดล้อม ซึ่งในการศึกษาพฤติกรรมของสารสามารถศึกษาได้ในรูปของดิน อากาศ และน้ำ โดยที่สารเคมีหรือสารพิษส่วนใหญ่ที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะถูกปล่อยไปในอากาศหรือน้ำมักจะไปสะสมในอยู่ในดิน และดินตะกอน (มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544) ปัญหาเกี่ยวกับสารพิษทางการเกษตรตกค้างในสิ่งแวดล้อมนั้นมิได้เกิดขึ้นเฉพาะพื้นที่ที่มีการใช้สารนี้เท่านั้น แต่สามารถแพร่กระจายและตกค้างในบริเวณกว้างได้ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา

โลหะหนักที่มีระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นนั้นจะเป็นอันตรายต่อสาหร่าย และ Cyanobacteria ความเป็นพิษของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ มีผลต่อสาหร่ายคือ ทำให้โครงสร้างโปรตีนในเซลล์ถูกทำลาย หรือมีผลต่อการเชื่อมต่อของกลุ่ม-SH (Sulphydryl Group) ในสายโปรตีน และมีผลต่อการเข้าแทนที่ของธาตุอาหารที่จำเป็นในเซลล์ (De Filippis & Pallaghy, 1994) และมีผลต่อกลไกต่าง ๆ เช่น กลไกที่อยู่นอกเซลล์ (Extracellular) กลไกการขับสารพิษ (Detoxification) กลไกการดูดซับลดลง (Reduced Uptake) กลไกการแตกสลายของสารพิษด้วยแสงหรือการลดความเป็นพิษของสารด้วยแสง (Sequestration by Photochelatins) และกลไกอื่น ๆ อีกมากนั้นสามารถนำมาเป็นตัวแปรที่อธิบายถึงความทนทาน (Tolerance) ของสาหร่ายต่อระดับโลหะหนักที่สูงขึ้นได้ (Gaur & Rai, 2001) ซึ่งสอดคล้องกับ Tripathi, Mehta, Amer, and Gaur (2006) ที่นำการเกิดภาวะ Oxidative Stress มาอธิบายถึงความเป็นพิษของสาหร่ายในช่วงที่ทำการทดลองได้กล่าวว่า สาหร่ายที่ได้รับโลหะหนักที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้น ซึ่งเกิดจากมลพิษทางน้ำ เป็นระยะเวลานาน และบางครั้งอาจได้รับในช่วงเวลาสั้น ๆ เกิดจากการปล่อยโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ลงสู่แหล่งน้ำ มีผลให้ความเป็นพิษของโลหะหนัก และการเกิดภาวะ Oxidative Stress มีค่าสูงขึ้นต่างกันไป จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องศึกษาถึงความเป็นพิษของโลหะหนักที่มีต่อสาหร่ายเมื่อได้รับโลหะหนักในระยะสั้น ๆ และในระยะยาวด้วย ลิลลี่ กาวีต๊ะ, มาลี ณ นคร, ศรีสม สุวรรณวงศ์ และสุรียา ตันติวิวัฒน์ (2549) กล่าวถึงการยับยั้งกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในระบบแสงที่ 2 (PS II) และการยับยั้ง

