

ประสิทธิภาพการตกตะกอนสาหร่ายขนาดเล็ก *Selenastrum bibraianum*

BPR1107 ด้วยสารเร่งการตกตะกอน

Flocculation efficiency of microalgae *Selenastrum bibraianum*

BPR1107 by flocculants

วราทิติ ดลสุจิต^{1*}, นฤมล บุญกระจ่าง¹ และ ไทหวายว รเลศวิทยาประสิทธิ²

Waratit Donsujit^{1*}, Narumon Boonkrachang¹ and Thaithaworn Lirdwitayaprasit²

บทคัดย่อ

การเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อนำไปสกัดน้ำมันและผลิตไบโอดีเซลสามารถทำได้หลายวิธี โดยงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาในสาหร่ายสีเขียว *Selenastrum bibraianum* BPR1107 ด้วยการใช้สารเคมีเพื่อให้เกิดกระบวนการรวมตะกอนและ ตกตะกอน โดยทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของสารเร่งการตกตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียมซัลเฟต เฟอริกคลอไรด์ และ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ผลการศึกษาพบว่า สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุดเท่ากับ 99.87 ± 0.12 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณ 0.21 กรัมต่อลิตร ในเวลา 60 นาที ส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงที่ต่างกันมีผลต่อ ปริมาณสารที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการตกตะกอน ซึ่งการใช้สารเร่งการตกตะกอนในปริมาณที่มากหรือน้อยเกินไปมีผลทำให้ ประสิทธิภาพการตกตะกอนลดลง ดังนั้นจึงสามารถสร้างสมการพยากรณ์ปริมาณสารที่เหมาะสมของแต่ละความเข้มข้นได้ คือ ปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (กรัมต่อลิตร) = $0.4202OD_{680} - 0.0004$ ($R^2=1$) ซึ่งผลการทดลองใช้ปริมาณสารที่คำนวณได้จากสมการดังกล่าวส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพการตกตะกอนมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ในทุกความเข้มข้นที่ทำการศึกษา

คำสำคัญ: สาหร่ายขนาดเล็ก *Selenastrum* การตกตะกอน สารเร่งการตกตะกอน พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

Abstract

Microalgae biomass can be harvested in several methods for oil extraction and biodiesel production. This study was investigated the green microalgae *Selenastrum bibraianum* BPR1107 using chemicals to achieve coagulation and flocculation processes. Three chemical flocculants (i.e., aluminium sulphate, ferric chloride and polyaluminium chloride) were evaluated for their flocculation efficiency. The results were showed that polyaluminium chloride provided a maximum flocculation efficiency of 99.87 ± 0.12 percent at 0.21 g/L in sedimental time of 60 minutes. The different initial concentration of microalgae culture affected the optimum flocculant dose and flocculation efficiency. In addition, excessive or less use of flocculant dose resulted in a decrease of flocculation efficiency. Therefore, the correlation between each dose of

¹ คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ชลบุรี 20110

¹ Faculty of Agricultural and Natural Resources, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chonburi 20110, Thailand

² คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

² Faculty of Science, Chulalongkorn University

* Corresponding author. E-mail: waratit17@hotmail.com

flocculants and OD_{680} expressed by optimal dose of polyaluminium chloride (g/L) = $0.4202OD_{680} - 0.0004$ ($R^2=1$). The optimal dose was estimated from this function, indicating the flocculation efficiency was more than 99 percent in all studied concentrations of microalgae culture.

Keywords: microalgae, *Selenastrum*, flocculation, flocculants, polyaluminium chloride

บทนำ

ปัจจุบันพลังงานจากถ่านหินและน้ำมันปิโตรเลียมเป็นแหล่งพลังงานที่มีปริมาณจำกัดมีความผันผวนของราคาสูง และการเผาไหม้ของแหล่งพลังงานเหล่านี้ยังส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมทำให้เกิดปัญหาโลกร้อนจากภาวะเรือนกระจก ทำให้ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกเริ่มตระหนักและตื่นตัวในการแสวงหาแหล่งพลังงานทางเลือก เช่น แสงอาทิตย์ ลม ไฮโดรเจน และเชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuel) ฯลฯ โดยเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นพลังงานที่ได้จากสิ่งมีชีวิต สามารถนำมาใช้ในการทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปสำหรับในประเทศไทยมีการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันเป็นหลัก ซึ่งปาล์มน้ำมันเป็นพืชอาหารและเริ่มมีจำนวนจำกัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแหล่งวัตถุดิบจากพืชอื่น ๆ ที่ไม่ใช่พืชอาหารมาผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น เมล็ดสบู่ดำ ละหุ่ง เมล็ดทานตะวัน เมล็ดเรพ เมล็ดกระเทียม เป็นต้น (EPPO, 2014; Srimoon, Darapong, & Kanavong, 2014) โดยประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกเริ่มตระหนักถึงข้อเท็จจริงดังกล่าวและหันมาให้ความสนใจกับการศึกษาวิจัยเรื่องสาหร่ายขนาดเล็ก (microalgae) เพื่อนำมาผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลหรือเชื้อเพลิงทดแทน สามารถลดการเกิดปัญหาในการแย่งส่วนแบ่งทางอาหารหรือเกษตรกรรมจากพืชน้ำมันทั่วไปได้ สาหร่ายขนาดเล็กมีศักยภาพในการให้น้ำมันได้ในปริมาณสูง เนื่องจากภายในเซลล์ของสาหร่ายบางสายพันธุ์มีการสะสมน้ำมันภายในเซลล์ถึง 20-60

เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง (Xiao, Shin, & Dong, 2013) อีกทั้งยังใช้พื้นที่น้อยกว่าการปลูกพืชทั่วไป รวมไปถึงใช้เวลาในการเจริญเติบโตที่สั้นกว่าพืชชั้นสูงโดยสามารถเพิ่มปริมาณเป็นสองเท่าภายในเวลาเพียง 24 ชั่วโมง จึงทำให้สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตหรือชีวมวลได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็วกว่าการปลูกพืชน้ำมันชนิดอื่น (Chisti, 2007) นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายยังช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีประโยชน์มากมาย ทั้งด้านอาหารสำหรับคนและสัตว์ หรือใช้ในด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น แก๊สชีวภาพ เครื่องสำอาง ปุ๋ย และการอัดแท่งเชื้อเพลิงหรือถ่านชีวภาพ เป็นต้น (Jacob-Lopes, Cacia, Lacerda, & Franco, 2008; Mata, Martins, & Caetano, 2010; Gonzalez-Fernandez, & Munoz, 2017; Zhu et al., 2017; Mathimani, & Mallick, 2018; Goh et al., 2019)

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่ายประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่าย การเพาะเลี้ยงขยายขนาดเพื่อผลิตชีวมวลสาหร่าย การเก็บเกี่ยวชีวมวล การสกัดน้ำมัน และการผลิตไบโอดีเซล (Oilgae, 2013; Yousuf, 2020) ซึ่งขั้นตอนการเก็บเกี่ยวชีวมวลนับว่าเป็นขั้นตอนสำคัญที่ต้องดำเนินการต่อจากการเพาะเลี้ยงเพื่อเก็บผลผลิตชีวมวล นำไปสกัดน้ำมันและผลิตไบโอดีเซลต่อไป ขั้นตอนการเก็บเกี่ยวสาหร่ายขนาดเล็กโดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การทำให้สาหร่ายเข้มข้นหรือหนาแน่นสูง (thickening) การชะน้ำออก

