บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางข้น

ต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับต้นๆ ของโลก โดยส่งออกในรูปยางดิบชนิดต่างๆ ที่สำคัญๆ ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง และน้ำยางข้น (สถาบันวิจัยยาง, 2550)

อุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางข้นเป็นการแปรรูปน้ำยางสด โดยการแยกน้ำออกจากน้ำยางสดให้เป็นน้ำยางข้น ที่มีร้อยละเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 60 เพื่อให้สะดวกต่อการขนส่งไปเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางโฟม ยางรถยนต์ ฯลฯ

2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำยางข้น

กระบวนการผลิตน้ำยางข้น เป็นการนำน้ำยางสด (Latex) ที่ได้จากการกรีด (Tapping) ต้นยางออกมาใหม่ๆ ซึ่งจะอยู่ในสภาพที่เรียกว่า คอลลอย มีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณร้อยละ 25-35 เมื่อผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นแล้วจะมีปริมาณเนื้อยาง ประมาณร้อยละ 55-65 ส่วนประกอบสำคัญของน้ำยางสดดังนี้

1) ส่วนที่เป็นน้ำ (Watery) ส่วนนี้ทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (Medium) ของ (Colloids) มีอยู่ประมาณร้อยละ 60 ของน้ำยางบริสุทธิ์

2) ส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber solid) ประกอบ ด้วย โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเกลืออนินทรีย์ มีอยู่ทั้งสิ้นประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำยาง มีทั้งที่อยู่ในรูปสารละลายและสารแขวนลอยองค์ประกอบเหล่านี้ทำให้ส่วนที่ เป็นน้ำกลายเป็นน้ำที่ไม่บริสุทธิ์น้ำยางที่รวมเอาส่วนนี้เข้าไปด้วยเรียก ว่า ซีรั่ม (Serum) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.02

3) ส่วนที่เป็นยาง (Rubber Hydrocarbon) เป็นส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์ พวกยางแผ่น ยางแท่ง ยางเครพ น้ำยางที่ยังสดอยู่ส่วนนี้จะอยู่กันเป็นเม็ดๆ เรียกว่า อนุภาคยาง (Rubber Particles) ซึ่งแขวนลอย (Suspended) อยู่ในส่วนที่เป็นซีรั่ม และมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ (Negative Charges) อนุภาคยางมีความถ่วงจำเพาะ 0.92 ซึ่งเบากว่าส่วนที่เป็นตัวกลางซึ่งมี ความถ่วงจำเพาะ 1.02 แต่ที่อนุภาคยางไม่ลอยฟ่องอยู่บนผิวของตัวกลางก็เพราะว่า แรงผลักดันซึ่งกันและกันอันเนื่องมาจากการมีประจุดไฟฟ้าที่เหมือนกันทำให้ อนุภาคยางเคลื่อนที่ไปมาแบบไร้ทิศ (Brownian Movement) อนุภาคยางจะหยุดการเคลื่อนที่เมื่อประจุไฟฟ้ารวมของน้ำยางเป็นศูนย์ (Isoelectric

Prince of Songkla University Pattani Campus

Point) จากนั้นก็จะจับตัวกันเป็นก้อนลอยฟ่องบนผิดของซีรั่ม การทำยางแผ่น ยางแท่ง หรือยางเครพที่เราเติมกรดลงไปก็เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าวนี้ ในทางตรงกันข้ามเวลาถนอมน้ำยาง จะเติมแอมโมเนีย ลงไปก็เพื่อให้ประจุลบที่เกิดจาก ไอดรอกไซด์อิออน(OH^-)ไปคลอบอนุภาคยางเอาไว้เพื่อทำหน้าที่เป็นด่านป้องกันประจุบวก (Positive Charges) ใดๆ ที่จะเข้าไปทำให้ประจุลบบนอนุภาคยางเป็นศูนย์ ส่วนที่เป็นยางมีอยู่ในน้ำยางในปริมาณไม่แน่นอน มีตั้งแต่ร้อยละ 22 จนถึงร้อยละ 48 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ อายุ ระบบกรีด และฤดูกาล แต่โดยทั่วไปแล้วน้ำยางสดจะมีส่วนเป็นยางหรือ DRC เฉลี่ยประมาณร้อยละ 35

วิธีผลิตน้ำยางข้นในทางการค้ามี 4 วิธีคือ การทำให้เกิดครีม (Creaming method) การปั่นแยก (Centrifuge method) การระเหยน้ำ (Evaporation) และการแยกด้วยไฟฟ้า (Electro decantation) แต่วิธีที่นิยมที่สุดคือการปั่นแยก

2.1.1.1 การทำให้เกิดครีม (Creaming method)

เป็นวิธีการผลิตน้ำยางข้นที่เก่าแก่ที่สุด เป็นวิธีที่อาศัยหลักการที่อนุภาคของเม็ดยางเบากว่าน้ำ เป็นไปตามกฎของสโตรก (Stokes law) การทำน้ำยางข้นโดยวิธีการทำครีม ไม่ค่อยนิยมกันมากนัก เนื่องจากต้องใช้เวลานานในการเตรียมสารและใช้เวลาทำค่อนข้างนาน สารทำครีมได้แก่ gum bragacarth, sodium aginate, tragon seed gum, ammonium aginate, locust bean gum และ pectin สมบัติของสารทำครีม คือ เป็นคอลลอยด์ที่ชอบน้ำ และจะพองตัวเมื่อใส่ในน้ำมัน ขั้นตอนการทำครีม ค่อนข้างง่าย คือ

1) ใส่สารทำครีม ปริมาณร้อยละ 0.3 โดยปริมาตร ลงในน้ำยางสดที่เก็บรักษาโดยแอมโมเนีย

2) กวนให้สารทำครีมละลาย ตั้งทิ้งไว้ 24-40 ชั่วโมง

3) กรองเอาชั้นน้ำออกจากของผสม

4) ปรับปริมาณเนื้อยางและความเข้มข้นของแอมโมเนียภายหลัง

ความเข้มข้นของเนื้อยางจะสูงประมาณร้อยละ 55 ในช่วงระยะเวลา 18 ชั่วโมง ในการทำน้ำยางข้นโดยวิธีการทำครีม หากต้องการเนื้อยางสูงถึงร้อยละ 60 ต้องตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4-5 วัน

2.1.1.2 การปั่นแยก (Centrifuge method)

เป็นวิธีที่นิยมกันมาก เนื่องจากน้ำยางประเภทนี้สามารถนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางสำเร็จรูปได้เกือบทุกชนิด วิธีผลิตน้ำยางข้นโดยการรวบรวมน้ำยางสด (DRC ประมาณร้อยละ 30-35) เข้าสู่บ่อพักยางปรับค่า DRC ของน้ำยางให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 30 เติมสารละลายแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.30-0.45 หรือร่วมด้วยสารเคมีประเภทอื่น เช่น ZnO/TMTD เพื่อรักษา

Prince of Songkla University Pattani Campus

สภาพน้ำยาง เติม Diammonium hydrogen phosphate (DAP) เพื่อตกตะกอนแมกนีเซียม พักน้ำยางไว้เป็นเวลา 6-12 ชั่วโมง สำหรับน้ำยางที่จะนำมาปั่นแยก ควรมีปริมาณแมกนีเซียมน้อยกว่า 50 ppm และเมื่อปั่นแล้วไม่ควรเกิน 20 ppm นอกจากนี้ ปริมาณกรดไขมันที่ระเหยได้ (Volatile Fatty Acid :VFA) ไม่ควรเกินร้อยละ 0.05 หากเกิน ให้นำไปผสมกับน้ำยางสดที่มีค่าไม่เกินร้อยละ 0.05 แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการปั่นแยก โดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่มีความเร็วรอบประมาณ 7,000 - 8,000 รอบต่อนาที

หลังการหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่อง แล้วน้ำยางจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือชั้นของน้ำยางข้นและชั้นของหางน้ำยาง ชั้นของน้ำยางข้นที่ได้ จะมีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งประมาณร้อยละ 60 ปรับคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำยางข้นให้ได้ตามมาตรฐาน และรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย หรือ สารรกาสภาพทุติยภูมิ (Secondary Preservative)

1) ชนิด HA: High ammonia (แอมโมเนียร้อยละ 0.7)

2) ชนิด LA: Low ammonia (แอมโมเนียร้อยละ0.2 + สารช่วยรักษาสภาพน้ำยาง)

ส่วนของหางน้ำยางซึ่งมีเนื้อยางประมาณร้อยละ 4-5 จะเข้าสู่กระบวนการจับหางน้ำยาง ในขั้นตอนนี้จะมีการกวนเพื่อไล่แอมโมเนียออกจากหางน้ำยาง แล้วจึงเติมกรดซัลฟิวริก ทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จะเกิดแผ่นยางลอยขึ้นมา ทำการกรีดแผ่นยางเป็นชิ้นเพื่อเข้าสู่การรีดแผ่นยาง หลังจากรีดแผ่นยางแล้ว นำแผ่นยางที่ได้ไปล้างน้ำเพื่อล้างกรดออกจากแผ่นยาง จากนั้นนำเข้าเครื่องย่อย อบ แล้วอัดเป็นแท่งต่อไป

2.1.1.3 การระเหยน้ำ (Evaporation)

เป็นวิธีที่ได้น้ำยางที่มีความคงตัวสูง วิธีการผลิตคือให้ความร้อนโดยผ่านน้ำร้อนเข้าไปในถัง 2 ชั้น ที่มีน้ำยางสดอยู่ในถังชั้นใน ในขณะที่ถังบรรจุน้ำยาง หมุนไปรอบๆ นั้น อากาศภายในถังจะถูกดูดออกไป พร้อมกับนำน้ำที่ระเหยออกไปด้วย น้ำยางส่วนที่เหลือจะกลายเป็นน้ำยางข้น

2.1.1.4 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electro decantation)

เป็นวิธีที่ใช้ความแตกต่างของพลังงานจากขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ทำให้เม็ดยางเม็ดเล็กๆ ซึ่งมีประจุเป็นลบเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าบวก ทำให้อนุภาคยางมาอยู่รวมกัน อย่างหนาแน่นจนเกิดเป็นน้ำยางข้นและลอยขึ้นข้างบน จากนั้นจึงตักน้ำยางข้นออกมา การทำน้ำยางข้นโดยใช้กระแสไฟฟ้านี้หางน้ำยางจะมีเนื้อยางน้อยมาก และเหมาะสำหรับการทำน้ำยางข้นที่ต้องการองค์ประกอบที่ไม่ใช่ยางต่ำ น้ำยางข้นที่ได้เหมาะสำหรับการเคลือบเส้นลวดที่ต้องการให้มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.1.2 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำยางข้น

กระบวนการผลิตน้ำยางข้นในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้เทคนิคการปั่นเหวี่ยงน้ำยางพาราสดเพื่อที่จะทำให้ได้น้ำยางข้น การใช้น้ำในกระบวนการผลิตน้ำยางข้นได้แก่ ล้างบ่อรับน้ำยางสด ล้างเครื่องปั่นยาง ล้างบ่อเก็บ น้ำยางข้น และล้างพื้น เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการล้างเครื่องปั่นยางมีอัตราการใช้น้ำสูงที่สุดและมีการใช้น้ำสิ้นเปลืองที่สุด เนื่องจากจะต้องมีการล้างเครื่องปั่นยางทุก 2-3 ชั่วโมง นอกจากน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำยางข้นแล้ว ยังมีน้ำที่เกิดจากกระบวนการจับหางน้ำยางอีกส่วนหนึ่ง

จากการสำรวจโรงงานน้ำยางข้น 14 โรงงานที่มีมาตรวัดน้ำของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (2544) พบว่า การผลิตน้ำยางข้น 1,000 กิโลกรัม จะใช้น้ำประมาณ 1.5-15.8 ลูกบาศก์เมตร หรือเฉลี่ย 6.42 ลูกบาศก์เมตร เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วก็จะกลายเป็นน้ำเสียทั้งหมด

2.1.3 ระบบบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำยางข้น

น้ำเสียที่เกิดจากโรงงานน้ำยางข้น มาจาก 2 แหล่งด้วยกันคือ

1) น้ำเสียจากการสกิมยาง
2) น้ำเสียจากการล้างเครื่องปั่นเหวี่ยง และน้ำล้างอื่นๆ ในโรงงาน

ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตน้ำยางข้นมีอยู่ 6 ระบบ ดังนี้

ระบบที่ 1 บ่อหมัก+บ่อกึ่งหมัก เป็นระบบที่เสียค่าใช่จ่ายในการเดินระบบต่ำ แต่ใช้พื้นที่มาก มีกลิ่นเหม็น น้ำทิ้งส่วนใหญ่จะไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพน้ำทิ้ง

ระบบที่ 2 บ่อหมัก+บ่อเติมอากาศ เป็นระบบที่เสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ แต่เสียค่าไฟฟ้าสูงถ้าดูแลไม่ดีน้ำจะมีกลิ่นเหม็น และน้ำทิ้งไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน

ระบบที่ 3 ระบบเอเอสแบบเติมอากาศในบ่อดิน ระบบนี้ไม่มีกลิ่นเหม็นและใช้พื้นที่ในการบำบัดน้อย แต่เสียค่าไฟฟ้าสูง

ระบบที่ 4 ระบบเอเอสแบบเติมอากาศในบ่อคอนกรีต ระบบนี้ไม่มีกลิ่นเหม็น ใช้พื้นที่ในการบำบัดน้อย แต่เสียค่าไฟฟ้าสูง ทั้งค่าก่อสร้างก็แพงกว่าระบบที่ 3

ระบบที่ 5 ระบบถังหมักไร้อากาศ+ระบบเอเอส เป็นระบบที่ไม่มีกลิ่นเหม็น ใช้พื้นที่น้อย เสียค่าไฟฟ้าต่ำ แต่ค่าก่อสร้างสูง การเดินระบบจึงต้องอาศัยผู้ชำนาญการ

ระบบที่ 6 ระบบยูเอเอสบี เป็นระบบที่มีการลงทุนค่อนข้างสูง ใช้ตะกอนแบคทีเรียบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ ลดค่าใช้จ่ายในเรื่องของการใช้ไฟฟ้า

โรงงานส่วนใหญ่จะนิยมใช้ระบบที่ 2 คือ ระบบบ่อหมัก+บ่อเติมอากาศ เพราะมีต้นทุนต่ำ แม้จะเป็นระบบที่มีกลิ่นเหม็นและมีน้ำทิ้งไม่ได้คุณภาพ แต่ก็สามารถพัฒนาโดยนำเทคโนโลยีที่เหมาะสมมาใช้บำบัดน้ำเสียโดยการใช้ น้ำหนักชีวภาพเพื่อลดกลิ่นเหม็น หรือใช้ร่วมกับสารเคมี

