

การบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก ด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก

Treatment of the Wastewater from Wet Coffee Processing Using Microalgae Cultivation

รุ่งนภา เขียววิจิตร^{1*} กลิ่นประทุม ปัญญาปิง¹ สุรสิทธิ์ เทียงจันตา²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Rungnapha Khiewwijit^{1*} Klinpratoom Panyaping¹ Surasit thiangchanta²

¹Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Chang Phueak, Mueang, Chiang Mai 50300, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Chang Phueak, Mueang, Chiang Mai 50300, Thailand

*Corresponding author Email: rungnapha@rmu.ac.th

(Received: June 25, 2018; Accepted: September 17, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและสารอินทรีย์ในรูปของทีเคเอ็นในโตรเจน (TKN-N) ฟอสเฟตฟอสฟอรัส ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) และซีโอดี (COD) ที่ละลายน้ำได้ ตามลำดับ โดยเน้นการบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบแขวนลอยและระบบตรึงฟิล์ม และเพื่อศึกษาอัตราการผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม ที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน โดยนำหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กชนิดผสมทำการเพาะเลี้ยงในระดับห้องปฏิบัติการ ภายใต้สภาวะแวดล้อมและแสงแดดตามธรรมชาติทางตอนเหนือของประเทศไทยและใช้ระบบเปิดทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ ระบบแขวนลอย ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) และระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) ทำการทดลองในแต่ละระบบรวม 3 รอบ รอบละ 14 วัน ผลการศึกษา พบว่าระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) สามารถกำจัด TKN-N $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ และ COD ที่ละลายน้ำได้ดีที่สุด คือสามารถกำจัดได้ค่าเฉลี่ยร้อยละ 48.44 และ 90 ตามลำดับ ส่วนอีกสองระบบมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด TKN-N $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ และ COD ที่ละลายน้ำได้น้อยกว่า เนื่องจากการใช้ระบบตรึงฟิล์ม ช่วยลดข้อจำกัดของปริมาณแสงที่ต้องการใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กและเพิ่มปริมาณการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่การเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 ทำให้หัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กที่เหลืออยู่มีปริมาณน้อย และส่งผลให้ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าเฉลี่ยอัตราผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กน้อยกว่า (1.02 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อวัน) ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) (1.19 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อวัน) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพ โดยการใช้ระบบตรึงฟิล์มและเพื่อเพิ่มอัตราผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก ควรเก็บเกี่ยวให้เหลือสาหร่ายขนาดเล็กเพียงครึ่งหนึ่งของพื้นที่แผ่นตัวกลางในวันที่ 7 และเก็บเกี่ยวทั้งหมดในวันที่ 14

คำสำคัญ: สหราชอาณาจักร น้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟ ระบบแขวนลอย ระบบตรึงฟิล์ม

ABSTRACT

The objective of this study was to explore the potential of the removals of nitrogen, phosphorus and organic matter in the forms of dissolved TKN-nitrogen (TKN-N), phosphate-phosphorus ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), and COD, respectively. This study focused on a treatment of wet coffee processing wastewater using suspended and biofilm microalgae cultivation. Moreover, this study also investigated the microalgal biomass production in biofilm microalgae system at the differences in harvesting frequency. Mixed-microalgae culture was cultivated in the laboratory scale and constructed under outdoor climatic conditions in Northern Thailand. Three different systems were used, which were suspended system, biofilm system (harvesting at day 7 and 14) and biofilm system (harvesting at day 14). These three systems were cultivated for 3 cycles with the period of 14 days for each cycle. The results showed that biofilm system (harvesting at day 7 and 14) gave the highest removals of dissolved TKN-N, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, and COD, which removed on average 48%, 44%, and 90%, respectively. Another two systems had lower average removal efficiencies of dissolved TKN-N, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, and COD. These results could be explained by the minimization of light limitation to photosynthesis and enhancement of CO_2 mass transfer when using biofilm system. However, this study showed that microalgal biomass harvesting in biofilm system at day 7 caused less mixed-microalgae seed. Consequently, biofilm system (harvesting at day 7 and 14) had lower average biomass production rate (1.02 g dry weight/day) than biofilm system (harvesting at day 14) (1.19 g dry weight/day). This study provided a development of efficient treatment for the wet coffee processing wastewater using microalgae cultivation in biofilm system. Moreover, only half biomass harvesting of the patterned sheet in day 7 and all biomass harvesting in day 14 should be applied to increase microalgal biomass production.

Keyword: Microalgae, coffee processing wastewater, suspended system, biofilm system.

1. บทนำ

กาแฟจัดเป็นพืชอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจทั่วโลก โดยทั่วไปสายพันธุ์หลักของกาแฟที่นิยมเพาะปลูกและบริโภคกัน ได้แก่ สายพันธุ์อาราบิก้า (Arabica) และโรบัสต้า (Robusta) แต่ส่วนใหญ่กาแฟสายพันธุ์อาราบิก้าจะได้รับความนิยมในการบริโภคมากกว่าโรบัสต้า เนื่องจากกาแฟโรบัสต้ามีรสชาติกาแฟขมกว่าและให้รสชาติน้อยกว่ากาแฟอาราบิก้า หากเปรียบเทียบกับประเทศในเขตภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในช่วง พ.ศ. 2554-2558 ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกเมล็ดกาแฟและกาแฟสำเร็จรูปอันดับที่ 4 รองลงมาจากประเทศเวียดนาม อินโดนีเซียและมาเลเซีย และมีแนวโน้มความต้องการ

ใช้เมล็ดกาแฟเพิ่มขึ้นทุกปี [1] สำหรับในประเทศไทยกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้าเป็นพืชที่ปลูกกันอย่างกว้างขวางในแถบภาคเหนือ โดยเฉพาะในเขตบริเวณพื้นที่สูง (Northern highland) เพราะมีสภาพแวดล้อมและอากาศที่เหมาะสมสำหรับการปลูกกาแฟ ปัจจุบันมูลนิธิโครงการหลวง (Royal project foundation) ให้การส่งเสริมและพัฒนาทั้งการเพาะปลูก รวมถึงกระบวนการผลิตและแปรรูปเมล็ดกาแฟอาราบิก้าให้คุณภาพสูงมานานกว่า 40 ปี รวมทั้งหมด 24 ศูนย์ และเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟมีการจำหน่ายผลผลิตกาแฟผ่านโครงการหลวงปีละประมาณ 400-500 ตันเมล็ดกาแฟแห้ง ซึ่งสามารถสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรบนพื้นที่สูงได้เป็นอย่างดี [2] สำหรับกระบวนการผลิตและแปรรูป