(dewatering) และการทำแห้ง (drying) (Richmond, & Becker, 1986; Grima, Belarbi, Acien Fernandez, Medina, & Chisti, 2003; Barros, Gonçalves, Simões, & Pires, 2015) ทั้งนี้การเก็บเกี่ยวสาหร่ายสามารถทำได้หลายวิธีโดยใช้เครื่องมือและวิธีการต่าง ๆ เช่น การปั่นเหวี่ยง การกรอง การตกตะกอนด้วยสารเคมี การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า การตกตะกอนทางชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งวิธีการปั่นเหวี่ยงไม่เหมาะสำหรับการเพาะเลี้ยงในระดับขยายขนาด เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายและการใช้พลังงานค่อนข้างสูงทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง เช่นเดียวกับวิธีการกรองมีค่าใช้จ่ายจากอุปกรณ์สิ้นเปลืองสูง ส่วนวิธีการตกตะกอนทางชีวภาพอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในเซลล์และสามารถเกิดการปนเปื้อนจากสิ่งมีชีวิตอีกชนิดได้ (Barros, Gonçalves, Simões, & Pires, 2015) แต่วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีเป็นวิธีที่น่าสนใจเนื่องจากง่าย รวดเร็ว และไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งเป็นกระบวนการรวมตัวและตกตะกอนทางเคมี (chemical coagulation and flocculation) โดยการใช้สารเร่งการตกตะกอน (flocclulants) จะทำให้สาหร่ายเกาะกันเป็นกลุ่ม เมื่อมีน้ำหนักรวมมากพอก็จะตกตะกอนลงมา รวมตัวเป็นตะกอนชีวมวลสาหร่ายที่มีความหนาแน่นสูงแยกกับน้ำอย่างชัดเจน จากข้อมูลการศึกษาของ de Godos et al. (2011) ได้ทำการแยกชีวมวลสาหร่ายออกจากน้ำด้วยวิธีการสร้างตะกอนและการรวมตะกอน จากอาหารเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่เป็นน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร โดยทำการเปรียบเทียบสารเร่งการตกตะกอนกลุ่มเกลือโลหะ 2 ชนิด คือ FeCl_3 และ $\text{Fe}_4(\text{SO}_4)_3$ กับสารเร่งการตกตะกอนที่เป็นพอลิเมอร์ 5 ชนิด คือ Drewfloc 447,

Flocudex CS/500, Flocusol CM/78, Chemofloc CV/300 และไคโตซาน ผลการศึกษาพบว่า สารทั้งหมดมีประสิทธิภาพการตกตะกอนได้สูงสุดที่ 66-98 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้สารกลุ่มเกลือโลหะปริมาณ 150-250 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อใช้สารกลุ่มพอลิเมอร์ปริมาณ 25-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการตกตะกอนจะต่ำถ้าใช้สารในปริมาณที่มากเกินไป ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการใช้สารเร่งการตกตะกอนที่เป็นพอลิเมอร์จะใช้สารในปริมาณที่น้อยกว่าสารเร่งการตกตะกอนกลุ่มเกลือโลหะ Gorin et al. (2015) ทำการศึกษาการตกตะกอนด้วยสารตกตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ FeCl_3 , polyacrylamide (PAA) และ polyethylnoxide (PEO) โดยพิจารณาจากชีวมวลของสาหร่าย ปริมาณความเข้มข้นของสารตกตะกอน และเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน ทำการศึกษาในสาหร่าย *Chlorella vulgaris* GKV1 ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้สารตกตะกอนผสมระหว่าง FeCl_3 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ PEO 7.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีประสิทธิภาพการตกตะกอน 90 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 5 นาที ส่วน PAA และ PEO มีประสิทธิภาพการตกตะกอนดีที่สุดที่ปริมาณ 0.025 และ 0.015 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยไม่ต้องมีการปรับค่า pH การศึกษาของ Wu et al. (2015) ได้ทำการตกตะกอนสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ด้วยสารเคมีชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ไคโตซาน Polyacrylamide (PAM), $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, NaOH และ HNO_3 ผลการศึกษาพบว่าสารตกตะกอนทั้ง 5 ชนิด มีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป แต่ไคโตซานและ PAM ใช้ในปริมาณน้อยกว่าสารชนิดอื่น แต่ก็มีความสูงกว่าสารอื่นเช่นกัน ส่วน $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ มีราคาถูกกว่าแต่มีปัญหาการตกค้าง

ในชีวมวลของสาหร่าย ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อคนและสัตว์ได้ และอีกทั้งยังไม่เหมาะกับการนำกลับมาเพาะเลี้ยงใช้งานซ้ำอีก ส่วน NaOH และ HNO₃ เป็นสารที่มีราคาถูกกว่าสารอื่นและมีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ที่ปริมาณ 1,400 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังนั้นชนิดของสารเร่งการตกตะกอนที่เหมาะสมกับสาหร่ายแต่ละชนิดจะแตกต่างกันออกไป อีกทั้งควรเป็นสารที่ราคาไม่สูง สามารถใช้ที่ความเข้มข้นต่ำได้ และไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสาหร่ายและสิ่งแวดล้อม (Vandamme, Foubert, Meesschaert, & Muylaert, 2010; Barros, Gonçalves, Simões, & Pires, 2015; Okoro Azimova, Munozb, Hernandezc, & Phand, 2019; Li et al., 2020)

จากข้อมูลพบว่าสาหร่ายขนาดเล็ก *Selenastrum* sp. เป็นสายพันธุ์ที่น่าสนใจและมีศักยภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้ โดยมีปริมาณไขมันสะสมภายในเซลล์ถึง 24-37 เปอร์เซ็นต์ (Mata, Martins, & Caetano, 2010; Mori Bagatini, da Silva, Parrish, & Vieira, 2018; Rocha, Parrish, Lombardi, & Melão, 2018; Chakravarty, & Mallick, 2019) และยังเป็นสายพันธุ์ที่ผู้วิจัยสามารถคัดแยกได้จากอ่างเก็บน้ำบางพระและนำมาเก็บรักษาสายพันธุ์ไว้ที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีสาหร่าย สาขาวิชาประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษานิตของสารเร่งการตกตะกอน ปริมาณของสารเร่งการตกตะกอนที่ใช้ และความเข้มข้นของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงที่เหมาะสมในการตกตะกอนสาหร่ายขนาดเล็ก *S. bibrainum* BPR1107 ในระดับ

ห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับกระบวนการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่เพาะเลี้ยงในระดับมหมวล (large scale) และระดับเชิงพาณิชย์ (commercial scale) ในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อเป็นพลังงานเชื้อเพลิงทดแทนในอนาคตต่อไป

วิธีการศึกษา

สายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กและการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

สายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ *Selenastrum bibrainum* BPR1107 (Donsujit, Khonsue, & Lirdwitayaprasit, 2020) ที่เก็บรักษาสายพันธุ์ไว้ในห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีสาหร่าย สาขาวิชาประมง คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก *S. bibrainum* BPR1107 ในอาหารเหลวสูตร BG11 (Stanier, Kunisawa, Mandel, & Cohen-Bazire, 1971) ปริมาตร 1.50 ลิตร ในขวดแลบฝาเกลียวปริมาตร 2 ลิตร โดยเติมหัวเชื้อสาหร่ายเริ่มต้น (ค่า OD=0.50 ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร) 10 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรอาหารเลี้ยง เพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ ที่ความเข้มแสง 60 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ช่วงเวลาได้รับแสง : ไม่ได้รับแสง คือ 12:12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 26±2 องศาเซลเซียส ให้อากาศตลอดเวลา และทำการเพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 4-5 วัน

การศึกษการตกตะกอนของสาหร่ายขนาดเล็ก *S. bibrainum* BPR1107

การทดลองที่ 1 การศึกษผลของชนิดและปริมาณสารเร่งการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการตกตะกอน

สารเร่งการตกตะกอนที่ใช้ทดลองมี 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) เฟอริกคลอไรด์ (FeCl_3) และพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) ทำการทดลองโดยเตรียมตัวอย่างสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงที่มีค่าการดูดกลืนแสง (optical density: OD) โดยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร เท่ากับ 0.50 ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง ขนาด 100 มิลลิลิตร เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของสารเร่งการตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด โดยแบ่งเป็น 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัมต่อลิตร หลังจากเติมสารตกตะกอนแล้วให้ใช้แท่งแก้วคน

เป็นเวลา 30 วินาที แล้วปล่อยให้สาหร่ายตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำการดูดตัวอย่างส่วนใส่ที่ผ่านการตกตะกอน (บริเวณกึ่งกลางของส่วนใส) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร โดยมีชุดควบคุมเป็นสาหร่ายที่ไม่ผ่านการใส่สารเร่งการตกตะกอน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณประสิทธิภาพการตกตะกอน (flocculation efficiency) ดังสมการ (1) (Kim, La, Ahn, Park, & Oh, 2011; Wu et al., 2012) แล้วหาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวน ด้วยวิธีมาตรฐานทางสถิติ ดังสมการ (1)

$$\text{ประสิทธิภาพการตกตะกอน (เปอร์เซ็นต์)} = \left(1 - \frac{A}{B}\right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงหลังจากการตกตะกอนด้วยสารเคมีแล้ว
B คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงก่อนการตกตะกอน

การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของปริมาณสารเร่งการตกตะกอนที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการตกตะกอน

ตอนที่ 1

เลือกสารเร่งการตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจากผลการทดลองที่ 1 มาทำการทดลอง โดยแบ่งเป็น 20 ความเข้มข้น ได้แก่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 และ 2.0 กรัมต่อลิตร หลังจากเติมสารตกตะกอนแล้วให้ใช้แท่งแก้วคนเป็นเวลา 30 วินาที แล้วปล่อยให้สาหร่ายตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำการดูดตัวอย่างส่วนใส่ด้านบน (บริเวณกึ่งกลางของส่วนใส) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

ตอนที่ 2

นำสารเร่งการตกตะกอนจากตอนที่ 1 มาทำการทดลอง โดยแบ่งเป็น 15 ความเข้มข้น ได้แก่ 0.18, 0.19, 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24, 0.25, 0.26, 0.27, 0.28, 0.29, 0.30, 0.31 และ 0.32 กรัมต่อลิตร หลังจากเติมสารตกตะกอนแล้วให้ใช้แท่งแก้วคนเป็นเวลา 30 วินาที แล้วปล่อยให้สาหร่ายตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำการดูดตัวอย่างส่วนใส่ที่ผ่านการตกตะกอน (บริเวณกึ่งกลางของส่วนใส) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของเวลาการตกตะกอนที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการตกตะกอน

การทดลองหาเวลาการตกตะกอนที่เหมาะสม โดยเลือกสารเร่งการตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและ

ปริมาณที่เหมาะสมที่สุดจากผลการทดลองที่ 2 หลังจากเติมสารตกตะกอนแล้วให้ใช้แท่งแก้วคนเป็นเวลา 30 วินาที แล้วปล่อยให้สาหร่ายตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำการดูดตัวอย่างส่วนใสที่ผ่านการตกตะกอน (บริเวณกึ่งกลางของส่วนใส) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทุก ๆ 15 นาที จนครบ 120 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงต่อประสิทธิภาพการตกตะกอน

เลือกสารเร่งการตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจากผลการทดลองที่ 1 มาทำการทดลองโดยกำหนดให้สาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงที่มีความเข้มข้นปกติ 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.50 ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร จากนั้นปรับความเข้มข้นของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงให้เป็น 25, 50, 75, 125, 150, 175 และ 200 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.125, 0.250, 0.375, 0.625, 0.750, 0.875 และ 1.000 ตามลำดับ สำหรับปริมาณสารเร่งการตกตะกอนที่ใช้ทดลองในแต่ละความเข้มข้นของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงจะคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 ในหน่วยกรัมต่อลิตร หลังจากเติมสารตกตะกอนแล้วให้ใช้แท่งแก้วคนเป็นเวลา 30 วินาที แล้วปล่อยให้สาหร่ายตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำการดูดตัวอย่างส่วนใสที่ผ่านการตกตะกอน (บริเวณกึ่งกลางของส่วนใส) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Windows version 20

สถานที่ทำการทดลอง

สาขาวิชาประมง คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลของชนิดและปริมาณสารเร่งการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการตกตะกอน

สารเร่งการตกตะกอนแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพการตกตะกอนสาหร่ายขนาดเล็ก *S. bibrainum* BPR1107 ที่แตกต่างกัน หลังจากที่มีการใส่สารเร่งการตกตะกอนตามชนิดและปริมาณที่กำหนดลงไปแล้ว จะเกิดการสร้างตะกอนและตกตะกอนที่แตกต่างกัน คือ อะลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอร์ริคคลอไรด์มีการสร้างตะกอนและการรวมตัวของสาหร่ายอย่างช้า ๆ และใช้เวลานานจึงจะสังเกตเห็นการจับกลุ่มกันของเซลล์สาหร่ายที่กันหลอดทดลองได้ ในขณะที่พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีการสร้างตะกอนและการรวมตัวของสาหร่ายอย่างรวดเร็วจนสามารถสังเกตเห็นการจับตัวกันของสาหร่ายได้ในทันที จากการทดลองพบว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุดเท่ากับ 89.20 ± 0.72 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร เฟอร์ริคคลอไรด์มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุดเท่ากับ 16.73 ± 0.64 เปอร์เซ็นต์

ที่ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร และอะลูมิเนียมซัลเฟต มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุดเท่ากับ 10.20 ± 0.20 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณ 4 กรัมต่อลิตร แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดัง (Figure 1)

จากข้อมูลการตกตะกอนของสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ซึ่งจัดอยู่ในชั้น (class) และอันดับ (order) ที่ใกล้เคียงกับสาหร่ายสีเขียว *Selenastrum* sp. มากที่สุด เช่นการศึกษาของ Chen, Wang, Wang, & Wei (2013) ได้ทำการศึกษาการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus* sp. ในการตกตะกอนด้วยสารเคมี ได้แก่ สารอะลูมิเนียมซัลเฟตและสารเฟอริคคลอไรด์ พบว่ามีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ปริมาณ 0.30 และ 0.20 กรัมต่อลิตร (ตามลำดับ) ภายในระยะเวลา 10 นาที เช่นเดียวกับการศึกษาของ Reyes, & Labra (2016) พบว่าการตกตะกอนสาหร่ายสีเขียว *S. spinocus* ด้วยสารอะลูมิเนียมซัลเฟตและสารเฟอริคคลอไรด์ที่ปริมาณ 1.50 และ 7 กรัมต่อลิตร (ตามลำดับ) ทำให้มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุดที่ 99.40 และ 98.40 เปอร์เซ็นต์ (ตามลำดับ) แต่จากการศึกษานี้พบว่าสารทั้งสองชนิดนี้มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุดที่ 10.20 ± 0.20 และ 16.73 ± 0.64 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพการตกตะกอนต่ำกว่าสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ค่อนข้างมาก ทั้งนี้ประสิทธิภาพการตกตะกอนของสารแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สายพันธุ์สาหร่าย ความเข้มข้นของสาหร่ายใน

อาหารเพาะเลี้ยง pH เป็นต้น (Li et al., 2020) นอกจากนี้ปริมาณการแตกตัวเป็นประจุบวกและน้ำหนักโมเลกุลของสารเร่งการตกตะกอนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอน โดยสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยจะทำให้มีความสามารถในการละลายน้ำสูง (Papazi, Markridis, & Divanach, 2010) แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับคุณสมบัติของสารเร่งการตกตะกอนนั้นด้วย นอกจากนี้การทำงานของประจุ +2 และ +3 จะช่วยลดปริมาณประจุลบของอนุภาคแขวนลอยในน้ำได้และทำให้อนุภาคจับตัวกันได้มากยิ่งขึ้น (Shelef, Sukenik, & Green, 1988) ซึ่งเมื่อเติมสารเร่งการตกตะกอนที่นำมาทดลองในงานวิจัยนี้ลงไป ในน้ำ โมเลกุลของสารจะแตกตัวให้ประจุที่แตกต่างกัน คือ อะลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอริคคลอไรด์ เมื่อแตกตัวแล้วจะได้ประจุ +3 ทั้งหมด แต่มีประสิทธิภาพการตกตะกอนค่อนข้างต่ำกว่าสารประเภทพอลิเมอร์ คือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของทั้งอะลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอริคคลอไรด์ที่มีมากกว่าทำให้ความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าและมีผลให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนต่ำกว่าสารในกลุ่มพอลิเมอร์ (Papazi, Markridis, & Divanach, 2010) อีกทั้งพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกสังเคราะห์ให้มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ เมื่อแตกตัวในน้ำนอกจากจะได้ประจุ +3 แล้ว ยังมีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นสาย ทำให้เชื่อมต่อกับอนุภาคของสาหร่ายได้หลายตำแหน่งจึงรวมตัวและตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังทำให้กลุ่มตะกอนที่เกิดขึ้นมีความแน่นและแข็งแรงยิ่งขึ้น

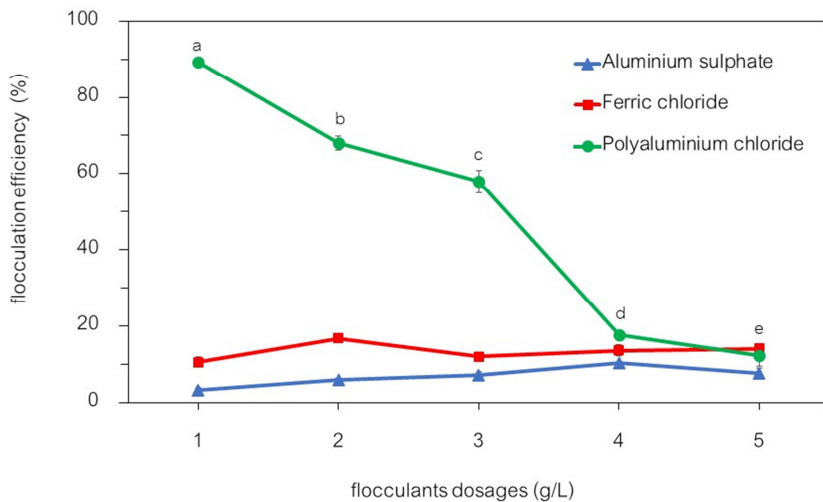


Figure 1 Flocculation efficiency with different dosages of different flocculants for *S. bibraianum* BPR1107 at sedimental time of 60 minutes (mean±SD, n=3). The different superscript letters in each value are significantly different ($p < 0.05$).

ผลของปริมาณสารเร่งการตกตะกอนที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการตกตะกอน

ตอนที่ 1

จากผลการทดลองที่ 1 ทำให้ทราบว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุดเท่ากับ 89.20 ± 0.72 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร แต่ผลดังกล่าวยังไม่สามารถที่จะสรุปได้อย่างชัดเจนว่าสารเร่งการตกตะกอนชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ปริมาณเท่าไร ซึ่งอาจอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือมากกว่า 1 กรัมต่อลิตร ก็เป็นไปได้ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ชัดเจนจึงทำการทดลองขั้นต่อไป โดยปรับความเข้มข้นของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็น 20 ระดับ ให้อยู่ในช่วง 0.10-2 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณ 0.10 กรัมต่อลิตร เมื่อเริ่มใส่สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

ลงไปในหลอดทดลอง สารห่วยจะเริ่มจับตัวกัน และตกลงสู่ก้นหลอดทดลอง แต่มีบางส่วนที่ยังแขวนลอยอยู่ในน้ำด้านบนค่อนข้างมาก ทำให้มีประสิทธิภาพการตกตะกอน 51.87 เปอร์เซ็นต์ แต่ที่ปริมาณ 0.20 กรัมต่อลิตร หลังจากใส่สารแล้ว สารห่วยจับตัวกันและตกลงสู่ก้นหลอดทดลองอย่างรวดเร็วภายใน 1 นาทีแรก ลักษณะตะกอนเกาะกันค่อนข้างแน่นและน้ำด้านบนใส ทำให้มีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ 99.07 ± 0.31 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าปริมาณการใช้สารระดับอื่นแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเป็น 0.30-2.00 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการตกตะกอนลดลง จาก 95.20 ± 0.72 จนถึง 63.87 ± 0.50 เปอร์เซ็นต์ (ตามลำดับ) แสดงดัง (Table 1)

Table 1 Flocculation efficiency with different dosages (coarse) of polyaluminum chloride for *S. bibraianum* BPR1107 at sedimental time of 60 minutes (mean±SD, n=3).

flocculants dosages (g/L)	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
flocculation efficiency (%)	51.87±0.95 ^k	99.07±0.31 ^a	95.20±0.72 ^b	94.67±0.31 ^b	94.33±0.42 ^b
flocculants dosages (g/L)	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
flocculation efficiency (%)	89.07±0.61 ^c	88.47±0.64 ^{cd}	87.67±0.50 ^{cd}	87.93±0.31 ^{cd}	87.33±0.83 ^d
flocculants dosages (g/L)	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
flocculation efficiency (%)	85.53±0.50 ^e	84.07±0.42 ^f	83.40±1.44 ^f	82.27±0.83 ^g	81.67±0.50 ^g
flocculants dosages (g/L)	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
flocculation efficiency (%)	78.53±0.58 ^h	76.67±0.31 ⁱ	77.13±0.61 ⁱ	64.87±0.83 ^j	63.87±0.50 ^j

The different superscript letters for all flocculation efficiency values are significantly different ($p < 0.05$).