Prince of Songkla University Pattani Campus

เช่น พอลิเมอร์ในการจับตัวยาง จะทำให้คุณภาพของน้ำทิ้งดีขึ้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งมาตรฐานของน้ำเสียหรือความสกปรกที่วัดได้จะต้อมีค่าบีโอดี น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.1.3.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น

การบำบัดน้ำเสียขั้นต้นเป็นการจับเศษยางที่ติดมากับน้ำทิ้งก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพ โดยน้ำจากการสกิมยาง และน้ำจากการล้าง แยกกันเข้าสู่บ่อดักยาง ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพ บางโรงงานใช้สารพอลิเมอร์ในการแยกยางออกจากน้ำเสีย ก่อนเข้าสู้บ่อดักยาง น้ำเสียจะมีลักษณะใส แต่ค่าบีโอดี และซีโอดี ยังสูงอยู่ หรือน้ำจากการสกิม และน้ำจากการล้างไหลรวมกันเข้าสู่บ่อดักยาง วิธีนี้ประสิทธิภาพจะดีกว่าวิธีแรกเนื่องจาก กรดในน้ำจากการสกิมยางจะช่วยให้เกิดการจับตัวยางแยกออกมาจากน้ำได้ดีขึ้น

เมื่อน้ำเสียเข้าสู่บ่อดักยาง จะมีเวลาพักน้ำประมาณ 16 – 24 ชั่วโมง ซึ่งจะช่วยลดภาระการบรรทุกสารอินทรีย์ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพ บริเวณด้านบนของบ่อดักยาง จะแบ่งเป็นช่องเล็กๆ หลายๆ ช่อง เพื่อการดักยางที่ลอยขึ้นมา และง่ายต่อการแยกยางออกจากน้ำ ในส่วนด้านล่างของบ่อ จะมีช่องให้น้ำไหลผ่านทะลุกัน

2.1.3.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 (ชีวภาพ)

หลังจากน้ำเสียผ่านบ่อดักยางเพื่อดักเศษยางที่หลงเหลืออยู่ ก็จะเข้าสู่การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพ ซึ่งประกอบไปด้วย บ่อหมักไร้อากาศ บ่อกึ่งมีอากาศ-ไร้อากาศ บ่อมีอากาศ และบ่อเติมอากาศ ตามลำดับ

1) บ่อหมักไร้อากาศ (Anaerobic Ponds) เป็นระบบทางบำบัดทางชีวภาพที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงโดยไม่ต้องการออกซิเจน อาศัยการเจริญเติบโต และเมทตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่ไม้ต้องการใช้ออกซิเจน น้ำเสียส่วนที่ผ่านการบำบัดจากบ่อนี้จะระบายต่อไปยังบ่อกึ่งมีอากาศ-ไร้อากาศ (Facultative Pond) เพื่อบำบัดต่อไป สภาพบ่อไร้อากาศ น้ำเสียมีสีดำ มีกลิ่นเหม็น

2) บ่อกึ่งมีอากาศ-ไร้อากาศ (Facultative Ponds) ภายในบ่อมีลักษณะการทำงานแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนบนของบ่อเป็นแบบแอโรบิค ได้รับออกซิเจนจากการถ่ายเทอากาศที่บริเวณผิวน้ำและจากการสังเคราะห์แสงของ สาหร่าย และส่วนล่างของบ่ออยู่ในสภาพแอนแอโรบิค กระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นในบ่อบ่อกึ่งมีอากาศ-ไร้อากาศ เรียกว่า การทำความสะอาดตัวเอง (Self-Purification) สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ประเภทที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) เพื่อเป็นอาหารและสำหรับการสร้างเซลล์ใหม่และเป็นพลังงาน โดยใช้ออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่อยู่ในบ่อส่วนบน สำหรับบ่อส่วนล่างจนถึงก้นบ่อซึ่งแสงแดดส่องไม่ถึง จะมีปริมาณออกซิเจนต่ำ จนเกิดสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic

Prince of Songkla University Pattani Campus

Condition) และมีจุลินทรีย์ประเภทไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์และแปรสภาพเป็นก๊าซเช่นเดียวกับบ่อหมักไร้อากาศ แต่ก๊าซที่ลอยขึ้นมาจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนที่อยู่ช่วงบนของบ่อทำให้ไม่ เกิดกลิ่นเหม็น ลักษณะทั่วไปของน้ำเสียในบ่อนี้คือ มีสีเทา มีกลิ่นเหม็นลดลง

3) บ่อมีอากาศ (Aerobic ponds) เป็นบ่อที่มีแบคทีเรียและสาหร่ายแขวนลอยอยู่ เป็นบ่อที่มีความลึกไม่มากนักเพื่อให้ออกซิเจนกระจายทั่วทั้งบ่อและมีสภาพเป็นแอโรบิค โดยอาศัยออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย และการเติมอากาศที่ผิวหน้า และยังสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ส่วนหนึ่งโดยอาศัยแสงแดด น้ำเสียในบ่อนี้จะมีสีเขียว เนื่องจากมีสาหร่ายเจริญเติบโตอยู่ในน้ำเป็นจำนวนมาก

4) บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยการเติมออกซิเจน จากเครื่องเติมอากาศ (Aerator) ที่ติดตั้งแบบทุ่นลอยหรือยึดติดกับแท่นก็ได้ เพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำให้มีปริมาณเพียงพอ สำหรับจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้เร็วขึ้นกว่า การปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ บ่อมีความลึกประมาณ 2-6 เมตร ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Detention Time) ภายในบ่อเติมอากาศประมาณ 3-10 วัน ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดปริมาณความสกปรกของน้ำเสียในรูปของค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ได้ร้อยละ 80-95 โดยอาศัยหลักการทำงานของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) โดยมีเครื่องเติมอากาศซึ่งนอกจากจะทำหน้าเพิ่มออกซิเจนในน้ำแล้วยังทำให้ เกิดการกวนผสมของน้ำในบ่อด้วย ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึงภายในบ่อ

5) ระบบเอเอส (Activited Sludge – AS) หลักการที่สำคัญของระบบนี้ได้แก่ การเติมอากาศและ การนำตะกอนส่วนหนึ่งมาใช้ใหม่ เมื่อน้ำเสียผ่านการ บำบัดทางกายภาพข้างต้น จะถูกสูบเข้าสู่ถังเติมอากาศ วิธีการเติมอากาศที่นิยมใช้กันได้แก่ การเติมอากาศแบบสมบูรณ์ (Complete - mix) ซึ่งน้ำเสียและ อากาศจะได้รับการผสมเข้ากันเป็นอย่างดี มีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากันเกือบทั้งหมด และยังมีศักยภาพในการป้องกันการล้มเหลวของระบบ (Shock Loads) การเติมอากาศจะช่วยให้ จุลินทรีย์เจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ในตะกอนแขวนลอยได้ดีขึ้น โดยจุลินทรีย์เหล่านี้จะสลายสารอินทรีย์และ สิ่งสกปรกในน้ำเสียเป็นอาหารหลังจากนั้นจึงเข้าสู่ถังตะกอนสุดท้าย เพื่อแยกตะกอนและน้ำใสออกจากกัน โดยตะกอนส่วนหนึ่งจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศให้อยู่ในภาวะสมดุล ตะกอนส่วนเกินจะถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีการที่เหมาะสมต่อไป โดยทั่วไประบบเอเอส จะมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียได้สูง โดย

Prince of Songkla University Pattani Campus

สามารถลดค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ของน้ำเสียได้ร้อยละ 80 - 95 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบและปัจจัยควบคุมการทำงานของระบบ