เมล็ดกาแฟรามีกำในมูลนิธิโครงการหลวง มุ่งเน้นให้ใช้วิธีแบบเปียก (Wet processing) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์กาแฟที่มีคุณภาพสูง และยังมีกลิ่นและรสชาติของกาแฟที่ดี ทำให้ความต้องการใช้น้ำและน้ำเสียที่ผลิตในแต่ละวันมีปริมาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแบบแห้ง (Dry processing) โดยระหว่างกระบวนการแปรรูปเมล็ดกาแฟรามีกำแบบเปียก จากการใช้ผลสดกาแฟรามีกำ 1 ตันต่อวัน จะมีน้ำเสียที่ผลิตและต้องการการบำบัดในปริมาณมากถึง 6 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยแบ่งเป็นปริมาณน้ำเสียที่ผลิตจากกระบวนการกะเทาะเปลือกกาแฟ 4 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และปริมาณน้ำเสียที่ผลิตจากกระบวนการหมักและการล้างเมือกกาแฟอีก 2 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน [3]

น้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟ มีลักษณะความเป็นกรดและมีสารอินทรีย์สูง นอกจากนั้นยังมีการปนเปื้อนด้วยสารไนโตรเจน (Nitrogen; N) และสารฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) ซึ่งหากปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง จะมีผลทำให้แหล่งน้ำเกิดการเน่าเสีย ส่งกลิ่นเหม็นและเกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศในบริเวณแหล่งน้ำอย่างรุนแรง อีกทั้งยังมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ที่อาศัยอยู่บริเวณโดยรอบแหล่งน้ำที่เน่าเสีย จากการทบทวนและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าโดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟที่นิยมใช้ ได้แก่ การหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic process) [4]-[6] เนื่องจากสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ในการสร้างความร้อนหรือกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟมีสภาวะความเป็นกรด จึงจำเป็นต้องเพิ่มค่าพีเอชด้วยการใส่สารเคมี เพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลต่อค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นและน้ำทิ้งที่ได้จากการหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจนยังปนเปื้อนด้วยสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง จึงจำเป็นต้องได้รับการบำบัดในขั้นต่อไป [5]-[6] นอกจากนั้น อีกหนึ่งวิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟ คือระบบการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยกระบวนการทางธรรมชาติแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland) ทั้งนี้เนื่องจากเป็นระบบที่มีวิธีดำเนินการไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายต่ำและไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการบำบัดสูง แต่ต้องหมั่นตัดวัชพืชหรือตัดพืชที่ปลูกออกอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้อากาศและแสงแดดส่องลงไปยังได้ผิวน้ำได้ [7]-[8]

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดและสนใจพัฒนาระบบการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟรามีกำด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) ซึ่งเป็นระบบที่สามารถนำสารอาหารทั้งสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟรามีกำกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็ก เพื่อสร้างชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งเป็นพืชที่สามารถนำไปย่อยสลายต่อได้และมีศักยภาพสูงสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิง เช่น ไบโอดีเซลและก๊าซมีเทน อีกทั้งการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กยังเป็นระบบที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดำเนินการง่าย ไม่ซับซ้อน ใช้เงินลงทุนต่ำและมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ นอกจากนั้น การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กยังมีประโยชน์ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หนึ่งในก๊าซเรือนกระจกได้อีกด้วย [9]-[12]

โดยทั่วไป การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสามารถทำได้ใน 2 ระบบ ได้แก่ ระบบแขวนลอย (Suspended system) และระบบตรึงฟิล์ม (Biofilm system) สำหรับการเพาะเลี้ยงในระบบแขวนลอย เป็นระบบที่สาหร่ายขนาดเล็กเจริญเติบโตปะปนกับน้ำเสีย ซึ่งข้อดีของระบบนี้ คือมีวิธีดำเนินการระบบง่าย แต่มีค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กสูง เนื่องจากต้องทำการแยกชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กออกจากน้ำ ในขณะที่ระบบตรึงฟิล์ม สาหร่ายขนาดเล็กเจริญเติบโตอยู่บนแผ่นตัวกลางที่เตรียมไว้และแผ่นตัวกลางนี้จะอยู่บริเวณผิวน้ำ ซึ่งมีเพียงชั้นน้ำบางๆ ปกคลุม ทำให้เก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่การออกแบบระบบตรึงฟิล์มจะมีความซับซ้อนกว่าระบบแขวนลอย [12] ด้วยเหตุนี้

ทางคณะผู้วิจัยจึงสนใจการออกแบบระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวโดยเฉพาะในระบบตรึงฟิล์ม โดยทั่วไปวิธีการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบแขวนลอยจะดำเนินการเพียงครั้งเดียวหลังจากหยุดระบบ แต่ในระบบตรึงฟิล์ม ควรเก็บเกี่ยวทั้งในระหว่างและหลังจากหยุดระบบ เพื่อเพิ่มอัตราผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ตัวอย่างจากการศึกษาของ Boelee et al. [13] พบว่าระยะเวลาการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่เหมาะสมที่สุด คือเก็บเกี่ยวในทุกๆ 7 วัน เนื่องจากทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและความหนาของชั้นสาหร่ายขนาดเล็กคงที่ ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและอัตราการผลิตของชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก ที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และหลังจากหยุดระบบ เฉพาะในระบบตรึงฟิล์ม

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการจัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและสารอินทรีย์ในรูปของทีเคเอ็นในโตรเจน (TKN-N) ฟอสเฟตฟอสฟอรัส ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) และซีโอดี (COD) ที่ละลายน้ำได้ ตามลำดับของการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบแขวนลอยและระบบตรึงฟิล์ม ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กสามารถใช้ไนโตรเจนได้ทั้งในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งทีเคเอ็นในโตรเจนประกอบด้วยสารไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์และในรูปของแอมโมเนียมที่สาหร่ายขนาดเล็กต้องการใช้ในการเจริญเติบโต ในขณะที่สาหร่ายขนาดเล็กต้องการใช้ฟอสฟอรัสในรูปของสารอนินทรีย์ ได้แก่ ฟอสเฟตฟอสฟอรัส [10], [12] โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระยะเวลา 14 วันต่อรอบ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สาหร่ายขนาดเล็กเข้าสู่ระยะคงที่ (Stationary phase) และมีความจำเป็นที่ต้องทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กหลังจากหยุดระบบ [9], [12]