ตอนที่ 2

จากผลการทดลองตอนที่ 1 ทำให้ทราบถึงช่วงของปริมาณการใช้ที่เหมาะสมอย่างคร่าว ๆ ของสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ทำให้มีประสิทธิภาพการตกตะกอนมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้สารปริมาณ 0.20-0.30 กรัมต่อลิตร ซึ่งการทดลองหาปริมาณที่เหมาะสมแบบละเอียดทำให้ทราบปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุด ซึ่งสามารถช่วยประหยัดสารเคมีได้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการเลี้ยงสาหร่ายแบบหมวนจากการเพิ่มลดปริมาณสารครั้งละ 0.01 กรัมต่อลิตร โดยให้อยู่ในช่วง 0.18-0.31 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าเมื่อเริ่มใส่สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ปริมาณ 0.18 กรัมต่อลิตร ลงไปในหลอดทดลอง สาหร่ายจะเริ่มจับตัวกันและตกลงสู่ก้นหลอดทดลองทันที น้ำด้านบนค่อนข้างใสเมื่อเทียบกับตัวอย่างสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงที่ไม่ได้ใส่สารเร่งการตกตะกอน เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารครั้งละ 0.01 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการตกตะกอนของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สารละลายด้านบนจะใสมากจนไม่สามารถ

สังเกตเห็นความแตกต่างของแต่ละหลอดทดลองได้ด้วยตาเปล่า ที่ปริมาณสาร 0.18-0.27 กรัมต่อลิตร ลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นจะจับกันแน่นที่ก้นหลอดทดลอง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารมากขึ้นตะกอนที่อยู่ก้นหลอดจะมีลักษณะฟุ้งขึ้นเล็กน้อย จนกระทั่งที่ปริมาณ 0.32 กรัมต่อลิตร เริ่มเห็นตะกอนแขวนลอยในมวลน้ำเล็กน้อย ซึ่งการใช้สารปริมาณในช่วง 0.18-0.32 กรัมต่อลิตร ทำให้มีประสิทธิภาพการตกตะกอนมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ปริมาณ 0.21 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุดเท่ากับ 99.87±0.12 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าปริมาณการใช้สารระดับอื่นแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ประสิทธิภาพการตกตะกอนมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณสารที่ใช้เพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 94.67±0.31 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณ 0.32 กรัมต่อลิตร (Table 2) ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองหาปริมาณที่เหมาะสมแบบหยาบ เมื่อปริมาณสารถึงจุดที่เหมาะสมกับปริมาณสาหร่ายที่แขวนลอยอยู่ในน้ำแล้ว ถ้าใช้ปริมาณสารมากกว่านั้นประสิทธิภาพการตกตะกอนก็จะลดลง เมื่อเติมสารในน้ำจะเกิดการ

ไฮโดรไลต์ทันทีและได้สารประกอบอะลูมิเนียมเชิงซ้อนจำนวนมากซึ่งจะไปดูดติดผิวและทำลายประจุลบของอนุภาคสาหร่ายที่อยู่ในน้ำ เมื่อประจุลบที่ผิวของสาหร่ายหมดไปก็จะสามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่และตกตะกอนลงมา (Nimusomsakul, 1995) การใช้สารในปริมาณช่วง 0.18-0.32 กรัมต่อลิตร สามารถตกตะกอนสาหร่ายโดยมีประสิทธิภาพการตกตะกอนมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และในช่วง 0.18-0.26 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงกว่า 98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์นอกจากมีประสิทธิภาพดีแล้วยังสามารถทำงานได้ดีในช่วงกว้าง (Pernitsky, & Edzwald, 2006) แต่เมื่อปริมาณสารเพิ่มขึ้นพบว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนกลับลดลง ซึ่งในกระบวนการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายด้วยวิธีการตกตะกอนนั้น มีความจำเป็นอย่างมาก

ที่จะต้องทดลองหาปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของสารตกตะกอนกับสิ่งที่ต้องการตกตะกอน เนื่องจากการใช้สารมากหรือน้อยเกินไปอาจทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนไม่ดีเท่าที่ควร (Uduman, Ying, Danquah, Forde, & Hoadley, 2010; Wang, Oshita, & Takaoka, 2021) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้สารตกตะกอนในปริมาณที่มากเกินไปเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์หรือทำให้อนุภาคตกตะกอนนั้นไม่มีความจำเป็นแต่กลับทำให้อนุภาคคอลลอยด์กลับคืนมาสู่ภาวะเสถียรอีกครั้งหนึ่ง (restabilization) จนสามารถแขวนลอยในน้ำต่อไปโดยไม่ตกตะกอนอีกเลย ซึ่งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการตกตะกอนลดลง (Ahmad, Yasin, Derek, & Lim, 2011; Ogbonna, & Nwoba, 2021)

Table 2 Flocculation efficiency with different dosages (fine) of polyaluminum chloride for *S. bibraianum* BPR1107 at sedimental time of 60 minutes (mean±SD, n=3).

flocculants dosages (g/L)	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22
flocculation efficiency (%)	98.00±0.20 ^{cde}	98.20±0.20 ^{cd}	99.13±0.12 ^{ab}	99.87±0.12 ^a	99.40±0.20 ^a
flocculants dosages (g/L)	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27
flocculation efficiency (%)	98.60±0.20 ^{bc}	98.53±0.31 ^{bc}	98.13±0.42 ^{cde}	98.07±0.42 ^{cde}	97.53±0.42 ^{def}
flocculants dosages (g/L)	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
flocculation efficiency (%)	97.40±0.60 ^{ef}	96.87±0.81 ^f	95.27±0.61 ^g	95.00±0.53 ^g	94.67±0.31 ^g

The different superscript letters for all flocculation efficiency values are significantly different ($p < 0.05$).