6) ระบบถังหมักไร้อากาศ (Anaerobic Digester) การทำงานของระบบถังหมักไร้อากาศคล้าย กับระบบบ่อหมักไร้อากาศ ต่างกันที่รูปแบบ และยังสามารถนำก๊าซ ชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์มาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ใช้หุงต้มอาหาร ผลิตไฟฟ้าและอื่น ๆ

7) ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) เป็นระบบที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์แขวนลอย ซึ่งมีการพัฒนาให้เกาะตัวกันในลักษณะเป็นเม็ดตะกอน (Granule) ระบบนี้อาศัยการกวนผสมที่เกิดจากการไหลของน้ำเสียทีป้อนเข้าถังปฏิกรณ์จากด้านล่างไหลขึ้นสู่ด้านบน และการกวนผสมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจริงจากกิจกรรมการย่อยสลายเป็นสำคัญ โดยตะกอนจุลินทรีย์เหล่านี้จะถูกแยกออกจากน้ำเสียด้วยอุปกรณ์แยกของ แข็ง-ของเหลว-ก๊าซ (Gas-Liquid-Solid Separator หรือ 3 Phase Separator) ทำให้สามารถรักษาจุลินทรีย์ประสิทธิภาพสูงไว้ในระบบได้ ในระบบยูเอเอสบี จุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย แล้วเปลี่ยนให้เป็นแก๊สมีเทน (CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในสภาวะแวดล้อม ที่เหมาะสม

2.2 สาหร่ายคลอเรลลา (*Chlorella*)

2.2.1 ชีววิทยาของสาหร่ายคลอเรลลา

คลอเรลลาค้นพบโดย เอ็ม ดับพลิว ไบเจอร์นิค (M.W. Beijerinck) นักจุลชีววิทยาชาวดัตช์ และได้ตั้งชื่อว่าคลอเรลลา (*Chlorella*) ซึ่งมาจากภาษากรีกว่า คลอโรส (Chloros) แปลว่าสีเขียว กับภาษลาตินว่า เอลล่า (Ella) แปลว่าเล็กคลอเรลลา (Kuhl and Lorenzen, 1963) จัดอยู่ในลำดับอนุกรมวิธาน ดังนี้

Kingdom: Plantae

Division: Chlorophyta

Class: Trebouxiophyceae

Order: Chlorellales

Family: Chlorellaceae

Genus: *Chlorella*

คลอเรลลาเป็นสาหร่ายเซลล์เดียวสีเขียว เซลล์รูปร่างกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 4-10 ไมโครเมตร ไม่มี flagella คลอโรพลาสเป็นรูปถ้วย หรือเป็นแผ่นอยู่ริมเซลล์ ประกอบไปด้วยคลอโรฟิลล์ เอ และบี เพื่อการสังเคราะห์แสง ในการสังเคราะห์แสง คลอเรลลาต้องการเฉพาะ

Prince of Songkla University Pattani Campus

คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ แสงแดด ในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ (Kuhl and Lorenzen, 1963) และสารอาหารเพียงเล็กน้อย คลอเรลลา 1 ล้านเซลล์หนักประมาณ 6.8 มิลลิกรัม (Watanabe. *et al*, 2006) ในสภาพธรรมชาติสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศโดยการสร้างออโตสปอร์ จำนวน 2, 4, 6, 8 และ 16 จำนวนของออโตสปอร์ (dauthter cell) จะมาจาก mather cell ซึ่งจะถูกควบคุมโดยสภาวะภายใน และและสภาวะภายนอก

การจำแนกชนิดและสายพันธุ์ของ *Chlorella* sp. จะอาศัยสมบัติทางสรีรวิทยาและชีวเคมี แต่มีข้อยกเว้นสำหรับบางสายพันธุ์ซึ่งไม่สามารถจัดหมวดหมู่โดยวิธีนี้ได้ (Kessler and Socder ,1962 อ้างโดย Richmond, 1986) จำแนกชนิดและสายพันธุ์ของ *Chlorella* sp. ได้ 25 สายพันธุ์ โดยอาศัยคุณสมบัติทางสรีรวิทยาและชีวเคมี โดยศึกษาลักษณะการสร้างคาโรทีนอยด์ ในสภาวะการขาดไนโตรเจน ศึกษาไฮโดจีเนสแอคติวิตี และลักษณะของผนังเซลล์ เป็นต้น *Chlorella* sp. สามารถจำแนกโดยอาศัยลักษณะทางสัณฐานวิทยาและลักษณะโครงสร้างของเซลล์ เช่น ผนังเซลล์ ลักษณะของคลอโรพลาส การมีหรือไม่มีไพรีนอยด์ จำนวน autospore ลักษณะการแบ่งเซลล์และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (Fott and Navakova,1969 อ้างโดย Richmond, 1986) นอกจากนี้ *Chlorella* sp. สามารถจำแนกกลุ่มโดยอาศัยลักษณะทางสรีรวิทยา เช่น ผลของแหล่งน้ำตาลกลูโคส กาแลคโทส แมนโนส ฟรักโทส และซูโครส ที่มีต่อการเติบโตในสภาวะให้แสงและไม่ให้แสง ความต้องการไทอามิน ผลของไนเตรท กรดอะมิโน กลูโคส ซึ่งมีผลต่อรูปร่างของเซลล์ สี ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง เป็นต้น (De Silva and Gyllenvberg ,1972 อ้างโดย Richmond, 1986)

2.2.2 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก

2.2.1.1 แสง

แสงเป็นปัจจัยหลักสำคัญของการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) การสังเคราะห์ด้วยแสง เป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่สำคัญทำให้สาหร่าย ได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ในการเจริญเติบโต กระบวนการนี้สารประกอบอนินทรีย์และพลังงานแสง จะถูกแปลงเป็นอินทรีย์วัตถุในเซลล์สาหร่าย พลังงานแสงจะแยกโปรตอนและอิเล็กตรอนจากดอเนอร์โมเลกุล เพื่อรีดิวซ์ CO_2 ไปเป็นโมลกุลอินทรีย์ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงมีวัตถุดิบและสิ่งที่จำเป็นต้องใช้คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ แสงแดด โดยมีสมการเคมีแสดงการเกิดกระบวนการดังนี้

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow[\text{Chlorophyll}]{\text{Light}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$

Prince of Songkla University Pattani Campus

ประสิทธิภาพโดยรวมของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์มีข้อจำกัดที่ว่า แต่ละเซลล์ไม่สามารถใช้แสงที่ความเข้มสูงได้ กระบวนการสังเคราะห์แสงของคลอเรลลาจะเกิดในสภาวะความเข้มแสงต่ำ ในช่วง 4,000 – 30,000 ลักซ์ (Oh-Hama and Miyashi ; อ้างโดย Borowitzka and Borowitzka , 1988) ในช่วงความยาวคลื่น visible (Kuhl and Lorenzen, 1963) ความเข้มแสงมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น (ช่วง 2,700 - 5,200 ลักซ์) ทำให้ปริมาณเซลล์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น (กรองจันทร์, 2536) จากรายงานของฤทัยรัตน์ (2548) พบว่าการเพาะเลี้ยงคลอเรลลาในถังปฏิกรชีวภาพแสง โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อความเข้มแสงเพิ่มจาก 2,220 ลักซ์ เป็น 17,760 ลักซ์ ทำให้อัตราการเจริญจำเพาะ และน้ำหนักแห้งของสาหร่ายเพิ่มขึ้น แต่เมื่เพิ่มความเข้มแสงจาก 17,760 ลักซ์ เป็น 39,960 ลักซ์ ค่าอัตราการเจริญจำเพาะ และน้ำหนักแห้งของสาหร่ายไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มแสงจาก 17,760 ลักซ์ เป็นความเข้มแสงอิ่มตัวของสาหร่าย เมื่อเพิ่มความเข้มแสงมากว่านี้ก็ไม่มีการเพิ่มขึ้นของอัตราการเจริญจำเพาะ

