วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

# ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนเตตราไซคลีนด้วยจุลินทรีย์ตะกอนเร่งในรูปเซลล์อิสระ เซลล์ยึดเกาะ และเซลล์ดักติด

# Efficiency of tetracycline - contaminated wastewater treatment by activated sludge microorganisms in free, attached, and entrapped cell forms

พงศธร ทวีธนวาณิชย์[1,2] สุดาวดี ยะสะกะ[3] นฤปวรรต์ พรหมมาวัย[4] ทองปักษ์ ดอนประจำ[2,5]*

[1] สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ 46230

[2] คณะศิปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ 33000

[3] สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000

[4] สาขาวิชาสาธารณสุขศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี 41000

[5] คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

Pongsatorn Taweetanawanit[1,2] Sudawadee Yasaka[3] Narupawan Prommawai[4] Tongpak Donprajum[2,5]*

[1] Division of Environmental Science and Natural Resources, Faculty of Science and Health Technology, Kalasin University, Kalasin, 46230

[2] Faculty of Liberal Arts and Science, Sisaket Rajabhat University, Sisaket, 33000

[3] Division of Environmental Health, Faculty of Public Health, Naresuan University, Phitsanulok, 65000

[4] Division of Health Science, Faculty of Science, Udon Thani Rajabhat University, Udon Thani, 41000

[5] Faculty of Public Health, Khon Kaen University, Khon Kean, 40002

* Corresponding author.

E-mail: tongpak_d@kkumail.com; Telephone: 095-6021587

วันที่รับบทความ 9 พฤศจิกายน 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 16 มีนาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 11 เมษายน 2565
วันที่ตอบรับบทความ 22 เมษายน 2565

**บทคัดย่อ**

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์ตะกอนเร่งในรูปแบบเซลล์อิสระ (FC) เซลล์ยึดเกาะ (AC) และเซลล์ดักติด (EC) ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนเตตราไซคลีน น้ำเสียสังเคราะห์มีซีโอดี 270.33±6.64 mg/L และเตตราไซคลีน 9.25±0.08 mg/L การทดลองนี้ทดสอบในระบบบำบัดรูปแบบกะที่เติมอากาศเป็นเวลา 72 h ผลการศึกษาพบว่าทุกชุดทดลองสามารถกำจัด COD อย่างรวดเร็วในเวลา 24 h (ร้อยละ 36.95 68.97 และ 83.77 ในชุด FC AC และ EC ตามลำดับ) จากนั้นอัตราการกำจัดซีโอดีคงที่ และผลการกำจัดเตตราไซคลีน ร้อยละ 10.36 30.20 และ 36.33 (ชุด FC AC และ EC ตามลำดับ) เนื่องจากเป็นการบำบัดทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ต้องใช้เวลาในการบำบัด และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์ตะกอนเร่งในรูปแบบ FC AC และ EC พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและเตตราไซคลีนสูงที่สุดคือ เซลล์ตะกอนเร่งในรูปแบบ EC การดักติดเซลล์ช่วยป้องกันการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ จากเตตราไซคลีน และแบเรียมแอลจิเนตยังช่วยดูดซับสารอินทรีย์ ส่วนการติดตามความเป็นกรด-เบส พบว่า ความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วง 7.02-8.31 ซึ่งเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ในน้ำเสียเจริญเติบโตได้ และค่าของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง ซึ่งชุดทดลองเซลล์อิสระมีของแข็งแขวนลอยสูงที่สุด ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าเซลล์ดักติดมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีเตตราไซคลีน ปนเปื้อนในน้ำเสียในอนาคต

**คำสำคัญ**

การตรึงเซลล์ สารพิษ ระยะเวลาในการเก็บกัก ยาปฏิชีวนะ

**Abstract**

The purpose of this study is to compare the efficiency of activated sludge cells in free cell (FC), attached cell (AC) and entrapped cell (EC) modes to treat of synthetic wastewater with tetracycline contamination. Synthetic wastewater has contained COD of 270.33±6.64 mg/L and tetracycline of 9.25±0.08 mg/L. The batch experiment was tested under aerobic condition for 72 h. The results showed that all experiments removed COD rapidly within 24 h. (36.95 68.97 and 83.77% for FC, AC, and EC, respectively) and COD was stable thereafter. The tetracycline removal was 10.36, 30.20 and 36.33% (from the test of FC, AC, and EC, respectively), because the treatment process is a biological treatment which relies on microorganisms, causing microorganisms to take time to remove (it takes time to acclimate, and it grows by decomposing organic matter). When comparing the efficiency of the activated sludge cells in FC, AC and EC models, the author found that the highest removal efficiency of COD and tetracycline was the activated sludge cells in the EC model. Cell entrapment was helped to prevent microbial inhibition from tetracycline, and also, the entrapped material absorbs organic matter, thereby, increasing the efficiency of organic removal. As for the trace of pH and Suspended Solid (SS), the author found that the pH was in the range of 7.02-8.31, which was the range of microorganisms in the wastewater could grow, and all experimental sets had no different results. The SS level increased with all trial set. The free cell experimental set had the highest of SS. The higher SS level was due to the effect of free microorganisms which suspended in the system. When the samples were collected and analyzed for the SS level, the amount of SS level was higher. But in the AC and EC, there was an increase in SS caused by the surface of the entrapped material which peeling off, and microorganisms were growing outside the entrapped material. The results of this study suggested that the entrapped cell has the potential to be applied in the future to treat tetracycline contaminated wastewater.