ผลของเวลาการตกตะกอนที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการตกตะกอน

การทดลองหาเวลาในการตกตะกอนที่เหมาะสม ซึ่งทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขของสารตกตะกอนที่ดีที่สุดและปริมาณที่เหมาะสมที่สุด คือ

สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ปริมาณ 0.21 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า หลังจากใส่สารและกวนน้ำแล้วสาหร่ายจะเริ่มจับตัวเกาะกันแบบไม่เป็นกลุ่มก้อนภายในระยะเวลา 15 นาทีของการทดลอง กลุ่มก้อนของสาหร่ายที่จับตัวกันจะมีขนาดใหญ่ขึ้นมีน้ำหนัก

มากขึ้นและค่อย ๆ ตกลงมายังก้นหลอดทดลอง ลักษณะตะกอนเกาะกันแบบไม่เป็นกลุ่มก้อน การตกตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 99.33±0.12 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 45 นาที และตั้งแต่เวลา 60 นาที เป็นต้นไป มีประสิทธิภาพการตกตะกอนเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (Table 3) และลักษณะของตะกอนแน่นขึ้นตามลำดับ ดังนั้นประสิทธิภาพการตกตะกอนมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเริ่มคงที่เมื่อเวลา 60 นาที เป็นต้นไป การปล่อยให้สาหร่ายตกตะกอนด้วยเวลานานกว่านี้ไม่มีผลทำให้ประสิทธิภาพ

การตกตะกอนเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ซึ่ง Wang, Oshita, & Takaoka (2021) ได้กล่าวว่าเมื่อใส่สารเคมีลงไปใต้น้ำแล้ว สารเคมีจะแตกตัวและเกิดปฏิกิริยาในทันที ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยานี้จะเกิดในช่วงไม่เกินสิบนาทีแรกของการทดลองขึ้นกับชนิดสารเร่งการตกตะกอน ขนาดอนุภาค และสิ่งที่ต้องการตกตะกอน เวลาหลังจากนั้นจะเป็นช่วงของการตกตะกอนของอนุภาคด้วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นลงสู่ก้นของภาชนะ ดังนั้นหากใช้เวลาในการตกตะกอนนานเกินไปก็ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนเพิ่มขึ้นหรืออาจไม่เพิ่มขึ้นเลย

Table 3 Flocculation efficiency of polyaluminum chloride for *S. bibrainum* BPR1107 at different sedimental times (mean±SD, n=3).

sedimental time (minute)	0	15	30	45	60
flocculation efficiency (%)	0.00±0.00 ^a	94.33±0.31 ^d	98.20±0.20 ^c	99.33±0.12 ^b	100.00±0.00 ^a
sedimental time (minute)	75	90	105	120	
flocculation efficiency (%)	100.00±0.00 ^a	100.00±0.00 ^a	100.00±0.00 ^a	100.00±0.00 ^a	

The different superscript letters for all flocculation efficiency values are significantly different ($p<0.05$).

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงต่อประสิทธิภาพการตกตะกอน

เมื่อปรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงให้มีความเข้มข้นที่ 25, 50, 75, 125, 150, 175 และ 200 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นปกติที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ($OD_{680}=0.500$) ลักษณะสีของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงจะเข้มข้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ดัง (Figure 2) เมื่อใช้สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ปริมาณ 0.21 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงปกติ 100 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงกับปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุดในแต่ละความเข้มข้น ดัง (Table 4)

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปริมาณที่มากเกินไปนอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองสารแล้วยังทำให้สาหร่ายตกตะกอนได้ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากปริมาณสารที่มากเกินไปทำให้สาหร่ายที่สูญเสียเสถียรภาพไปแล้วกลับมามีเสถียรภาพอีกจนสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำต่อไปได้ ในทางกลับกันการใช้สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปริมาณ

น้อย (น้อยกว่าปริมาณที่เหมาะสม) กลับทำให้การตกตะกอนสาหร่ายเกิดขึ้นได้มากกว่าจนมีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ใกล้เคียงกับการใช้สารในปริมาณที่เหมาะสม เช่นเดียวกับการศึกษาของ Chen, Wang, Wanga, & Wei (2013); Wu et al. (2015); Gerchman

et al. (2017); Aramaki, Watanabea, Nakajimaa, & Ichikawa (2020); Zhu et al. (2021) ได้กล่าวสรุปว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของชีวมวลหรือสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ปริมาณสารเร่งการตกตะกอนที่ใช้ก็ต้องเพิ่มปริมาณด้วยเช่นกัน

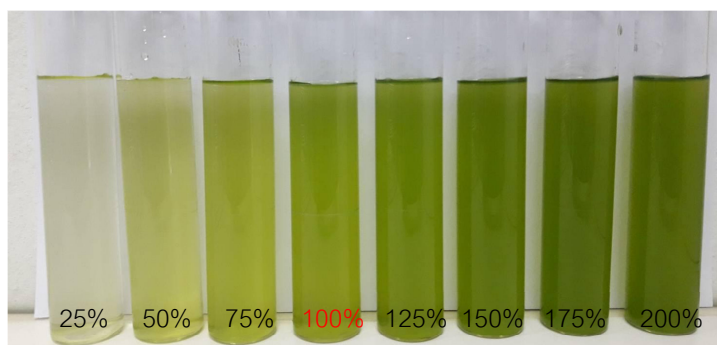


Figure 2 Microalgal culture with different initial concentrations.

Table 4 Flocculation efficiency of polyaluminum chloride for *S. bibrarianum* BPR1107 at different initial microalgal culture concentrations (mean $\pm$ SD, n=3).

microalgal culture concentrations		flocclulants dosages (g/L)	flocculation efficiency (%)
%	OD ₆₈₀		
25	0.125	0.052	99.47 $\pm$ 0.12
50	0.250	0.105	99.27 $\pm$ 0.31
75	0.375	0.157	99.13 $\pm$ 0.31
100	0.500	0.210	99.27 $\pm$ 0.12
125	0.625	0.262	99.20 $\pm$ 0.20
150	0.750	0.315	99.13 $\pm$ 0.31
175	0.875	0.367	99.27 $\pm$ 0.42
200	1.000	0.420	99.33 $\pm$ 0.12

จากผลการทดลองสามารถสร้างสมการพยากรณ์ ปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเมื่อสาหร่ายเริ่มต้นมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่นำมาทดลอง

สำหรับการวิจัยครั้งนี้กำหนดให้ OD₆₈₀ มีค่าอยู่ในช่วง 0.125-1.000 ดังสมการ (2) และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงกับปริมาณ

สารที่เหมาะสมจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง (Figure 3) การใช้สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงสุด แต่เมื่อตัวอย่างสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงถูกปรับให้มีความเข้มข้นลดลงปริมาณสารที่เหมาะสมก็จะเปลี่ยนไป และเช่นกันเมื่อตัวอย่างสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงถูกปรับให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นปริมาณสารที่เหมาะสมก็จะเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งการใช้ปริมาณสารที่คำนวณ

จากสมการนี้จะทำให้มีประสิทธิภาพการตกตะกอนมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ในทุกความเข้มข้นของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงที่ทำการทดลองและไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ทำให้สามารถนำสมการนี้ไปใช้พยากรณ์ปริมาณสารที่ต้องใช้กรณีที่มีความเข้มข้นของสาหร่ายอยู่นอกเหนือขอบเขตของการทดลองได้โดยไม่จำเป็นต้องทดลองหาปริมาณสารที่เหมาะสมอีก ซึ่งจะทำให้สะดวกต่อการใช้งานต่อไป

$$\text{ปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (กรัมต่อลิตร)} = 0.4202\text{OD}_{680} - 0.0004 \quad (R^2 = 1) \quad (2)$$

โดยที่ OD_{680} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยง ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร

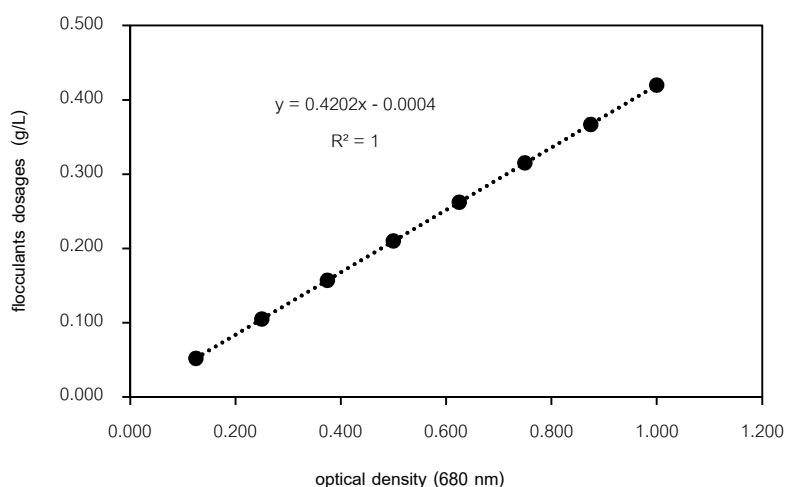


Figure 3 Relationship between flocculation dosages of polyaluminum chloride and optical density (680 nm) for flocculate *S. bibrarianum* BPR1107 at flocculation efficiency > 99 percent.

สำหรับสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) เป็นเกลือสังเคราะห์ของอะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่ถูกพัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูง มีคุณสมบัติในการจับตัวของตะกอนดีกว่าสารส้มหลายเท่าและมีราคาถูกกว่า ผู้ผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่จึงนิยมใช้ PAC ทดแทนสารส้มกันมากขึ้นในปัจจุบัน และนิยม

นำมาใช้บำบัดน้ำเสียเช่นเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือบ้านเรือน สามารถทำงานได้ในช่วง PH กว้างตั้งแต่ 5-8 และมีค่าใช้จ่ายไม่แตกต่างจากการใช้สารสร้างตะกอน กลุ่มเกลือของสารอนินทรีย์โลหะ (Watcharenwong, & Bailuang, 2017; Sudbundit, & Changchai, 2018)

ซึ่งการใช้สารเร่งการตกตะกอนในปริมาณที่เหมาะสม เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในกระบวนการเก็บเกี่ยว ชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่เพาะเลี้ยงในระดับหมวด และระดับเชิงพาณิชย์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลเพื่อเป็นพลังงานเชื้อเพลิงทดแทนในอนาคตต่อไป จึงสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อีกทางหนึ่ง อีกทั้งการเติมสารเร่งการตกตะกอนในปริมาณที่มากเกินไปก็จะทำให้สภาพคอลลอยด์กลับคืนมาสู่ภาวะเสถียรอีกครั้งหนึ่งและแขวนลอยในน้ำต่อไป ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนต่ำ (Tanthulwet, 1996)

สรุป

เมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนเท่ากันพบว่า สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสาหร่ายขนาดเล็ก *S. bibrainum* BPR1107 สูงที่สุดเท่ากับ 99.87 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณ 0.21 กรัม ต่อลิตร ในเวลา 60 นาที นอกจากนี้การใช้สารในปริมาณที่มากหรือน้อยกว่าปริมาณที่เหมาะสมจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนลดลง การใช้สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในการตกตะกอนสาหร่ายจะเกิดการรวมตัวและตกตะกอนของสาหร่ายภายในระยะเวลาอันสั้น การรวมตัวของสาหร่ายจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนทำให้สาหร่ายมีน้ำหนักมากขึ้นและตกตะกอนลงไปอยู่บริเวณก้นหลอดทดลอง ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มระยะเวลาการตกตะกอนมากขึ้นประสิทธิภาพในการตกตะกอนก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน จนกระทั่งเวลา 60 นาที การตกตะกอนจะเริ่มคงที่จนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขของปริมาณสารที่เหมาะสม

การใช้ระยะเวลาการตกตะกอนที่นานเกินไปก็ไม่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนเปลี่ยนแปลง ส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงที่ต่างกันมีผลต่อปริมาณสารที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการตกตะกอน ดังนั้นการตกตะกอนสาหร่ายขนาดเล็ก *S. bibrainum* BPR1107 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ด้วยสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ สามารถสร้างสมการพยากรณ์ปริมาณสารที่เหมาะสมในแต่ละความเข้มข้นคือ ปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (กรัมต่อลิตร) = $0.4202OD_{680} - 0.0004$ โดยที่ OD_{680} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายในอาหารเพาะเลี้ยงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร ซึ่งผลการทดลองใช้ปริมาณสารที่คำนวณได้จากสมการนี้ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพการตกตะกอนมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ในทุกความเข้มข้นที่ทำการทดลอง ดังนั้นการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่เพาะเลี้ยงในระดับหมวดและระดับเชิงพาณิชย์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลเพื่อเป็นพลังงานเชื้อเพลิงทดแทนในอนาคต และสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อีกทางหนึ่ง

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาประมง คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณนายชัชวาลย์ ไมตรี และนางสาวธัญญารัตน์ คนชื่อ ที่ช่วยเหลืองานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, A. L., Yasin, N. H. M., Derek, C. J. C., & Lim J. K. (2011). Optimization of microalgae coagulation process using chitosan. *Chemical Engineering Journal*, 173, 879-882.
- Aramaki, T., Watanabe, M. M., Nakajima, M., & Ichikawa, S. (2020). Bench-scale dehydration of a native microalgae culture by centrifugation, flocculation and filtration in Minamisoma city, Fukushima, Japan. *Bioresource Technology Reports*, 10, 100414.
- Barros, A. I., Gonçalves, A. L., Simões, M., & Pires, J. C. M. (2015). Harvesting techniques applied to microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1489-1500.
- Chakravarty, S., & Mallick, N. (2019). Optimization of lipid accumulation in an aboriginal green microalga *Selenastrum* sp. GA66 for biodiesel production. *Biomass and Bioenergy*, 126, 1-13.
- Chen, L., Wang, C., Wang, W., & Wei, J. (2013). Optimal conditions of different Flocculation methods for harvesting *Scenedesmus* sp. cultivated in an open-pond system. *Bioresource Technology*, 133, 9-15.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology*, 25, 294-306.
- de Godos, I., Guzman, H. O., Soto, R., Garcia-Encina, P. A., Becares, E., Munoz, R., & Vargas, V. (2011). Coagulation/flocculation-Based removal of algal-bacterial biomass from piggy wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 102(2), 923-927.
- Donsujit, W., Khonsue, T., & Lirdwitayaprasit, T. (2020). Growth and fatty acid composition of microalgae *Selenastrum bibrarianum* BPR1107 isolated from Bangpra reservoir, Chonburi province, under laboratory and outdoor condition cultivation. *Burapha Science Journal*, 25(3), 1052-1066. (in Thai)
- EPPO. (2014). *Biodiesel*. Retrieved August 5, 2021, from http://www.eppo.go.th/images/Information_service/Publication/Knowledge/biodiesel.pdf
- Gerchman, Y., Vasker, B., Tavasi, M., Mishael, Y., Kinel-Tahan, Y., & Yehoshua, Y. (2017). Effective harvesting of microalgae: Comparison of different polymeric flocculants. *Bioresource Technology*, 228, 141-146.
- Goh, B. H. H., Ong, H. C., Cheah, M. Y., Chen, W. H., Yu, K. L., & Mahlia, T. M. I. (2019). Sustainability of direct biodiesel synthesis from microalgae biomass: a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 59-74.
- Gonzalez-Fernandez, C., & Munoz, R. (2017). *Microalgae-based biofuels and bioproducts: From feedstock cultivation to end-products*. Duxford: Woodhead.
- Gorin, K. V., Sergeeva, Y. E., Butylin, V. V., Komova, A. V., Pojidaev, V. M., Badranova, G. U., Shapovalova, A. A., Konova, I. A., & Gotovtsev, P. M. (2015). Methods coagulation/flocculation and flocculation with ballast agent for effective harvesting of microalgae. *Bioresource Technology*, 193, 178-184.
- Grima, E. M., Belarbi, E.-H., Acien Fernandez, F. G., Medina, A. R., & Chisti, Y. (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*, 20, 491-515.
- Jacob-Lopes, E., Cacia, L. M., Lacerda, F., & Franco, T. T. (2008). Biomass production and carbon dioxide fixation by *Aphanthece microscopica* Nägeli in a bubble column photobioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 40, 27-34.
- Kim, D.-G., La, H.-J., Ahn, C.-Y., Park, Y.-H., & Oh, H.-M. (2011). Harvest of *Scenedesmus* sp. with bioflocculant and reuse of culture medium for