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย สาหร่ายสามารถเติบโตในสภาพที่มีทั้งช่วงมืดและช่วงสว่าง แต่สาหร่ายไม่สามารถเติบโตได้ในสภาวะที่มีความเข้มแสงสูง และมีแสงอย่างต่อเนื่อง เพราะว่า การให้แสงที่มีความเข้มสูงอย่างต่อเนื่อง จะมีผลทำให้เซลล์มีสีซีดหรือปรากฏลักษณะสีเหลืองอมน้ำตาลซึ่งเป็นผลจากการที่เม็ดสีถูกทำลาย (Lorenzen, 1963 อ้างโดย Richmond, 1986)

ความเข้มของแสงจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับฤดูกาล และสถานที่เช่น ในฤดูร้อนแสงมีความเข้มสูง 80-110 กิโลลักซ์ ในสภาพที่ความเข้มข้นของแสงต่ำกว่า 20 กิโลลักซ์ สาหร่ายและพืชชั้นสูงสามารถใช้พลังงานแสงได้เพียงร้อยละ 20 ของแสงที่ตกกระทบ ถ้าความเข้มของแสงสูงกว่า 80 กิโลลักซ์ ความสามารถในการใช้พลังงานของสาหร่ายจะลดลง (Nakamura, 1982)

2.2.1.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อระบบนิเวศของสาหร่าย อุณหภูมิถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกชนิดของสาหร่าย ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 พวกด้วยกันคือ สายพันธุ์ที่ชอบหรือทนอุณหภูมิสูง และสายพันธุ์ที่ชอบและทนอุณหภูมิปานกลาง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สาหร่ายสายพันธุ์ที่ชอบหรือทนอุณหภูมิสูง จะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าพวกสายพันธุ์ที่ชอบและทนอุณหภูมิปานกลาง ในสภาวะอุณหภูมิต่ำพวก สายพันธุ์ที่ชอบหรือทนอุณหภูมิสูง จะเจริบเติบโตได้แย่กว่าพวก สายพันธุ์ที่ชอบและทนอุณหภูมิปานกลาง โดยเฉพาะที่ความเข้มแสงสูง ในบางกรณี ปัจจัยนี้จะจำกัดประโยชน์ของสายพันธุ์ที่ชอบหรือทนอุณหภูมิสูง สำหรับการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง โดยแท้จริงแล้วพวกสายพันธุ์ที่ชอบและทนอุณหภูมิ

Prince of Songkla University Pattani Campus

ปานกลาง สามารถเจริญเติบโตได้ดีตลอดทั้งปี ขณะที่พวกสายพันธุ์ที่ชอบหรือทนอุณหภูมิสูง จะไม่เจริญเติบโตในช่วงหน้าหนาว (Oh-Hama and Miyashi ; อ้างโดย Borowitzka, 1988)

2.2.1.3 ค่าความเป็นกรด – ด่าง

ความเป็นกรด – ด่าง เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม กับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย โดยจะเป็นตัวบอกปริมาณการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Venkataraman, 1983) โดยที่ค่ากรด- ด่าง อยู่ในช่วง 7-9 จะอยู่ในรูปของเกลือไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) เมื่อกรด- ด่าง มากกว่า 9.5 จะอยู่ในรูปเกลือคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และเมื่อกรด- ด่าง มีค่าประมาณ 5 คาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในรูปก๊าซที่ละลายน้ำ ค่าความเป็นกรด- ด่าง มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง รวมทั้งการทำงานของเอนไซม์ต่างๆ ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย

2.2.1.4 ธาตุอาหาร

ธาตุอาหารเป็นปัจจัยทางเคมีที่มีผลต่อการเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว ทั้งในด้านปริมาณ และด้านชนิดของธาตุอาหาร โดยทั่วไปธาตุอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายเซลล์เดียวจะได้แก่ N, P, K, Mg, Ca, S, Fe, Cu, Mn, และ Zn

1) แหล่งคาร์บอน

คาร์บอนเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ซึ่งจำเป็นต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง การเพิ่มสารอาหารทีจำเป็นต่างๆ มากขึ้นจะไม่มีผลทำให้ปริมาณเซลล์ของสาหร่ายเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนถูกจำกัด Warburg (1948) แนะนำเทคนิคการเพาะเลี้ยงคลอเรลลาโดยการเติมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป โดยเมื่อคาร์บอนละลายอยู่ในน้ำจะอยู่ในรูปของ CO_2, HCO_3^- และ CO_3^{2-} ความเข้มข้นของแต่ละรูปนั้นขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด- ด่างของสารละลาย โดยที่ค่ากรด- ด่าง อยู่ในช่วง 7-9 จะอยู่ในรูปของเกลือไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) เมื่อกรด- ด่าง มากกว่า 9.5 จะอยู่ในรูปเกลือคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และเมื่อกรด- ด่าง มีค่าประมาณ 5 คาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในรูปก๊าซที่ละลายน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ 1 มิลลิลิตร ใช้ในการเจริญเติบโตของคลอเรลลาประมาณ 1 มิลลิกรัมน้ำหนักแห้ง (Myer, 1980)

2) ไนโตรเจน (Nitrogen)

ไนโตรเจนมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ แหล่งไนโตรเจนได้แก่ เกลือแอมโมเนีย ไนเตรท และยูเรีย ไนเตรท และยูเรีย จะถูกสาหร่ายรีดิวซ์ เป็นแอมโมเนียมก่อนที่จะนำเข้าสู่เซลล์ ในน้ำเสียโดยทั่วไปหากมีไนเตรท อยู่ในน้ำมากจะทำให้ ค่าความเป็นกรด – ด่างเพิ่มขึ้น และหากมีแอมโมเนียมมาก ค่าความเป็น

Prince of Songkla University Pattani Campus

กรด – ด่างจะ ลดลง กระบวนการนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายในรูปแอมโมเนียอธิบายได้ด้วยสมการ (กษิดิศ, 2551)

$16NH_4^+ + 92CO_2 + HPO_4^{2-} + 92H_2O + 14HCO_3^- \longrightarrow C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P + 106O_2$

หมายเหตุ- $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ = องค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายขนาดเล็ก

3) ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

ฟอสฟอรัส เป็นองค์ประกอบของอินทรีย์สารมากมายหลายชนิด ได้แก่ กรดนิวคลีอิค ฟอสโฟไลปิด มีบทบาทในกระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์ การเคลื่อนย้ายพลังงานละการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิค รวมทั้งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ช่วยให้ค่าพีเอชค่อนข้างคงที่ โดยทั่วไปจะใช้ในรูป $H_2PO_4^-$และ HPO_4^{2-}

4) โพแทสเซียม(Potassium)

โพแทสเซียมเป็นส่วนประกอบหลักของเซลล์คลอเรลลา(แห้ง) ร้อยละ 1-2 และเป็นองค์ประกอบหลักของ Cytoplasmic cation ในเซลล์ รูปที่เป็นประโยชน์คือ โพแทสเซียมไอออน (K^+) ซึ่งจำเป็นสำหรับเอนไซม์ สำหรับสังเคราะห์แป้ง และ pyruvate kinase (Borowitzka and Borowitzka, 1988)