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ว่า ไอออนของโลหะหนักจะสามารถเข้าจับกับ D-1 Protein (ที่ PS II Reaction Center) ตรงบริเวณที่จับ (Binding Site) กับพลาสโตคิวโนน (Plastoquinone) กับ Q_B (Quinone B) ดังนั้นเมื่อพืชได้รับสารยับยั้งนี้การถ่ายทอดอิเล็กตรอนจะถูกยับยั้งไป ส่วนการยับยั้งการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์นั้นเกิดจากการที่สารกลุ่ม Diphenyl Ethers ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสารปราบวัชพืชมีผลไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ Protoporphyrinogen Oxidase (PPG-Oxidase) ดังนั้นจึงทำให้การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์หยุดชะงัก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขนิษฐา ใช่เจริญ (2546) หาปริมาณโปรตีนในสาหร่าย 4 ชนิด (ตามวิธีของ Lowry) ได้แก่ *Chlorella* sp., *Kirchneriella* sp., *Navicula* sp. และ *Coccomyxa* sp. ที่ระยะเวลาการเลี้ยงต่าง ๆ พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. ให้ปริมาณโปรตีนสูงสุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 58.60% (น้ำหนักแห้ง) ในวันที่ 5 ของการเลี้ยง และในวันที่ 8 ของการเลี้ยงพบว่า มีจำนวนเซลล์ (โดยเริ่มเลี้ยงที่ความหนาแน่น 1×10^4 cell/ ml) ซึ่งทำการนับด้วยสไลด์นับเม็ดเลือดทุกวัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 239.35×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร สำหรับอัตราการแบ่งเซลล์ต่อวันของสาหร่าย *Chlorella* sp. จะมีค่าสูงในวันที่ 1-3 ของการเลี้ยง ซึ่งวันที่ 2 ของการเลี้ยงจะให้อัตราการแบ่งเซลล์สูงกว่าช่วงอื่น ๆ คือ 6.97 เซลล์/ วัน

ศศิพินทุ์ นรเศรษฐพันธุ์ (2540) ทำการศึกษาผลของไอออนโลหะหนักต่อการเจริญของสาหร่ายพบว่า การเจริญของ *Chlorella* sp. ลดลงในไอออนโลหะหนักปรอท แคดเมียม และทองแดง ตั้งแต่ระดับความเข้มข้น 1 ppm เป็นต้นไป และตะกั่วไม่มีผลต่อการเจริญของ *Chlorella* sp. การเจริญของ *Scenedesmus* sp. ลดลงในไอออนโลหะหนักปรอท แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ตั้งแต่ระดับความเข้มข้น 1, 1, 10 และ15 ppm ตามลำดับ ส่วนไอออนโลหะหนักตะกั่วไม่มีผลต่อการเจริญของ *Scenedesmus* sp. การเจริญของ *Closterium* sp. ลดลงในไอออนโลหะหนักปรอท แคดเมียม และทองแดง ตั้งแต่ระดับความเข้มข้น 1, 10 และ15 ppm ตามลำดับ ไอออนโลหะหนักตะกั่วทำให้การเจริญเพิ่มขึ้นที่ 5 ppm และสังกะสีทำให้การเจริญเพิ่มขึ้นที่ระดับความเข้มข้น 5 และ15 ppm

สาธิต โกวิทวที, อุทัยวรรณ โกวิทวที, ประภัสสร พลวงศ์, และนฤภัทร กุชวัฒนะ (2546) ปริมาณโปรตีนจะมีมากในช่วงที่สาหร่ายมีการแบ่งเซลล์มาก และลดลงเมื่อจำนวนเซลล์สาหร่ายลดลง และมีปริมาณโปรตีนน้อยที่สุดในวันที่ 15 ของการเลี้ยง ดังนั้นการจะนำสาหร่าย *Chlorella* sp., *Kirchneriella* sp. และ *Coccomyxa* sp. ไปเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีปริมาณสูงสุดควรจะให้อายุสาหร่ายวันที่ 5 ของการเลี้ยง