นอกจากนั้น งานวิจัยนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการผลิตของชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม ในการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก โดยใช้ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14 และใช้ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวเพียงครั้งเดียวในวันที่ 14 เพื่อนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้พัฒนาระบบการบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกอย่างยั่งยืนต่อไป

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กเริ่มต้น

หัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กเริ่มต้นที่ใช้เป็นหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กชนิดผสม (Mixed-microalgae culture) เก็บจากบ่อปรับเสถียร ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียรวมของศูนย์พัฒนาโครงการหลวงตีนตก จังหวัดเชียงใหม่ ที่ระดับความเข้มข้นน้ำหนักแห้ง (Dry weight; DW) ของเซลล์สาหร่ายขนาดเล็ก เท่ากับ 9.4 ± 0.4 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อลิตร เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้มาจากการศึกษาที่ผ่านมาของ Khiewwijit et al. [9] ซึ่งพบว่าสาหร่ายขนาดเล็กสามารถเจริญเติบโตและช่วยกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 ลักษณะสมบัติของน้ำทางเคมี

น้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกเป็นน้ำเสียที่ได้มาจากจุดเก็บรวบรวมน้ำเสียหลังจากขั้นตอนการกะเทาะเปลือกกาแฟ การหมักและการล้างเมือกกาแฟ จากศูนย์พัฒนาโครงการหลวงตีนตก จังหวัดเชียงใหม่ ปริมาณเฉลี่ยของน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกที่ผลิตได้ เท่ากับ 10 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยนำน้ำเสียที่เก็บได้ มาผ่านการกรองด้วยตาข่ายผ้ามุ้งไนลอนสีฟ้าขนาด 20 ตาต่อตารางนิ้ว ซึ่งสามารถกรองเมือกและเมล็ดกาแฟที่ตกค้างในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำเสียหลังจากผ่านการกรองเมือกและเมล็ดกาแฟที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าความเข้มข้นเฉลี่ย*
พีเอช (pH)	-	4.29 ± 0.10
ทีเคเอ็นไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้ (Dissolved TKN-N)	มิลลิกรัมต่อลิตร	103.6 ± 4.8
ฟอสเฟตฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ (Dissolved PO_4^{3-} -P)	มิลลิกรัมต่อลิตร	71.6 ± 14.9
ซีโอดีทั้งหมด (Total COD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	$10,095 \pm 778$
ซีโอดีที่ละลายน้ำได้ (Dissolved COD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	$5,036 \pm 529$
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	กรัมต่อลิตร	1.078 ± 0.283
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (VSS)	กรัมต่อลิตร	1.044 ± 0.270

หมายเหตุ: *ค่าเฉลี่ยได้จากการตรวจวัดจากทั้ง 3 รอบการทดลอง และตรวจ 3 ซ้ำในแต่ละรอบ

3.3 แผ่นตัวกลางที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์มใช้แผ่นตัวกลางที่ได้พัฒนามาจากการศึกษาครั้งก่อน [9] ซึ่งพบว่าสาหร่ายขนาดเล็กสามารถยึดเกาะและเจริญเติบโตอยู่บนแผ่นตัวกลางที่ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแผ่นตัวกลางที่ใช้มีขนาด 0.4 เมตร x 0.4 เมตร (กว้าง x ยาว) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.16 ตารางเมตร และประกอบด้วยวัสดุ 3 ชั้น ยึดติดกันด้วยเอ็นไคโนลอน โดยชั้นบนและล่างของแผ่นตัวกลางเป็นวัสดุตาข่ายกรองแสง ระดับ 90 เปอร์เซนต์ ชนิดสีดำ (90% Knitted black shade netting) (ดังแสดงในรูปที่ 1) ส่วนชั้นกลางของแผ่นตัวกลางเป็นวัสดุแผ่นใยขัด (Scotch-Brite™ General purpose scouring pad No. 105)



รูปที่ 1 แผ่นตัวกลางที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม

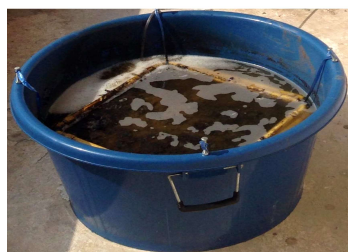
3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบแขวนลอยและระบบตรึงฟิล์ม และศึกษาอัตราการผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม ซึ่งใช้ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

นำหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กชนิดผสม มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก โดยทำการออกแบบการทดลองเป็น 3 ชุดการทดลอง และทำการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระดับห้องปฏิบัติการและใช้ระบบเปิด ภายใต้สภาวะแวดล้อมและแสงแดดตามธรรมชาติ ในที่โล่งแจ้ง ไม่มีเงาต้นไม้บดบัง ของบริเวณสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม โดยทำการทดลองชุดการทดลองละ 3 รอบ รอบละ 14 วัน การเดินระบบของการทดลองใช้ถังพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร (ขอบด้านบน) และ 45 เซนติเมตร (ขอบด้านล่าง) มีความสูง 25 เซนติเมตร และมีปริมาตรการใช้งาน 40 ลิตร ในชุดการทดลองที่ 1 ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบแขวนลอย (ดังแสดงในรูปที่ 2ก) สำหรับในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (ดังแสดงในรูปที่ 2ข) โดยในชุดการทดลองที่ 2 ทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กทุกๆ 7 และ 14 วัน เรียกว่า ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14)

ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 3 ทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสำหรับขนาดเล็กทุกๆ 14 วัน เรียกว่า ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) ทั้ง 3 ชุดการทดลองใช้หัวเชื้อสำหรับขนาดเล็กชนิดผสมเริ่มต้น ที่มีความเข้มข้น 9.4 ± 0.4 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อลิตร ปริมาตร 0.4 ลิตร หรือคิดเป็นร้อยละ 1 ของปริมาตรต่อปริมาตร [9] และเติมน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก ปริมาตร 39.6 ลิตร ลงไปในถังพลาสติก โดยชุดการทดลองที่ 1 ทำการเทหัวเชื้อสำหรับขนาดเล็กชนิดผสมลงไปในถังได้โดยตรง ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ทำการเทหัวเชื้อสำหรับขนาดเล็กชนิดผสมลงบนแผ่นตัวกลางที่ใช้เพาะเลี้ยงสำหรับขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม จากนั้นใช้เครื่องเติมอากาศ (Electromagnetic air pump) และหัวทราย (Aquarium air stone) ช่วยในการกวนตลอดเวลาของการเพาะเลี้ยงสำหรับขนาดเล็กในทุกชุดการทดลอง