5) แมกนีเซียม(Magnesium)

แมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบของ คลอโรฟิลล์ ไรโบโซม และโครโมโซม รูปที่เป็นประโยชน์คือ แมกนีเซียมไอออน(Mg^{2+}) นอกจากนั้นแมกนีเซียมยังจำเป็นในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์

6) ซัลเฟอร์ (Sulpher)

ทั้งหมดของซัลเฟอร์ต้องการโดย สาหร่ายส่วนใหญ่สามารถนำไปใช้โดยการรีดิวซ์ ซัลเฟต ซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบของโปรตีนบางชนิด

7) คลอไรด์ (Chloride)

หน้าที่หลักของคลอไรด์ เกี่ยวกับกิจกรรมของคลอโรพลาส สาหร่ายต้องการคลอไรด์ สำหรับกระบวนการสังเคราะห์แสงที่ 2

8) แคลเซียม (Calcium)

แคลเซียมเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเติบโตสำหรับสาหร่ายสีเขียว โดยมีส่วนเกี่ยวข้องในการสร้างโครงสร้างของสาหร่ายโดยเฉพาะในสาหร่ายทะเล และมีบทบาทในการสร้างผนังเซลล์ของเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ (ลัดดา, 2540) ซึ่งปริมาณแคลเซียมที่พืช ต้องการ ขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุอาหารชนิดอื่นด้วย เช่น แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี โคบอลท์ ทองแดง โมลิบดีนัม นิคเกิล อะลูมิเนียม โซเดียม ปรอท เงิน และตะกั่ว เป็นต้น

Prince of Songkla University Pattani Campus

9) เหล็ก (Iron)

เป็นธาตุอาหารที่ช่วยดูดซึมไนโตรเจน และเหล็กเป็นองค์ประกอบของรงควัตถุ และยังเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์หลายชนิด เช่น เฟอริดอกซิน (Ferredoxin) คะตะเลส (Catalase) อีกทั้งยังเป็นองค์ประกอบของไซโตโครม (Cytochrome) และพอไฟริน (Porphyrins) (Warburg, 1948)

10) แมงกานีส (Manganise)

เป็นธาตุที่จำเป็นต่อสาหร่ายเซลล์เดียวหลายชนิด ซึ่งแมงกานีสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย โดย Wiessner (1962) ได้ทดลองเติมแมงกานีสลงในอาหารเลี้ยงสาหร่าย พบว่ามีผลในการเพิ่มอัตราการเติบโตของสาหร่าย

11) สังกะสี (Zinc)

เป็นธาตุอาหารที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งมีผลต่อการเติบโตของ *Stichococus bacillaris* (Wiessner, 1962) ในอาหารเลี้ยงสาหร่ายหลายชนิดจะมีสังกะสีอยู่ในความเข้มข้นประมาณ 0.01-0.1 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมี EDTA เป็นคีเลเตอร์ นอกจากนี้Stagmann (1940) พบว่าเมื่อปริมาณสังกะสีลดลงจะทำให้การสร้างคลอโรฟิลล์ลดลง

12) ทองแดง (Copper)

พบในเอนไซม์สำหรับกระบวนการออกซิเดชัน และนอกจากนี้ทองแดงยังมีความสำคัญต่อกระบวนการหายใจ โดยพบว่าการหายใจลดลงเมื่อปริมาณทองแดงลดลง (Wiessner,1962) สำหรับ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการจะมีอาการผิดปกติ เมื่อเลี้ยงในอาหารเลี้ยงสาหร่ายที่มีทองแดงต่ำกว่า 10-7 โมลาร์ (Walker, 1953)

2.2.3 การเติบโตของสาหร่าย

เมื่อกล่าวถึงการเติบโตของสาหร่ายบางชนิดที่อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว การเจริญเติบโตของนั้นไม่ได้หมายความว่าขนาดของเซลล์ใหญ่ขึ้น แต่หมายถึงการเพิ่มจำนวนเซลล์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฟิสิกส์ภายในเซลล์ การเจริญเติบโตเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งในการดำรงชีวิต เซลล์แต่ละเซลล์มีช่วงอายุที่จำเพาะเจาะจงสำหรับสายพันธุ์หนึ่งๆ การเติบโตของประชากรนั้น สามารถที่จะตรวจสอบได้โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเซลล์หรือมวลชีวภาพ (biomass) ของประชากรต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งเรียกว่า “อัตราการเจริญเติบโต” (growth rate) เวลาที่ใช้ในการเพิ่มจำนวนประชากรจากเดิมเป็น 2 เท่า เรียกว่า generation time(doubling time) จะแตกต่างกันไปในแต่ละสายพันธุ์ ในสภาวะแวดล้อมหนึ่งๆ การเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว สามารถบอกได้โดยการวัดความขุ่น(turbidity) ของสาหร่ายในอาหารเหลว การเพิ่มขนาดของ

Prince of Songkla University Pattani Campus

โคโลนีบนอาหารแข็ง หรือการเพิ่มของจำนวนเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ทั้งนี้การวัดนั้นต้องเทียบกับหน่วยเวลา

สาหร่ายเซลล์เดียวจะเติบโตเพิ่มจำนวนด้วยการแบ่งเซลล์จาก 1 เป็น 2 (binary fission) เซลล์รุ่นลูกแต่ละเซลล์มีลักษณะเหมือนเซลล์แม่ทุกประการ เมื่อการแบ่งเซลล์สิ้นสุดลง จำนวนเซลล์หรือมวลชีวภาพ (biomass) จะเพิ่มเป็น 2 เท่าของเมื่อก่อนแบ่งเซลล์

การเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว(Lavens and Sorgeloos, 1996) สามารถศึกษาได้จากกราฟการเติบโต (growth curve) โดยที่กราฟการเติบโตปกติ (typical growthcurve) จะแสดงให้เห็นถึงระยะการเติบโต 5 ขั้นด้วยกัน (รูปที่ 2.1) คือ

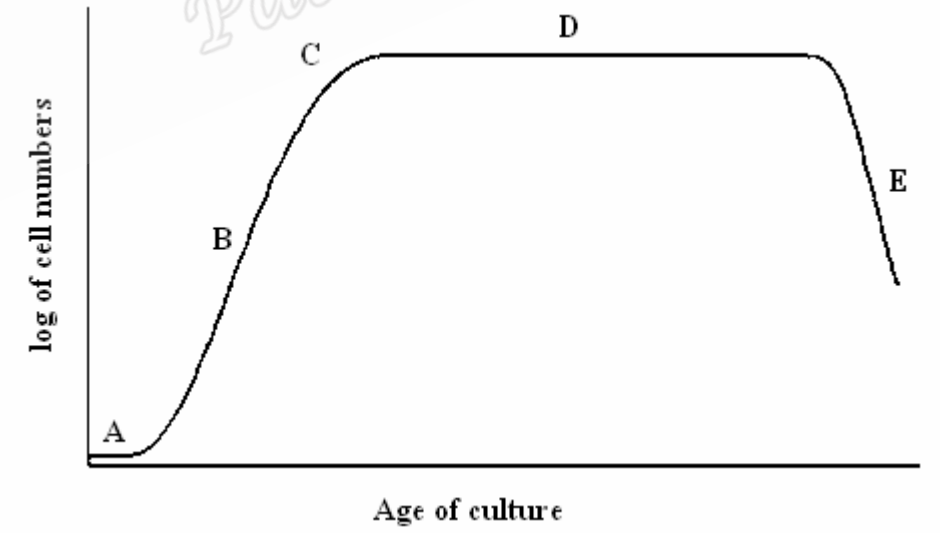
1) ระยะ lag phase (A เซลล์อยู่ในช่วงการปรับตัวก่อนแบ่งเซลล์เพิ่มจำนวน