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

Akira, Litiana, Norihide, and Shigetoh (2005) ทำการศึกษาถึงความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสาหร่ายทะเลขนาดเล็ก สายพันธุ์ *Cylindrotheca* sp. และ LPP Group ต่อโลหะหนัก 5 ชนิดคือ Cu, As, Sb, Pb และ Cd โดยใช้ Fluorometric เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเจริญของสาหร่าย ทำการหา Chlorophyll *a* และวัดค่าการเรืองแสงของคลอโรฟีลล์ (485 nm Excitation Filter และ 645 nm Emission Filter) คิดอัตราการเจริญเติบโตโดยการคำนวณค่า IC_{50} ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลให้การเจริญของสาหร่ายถูกยับยั้ง 50% ที่ 72 ชั่วโมงหลังจากเติมโลหะหนัก พบว่า ค่า IC_{50} ของ As ที่ระดับต่ำสุดอยู่ที่ 1.6-9.5 mg/ l (ยกเว้นสายพันธุ์ *Heterocapsa* sp. และ *Cylindrothera* sp.) แสดงให้เห็นว่า As เป็นโลหะที่มีพิษสูงสุด ส่วนความเป็นพิษของ Cu (II), Pb (II) และ Cd (II) มีความใกล้เคียงกันคือมีค่า IC_{50} ที่ระดับสูงสุดอยู่ที่ Pb เท่ากับ 21.4 mg/ l, Antimony (III) มีพิษต่ำสุดค่า IC_{50} อยู่ที่ 7.9-45.9 mg/ l สรุปถึงความเป็นพิษที่มีต่อสาหร่ายได้ดังนี้คือ As > Pb = Cu = Cd > Sb สำหรับปริมาณคลอโรฟีลล์ พบว่า มีปริมาณ Chlorophyll *a* เพิ่มสูงขึ้นกว่า 5 เท่า (ใน Control) เมื่อสาหร่ายได้รับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ พบว่า ค่าการเรืองแสงของ Chlorophyll a มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเจริญเติบโตของสาหร่ายแต่ละชนิด

Bhumi, Surya, and Gaur (2004) ศึกษาถึงอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. เมื่อได้รับ Cu^{2+}และ Zn^{2+} ที่ระดับความเข้มข้น 0.5-5.0 µmol/ l และ 1-100 µmol/ l ตามลำดับ และทำการวัดค่า Absorbance ที่ 663 nm ทุกวันเป็นเวลา 7 วัน โดยคิดเป็นอัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (µg/ d) พบว่า อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ถูกยับยั้ง 25 เปอร์เซ็นต์ใน Cu^{2+} ที่ระดับความเข้มข้น 2.5 µmol/ l สำหรับ Zn^{2+} ที่ระดับความเข้มข้น 5 µmol/ l และอัตราการเจริญเติบโตถูกยับยั้งที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ใน Cu^{2+} ที่ระดับความเข้มข้น 10 µmol/ l สำหรับ Zn^{2+} ที่ระดับความเข้มข้น 25 µmol/ l

Devi and Devi (1981) ศึกษาผลของแคดเมียม ตะกั่ว และนิกเกิล ต่อการเจริญของสาหร่ายน้ำจืด 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Ankistrodesmus falcatus*, *Scenedesmus bliguus* และ *Chlorococcum* spp. พบว่า แคดเมียมและตะกั่ว มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย เมื่อได้รับที่ระดับความเข้มข้น 0.1-1.0 ppm แต่ที่ระดับความเข้มข้นที่สูงกว่า 5 ppm มีผลให้สาหร่ายตาย แต่เมื่อได้รับนิกเกิลที่ระดับคามเข้มข้น 0.1 -10.0 ppm ไม่มีผลให้สาหร่ายตาย แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมและตะกั่วมีพิษต่อสาหร่ายส่งผลให้การเจริญของสาหร่ายลดลง

Fathi and Omair (2006) ศึกษาถึงผลของพีเอชต่อความเป็นพิษของ Cd, Co และ Cu ในสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus bijuga* พบว่า พีเอชมีผลต่อความเป็นพิษของโลหะหนักที่ทดสอบ และการเจริญของ *S. bijuga* เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอช แต่เมื่อพีเอชสูงกว่า 8 มีผลให้การเจริญลดลงเล็กน้อย งานวิจัยจะศึกษาถึงการเจริญและการสะสมของโลหะหนักใน *S. bijuga* ระดับความเข้มข้น

ที่มีผลให้ S. *bijuga* ตาย (Lethal Concentration) ใน Cd อยู่ที่ 10^{-5}M และ Co และ Cu อยู่ที่ 10^{-4}M ได้ผลการทดลองคือ Cd มีผลทำให้การเจริญของ S. *bijuga* ลดลงต่ำกว่าโลหะตัวอื่นที่ใช้ทดลอง สำหรับใน Cu ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (10^{-9}M) มีผลให้ปริมาณ Chlorophyll *a* และจำนวนเซลล์ของ S. *bijuga* สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับ Cu (Control) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลของพีเอชต่อความเป็นพิษของ Cadmium, cobalt และ Copper ต่อ *S. bijuga* (Fathi & Omair, 2006)