**Keywords**

cell immobilization, toxic substance, hydraulic retention time, antibiotic

## 1. คำนำ

จากอดีตจนถึงปัจจุบันมีการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียที่หลากหลายรูปแบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้น ผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการปนเปื้อนของสารเคมีที่เป็นพิษในองค์ประกอบของน้ำเสีย ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียลดลงหรือเสื่อมประสิทธิภาพ และนอกจากนี้ยังส่งผลให้น้ำทิ้งหลังการบำบัดที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานแพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ [1,2] เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ตัวอย่างของสารเคมีที่มีโอกาสปนเปื้อนมากับน้ำเสีย เช่น ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าหญ้า สารทำความสะอาดห้องน้ำ หรือยาปฏิชีวนะ เป็นต้น ซึ่งการปนเปื้อนของสารเคมีขึ้นอยู่กับลักษณะของกิจกรรม ส่วนความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีนั้นๆ [2]

ปัจจุบันมีการใช้ยาปฏิชีวนะอย่างแพร่หลาย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นยาฆ่าชื้อโรคทั้งในร่างกายของมนุษย์และสัตว์ มีการใช้ยาปฏิชีวนะหลากหลายชนิดเพื่อกำจัดเชื้อโรคในทางการแพทย์และอุตสาหกรรมการเกษตร หนึ่งในยาปฏิชีวนะที่นิยมใช้มากคือ เตตราไซคลีน [3-5] ส่วนใหญ่ใช้เพื่อลดอาการปวด บวม แดง และรู้สึกร้อนจากการอักเสบ เพื่อรักษาโรคในทางปศุสัตว์ เช่น สุกร โค และกระบือ เป็นต้น ภายหลังกระบวนการรักษาทั้งในมนุษย์และสัตว์มักจะมีการขับถ่ายของเสียออกจากร่างกาย [5] ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของเตตราไซคลีนในน้ำเสีย [6,7]

ผลของการใช้เตตราไซคลีนอย่างแพร่หลาย ทำให้ตรวจพบการตกค้างของเตตราไซคลีนในสภาพแวดล้อม เช่น ดิน น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และน้ำดื่ม [8,9] ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ [4,9,10] เนื่องจากเตตราไซคลีนมีผลทำให้จุลินทรีย์ที่ก่อโรคเกิดการดื้อยา [4,11] เมื่อมนุษย์ได้รับเชื้อโรค อาจก่อให้เกิดโรคร้ายแรงได้ โดยมีรายงานผู้เสียชีวิตจากเชื้อโรคที่ดื้อยา 700,000 รายต่อปี [9] เช่นเดียวกับผลกระทบต่อระบบนิเวศที่เตตราไซคลีนมีผลต่อการทำลายพืชน้ำหรือสัตว์น้ำได้ [12] การปนเปื้อนของเตตราไซคลีนในน้ำเสียก่อให้เกิดการ

ทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ในระบบบำบัดน้ำเสีย ส่งผลให้บางระบบที่มีการสร้างไบโอฟิล์มเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียเสื่อมสภาพ [7]

วิธีการที่มีความเป็นไปได้ในการช่วยแก้ไขปัญหาของจุลินทรีย์ถูกยับยั้งการทำงานด้วยเตตราไซคลีนในระบบบำบัดน้ำเสียคือ การตรึงเซลล์ (Cell Immobilization) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีการยึดเซลล์ไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ด้วยวิธีการที่หลากหลาย เช่น การกักเซลล์ไว้ในพอลิเมอร์ หรือวัตถุที่ให้เซลล์เกาะ เป็นต้น วิธีการตึงเซลล์จะไม่ทำปฏิกิริยากับเซลล์จุลินทรีย์โดยตรง ทำให้เซลล์จุลินทรีย์ยังคงมีประสิทธิภาพเช่นเดิม และการตึงเซลล์ทำให้เกิดการปกป้องโครงสร้างของเซลล์จากสารพิษส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้นานขึ้น [13-15] และสามารถนำเซลล์จุลินทรีย์ที่ถูกตรึงกลับมาใช้ซ้ำได้อีกหลายครั้ง [16] นอกจากนี้ยังพบการเพิ่มขึ้นของจำนวนจุลินทรีย์ภายในพอลิเมอร์อีกด้วย จากข้อดีดังกล่าว จึงมีการนำเซลล์ตรึงมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรมด้วยวิธีการที่เป็นที่นิยมคือ เซลล์ดักติด (Entrapped Cell) และเซลล์ยึดเกาะ (Attached Cell) โดยใช้แบเรียมแอลจิเนตซึ่งเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพสูง คงทนต่อสภาวะทางกลและทางเคมีเป็นสารในการตรึงเซลล์ [17]