2.) ระยะ exponential phase (B) เซลล์มีการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นแบบ exponential

3) ระยะ phase of declining growth (C) การแบ่งเซลล์ช้าลงเมื่อสารอาหารแสง, pH, หรือปัจจัยทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ เริ่มที่จะจำกัดการเจริญเติบโต

4) ระยะ stationary phase (D) ปัจจัยด้านสารอาหารมีจำกัด และอัตราการเติบโตเป็น 0 ซึ่งผลในความหนาแน่นเซลล์ค่อนข้างคงที่

5) ระยะ death phase (E) สารอาหารหมดลง ความหนาแน่นของเซลล์ลดลงอย่างรวดเร็ว และจำนวนของเซลล์ที่มีชีวิตลดลง อัตราการเพิ่มจำนวนน้อยกว่าอัตราการตาย



รูปที่ 2.1 กราฟการเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว (Lavens and Sorgeloos, 1996)

Prince of Songkla University Pattani Campus

โดยทั่วไปแล้ว การเติบโตของสาหร่าย สำหรับสภาวะการเพาะเลี้ยงแบบเก็บเกี่ยวครั้งเดียว ที่มีสารอาหารเป็นตัวจำกัดการเติบโต จะสามารถอธิบายการเติบโตโดยใช้ สมการของโมนอด (Monod's equqtion) ซึ่งสร้างโดย Jacques Monod (Monod, 1949) ขณะสาหร่ายมีการเติบโต อัตราการเพิ่มปริมาณของสาหร่ายต่อหน่วยเวลาเป็นสัดส่วนกับปริมาณสาหร่าย ณ เวลาเริ่มต้น กล่าวคือ การเติบโตของสาหร่ายจะเป็นไปตามสมการ (Andersen, 2005)

$$dx/dt = \mu X \quad \text{---------- (1)}$$

เมื่อ Integrate สมการ (1) จะได้

$$X_t = X_0.e^{\mu t} \quad \text{---------- (2)}$$

เมื่อใส่ Natural logarithm ในสมการ (2) จะได้

$$\ln (X/X_0) = \mu t \quad \text{---------- (3)}$$

เมื่อ X = คลอโรฟิลล์ เอ ที่เวลาต่างๆ

X_0 = คลอโรฟิลล์ที่เวลาเริ่มต้น

t = เวลาในการเพาะเลี้ยง (วัน)

μ = อัตราการเติบโตจำเพาะ (ต่อวัน)

ค่าอัตราการเติบโตจำเพาะ (μ) เป็นค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงจำนวนของสาหร่าย ที่ระยะการเพาะเลี้ยงต่าง ๆ ของสาหร่ายแต่ละชนิด และแสดงถึงสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

2.2.4 การเพาะเลี้ยงสาหร่าย

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยพื้นฐานแล้วแบ่งเป็น 3 วิธี คือ การเพาะเลี้ยงและเก็บเกี่ยวครั้งเดียว (Batch culture) การเพาะเลี้ยงและเก็บเกี่ยวแบบต่อเนื่อง (Continuous culture) และการเพาะเลี้ยงและเก็บเกี่ยวแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous culture)

2.2.3.1 การเพาะเลี้ยงและเก็บเกี่ยวครั้งเดียว (Batch culture)

เป็นการเพาะเลี้ยงโดยการเติมสารอาหารลงไปครั้งเดียว แล้วปล่อยให้สาหร่ายเจริญเติบโต เมื่อสาหร่ายเจริญเติบโตเต็มที่ จึงทำการเก็บผลผลิตออกจากระบบหมด

2.2.3.2 การเพาะเลี้ยงและเก็บเกี่ยวแบบต่อเนื่อง (Continuous culture)

เป็นการเพาะเลี้ยงโดยการเติมสารอาหารเข้าและเอาผลผลิตของสาหร่ายออกอยู่ตลอดเวลา ด้วยอัตราการเติมอาหารเข้าและเก็บผลผลิตออกคงที่ ประสิทธิภาพของระบบนี้จะสูงสุด เหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรม

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.2.3.3 การเพาะเลี้ยงและเก็บเกี่ยวแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous culture)

เป็นการเพาะเลี้ยงโดยการเติมสารอาหารเป็นประจำ วันเว้นวัน หรือวันเว้น สองวัน ขึ้นอยู่กับสารอาหารที่มีอยู่ในระบบ เมื่อทำการเก็บผลผลิตออก จะตามด้วยการเติมสารอาหารเข้าสู่ระบบอีกครั้ง เท่ากับปริมาณผลผลิตที่เก็บออก เพื่อเริ่มเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง ผลที่ได้ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแรก

2.2.5 การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายขนาดเล็ก

2.2.4.1 แหล่งอาหาร

ในปัจจุบันสาหร่ายขนาดเล็กเป็นที่รู้จักกันดีในรูปของอาหารเสริมสุขภาพ โดยทั่วไปแล้วตามท้องตลาดจะมีผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากสาหร่ายขนาดเล็ก 3 ชนิดคือ สาหร่ายคลอเรลลา สาหร่ายสไปรูดินา และดูนาลิเอลลา โดยมีทั้งสาหร่ายแห้ง อัดเม็ด สาหร่ายในแคปซูล และสาหร่ายผสมกับตัวยาหรือผลิตถัณฑ์อื่น ๆ (สรวิศ, 2543)

หลายคนเชื่อว่าคลอเรลลาเป็นแหล่งอาหารและพลังงานเพราะ ในเซลล์คลอเรลลามีปริมาณโปรตีนปริมาณร้อยละ 55-60 ตารางที่ 2.1 เป็นโปรตีนที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากประกอบด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นหลายชนิด ในปริมาณค่อนค้างมาก เช่น ทรีโอนีน ไลซีน และลูซีน เป็นต้น ปริมาณโปรตีนของคลอเรลลาสูงกว่าโปรตีนจากผักและธัญพืชมาก และสูงกว่าโปรตีนจากถั่วเหลืองเล็กน้อย (Lubitz, 1963) นอกจากนั้นคลอเรลลายังประกอบด้วย กรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปกรดไขมันไม่อิ่มตัว วิตามิน และเกลือแร่ที่จำเป็นต่อร่างกาย เช่น วิตามินเอ บี1 บี2 บี6 บี12 และไนอะซีน เป็นต้น และยังมีปริมาณ เบต้า-คาโรทีน ประมาณร้อยละ0.18 ซึ่งเป็นสารก่อให้เกิดวิตามินเอและเป็นตัวต่อต้านออกซิเดชัน (วิสัย, 2534) คลอเรลลามีผนังเซลล์ที่หนา และแข็ง ทำให้ไม่สามารถย่อย และดูดซึมได้ในกระเพาะอาหารและลำไส้ของคน ดังนั้นการผลิตสาหร่ายคลอเรลลาจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการพิเศษ เพื่อบด หรือย่อยให้ผนังเซลล์แตกออก เช่นการสกัดผนังเซลล์สาหร่ายคลอเรลลา(*Chlorella pyrenoidosa*) แห้งด้วยเอทานอล เมื่อมนุษย์รับประทานเข้าไป ร่างกายสามารถย่อยได้ร้อยละ 58 ของไนโตรเจน (Dam *et al.*, 1965) การบดเซลล์คลอเรลลา (*Chlorella* sp.) ให้แตกด้วยเครื่อง Dyno-mill การให้ความร้อนกับเซลล์ การลอกผนังเซลล์ออกโดยที่สภาพสีของเซลล์ยังสมบูรณ์มีค่า ซึ่งร่างกายสามารถที่จะย่อยได้ เท่ากับร้อยละ 79.5, 50 และ 47 ตามลำดับ (Steenblock, 1987)