Metal conc.(M)	Cd		Co		Cu	
	Chl a. Content ($mg\ l^{-1}$)	Cell number ($No. \times 10^7 l^{-1}$)	Chl a. Content ($mg\ l^{-1}$)	Cell number ($No. \times 10^7 l^{-1}$)	Chl a. Content ($mg\ l^{-1}$)	Cell number ($No. \times 10^7 l^{-1}$)
Cont.	52.00 ± 2.35	21.2 ± 1.32	52.00 ± 2.35	21.2 ± 1.32	52.00 ± 2.35	21.2 ± 1.32
10^{-3}	44.62 ± 2.00	25.32 ± 1.08	52.61 ± 1.06	25.21 ± 2.06	56.00 ± 3.00	26.23 ± 1.00
10^{-4}	42.22 ± 1.86	20.34 ± 1.26	55.00 ± 2.00	22.32 ± 1.26	50.31 ± 3.00	21.41 ± 1.00
10^{-5}	10.52 ± 0.98*	10.26 ± 0.85*	42.81 ± 1.66	20.32 ± 1.21	48.00 ± 2.61	15.32 ± 1.00
10^{-6}	0.98 ± 0.00***	0.62 ± 0.35**	22.92 ± 1.00*	15.85 ± 1.20	18.61 ± 0.56*	12.11 ± 0.53
10^{-7}	0.00	0.00	1.60 ± 0.90**	0.99 ± 0.05	0.82 ± 1.00***	0.21 ± 0.81**
10^{-8}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10^{-9}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ANOVA	***	**	***	**	**	***

Means ± SD (n=3). Results of one-way ANOVA comparison of treatments to control indicate $^*P < 0.05$; $^{**}P < 0.01$; $^{***}P < 0.001$.

จากตารางที่ 3 พบว่า Cd มีผลไปยับยั้งการเจริญของ *S. bijuga* สูงที่สุด และแสดงให้เห็นชัดเจนในเรื่องของปริมาณ Chlorophyll a หลังจากที่ได้รับโลหะแต่ละชนิด พบว่าปริมาณ Chlorophyll a มีปริมาณต่ำกว่าโลหะทั้งสอง (Co และ Cu) ซึ่งแสดงผลออกมาได้อย่างชัดเจน

Ioanna and Joseph (1991) ทำการศึกษาปฏิกิริยาสารพิษ และการเกิดปฏิกิริยาร่วมกันของ Cu และ Cd ต่อสาหร่ายทะเล (*Dunaliella minuta*) ทั้งในระยะเฉียบพลัน (Acute Exposure) และระยะเรื้อรัง (Chronic Exposure) พบว่า ความเข้มข้นของ Cu และ Cd ที่มีผลให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ หลังจากที่ได้รับโลหะ 96 ชั่วโมง คือ Cu ที่ระดับความเข้มข้น 7.57 µM และ Cd ที่ระดับความเข้มข้น 0.34 µM สำหรับผลการที่สาหร่ายได้รับโลหะทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกันนั้นในระยะสั้น ๆ (Short-Term) ทำให้เกิดปฏิกิริยาต้านสารพิษ (Antagonistic) ร่วมกันซึ่งมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของพืชที่มีสีเขียว สำหรับผลการที่ได้รับโลหะในระยะยาว (Long-Term) ที่ระดับความเข้มข้นของ Cu และ Cd Led ต่ำ ๆ นั้นมีผลให้สาหร่ายเกิดความทนทานต่อ Cu และ Cd ตามลำดับ และทำให้เกิดความทนทานต่อโลหะหนักร่วมกัน (Co-Tolerance) กับ Cu ด้วย