(ก) Suspended system



(ข) Biofilm system

รูปที่ 2 การเพาะเลี้ยงสำหรับขนาดเล็กด้วยน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 ลักษณะสมบัติของน้ำทางเคมี

ทำการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก ทั้งก่อนเข้าระบบบำบัด

และในวันที่ 2 4 7 9 11 และ 14 ของการบำบัดด้วยสำหรับขนาดเล็ก โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย เนื่องจากสำหรับขนาดเล็กมีอัตราการเจริญเติบโตที่ดี การวิเคราะห์พารามิเตอร์อ้างอิงตาม Standard Methods [14] ได้แก่ พีเอช (pH) หรือความเป็นกรด-ด่าง ที่เคเอ็นไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้ (Dissolved TKN-N) ฟอสเฟตฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ (Dissolved PO_4^{3-} -P) และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีที่ละลายน้ำได้ (Dissolved COD) หลังจากเก็บตัวอย่างน้ำเสียแล้ว ทำการตรวจวัดค่าพีเอชทันที สำหรับวิธีการวิเคราะห์สารที่ละลายน้ำได้ ทำได้โดยการนำตัวอย่างน้ำเสียไปปั่นด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นความเร็วและระยะเวลาที่สามารถแยกตะกอนออกจากสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมา [9] หลังจากนั้นทำการแยกเฉพาะสารละลายออก แล้วจึงวิเคราะห์ปริมาณ TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่เหลือในสารละลาย

3.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P

และ COD

ตรวจวัดความเข้มข้นของ TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ ทั้งก่อนและหลัง (วันที่ 14) ของการบำบัดด้วยสำหรับขนาดเล็ก แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ของสำหรับขนาดเล็ก จากสมการ (1) [15]

$$\eta_x = \frac{(C_{x,in} - C_{x,out}) * 100}{C_{x,in}} \quad (1)$$

โดยที่ η_x คือ ประสิทธิภาพการกำจัดของสาร x (ร้อยละ) และในการศึกษารั้งนี้ x ได้แก่ สาร TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ สำหรับ $C_{x,in}$ คือความเข้มข้นของสาร x ก่อนเข้าสู่ชุดการทดลองหรือก่อนเข้าระบบบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ $C_{x,out}$ คือความเข้มข้นของสาร x หลังออกจากชุดการทดลองหรือหลังการบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.5.3 อัตราการผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม

ทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์มด้วยการใช้ข้อช้อนขูดบนแผ่นตัวกลางที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ในชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กทุกๆ 7 และ 14 วัน ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในทุกๆ 14 วัน โดยเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในช่วงเวลากลางวัน หลังจากนั้นนำชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กมาชั่งน้ำหนักหาปริมาณสาหร่ายขนาดเล็กเปียก (Wet weight) แล้วจึงนำไปหาปริมาณน้ำหนักสาหร่ายขนาดเล็กแห้ง โดยการนำชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กเปียกมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นให้นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กแห้ง จากสมการ (2) [9], [13]

$$Production\ rate_{DW} = \frac{Yield_{DW} * V_{total}}{Cultivation\ time} \quad (2)$$

โดยที่ $Production\ rate_{DW}$ คือ อัตราผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กแห้ง (กรัม/น้ำหนักแห้งต่อวัน) $Yield_{DW}$ คือ ผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กแห้ง (กรัม/น้ำหนักแห้งต่อลิตร) V_{total} คือ ปริมาตรใช้งานทั้งหมดสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก (ลิตร) และ $Cultivation\ time$ คือ ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในแต่ละรอบ (วัน)

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ประสิทธิภาพการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD และลักษณะน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก

ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ ซึ่งเป็นธาตุอาหารและสารอินทรีย์ที่สาหร่ายขนาดเล็กและแบคทีเรียสามารถนำไปใช้ได้ทันที [12], [15] ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกได้สูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยในการ

กำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้เท่ากับร้อยละ 48.44 และ 90 ตามลำดับ รองลงมาด้วยระบบแขวนลอย ที่สามารถกำจัดได้ที่ค่าเฉลี่ยร้อยละ 42.40 และ 81 ตามลำดับ ในขณะที่ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) สามารถกำจัดได้น้อยที่สุด ที่ค่าเฉลี่ยร้อยละ 37.35 และ 78 ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Khiewwijit et al. [9] ที่พบว่าระบบตรึงฟิล์ม สามารถกำจัดสาร TKN-N และ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้ในน้ำทิ้งที่ได้จากการหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจนของน้ำเสียฟาร์มสุกรได้สูงกว่าระบบแขวนลอย เนื่องจากการใช้ระบบตรึงฟิล์มช่วยลดข้อจำกัดปริมาณแสงที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กและเพิ่มปริมาณการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 mass transfer) [16]-[17] สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัด COD ที่ละลายน้ำได้ซึ่งพบระหว่างเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก เกิดจากการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ปะปนมากับน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก ซึ่งจะอภิปรายผลเพิ่มเติมในหัวข้อต่อไป

นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของ TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ในน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็กทั้ง 3 ระบบ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) สามารถผลิตน้ำทิ้งที่มีคุณภาพดีกว่าระบบแขวนลอยและระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) ซึ่งน้ำทิ้งที่ได้จากระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าเฉลี่ยของ TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ เท่ากับ 54.13 39.8 และ 518 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม [18] พบว่าความเข้มข้นของค่าซีโอดีในน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยการใช้สาหร่ายขนาดเล็กยังมีค่าเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด (ค่าซีโอดีรวมทั้งหมด ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ในขณะที่ค่าที่เคเอ็นไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด (ค่าที่เคเอ็นไนโตรเจน ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าฟอสฟอรัสอยู่ระหว่าง 5.5 ถึง 9.0) ดังนั้น จากคุณภาพของน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยการใช้สาหร่ายขนาดเล็ก จึงยังไม่เหมาะที่จะปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือสิ่งแวดล้อมโดยตรง และควรบำบัดด้วยวิธีธรรมชาติอีกครั้งหนึ่ง เช่น การใช้บึงประดิษฐ์หรือบ่อปรับเสถียร [7]-[8] เพื่อให้ระบบธรรมชาติย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งต่อไป