แบเรียมแอลจิเนตเป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในการตรึงเซลล์ เนื่องจากเป็นสารเคมีที่มาจากธรรมชาติ และไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ สามารถใช้ในการป้องกันจุลินทรีย์จากสารพิษได้ด้วยการตรึงเซลล์ไว้กับวัสดุ วิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ 1) เซลล์ยึดเกาะ เป็นวิธีที่ทำให้จุลินทรีย์เกาะที่ผิวของวัสดุตรึง ส่งผลให้มีโอกาสสัมผัสกับสารอาหารและอากาศได้ดี และเป็นการกักจุลินทรีย์ไว้ในระบบ ทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่โอกาสในการสัมผัสสารพิษก็มีมากเช่นเดียวกัน [18] และ 2) เซลล์ดักติด เป็นวิธีที่ทำให้จุลินทรีย์กระจายอยู่ในวัสดุตรึง ซึ่งช่วยให้จุลินทรีย์ที่อยู่ภายในถูกปกป้องไม่ให้สารพิษที่มีความเข้มข้นสูงมาสัมผัสได้และเป็นการกักจุลินทรียไว้ในวัสดุตรึง แต่มีโอกาสในการสัมผัสสารอาหารและอากาศต่ำกว่าเซลล์ยึดเกาะ [18] จากข้อดีและข้อจำกัดของทั้งสองวิธีส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดในแต่ละวิธีไม่แน่นอน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อหาความเหมาะสมของวิธีการตรึงเซลล์ในการเพิ่มศักยภาพการกำจัดสารอินทรีย์

ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนเตตราไซคลีนด้วยจุลินทรีย์ตะกอนเร่งในรูปเซลล์อิสระ เซลล์ยึดเกาะ และเซลล์ดักติด เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนเตตราไซคลีนในอนาคตต่อไป

## 2. วิธีดำเนินงานวิจัย

### 2.1 การเตรียมแบเรียมแอลจิเนต

การเตรียมแบเรียมแอลจิเนตเริ่มต้นจากเตรียมสารละลายโซเดียมแอลจิเนต (Fluka, Singapore) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร หลังจากนั้นหยดส่วนผสมลงในสารละลายแบเรียมคลอไรด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ส่วนผสมจะแข็งตัวเป็นเม็ดเจลทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-5 มิลลิเมตร จากนั้นแช่แบเรียมแอลจิเนตไว้ให้แข็งตัวในสารละลายแบเรียมคลอไรด์เป็นเวลา 1 h แล้วกรองสารละลายออกจะได้แบเรียมแอลจิเนต (BA) ที่พร้อมใช้งานเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส [13]

### 2.2 การเตรียมเซลล์อิสระ

จุลินทรีย์ตั้งต้นเป็นจุลินทรีย์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ยี่ห้อ NBI EV1 (NANOBIO EV1) นำจุลินทรีย์มาเพาะเลี้ยงและปรับสภาพในห้องปฏิบัติการก่อนเริ่มการทดลองเป็นระยะเวลา 2 เดือน โดยใช้ถังขนาด 10 L สำหรับเลี้ยงและปรับสภาพจุลินทรีย์ จำนวน 3 ถัง เติมกากน้ำตาลอัตราส่วนกากน้ำตาล 1 mL : น้ำกลั่น 1 L เดินระบบแบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor; SBR) ที่มีออกซิเจนละลายมากกว่า 1 mg/L เวลากักน้ำ 1 วัน และเวลากักตะกอน 30 วัน

เซลล์อิสระเตรียมจากจุลินทรีย์ตั้งต้นในถังเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ โดยแยกจุลินทรีย์ออกจากอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 7,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเทอาหารเลี้ยงเชื้อออกจากตะกอนจุลินทรีย์เข้มข้น แล้วจึงเจือจางตะกอนจุลินทรีย์เข้มข้นและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน ปริมาตร 10 mL

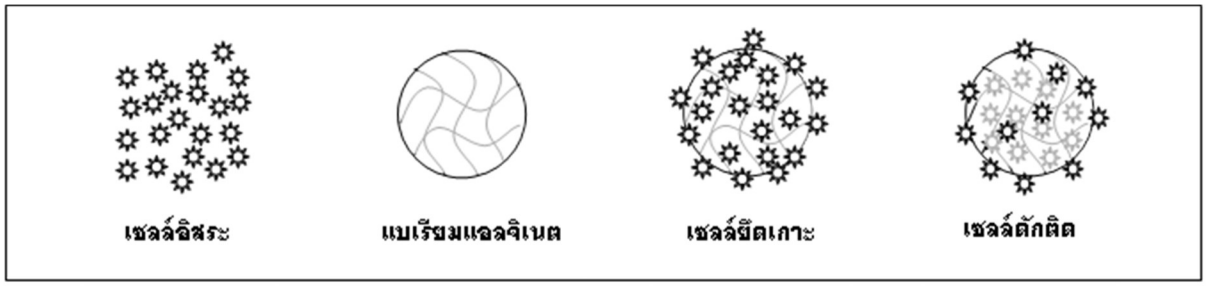
### 2.3 การเตรียมเซลล์ดักติด

เตรียมสารละลายโซเดียมแอลจิเนต (Fluka, Singapore) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมกับจุลินทรีย์ด้วย