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

Joseph, Barbara, and Thomus (1982) ศึกษาผลของแคดเมียม ($CdCl_2$) ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่มีผลให้การเจริญของสาหร่ายลดลง ได้แก่ สาหร่าย *Chlorella saccharophila, Navicula incerta* และ *Nitzschia closterium* มีค่า EC_{50} หลังจากที่ได้รับแคดเมียมเป็นเวลา 96 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 0.105 ppm, 3.008 ppm และ 0.476 ppm ตามลำดับ โดยสาหร่ายสีเขียว (*C. saccharophila*) มีผลตอบสนองต่อแคดเมียมสูงกว่าไดอะตอมทั้ง 2 ชนิด จากผลการทดลองพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายลดลงมากขึ้นเมื่อได้รับแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้น

Leite, Carlos, Moore, and Pinto (1993) ศึกษาความเป็นพิษของแคดเมียมต่อการเจริญของ *Chlorella homosphaera* และ *Scenedesmus quadricauda* โดยการเติม $CdCl_2$ ที่ระดับความเข้มข้น 0 – 12 mg/ l ลงในอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยง พบว่า การเจริญของ *Chlorella homosphaera* และ *Scenedesmus quadricauda* ถูกยับยั้งการเจริญที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 4 และ 2 mg/ l ตามลำดับ

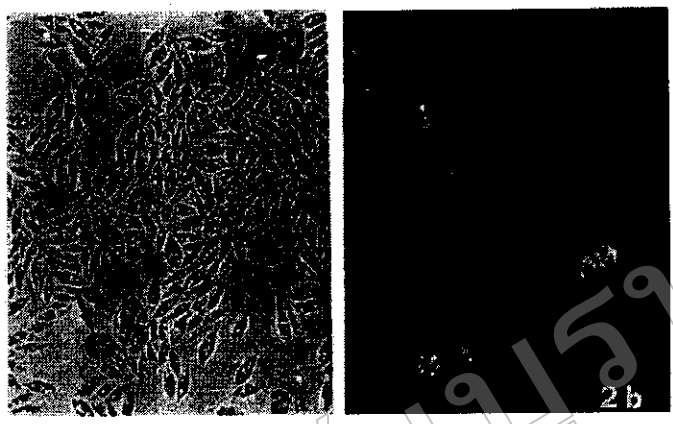
Lue, Wozniak, and Fletcher (1980) ศึกษาผลความเป็นพิษในแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) ที่ระดับความเข้มข้น 5-50 μM ต่อ *Chlorella ellipsoidea* โดยได้รับ $CdSO_4$ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง พบว่า เมื่อได้รับ $CdSO_4$ ที่ระดับความเข้มข้น 5 μM มีผลให้การเจริญของสาหร่ายทั้งจำนวนเซลล์ ปริมาณคลอโรฟิลล์ และน้ำหนักแห้งลดลงเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อได้รับที่ระดับความเข้มข้น 10-40 μM และที่ระดับความเข้มข้น 50 μM หรือที่สูงกว่า มีผลให้เกิดการยับยั้งการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ น้ำหนักแห้ง ส่งผลให้จำนวนเซลล์ ปริมาณคลอโรฟิลล์ และน้ำหนักแห้งลดลงสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า แคดเมียมส่งผลให้เกิดเซลล์แตก (Cytolysis) ยับยั้งการแบ่งเซลล์ ทำให้รูปร่างเซลล์เปลี่ยนแปลงไปคือ เกิดการโป่ง พอง (Swelling) ทำให้ไมโทรคอนเดรียถูกทำลาย และความเป็นพิษของแคดเมียมยังมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการซึมผ่านของสาร (Permeability) คือ ทำให้ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในเซลล์สูงขึ้น ผลความเป็นพิษของแคดเมียมที่เกิดขึ้นในช่วงต้นนั้นพบว่า แคดเมียมมีผลยับยั้งการแบ่งเซลล์ ทำให้ไม่เพียงต่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และส่งผลต่อน้ำหนักแห้งของเซลล์ (Dry Weight)