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของ *Chlorella* สายพันธุ์ต่างๆ

	กรัมต่อ100 กรัมน้ำหนักเซลล์แห้ง				
	C. pyrenoidosa[a]	*C. pyrenoidosa*[b]	*C. vulgaris*[c]	*C.* NO. 650818[d]	*C. sp.*[e]
โปรตีน	60.2	56.5	55.2	60.2	58.4
คาร์โบไฮเดรต	18.5	17.8	21.04	20.1	23.2
ไขมัน	10.7	7.5	8.07	11	9.3
เยื่อใย	2.8	2.5	12.09	0.2	0.3
เถ้า	7.2	8.25	3.28	4.6	4.2

หมายเหตุ C.. : *Chlorella*

ที่มา a : Taiwan chlorella (1964)

b : Lubitz (1963)

c : Kobayashi and Kurata (1978)

d : Steenblock (1987)

e : วิสัย (2534)

นอกจากมนุษย์จะนำคลอเรลลามาจะเป็นอาหารเสริมสุขภาพแล้ว มนุษย์ยังใช้คลอเรลลาเป็นอาหารสำหรับสัตว์อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น เป็นอาหารสำหรับการเพาะเลี้ยงไรแดง (ภานุและคณะ, 2532; Zhihui *et al.*, 1988) การเพาะเลี้ยงโรติเฟอร์ (Abu-Rezeq and James ,1985) และการผสม *Chlorella* sp. ร้อยละ 10 ลงในกากถั่วเหลืองเพื่อนำไปเลี้ยงไก่ไข่ (Arakawa *et al.*,1960 อ้างโดย Richmond, 1986)

2.2.4.2 ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

เนื่องจากคลอเรลลามีองค์ประกอบของไลปิดอยู่ในช่วงร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักแห้ง (Spolaore, *et al*. 2006) จึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่จะนำไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซล นอกจากนี้ไบโอดีเซลที่ได้ พบปริมาณของซัลเฟอร์น้อยมาก (Mata, *et al*. 2010) เมื่อสกัดน้ำมันออกมาจากเซลล์สาหร่ายโดยใช้เฮกเซน น้ำมันที่ได้จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นไบโอดีเซล โดยอาศัยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบกรด (Xu, H. *et al*. 2006) ซึ่งวิธีการนี้นับได้ว่า มีศักยภาพสูงสำหรับผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงเหลวจากสาหร่ายเซลล์เดียว

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.2.4.3 วัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพจากสาหร่ายเซลล์เดียว เกิดจากกระบวนการหมักของจุลินทรีย์โดยไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ได้ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน (Methane) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Fernández, 2008)

2.2.4.4 ใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์

หลังจากการหมักสาหร่ายเซลล์เดียว ด้วยกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อเป็นพลังงานชีวมวล ผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการหมัก สามารถใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ (Fernández, 2008) ซึ่งเป็นเหตุผลหนึ่งในการใช้ชีวมวลเพื่อสร้างพลังงาน นอกจากนั้นในเซลล์ของสาหร่ายเซลล์เดียว ประกอบไปด้วยธาตุอาหารหลัก และรอง และกรดอะมิโน ซึ่งจำเป็นต่อการเติบโตของพืช และเป็นการทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมี ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Farheed and Fattah, 2008)

2.2.4.5 ใช้บำบัดน้ำเสีย

น้ำ เป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิต มนุษย์นำมาใช้ในการอุปโภค บริโภค และกิจกรรมต่าง ๆ ส่วนใหญ่ล้วนเกี่ยวข้องกับน้ำ เมื่อน้ำถูกใช้เสร็จแล้วก็จะถูกปล่อยทิ้ง กลายเป็นน้ำเสียออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ น้ำเสียที่เกิดขึ้นนี้ จะมีสารใด ๆ หรือสิ่งปฏิกูลที่ไม่พึงปรารถนาปนอยู่ การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกเหล่านี้ จะทำให้ คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ สิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ น้ำมัน ไขมัน ผงซักฟอก สบู่ ยาฆ่าแมลง สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเหม็นและเชื้อโรคต่าง ๆ สำหรับแหล่งที่มาของ น้ำเสียพอจะแบ่งได้เป็น 2 แหล่งใหญ่ ๆ ดังนี้

1) น้ำเสียจากแหล่งชุมชน มาจากกิจกรรมสำหรับการดำรงชีวิตของคนเรา เช่น อาคารบ้านเรือน หมู่บ้านจัดสรร คอนโดมิเนียม โรงแรม ตลาดสด โรงพยาบาล เป็นต้น

2) น้ำเสียจากกิจกรรมอุตสาหกรรม ได้แก่น้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม สิ่งสกปรกในน้ำเสียจะเป็นพวกสารเคมีที่เป็นพิษและพวกโลหะหนักต่าง ๆ รวมทั้งพวก สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีความเข้มข้นสูงด้วย

ในน้ำเสียจากแหล่งชุมชน และจากกิกรรมอุตสาหกรรม พบว่า มีสารอาหารมากเพียงพอกับความต้องการของจุลสาหร่าย (microalgae) จุลสาหร่ายจะใช้สารอาหารหรือแร่ธาตุในน้ำเสียเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต จุลสาหร่ายเป็นผู้ผลิตออกซิเจนจากกระบวนการสังเคราะห์แสง ออกซิเจนที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้น้ำมีคุณภาพ ดียิ่งขึ้น ในขณะเดียวกับจุลสาหร่ายยังมีคุณสมบัติพิเศษในการลดมลพิษทางน้ำ อันเกิดจากสารโลหะหนักจากโรงงาน อาทิ ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม และสารหนู การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายด้วยน้ำเสียจากกิจกรรมต่าง ๆ จึงเป็นทั้งการบำบัดน้ำเสีย และ

Prince of Songkla University Pattani Campus

เป็นทางเลือกสำหรับการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อทดแทนปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายจากน้ำเสีย ได้แก่ การเพาะเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลา ในน้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเล (กรองจันทร์, 2536; สันติชัยและทวีป, 2537) การเพาะเลี้ยง *Chlorella* sp. ในน้ำทิ้งจากการหมักแก๊สชีวภาพ (ชิตและไพศาล, 2525) การเพาะเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลาด้วยการใช้น้ำทิ้งซึ่งเป็นส่วนของซีรัมน้ำยาง (ชลธี, 2546) การเพาะเลี้ยงคลอเรลลาในน้ำเสียจากบ่อหมักก๊าซชีวภาพมูลสุกร (วีนา, 2535) การเพาะเลี้ยงคลอเรลลาด้วยน้ำกากส่า (ฐิติมา, 2540) การเพาะเลี้ยง*Chlorella* sp. K_3, *Scenedesmus acutus* 272-3a, *Chlamydomonas* sp. 1K และ *Chlorella* sp. Chx. ด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำนมถั่วเหลือง (หยกแก้วและคณะ, 2525) การเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อไม้และกระดาษ (Tarlan *et al*., 2002) การเพาะเลี้ยงคลอเรลลาด้วยน้ำเสียจากเล้าหมู (Travieso *et al.,*2006) เป็นต้น

Prince of Songkla University
Pattani Campus