อัตราส่วนจุลินทรีย์เข้มข้น (ที่ได้จากข้อ 2.2) ต่อสารโซเดียมแอลจิเนต เท่ากับ 1:10 โดยปริมาตร หลังจากนั้นหยดส่วนผสมลงในสารละลายแบเรียมคลอไรด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ส่วนผสมจะแข็งตัวเป็นเม็ดเจลทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-5 mL จากนั้นแช่เม็ดเซลล์ดักติดไว้ให้แข็งตัวในสารละลายแบเรียมคลอไรด์เป็นเวลา 1 h แล้วกรองสารละลายออกจะได้เซลล์ดักติดที่พร้อมใช้งาน [13] (ดังรูปที่ 1)

**2.4 การเตรียมเซลล์ยึดเกาะ**

นำวัสดุตรึงที่ได้จากข้อ 2.1 แช่ในเซลล์อิสระจากข้อ 2.2 ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ 1,000 mg/L ปริมาตร 500 mL เติมอากาศเป็นเวลา 15 วัน จากนั้นกรองเซลล์ยึดเกาะและล้างด้วยน้ำกลั่น ได้เซลล์ยึดเกาะที่พร้อมใช้งาน [3] (ดังรูปที่ 1)




**รูปที่ 1** เซลล์อิสระ แบเรียมแอลจิเนต เซลล์ยึดเกาะ และเซลล์ดักติด

**2.5 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนเตตราไซคลีน**

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ COD 270 mg/L เตตรา ไซคลีน 10 mg/L และ pH 6.5-7.0 เตรียมในน้ำกลั่น โดย น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วยซูโครส ($C_{12}H_{22}O_{11}$) ยูเรีย ($CO(NH_2)_2$) และแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($Ca(H_2PO_4)2.H_2O$) ที่อัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:5:1 จากนั้นเติมเตตราไซคลีนความเข้มข้น 10 mg/L คนให้เข้ากัน หากยังไม่ใช้งานให้เก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เมื่อต้องการใช้งานให้นำออกมาวางไว้ข้างนอกตู้เย็น เพื่อให้น้ำเสียสังเคราะห์มีอุณหภูมิห้องก่อนนำไปทดลอง

**2.6 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนเตตราไซคลีน**

การทดลองนี้ศึกษาใช้ถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor) ด้วยจุลินทรีย์ตะกอนเร่งในรูปแบบเซลล์อิสระ เซลล์ยึดเกาะ และเซลล์ดักติด (ชุดทดลองแสดงดังตารางที่ 1) บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 500 mLที่มีเตตราไซคลีน ปนเปื้อน 10 mg/L และค่าซีโอดี 270 mg/L เติมอากาศให้มีค่า DO มากว่า 2 mg/L เป็นเวลาทั้งหมด 72 h เก็บตัวอย่างทุก 8 h เพื่อวิเคราะห์ค่า COD ค่าเตตราไซคลีน ค่า pH และค่าของแข็งแขวนลอย เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและแนวโน้มการบำบัดน้ำเสีย (ดังรูปที่ 2)

สำหรับการควบคุมปริมาณเซลล์จุลินทรีย์เริ่มต้นของเซลล์อิสระ เซลล์ดักติด และเซลล์ยึดเกาะ มีวิธีการดังต่อไปนี้

-วิธีการควบคุมปริมาณเซลล์เริ่มต้นของเซลล์อิสระคือ ใช้วิธีวัดของแข็งแขวนลอย ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อให้ทราบปริมาณจุลินทรีย์ในถัง จากนั้นคำนวณเพื่อหาปริมาตรน้ำสำหรับนำมาปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อให้จุลินทรีย์ตกตะกอนแล้วรินน้ำใสทิ้ง จะได้ปริมาณเซลล์อิสระ 1,000 mg/L ตามที่ต้องการและพร้อมใช้งาน