Heinz and Jerry (1978) ศึกษาความเป็นพิษของตะกั่ว และปริมาณฟอสเฟตที่ลดลงใน *Chlamydomonas* พบว่า การเติม Pb^{2+} ในอาหารที่เลี้ยง *Chlamydomonas* ซึ่งมีฟอสเฟต เป็นสาเหตุให้เกิดการตกตะกอน (Precipitation) ของ $Pb_3(PO_4)_2$ เป็นผลให้ฟอสเฟตที่อยู่ในอาหารถูกจำกัดออก สำหรับผลของตะกั่วต่อ *Chlamydomonas* ซึ่งกำหนดอัตราส่วนของ Pb^{2+} ต่อ PO_4 ที่เท่า ๆ กัน เมื่อ Pb^{2+} มีปริมาณเท่ากับฟอสเฟต พบว่า การเจริญในช่วงแรกเป็นไปอย่างช้า ๆ เนื่องจากเกิดการตกตะกอนติดกับ $Pb_3(PO_4)_2$ ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำ หลังจากนั้นการเจริญจะเป็นปกติ แต่เมื่อระดับ Pb^{2+} สูงกว่าฟอสเฟตมีผลให้เซลล์ไม่สามารถเจริญได้ และพบว่า Pb^{2+} ไม่เป็นพิษต่อ

Chlamydomonas แต่จะทำลายเซลล์ โดยเซลล์ไม่สามารถดึงฟอสเฟตจากอาหารที่มี Pb^{2+} ที่สูงเกินทำให้ไม่สามารถสร้างพลังงานเพื่อพัฒนาการเจริญในเซลล์ได้อย่างปกติ

Mohammed and Makert (2006) ได้ศึกษาผลความเป็นพิษของโลหะหนัก (Cd, Pb และ Cu) ต่อการเจริญเติบโตของ *Scenedesmus quadricauda* (Turp) โดยการนับเซลล์ และวิเคราะห์ Chlorophyll *a* พบว่า การเจริญเติบโตของ *Scenedesmus quadricauda* (Turp) ค่อย ๆ ลดลง เมื่อได้รับ Cd ที่ระดับความเข้มข้น 0.05, 0.1 และ 0.5 mg/ l ส่วน Pb ที่ระดับความเข้มข้น 15, 20 และ 25 mg/l และในทางกลับกันพบว่า เมื่อสาหร่ายได้รับ Cu ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 1.5 mg/ l มีผลให้การเจริญเติบโตของ *Scenedesmus quadricauda* (Turp) ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น แต่เมื่อได้รับ Cu ที่ระดับความเข้มข้น 2 mg/ l ทำให้การเจริญเติบโตนั้นลดลง สามารถให้เหตุผลได้ว่า ผลความเป็นพิษของโลหะหนักมีความแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นและช่วงเวลาที่ได้รับของสารโลหะแต่ละชนิดด้วย