- subsequent high-density cultures. *Bioresource Technology*, 102, 3163-3168.
- Li, S., Hu, T., Xu, Y., Wang, J., Chu, R., Yin, Z., Mo, F., & Zhu, L. (2020). A review on flocculation as an efficient method to harvest energy microalgae: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 1100-1115.
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 217-232.
- Mathimani, T., & Mallick, N. (2018). A comprehensive review on harvesting of microalgae for biodiesel – key challenges and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9, 1103-1120.
- Mori, C. C., Bagatini, I. L., da Silva, T. G., Parrish, C. C., & Vieira, A. A. H. (2018). Use of fatty acids in the chemotaxonomy of the family Selenastraceae (Sphaeropleales, Chlorophyceae). *Phytochemistry*, 151, 9-16.
- Nimusornsakul, A. (1995). *Reuse of treated water from a bio-rotating disc system through a chemical process with polyaluminum chloride* (Master's thesis). Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Ogbonna, C. N., & Nwoba, E. G. (2021). Bio-based flocculants for sustainable harvesting of microalgae for biofuel production. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110690.
- Oilgae. (2013). *Comprehensive oilgae report, energy from algae: Products, market, processes & strategies*. Tamilnadu: Oilgae.
- Okoro, V., Azimova, U., Munozb, J., Hernandezc, H. H., & Phand, A. N. (2019). Microalgae cultivation and harvesting: Growth performance and use of flocculants - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109364.
- Papazi, A., Markridis, P., & Divanach, P. (2010). Harvesting *Chlorella minutissima* using cell coagulants. *Journal of Applied Phycology*, 22, 349-355.
- Pernitsky, D. J., & Edzwald, J. K., (2006). Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 55(2), 121-141.
- Reyes, J. F., & Labra, C. (2016). Biomass harvesting and concentration of microalgae *scenedesmus* sp. cultivated in a pilot photobioreactor. *Biomass and Bioenergy*, 87, 78-83.
- Richmond, A., & Becker, E. W. (1986). Technological aspects of mass cultivation-a general outline. In A. Richmond (Ed.), *CRC Handbook of microalgae mass culture* (pp. 245-263). Boca Raton: CRC Press.
- Rocha, G. S., Parrish, C. C., Lombardi, A. T., & Melão, M. da G. G. (2018). Biochemical and physiological responses of *Selenastrum gracile* (Chlorophyceae) acclimated to different phosphorus concentrations. *Journal of Applied Phycology*, 30, 2167-2177.
- Shelef, G., Sukenik, A., & Green, M. (1988). *Microalgae harvesting and processing: A literature review SERI/STR-231-2396, UC Category, 61a, DE84013036* (Subcontract report). Haifa, Israel: Technion Research and Development Foundation.
- Srimoon, R., Darapong, P., & Kanavong, V. (2014). Extraction of Alexandrian Laurel (*Calophyllum inophyllum* L.) seed oil for biodiesel production. *RMUTSB Academic Journal*, 2(2), 131-138. (in Thai)
- Stanier, R. Y., Kunisawa, R., Mandel, M., & Cohen-Bazire, B. G. (1971). Purification and properties

- of unicellular blue green algae (Order Chroococcales). *Bacteriology Review*, 35(2), 171-205.
- Sudbundit, A., & Changchai, N. (2018). The paint factory's wastewater: COD removal by chemical precipitation method. *RMUTSB Academic Journal*, 6(2), 171-181. (in Thai)
- Tanthulwet, M. (1996). *Water supply engineering, Volume 1* (3rd ed.). Bangkok: Chulalongkorn University Press. (in Thai)
- Uduman, N., Ying, Q., Danquah, M. K., Forde, G. M., & Hoadley, A., (2010). Dewatering of microalgae cultures: A major bottleneck to algae-based fuel. *Renewable and Sustainable Energy*, 2, 012701/1 – 012701/15.
- Vandamme, D., Foubert, I., Meesschaert, B., & Muylaert, K. (2010). Flocculation of microalgae using cationic starch. *Journal of Applied Phycology*, 22, 525-530.
- Wang, Q., Oshita, K., & Takaoka, M. (2021). Flocculation properties of eight microalgae induced by aluminum chloride, chitosan, amphoteric polyacrylamide, and alkaline: Life-cycle assessment for screening species and harvesting methods. *Algal Research*, 54, 102226.
- Watcharenwong, A., & Bailuang, Y. (2017). *Using of organic coagulant with magnetic coagulant in raw water suspended particle removal for water supply system* (research report). Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Wu, Z., Zhu, Y., Huang, W., Zhang, C., Li, T., Zhang, Y., & Li, A. (2012). Evaluation of flocculation induced by pH increase for harvesting microalgae and reuse of flocculated medium. *Bioresource Technology*, 12, 234-241.
- Wu, J., Liu, J., Lin, L., Zhang, C., Li, A., Zhu, Y., & Zhang, Y. (2015). Evaluation of several flocculants for flocculating microalgae. *Bioresource Technology*, 197, 495-501.
- Xiao, M., Shin, H-J., & Dong, Q. (2013). Advances in cultivation and processing techniques for microalgal biodiesel: a review. *Korea Journal of Chemical Engineering*, 30(12), 2119-2126.
- Yousuf, A. (2020). *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. London: Academic Press.
- Zhu, L., Nugroho, Y. K., Shakeel, S. R., Li, Z., Martinkauppi, B., & Hiltunen, E. (2017). Using microalgae to produce liquid transportation biodiesel: what is next?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 391-400.
- Zhu, L., Pan, G., Xu, H., Kong, L., Guo, W., Yu, J., Mortimer, R. J. G., & Shi, W. (2021). Enhanced chitosan flocculation for microalgae harvesting using electrolysis. *Algal Research*, 55, 102268.