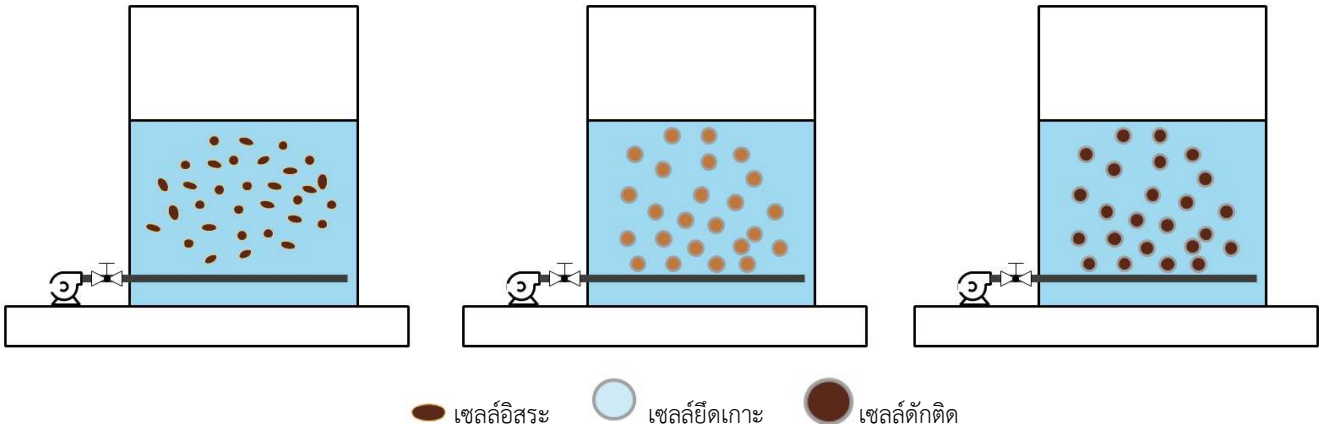
-วิธีการควบคุมปริมาณเซลล์เริ่มต้นของเซลล์ดักติดคือ ใช้วิธีเตรียมจุลินทรีย์เช่นเดียวกับเซลล์อิสระ เมื่อได้จุลินทรีย์ 1,000 mg/L แล้วนำมาดักติดในแบเรียมแอลจิเนต จะได้ปริมาณจุลินทรีย์ในเซลล์ดักติดตามที่ต้องการและพร้อมใช้งาน

-วิธีการควบคุมปริมาณเซลล์เริ่มต้นของเซลล์ยึดเกาะคือ ใช้วิธีเตรียมจุลินทรีย์เช่นเดียวกับเซลล์อิสระ แล้วจึงนำไปเลี้ยงในถัง SBR ร่วมกับแบเรียมแอลจิเนต เมื่อผ่านการเดินระบบเป็นระยะเวลา 15 วัน สุ่มเลือกเซลล์ยึดเกาะมา 20 เม็ด ใส่ในหลอด Centrifuge ที่มีน้ำกลั่น นำไปเขย่าด้วยเครื่อง อัลทราโซ

นิกส์ (Ultrasonic Bath) เป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงเขย่าอีกครั้งด้วยเครื่องเขย่าแนวตั้ง (Vortex Mixer) เป็นเวลา 2 นาที [19] เมื่อครบ 10 รอบ นำมาวัดของแข็งแขวนลอย ผลดังกล่าวทำให้ทราบปริมาณเซลล์ใน 20 เม็ดของเซลล์ยึดเกาะ นำมาคำนวณปริมาณเซลล์เฉลี่ยต่อ 1 เม็ดในเซลล์ ยึดเกาะ จากนั้นนับจำนวนเซลล์ยึดเกาะทั้งหมดในถัง SBR แล้วจึงนำมาคำนวณปริมาณเซลล์ทั้งหมดที่ยึดเกาะกับวัสดุ หากปริมาณจุลินทรีย์ในเซลล์ยึดเกาะมีน้อยกว่า 1,000 mg/L ให้นำเซลล์ในถัง SBR (ถังที่เตรียมเซลล์ยึดเกาะ) ไปปั่นเหวี่ยงให้ตกตะกอน เพื่อนำมาเติมลงในชุดทดลองเซลล์ยึดเกาะ จะได้ปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1,000 mg/L ตามที่ต้องการ

**ตารางที่ 1** คำอธิบายชุดทดลองเซลล์อิสระ เซลล์ยึดเกาะ และเซลล์ดักติด

| ชื่อชุดทดลอง | ปริมาณจุลินทรีย์ (mg/L) | ปริมาณแบเรียมแอลจิเนต (%ของปริมาณน้ำเสีย) | การเติมอากาศ |
|---|---|---|---|
| ชุดควบคุมการทดลอง (Control) | - | - | - |
| ชุดแบเรียมแอลจิเนต (BA) | - | 30 | เติม |
| ชุดเซลล์อิสระ (FC) | 1,000 | 0 | เติม |
| ชุดเซลล์ยึดเกาะ (AC) | 1,000 | 30 | เติม |
| ชุดเซลล์ดักติด (EC) | 1,000 | 30 | เติม |




**รูปที่ 2** ชุดทดลองเซลล์อิสระ เซลล์ยึดเกาะ และเซลล์ดักติด

### 2.7 การวิเคราะห์พารามิเตอร์

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการทดลองทั้งทางกายภาพและทางเคมี วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) [20] โดยนำน้ำเสียมากรองในกระดาษกรอง GF/C จากนั้นนำกระดาษกรองไปวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย และน้ำที่ผ่านการกรองนำไปวิเคราะห์ค่า COD ด้วยวิธีการย่อยสลายสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมตแบบรีฟลักซ์ปิด ส่วนการวิเคราะห์เตตราไซคลีนวิเคราะห์ตามวิธีของ Ali และคณะ [21] โดยทำการเตรียมสารรีเอเจนต์ ได้แก่ 1) $NaNO_2$ ร้อยละ 2 2) HCl 0.5 M และ 3) Sulphanilic Acid ร้อยละ 0.1 ผสมให้เข้ากันจะได้สารรีเอเจนต์ เตรียม Potassium Hydroxide (KOH) ร้อยละ 2 และเตรียม Ethanol เข้มข้น จากนั้นนำมาทดสอบวัดความเข้มข้นเตตราไซคลีน โดยการนำตัวอย่างที่มีความเข้มข้นเตตราไซคลีน 200-2,375 µg-TC ใส่ลงในขวดปรับปริมาตร 25 mL แล้วเติม KOH 2.8 mL และสารรีเอเจนต์ 2.2 mL เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเติม Ethanol เข้มข้น ให้ถึงขีดของขวดปรับปริมาตร 25 mL เขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปวัดเตตราไซคลีนด้วยเครื่อง Spectrophotometer ความยาวคลื่น 403 nm