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD หลังจากการบำบัดของแต่ละชุดการทดลอง

ระบบการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด* (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นหลังจากการบำบัด**,**
1. ชุดการทดลองที่ 1: ระบบแขวนลอย		
Dissolved TKN-N	42 ± 2	59.7 ± 4.3
Dissolved PO_4^{3-} -P	40 ± 3	42.8 ± 6.4
Dissolved COD	81 ± 4	968 ± 315
pH	-	8.53 ± 0.27
2. ชุดการทดลองที่ 2: ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14)		
Dissolved TKN-N	48 ± 3	54.1 ± 3.2
Dissolved PO_4^{3-} -P	44 ± 4	39.8 ± 5.3
Dissolved COD	90 ± 2	518 ± 160
pH	-	8.64 ± 0.31
3. ชุดการทดลองที่ 3: ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14)		
Dissolved TKN-N	37 ± 3	65.3 ± 3.2
Dissolved PO_4^{3-} -P	35 ± 4	46.0 ± 6.1
Dissolved COD	78 ± 6	1,095 ± 324
pH	-	7.45 ± 0.35

หมายเหตุ: *ค่าเฉลี่ยได้จากการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในแต่ละระบบรวม 3 รอบ รอบละ 14 วัน, **หน่วย: มิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้นฟอสฟอรัส ไม่มีหน่วย

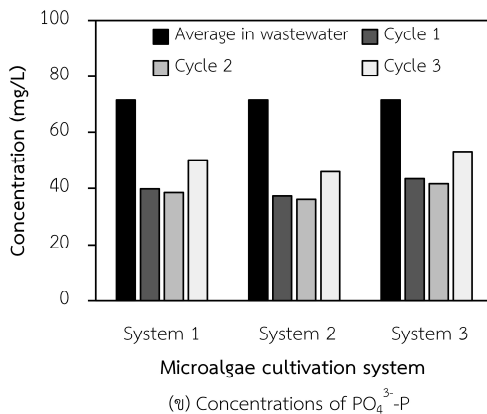
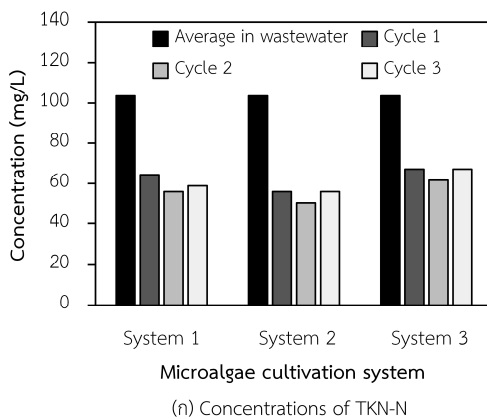
4.2 ผลการตรวจความเข้มข้น TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD และค่าฟอสเฟตระหว่างการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก

4.2.1 TKN-N และ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้

ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก โดยไนโตรเจนใช้ในกระบวนการเกิดเมตาบอลิซึมภายในเซลล์สาหร่ายขนาดเล็ก ส่วนฟอสฟอรัสมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการถ่ายเทพลังงานและการสร้างกรดนิวคลีอิก [12] ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นของ TKN-N และ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้ในน้ำเสียก่อนเข้าบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดทั้ง 3 ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีความเข้มข้นของ TKN-N และ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้ในแต่ละรอบน้อยที่สุด ซึ่งความเข้มข้นของ TKN-N ที่ละลายน้ำได้มีค่าเท่ากับ 56.0 50.4 และ 56.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรอบที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3ก) และมีความเข้มข้นของ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้ มีค่าเท่ากับ 37.3 36.1 และ 45.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรอบที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3ข) ในขณะที่ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) มีความเข้มข้นของ TKN-N และ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้ในน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดของแต่ละรอบการทดลองมากที่สุด

จากผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นของการออกแบบระบบและการเลือกระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัด TKN-N และ PO_4^{3-} -P เนื่องจากในระบบแขวนลอย แสงแดดที่ส่องลงไปในระบบเพื่อใช้ในการกระบวนการสังเคราะห์แสงอาจจะส่องได้ไม่ทั่วถึงโดยเฉพาะบริเวณด้านล่างสุดของระบบ นอกจากนั้น ยังจำกัดการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณด้านล่างของระบบอีกด้วย ในขณะที่เมื่อใช้ระบบตรึงฟิล์ม สาหร่ายขนาดเล็กจะเจริญเติบโตบนแผ่นตัวกลางที่อยู่บริเวณผิวน้ำ ทำให้ลดข้อจำกัดของปริมาณแสงแดดและการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลต่อปริมาณการผลิต

ชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่สูงกว่าระบบแขวนลอย [16]-[17], [19] อย่างไรก็ตาม การใช้ระบบตรึงฟิล์มควรทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 และ 14 ของการบำบัด เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด TKN-N และ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ เนื่องจากการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กเฉพาะในวันที่ 14 ของการบำบัด ส่งผลให้ชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กมีความหนาแน่นเกินไป และทำให้จำกัดอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กที่อยู่บริเวณชั้นล่าง เพราะแสงแดดส่องลงไปไม่ถึงชั้นล่างของแผ่นตัวกลาง [13]

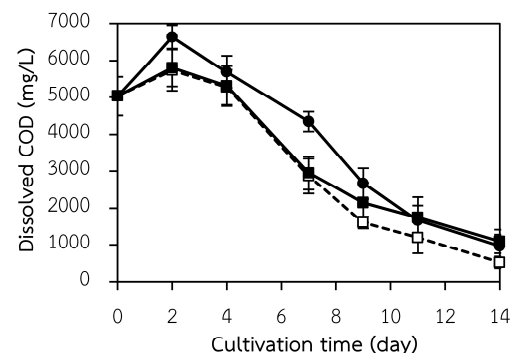


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของ TKN-N และ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ในน้ำเสียและน้ำทิ้งหลังการบำบัดของแต่ละชุดการทดลอง