Morsi et al. (1998) ศึกษาความเป็นพิษของ Copper และ Zinc ในสาหร่าย *Scenedesmus acutus* 2 สายพันธุ์ คือ Wild type (S_2N) และ Cr-Tolerant (S_2T) พบว่า Copper มีผลให้อัตราการเจริญของสาหร่ายทั้ง 2 สายพันธุ์ลดลง แต่ S_2N มีอัตราการเจริญลดลงสูงกว่า S_2T คือ ที่ 1 mg Cu/ l มีผลให้อัตราการเจริญเติบโตเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งลดลงมากเมื่อเทียบกับ Control (ใช้เวลาเพียง 0-2 วัน) ใน Cu ที่ระดับความเข้มข้น 1.5 mg/ l อัตราการเจริญเติบโตของ S_2N ยังคงต่ำกว่า S_2T และใน Cu ที่ระดับความเข้มข้น 2 mg/ l มีผลให้อัตราการเจริญของทั้ง 2 สายพันธุ์หยุดลง เมื่อทำการสังเกตการณ์เปลี่ยนของเซลล์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ Fluorescence พบว่า หลังจากที่ได้รับ Cu ที่ระดับความเข้มข้น 1.5 mg/ l เป็นเวลา 7 วัน เซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ S_2N มีการเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในภาพที่ 6 เนื่องจากเซลล์สูญเสียคลอโรฟิลล์ ซึ่งโลหะหนักมีผลเข้าไปทำลายการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสงในเซลล์สาหร่าย ซึ่งตรงกันข้ามกับสายพันธุ์ S_2T พบว่าเซลล์ยังคงแข็งแรงสมบูรณ์ดี เนื่องจากเป็นสายพันธุ์ที่มีความทนทานต่อ Cr และสำหรับโปรตีนของทั้ง 2 สายพันธุ์มีปริมาณลดลงหลังจากที่ได้รับ Cu ที่ระดับความเข้มข้น 2 mg/ l และใน Zn ที่ระดับความเข้มข้น 5 และ10 mg/ l ปริมาณโปรตีนที่พบในเซลล์ที่ได้รับ Cu และ Zn ที่ระดับความเข้มข้นสูง ๆ นั้นมีค่าต่ำนั้นเป็นเพราะการสังเคราะห์แสงถูกทำลายมีผลให้สูญเสียโปรตีนไปมาก และการที่น้ำหนักแห้ง (Dry Weight) และปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลงนั้น มีผลมาจากการเจริญของสาหร่ายลดลง เนื่องจากสูญเสียคลอโรฟิลล์ ดังนั้นผลที่ตามมาก็คือ ทำให้ในระยะเริ่มต้นมวลชีวภาพและคาร์โบไฮเดรตมีค่าไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 7 ภาพถ่ายเซลล์ *Scenedesmus* sp. (S_2N) ที่ได้รับ Cu ที่ระดับความเข้มข้น 1.5 mg/ l เป็นเวลา 7 วัน (Morsi et al., 1998)

จากภาพ 2a (ด้านซ้าย) เป็นภาพที่ถ่ายด้วย Light microscopy ของเซลล์สาหร่าย *Scenedesmus* sp. (S_2N) ที่ได้รับ Cu ที่ระดับความเข้มข้น 1.5 mg/ l พบว่าเซลล์บางเซลล์มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปจากเซลล์ปกติ (ดังลูกศรชี้) และภาพ 2b (ด้านขวา) เป็นภาพที่ถ่ายด้วย Fluorescence Microscopy จะเห็นว่าเซลล์มีการสูญเสียคลอโรฟิลล์

Moreno, LuBian, and Soaves (2000) ทดสอบผลการยับยั้งการเจริญของสาหร่ายทะเลที่ได้รับทองแดง โดยศึกษาความหนาแน่นของเซลล์ที่ลดลง 10 และ 50% (EC_{50}) ซึ่งคำนวณจากอัตราการเจริญเติบโตในช่วง Exponential พบว่า ค่า EC_{50} ลดลงเมื่อความหนาแน่นของเซลล์ลดลง และในการศึกษาครั้งนี้ *Isochrysis*. aff. *galbana* มีความตอบสนองต่อการทดสอบดีที่สุด โดยแสดงผลการยับยั้งสูงสุด รองลงมาคือ *Phaeodactylum Tricornutum* และสาหร่ายสีเขียว (*Chlorella autotrophyca* และ *Nannochloris atomus*) ตามลำดับ

Nygard and Ekalund (1999) ศึกษาผลของ Lead ($PbCl_2$) ต่อการสังเคราะห์แสง และการหายใจของสาหร่าย (*Fucus visiculosus*) พบว่า $PbCl_2$ ที่ระดับความเข้มข้น 30 mg/ l มีผลทำให้ค่าการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis Capacity) ลดลงถึง 69 เปอร์เซ็นต์ (เมื่อเทียบกับ Control) แสดงให้เห็นว่าตะกั่วมีผลในการยับยั้งการสังเคราะห์แสง

Scragg (2006) ได้ศึกษาผลของ Phenol ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย 2 สายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* และ *Chlorella* VT-1 โดยวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ OD_{500} พบว่า Phenol มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายทั้งสองชนิดนี้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Phenol ที่ระดับความเข้มข้น 400 mg/ l (4.2 mM) มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Chlorella* VT-1 และ *Chlorella vulgaris* ถึง 44 และ 100% ตามลำดับ หลังจากที่เพาะเลี้ยงต่อไปอีก 7 วัน *Chlorella* VT-1 มีอัตรา

การเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณ Phenol ที่เปลี่ยนแปลงไป (ลดลง) หรือสารอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออยู่ในสภาพที่มีแสง

Tripathi et al. (2006) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดภาวะ Oxidative Stress ในสาหร่าย (*Scenedesmus* sp.) ซึ่งเป็นสาหร่ายสีเขียวที่สามารถพบได้ทั่ว ๆ ไปในน้ำจืดที่มีธาตุอาหารสมบูรณ์ ทำการทดลองโดยเติมโลหะที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ โลหะหนักคือ Cu^{2+}และ Zn^{2+} ในสาหร่าย และมีการแบ่งช่วงการทดลองเป็นระยะสั้น ๆ คือ ช่วง Short-Term คือ ระยะที่ได้รับ 6 ชั่วโมง และระยะยาว คือ ช่วง Long-Term มีระยะที่ได้รับ 7 วันพบว่าการสะสมของโลหะหนักคือ Cu^{2+}และ Zn^{2+} ที่ได้รับระยะยาว (Long-Term) มีการสะสมสูงกว่าที่ได้รับระยะสั้น ๆ (Short-Term) 2 และ 4 เท่า ตามลำดับ สำหรับการสร้างออกซิเจน และการพัฒนาเซลล์ของสาหร่ายนั้นพบว่า เมื่อได้รับโลหะหนักในระยะยาวจะถูกยับยั้งการสร้างออกซิเจนน้อยกว่าในระยะสั้น ๆ และการพัฒนาของเซลล์สาหร่ายที่ได้รับโลหะหนักทั้ง 2 ช่วงนั้น มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยที่ได้รับระยะยาวมีผลทำให้เซลล์สาหร่ายสามารถพัฒนาได้ดีกว่าซึ่งแสดงให้เห็นว่าในระยะยาว สาหร่ายมีความเครียดเกิดขึ้นน้อยกว่าระยะที่ได้รับสั้น ๆ จึงมีผลต่อการพัฒนาเซลล์รวมถึงการสร้างออกซิเจนด้วย

Yap, Ismail, Omer, and Tan (2004) ทำการศึกษาความเป็นพิษ และความทนทานโลหะหนัก (Cd, Cu, Pb และ Zn) ในสาหร่ายสีน้ำตาล (*Isochrysis galbana*) ซึ่งเป็นผู้ผลิตขั้นต้น และหอยแมลงภู่ (*Perna viridis*) ซึ่งเป็นผู้บริโภคขั้นแรก โดยวัดการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของสาหร่าย EC_{50} ในช่วงเวลา 5 วัน และอัตราการตายของหอยสองฝา (หอยแมลงภู่) LC_{50} ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าสาหร่ายมีความไวต่อ Zn สูงสุด และได้ค่า EC_{50} ของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ดังนี้ Cd 0.74 mg/ l Cu 0.91 mg/ l Pb 1.40 mg/ l และ Zn 0.60 mg/ l สำหรับค่า LC_{50} ในหอยสองฝาพบว่า Cu นั้นจะมีผลต่ออัตราการตายของหอยสองฝาสูงสุด รองลงมาคือ Cd, Zn และ Pb ตามลำดับ และได้กล่าวต่อไปว่า ความเป็นพิษ และความทนทานต่อโลหะหนักของสาหร่าย และหอยสองฝานั้นจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของการกินอาหารของหอย (Trophic Levels) วิธีการควบคุมปฏิบัติกับโลหะในแต่ละพื้นที่ ลักษณะทางชีววิทยา และนิเวศวิทยาของสาหร่ายซึ่งเป็นผู้ผลิตเบื้องต้น (Primary Producer) และหอยสองฝาซึ่งเป็นผู้บริโภคเบื้องต้น (Primary Consumer)