## 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

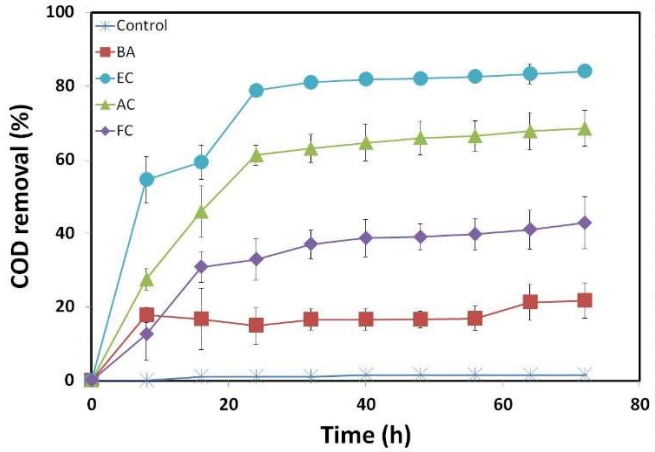
การศึกษาทำการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซีโอดี (COD) 270.33±6.64 mg/L และมีเตตราไซคลีนปนเปื้อน 9.25±0.08 mg/L ด้วยเซลล์อิสระ เซลล์ ดักติด และเซลล์ยึดเกาะในระบบเติมอากาศ ทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี เตตราไซคลีน กรด-เบส และของแข็งแขวนลอย ทุก 8 h เป็นเวลา 72 h

### 3.1 ผลการบำบัดซีโอดี

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนเตตราไซคลีนของเซลล์อิสระ เซลล์ยึดเกาะ และเซลล์ดักติด โดยการติดตามค่า COD ที่ลดลงเป็นเวลา 72 h (ดังรูปที่ 3) พบว่าการติดตามค่า COD ของชุดการทดลองเซลล์อิสระ (Free Cell : FC) เซลล์ยึดเกาะ (Attached Cell : AC) และเซลล์ดักติด (Entrapped Cell : EC) มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD เฉลี่ยร้อยละ 32.85 61.21 และ 78.76 ตามลำดับ ในเวลา 24 h จากนั้นประสิทธิภาพการกำจัด COD เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งถึงเวลา 72 h เมื่อสิ้นสุดเวลา 72 h ชุดทดลอง FC AC และ EC สามารถกำจัด COD ได้ร้อยละ 42.84 68.44 และ 83.96 ตามลำดับ โดยการกำจัด COD ที่พิจารณาตามปฏิกิริยาอันดับที่ 1 มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 2 โดยผลการกำจัดในชุดที่มีจุลินทรีย์ (FC AC และ EC) มีความแม่นยำสูงมาก (พิจารณาจากค่า $R^2$) ซึ่งการย่อยสลาย COD ทางชีวภาพขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นเป็นสำคัญ โดยค่าคงที่ในการกำจัด COD คือ 0.0149 0.0332 และ 0.0508 $h^{-1}$ ตามลำดับ ผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียได้ในอนาคต นอกจากนี้จะเห็นได้ว่ารูปแบบเซลล์ตะกอนเร่งที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างกันส่งผลให้ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดแตกต่างกันด้วย [7,18]

ผลของประสิทธิภาพการกำจัด COD ของ FC AC และ EC พบว่า การลดลงของค่า COD มีผลมาจากการดูดซับสารอินทรีย์ของแบเรียมแอลจิเนต (BA) ร่วมด้วย แต่อย่างไรก็ตามผลแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นในช่วงแรกของการทดลองเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาการบำบัดยาฆ่าแมลงด้วยเซลล์ดักติด พบว่าในกระบวนการบำบัดมีผลของการดูดซับยาฆ่าแมลงจากวัสดุดักติดส่งผลให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด [14] สำหรับประสิทธิภาพของ FC พบว่า ชุดทดลองสามารถลดค่า COD ได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเซลล์อิสระบำบัด COD ได้เพียงร้อยละ 43.02 ในเวลา 72 h เป็นการชี้ให้เห็นว่าเตตราไซคลีนมีผลทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เนื่องจากก่อนทำการทดลองช่วงปรับสภาพเซลล์ไม่ได้มีการให้อาหารเลี้ยงเชื้อที่มีเตตราไซคลีนจึงทำให้ผลการทดลองช่วงแรกเกิดการยับยั้ง ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ลดลงเกิดจากเตตราไซคลีนไปยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีน [11,22] โดยอาศัยระยะเวลาช่วงหนึ่งในการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ [23] แต่ผลการทดสอบ พบว่า เซลล์อิสระยังสามารถปรับสภาพและทำงานต่อไปได้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษา การกำจัดยาปฏิชีวนะด้วยเซลล์อิสระ พบว่า ในช่วงแรกของการบำบัดจุลินทรีย์ถูกยับยั้งการทำงานด้วยยาปฏิชีวนะ การทำงานของจุลินทรีย์ที่ดีจำเป็นต้องมีการป้องกันหรือปรับสภาพจุลินทรีย์ให้สามารถเจริญเติบโตได้ก่อน โดยจุลินทีย์ที่ใช้เป็นจุลินทรีย์ที่มีสมบัติในการย่อยสลายยาปฏิชีวนะ ส่งผลให้สามารถทำงานต่อไปได้ [13]