โดย System 1 ระบบแขวนลอย System 2 ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) และ System 3 ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14)

4.2.2 สารอินทรีย์ในรูปของ COD ที่ละลายน้ำได้

ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารอินทรีย์ในรูปของ COD ที่ละลายน้ำได้ ระหว่างการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกทั้ง 3 ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าใน 2 วันแรกของการบำบัด ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ COD ที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในระบบแขวนลอย ซึ่งพบว่ามีค่า COD ที่ละลายน้ำได้ก่อนการบำบัด เท่ากับ 5,036 มิลลิกรัมต่อลิตร และในวันที่ 2 เพิ่มขึ้นเป็น 6,629 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กชนิดผสมอยู่ในช่วงการปรับตัวเข้าสู่สภาวะแวดล้อมใหม่ ทำให้หัวเชื้อบางส่วนตายลงและส่งผลต่อการเพิ่มของปริมาณ COD ที่ละลายน้ำได้ในระบบ [20] แต่หลังจากวันที่ 2 ไปจนถึงวันที่ 14 ของการบำบัด พบว่าทั้ง 3 ระบบ ความเข้มข้นเฉลี่ยของ COD ที่ละลายน้ำได้มีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ปะปนมากับน้ำเสียช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์



รูปที่ 4 ความเข้มข้นเฉลี่ยของ COD ที่ละลายน้ำได้ ระหว่างการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก โดยใช้ (●) ระบบแขวนลอย (□) ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) และ (■) ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14)

จากตัวอย่างรายงานของ Mujtaba et al. และจากกรมควบคุมมลพิษ [21]-[22] พบว่าสาหร่ายขนาดเล็กกับแบคทีเรียสามารถทำงานร่วมกันได้ โดยเฉพาะในระบบของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางธรรมชาติที่มักพบสาหร่ายขนาดเล็กเจริญเติบโตอยู่

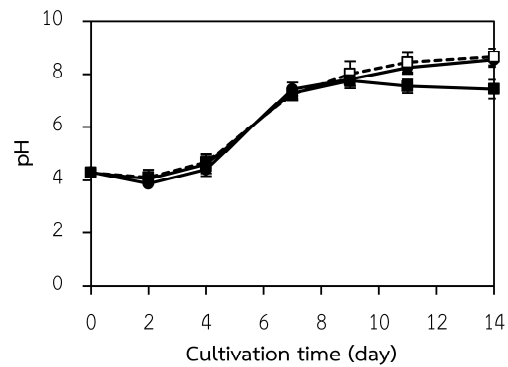
บริเวณผิวน้ำ โดยสาหร่ายขนาดเล็กจะอาศัยสารในโตรเจน ฟอสฟอรัสและคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ผลจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กจะได้ออกซิเจนซึ่งสามารถใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียแบบใช้ออกซิเจนได้ โดยเฉพาะสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีที่ละลายน้ำได้ที่แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ได้โดยตรง และผลจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์สำหรับใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กต่อไป

นอกจากนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด COD ที่ละลายน้ำได้ในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) และในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) พบว่าในช่วง 7 วันแรกของการบำบัด ความเข้มข้นเฉลี่ยของ COD ที่ละลายน้ำได้มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 ระบบ คือในวันที่ 7 ของการบำบัด ความเข้มข้นเฉลี่ย COD ที่ละลายน้ำได้ มีค่าเท่ากับ 2,865 และ 2,947 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่หลังจากระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) ทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 ของการบำบัด พบว่าปริมาณ COD ที่ละลายน้ำได้มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและความเข้มข้นเฉลี่ย COD ที่ละลายน้ำได้หลังจากผ่านการบำบัด มีค่าเท่ากับ 518 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ที่ละลายน้ำได้ลดลงอย่างชัดเจนและความเข้มข้นเฉลี่ย COD ที่ละลายน้ำได้หลังจากผ่านการบำบัด มีค่าเท่ากับ 1,095 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กและการผลิตออกซิเจนที่น้อยลง ทำให้จำกัดอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่อาศัยออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ [13] สอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในระบบ ซึ่งจะกล่าวต่อไป

4.2.3 ค่าพีเอชหรือความเป็นกรด-ด่าง

ค่าพีเอช (pH) หรือความเป็นกรด-ด่างของทั้ง 3 ระบบที่บำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก มีความสัมพันธ์ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก และผลของ

การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชระหว่างการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ยพีเอช (pH) ระหว่างการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก โดยใช้ (●) ระบบแขวนลอย (□) ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) และ (■) ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14)

จากผลการทดลอง พบว่าสาหร่ายขนาดเล็กสามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก โดยเฉพาะหลังจากวันที่ 4 ของการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก เนื่องจากน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก มีค่าเฉลี่ยพีเอชเท่ากับ 4.29 (ดังแสดงในตารางที่ 1) หรือมีสภาวะความเป็นกรด ในขณะที่สาหร่ายขนาดเล็กส่วนใหญ่สามารถเจริญเติบโตได้ดี ที่ช่วงพีเอชมีค่าอยู่ระหว่าง 6-10 [23] อย่างไรก็ตาม มีสาหร่ายขนาดเล็กบางชนิดที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะความเป็นกรด ที่ช่วงพีเอชมีค่าอยู่ระหว่าง 3-5 หรือแม้แต่ในสภาวะที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 3 [24]-[25] ดังนั้นในช่วง 4 วันแรกของการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก หัวเชื้อเริ่มต้นของสาหร่ายขนาดเล็กชนิดผสมที่ใส่ลงไปจะเข้าสู่ในช่วงการปรับตัวให้เข้ากับอาหารและสิ่งแวดล้อมใหม่ ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า ระยะพักตัว (Lag phase) ส่งผลให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของทั้ง 3 ระบบ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก แต่หลังจากวันที่ 4 ถึง 7 ของการบำบัด พบว่าค่าเฉลี่ยพีเอชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในทั้ง 3

ระบบ ทั้งนี้เนื่องจากสารอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ร่วมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็ก จึงทำให้ปริมาณสารละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำซึ่งอยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิกมีปริมาณลดลง และส่งผลทำให้ค่าเฉลี่ยพีเอชเพิ่มขึ้น [25]

นอกจากนั้น ผลของค่าพีเอช ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าพีเอชจากวันที่ 9 ถึง 14 ของการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบแวนลอยและระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จาก 7.82 เป็น 8.53 ในระบบแวนลอยและจาก 8.01 เป็น 8.64 ในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กอยู่ในช่วงระยะคงที่ (Stationary phase) ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการตายเท่ากัน ในขณะที่ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) มีค่าเฉลี่ยพีเอชลดลงจากพีเอช 7.77 เป็น 7.45 ในวันที่ 9 และ 14 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่ระบบบำบัดไม่มีการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 ซึ่งความหนาของชั้นชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้น ทำให้แสงแดดส่องลงไปไม่ถึงชั้นล่างของแผ่นตัวกลางและจำกัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก สอดคล้องกับ Khiewwijit et al. [9] ที่ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งที่ได้จากการหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจนของน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสาหร่ายขนาดเล็กและทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กทุกๆ 14 วัน พบว่าพีเอชในวันที่ 14 ของการบำบัดด้วยระบบตรึงฟิล์ม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.03 ในขณะที่ระบบแวนลอย มีค่าเฉลี่ยพีเอชสูงถึง 8.95 เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชกับระยะเวลาของการบำบัดน้ำเสียด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก พบว่าจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์มทั้งในระหว่างบำบัดและหลังจากหยุดระบบ เพื่อช่วยลดความหนาของชั้นชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้น

4.3 อัตราการผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม

เมื่อพิจารณาผลผลิตสาหร่ายขนาดเล็กเปียกและแห้งที่เก็บเกี่ยวได้ในระบบตรึงฟิล์ม พบว่ามีปริมาณน้ำและอัตราผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กของทั้ง 2 ระบบ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำและอัตราผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็กเปียกและแห้งในระบบตรึงฟิล์ม

พารามิเตอร์	ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14)*	ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14)*
ผลผลิตของสาหร่ายขนาดเล็กเปียกที่ได้ต่อพื้นที่เพาะปลูก (กรัมน้ำหนักเปียกต่อตารางเมตรต่อวัน)	17.81	18.56
ผลผลิตของสาหร่ายขนาดเล็กแห้งที่ได้ต่อพื้นที่เพาะปลูก (กรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตรต่อวัน)	6.39	7.43
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	63.39	60.49
อัตราผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก (กรัมน้ำหนักแห้งต่อวัน)	1.02	1.19

หมายเหตุ: *ค่าเฉลี่ยได้จากการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในแต่ละระบบรวม 3 รอบ รอบละ 14 วัน

จากตารางที่ 3 พบว่าอัตราผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าน้อยกว่าในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.02 กรัมน้ำหนักแห้ง

ต่อวัน และ 1.19 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อวัน ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กที่เหลืออยู่ หลังจากเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 มีปริมาณน้อย ส่งผลให้ชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็ก ที่เก็บเกี่ยวได้ในวันที่ 14 มีปริมาณน้อยกว่าในระบบ ตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) อย่างไรก็ตาม จากผล การกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ (ดังแสดงในตารางที่ 2) แสดงให้เห็นชัดเจนว่าระบบ ตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีประสิทธิภาพ ในการบำบัดน้ำเสียได้สูงกว่าระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยว ในวันที่ 14)

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะให้ดำเนินการ เก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กให้เหลือเพียง ครึ่งหนึ่งของพื้นที่แผ่นตัวกลางในวันที่ 7 และเก็บเกี่ยว ทั้งหมดในวันที่ 14 ของการบำบัด เพื่อเพิ่มอัตรา ผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) นอกจากนั้น จากผลของ การทดลอง พบว่าปริมาณน้ำของผลผลิตชีวมวล สาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 63.39 ซึ่งมีค่า ใกล้เคียงกับระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) ที่มี ค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 60.49 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบแขวนลอยที่ผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก มีปริมาณน้ำสูงได้มากถึงร้อยละ 99 [17], [26] พบว่า ชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่ได้จากระบบตรึงฟิล์มมี ปริมาณน้ำต่ำกว่าระบบแขวนลอย เนื่องจากในระบบ ตรึงฟิล์ม สาหร่ายขนาดเล็กเจริญเติบโตอยู่บนแผ่น ตัวกลางที่ใช้และมีเพียงชั้นน้ำบางๆ ปกคลุม ซึ่ง ปริมาณน้ำที่มีค่าต่ำในระบบตรึงฟิล์ม มีผลต่อการนำ ชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการ ผลิตเป็นเชื้อเพลิง เช่น ไบโอดีเซล เพราะชีวมวล สาหร่ายขนาดเล็กสามารถย่อยสลายได้ง่าย [27]

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษา สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กด้วยระยะเวลา 14 วัน สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟ แบบเปียกได้อย่างมีประสิทธิภาพและระบบตรึงฟิล์ม

(เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ ซึ่งสามารถกำจัดได้ร้อยละ 48.44 และ 90 ตามลำดับ ในขณะที่การเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 ทำให้หัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กที่เหลืออยู่มี ปริมาณน้อยและส่งผลทำให้อัตราผลผลิตชีวมวล สาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าน้อยกว่าระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวใน วันที่ 14) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.02 และ 1.19 กรัม น้ำหนักแห้งต่อวัน ตามลำดับ ดังนั้น เพื่อให้เกิดการ พัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ด กาแฟแบบเปียกให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืนต่อไปใน อนาคต จึงควรใช้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กใน ระบบตรึงฟิล์ม โดยเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก ให้เหลือสาหร่ายขนาดเล็กเพียงครึ่งหนึ่งของพื้นที่แผ่น ตัวกลางในวันที่ 7 และเก็บเกี่ยวทั้งหมดในวันที่ 14 ของการบำบัด

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทางมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ที่สนับสนุน เงินทุนจากการดำเนินงานของมูลนิธิโครงการหลวง อีกทั้งคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวบงกช แก้วเมือง และนางสาวพิไลวรรณ ก่องคำ ที่ให้การช่วยเหลือเก็บ ผลการทดลองในการศึกษาค้นคว้า

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Horticulture Research Institute, "Situation in Asian countries", in *Strategic coffee Year 2560-2564*, (in Thai), Department of Agriculture, Bangkok, Thailand, 2017, pp. 13-18.
- [2] S. Roygrong and C. Chumpan. (2018, March 5). The process of quality arabica coffee production of the royal project (in Thai) [Online]. Available: <http://www.royalprojectthailand.com>