ผลการใช้ AC และ EC ในการบำบัด COD พบว่า สามารถบำบัด COD ได้ร้อยละ 68.99 และ 83.93 ตามลำดับ (เวลา 72 h) ซึ่งสูงกว่าเซลล์อิสระ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการตรึงเซลล์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย [18] เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด COD ระหว่าง AC และ EC พบว่า EC มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงกว่า AC ผลดังกล่าวเกิดจาก AC ถูกเตตราไซคลีนทำลายจุลินทรีย์ ที่เกาะอยู่นอกผิววัสดุ จึงส่งผลให้จุลินทรีย์บางส่วนถูกทำลาย สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยเซลล์ดักติดเปรียบเทียบกับเซลล์ยึดเกาะ พบว่า การใช้เซลล์ตรึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์ยึดเกาะ เนื่องจากเซลล์ยึดเกาะที่ใช้เป็นการนำวัสดุยึดเกาะกับจุลินทรีย์เติมลงในระบบพร้อมกันเพื่อบำบัดน้ำเสีย ทำให้เซลล์อิสระสัมผัสกับสารเคมีที่อยู่ในน้ำเสียโดยตรง จุลินทรีย์จึงถูกยับยั้งการทำงาน ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย [18]




**รูปที่ 3** ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

**ตารางที่ 2** จลนพลศาสตร์ค่าซีโอดีที่ลดลง

| ชื่อชุดทดลอง | ร้อยละการกำจัด COD | สมการของปฏิกิริยา | ค่าคงที่ (k) ($h^{-1}$) | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| ชุดควบคุมการทดลอง (Control) | 1.47 | y=-0.0004x+5.6058 | 0.0004 | 0.7500 |
| ชุดแบเรียมแอลจิเนต (BA) | 21.78 | y=-0.0041x+5.5174 | 0.0041 | 0.4033 |
| ชุดเซลล์อิสระ (FC) | 43.02 | y=-0.0149x+5.5351 | 0.0149 | 0.9133 |
| ชุดเซลล์ยึดเกาะ (AC) | 68.99 | y=-0.0332x+5.5737 | 0.0332 | 0.9619 |
| ชุดเซลล์ดักติด (EC) | 83.93 | y=-0.0508x+5.3997 | 0.0508 | 0.9296 |

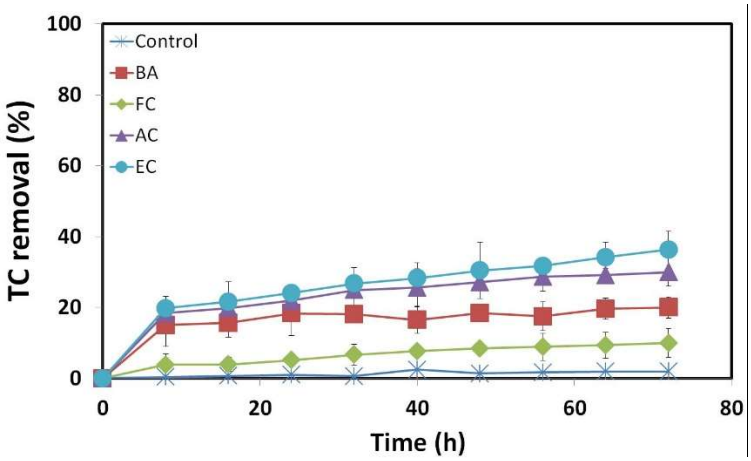
หมายเหตุ : y คือ ln (ความเข้มข้นของ COD) และ X คือ เวลา (h)