- [3] M. Tuiprae, "The development of the process of parchment coffee production in the royal project: Learning center of community enterprise for the process of parchment coffee production," (in Thai), Rajamangala Univ. of Technology Lanna, Chiang Mai, Progress Rep., 2017.
- [4] S. Rattan, A. K. Parande, V. D. Nagaraju, and G. K. Ghiwari, "A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing," *Environ. Sci. Pollut. R.*, vol. 22, no. 9, pp. 6461-6472, 2015.
- [5] G. Schutgens, "Anaerobic treatment of coffee wastewater: A study on monitoring and implementation of biogas at Finca el Socorro, Matagalpa, Nicaragua," M.S. thesis, Dept. Civil Eng. and Geo Sci., Delft Univ. of Technology, The Netherlands, 2011.
- [6] J. C. von Enden and K. C. Calvert, "Review of coffee waste water characteristics and approaches to treatment," German Technical Cooperation Agency. Rep., 2002.
- [7] M. Rossmann, A. T. Matos, E. C. Abreu, F. F. Silva, and A. C. Borges, "Effect of influent aeration on removal of organic matter from coffee processing wastewater in constructed wetlands," *J. Environ. Manage.*, vol. 128, pp. 912-919, 2013.
- [8] M. Rossmann, A. T. de Matos, E. C. Abreu, F. F. e Silva, and A. C. Borges, "Performance of constructed wetlands in the treatment of aerated coffee processing wastewater: Removal of nutrients and phenolic compounds," *Ecol. Eng.*, vol. 49, pp. 264-269, 2012.
- [9] R. Khiewwijit, K. Panyaping, and P. Wongpankamol, "Nutrient removal by suspended and biofilm microalgae for treating the wastewater of agro-industrial pig farm," *Walailak J. Sci. & Tech.*, to be published. Abstract online, Jan. 5, 2018.
- [10] S. Abinandan and S. Shanthakumar, "Challenges and opportunities in application of microalgae (*Chlorophyta*) for wastewater treatment: A review," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 52, pp. 123-132, 2015.
- [11] M. E. Montingelli, S. Tedesco, and A. G. Olabi, "Biogas production from algal biomass: A review," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 43, pp. 961-972, 2015.
- [12] R. Whitton, F. Ometto, M. Pidou, P. Jarvis, R. Villa, and B. Jefferson, "Microalgae for municipal wastewater nutrient remediation: Mechanisms, reactors and outlook for tertiary treatment," *Environ. Technol. Rev.*, vol. 4, no. 1, pp. 133-148, 2015.
- [13] N. C. Boelee, M. Janssen, H. Temmink, L. Taparaviciute, R. Khiewwijit, A. Janoska, C. J. N. Buisman, and R. H. Wijffels, "The effect of harvesting on biomass production and nutrient removal in phototrophic biofilm reactors for effluent polishing," *J. Appl. Phycol.*, vol. 26, no. 3, pp. 1439-1452, 2014.
- [14] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd ed., APHA, American Water Works Association, Water Environment Federation, USA, 2012.
- [15] S. K. Prajapati, P. Kumar, A. Malik, and V. K. Vijay, "Bioconversion of algae to methane and subsequent utilization of digestate for algae cultivation: A closed loop bioenergy generation process," *Bioresour. Technol.*, vol. 158, pp. 174-180, 2014.
- [16] M. Gross, D. Jarboe, and Z. Wen, "Biofilm-based algal cultivation systems," *Appl.*

- Microbiol. Biotechnol.*, vol. 99, no. 14, pp. 5781-5789, 2015.
- [17] Y. Huang, W. Xiong, Q. Liao, Q. Fu, A. Xia, X. Zhu, and Y. Sun, "Comparison of *Chlorella vulgaris* biomass productivity cultivated in biofilm and suspension from the aspect of light transmission and microalgae affinity to carbon dioxide," *Bioresour. Technol.*, vol. 222, pp. 367-373, 2016.
- [18] Industrial Effluent Standard for Industry, Industrial Estate, and Industrial Zone, the Notification of the Ministry of Natural Resources and Environment, Royal Thai Government Gazette, No. 133, Special Section 129 Ngor-Ngoo, Date on June 6, B.E. 2559 (2016), (in Thai), 2016.
- [19] J. Wang, J. Liu, and T. Liu, "The difference in effective light penetration may explain the superiority in photosynthetic efficiency of attached cultivation over the conventional open pond for microalgae," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 8, no. 49, pp. 1-12, 2015.
- [20] R. Gough, P. J. Holliman, G. M. Cooke, and C. Freeman, "Characterisation of algogenic organic matter during an algal bloom and its implications for trihalomethane formation," *Sustainability Water Qual. Ecol.*, vol. 6, pp. 11-19, 2015.
- [21] G. Mujtaba and K. Lee, "Treatment of real wastewater using co-culture of immobilized *Chlorella vulgaris* and suspended activated sludge," *Water Res.*, vol. 120, pp. 174-184, 2017.
- [22] Pollution control department, "Chapter 4: Stabilization ponds for wastewater treatment," in *Manual for wastewater treatment system*, (in Thai), Ministry of Science Technology and Environment, Bangkok, 2000, pp. 1-24.
- [23] J. S. Chang, P. L. Show, T. C. Ling, C. Y. Chen, S. H. Ho, C. H. Tan, D. Nagarajan, and W. N. Phong, "11. Photobioreactors," in *Current developments in biotechnology and bioengineering: Bioprocesses, bioreactors and controls*, C. Larroche, M. A. Sanroman, G. Du, and A. Pandey, Eds. Elsevier, 2017, pp. 313-352.
- [24] H. Gimpler, "Chapter 9: Acidophilic and acidotolerant algae," in *Algal adaptation to environmental stresses*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2001, pp. 259-290.
- [25] B. Zhao and Y. Su, "Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: A review," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 31, pp. 121-132, 2014.
- [26] C. F. Murphy and D. T. Allen, "Energy-water nexus for mass cultivation of algae," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 13, pp. 5861-5868, 2011.
- [27] H. Cao, Z. Zhang, X. Wu, and X. Miao, "Direct biodiesel production from wet microalgae biomass of *Chlorella pyrenoidosa* through *in situ* transesterification," *Biomed Res. Int.*, vol. 2013, pp. 1-6, 2013.