### 3.2 ผลการบำบัดเตตราไซคลีน

ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนเตตราไซคลีนของเซลล์อิสระ (FC) เซลล์ยึดเกาะ (AC) และเซลล์ดักติด (EC) (ดังรูปที่ 4) พบว่า ชุดทดลอง FC AC และ EC สามารถกำจัดเตตราไซคลีนเฉลี่ยร้อยละ 3.83 18.43 และ 19.80 ตามลำดับ ในเวลา 8 h ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดเตตราไซคลีนได้รวดเร็วอย่างเห็นได้ชัด หลังจากสิ้นสุดการทดลอง (เวลา 72 h) ชุดทดลอง FC AC และ EC สามารถกำจัดเตตราไซคลีนเฉลี่ยร้อยละ 10.36 30.20 และ 36.33 ตามลำดับ การกำจัดเตตราไซคลีนสามารถพิจารณาตามปฏิกิริยาอันดับที่ 1 มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 3 ผลการกำจัดในชุดที่มีจุลินทรีย์ (FC AC และ EC) มีความแม่นยำสูง (พิจารณาจากค่า $R^2$) ซึ่งการย่อยสลายเตตราไซคลีนทางชีวภาพขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นเป็นสำคัญ ค่าคงที่ในการกำจัดเตตราไซคลีน คือ 0.0013 0.0038 และ 0.0049 $h^{-1}$ ตามลำดับ ผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่มีเตตราไซคลีนปนเปื้อนได้เช่นเดียวกัน จะเห็นได้ว่าเซลล์ตะกอนเร่งสามารถกำจัดเตตราไซคลีนได้ เนื่องจากเตตราไซคลีนเป็นสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้จุลินทรีย์ Granular ในระบบ SBR เพื่อกำจัดเตตราไซคลีน ซึ่งผลการทดลองสามารถใช้จุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียบำบัดเตตราไซคลีนได้ [10] และการบำบัดเตตราไซคลีนของเซลล์ตะกอนเร่งมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบเซลล์ตะกอนเร่งที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดแตกต่างกัน [7,18] ซึ่งการกำจัดเตตราไซคลีนของชุดทดลองข้างต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาการกำจัดเตตราไซคลีนทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่า ในระยะเวลา 2 วัน สามารถกำจัดเตตราไซคลีนได้ร้อยละ 3 และในเวลา 4 วัน สามารถกำจัดเตตราไซคลีนได้ร้อยละ 5 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการกักเก็บน้ำมีผลต่อการกำจัดเตตราไซคลีน [24]

ประสิทธิภาพการกำจัดเตตราไซคลีนจากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า การกำจัดเตตราไซคลีนเกิดจากการทำงานของแบเรียมแอลจิเนต (Barium Alginate : BA) ร้อยละ 20 ส่วน

การบำบัดน้ำเสียที่เหลือมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ สังเกตได้จากชุดทดลอง FC ที่สามารถกำจัดเตตราไซคลีนได้ถึงร้อยละ 10.36 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลอง AC และ EC แสดงให้เห็นว่าการตรึงเซลล์มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเตตราไซคลีน กล่าวคือ การตรึงเซลล์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับจุลินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 30.20 และ 36.33 ในชุด AC และ EC ตามลำดับ จากผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ทำการศึกษาการตรึงเซลล์เซลล์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน คือ เซลล์ยึดเกาะและเซลล์ดักติด ซึ่งพบว่าการตรึงเซลล์ช่วยปรับสภาพการทำงานของจุลินทรีย์ ช่วยป้องกันสารพิษ และช่วยให้จุลินทรีย์มีเวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะที่มีสารพิษปนเปื้อน [13,25]




**รูปที่ 4** ประสิทธิภาพการกำจัดเตตราไซคลีน

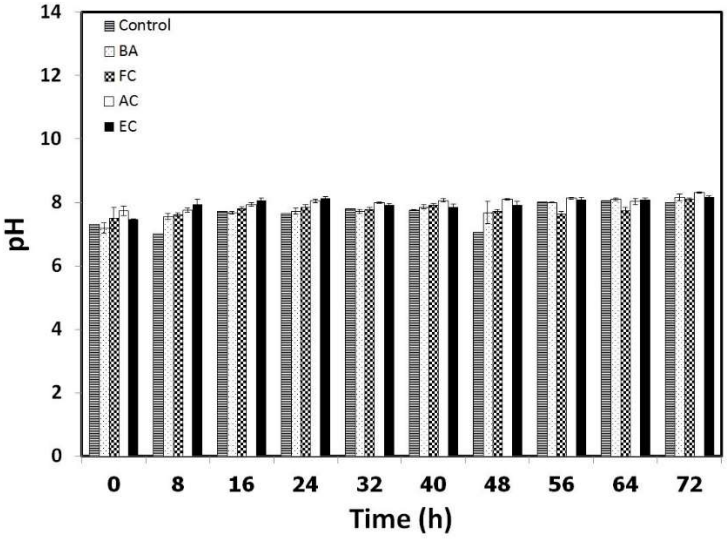
**ตารางที่ 3** จลนพลศาสตร์ค่าเตตราไซคลีนที่ลดลง

| ชื่อชุดทดลอง | ร้อยละการกำจัด TC | สมการของปฏิกิริยา | ค่าคงที่ (k) ($h^{-1}$) | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| ชุดควบคุมการทดลอง (Control) | 1.90 | y=-0.0003x+2.2106 | 0.0003 | 0.6753 |
| ชุดแบเรียมแอลจิเนต (BA) | 20.03 | y=-0.0019x+2.1255 | 0.0019 | 0.5046 |
| ชุดเซลล์อิสระ (FC) | 10.36 | y=-0.0013x+2.1996 | 0.0013 | 0.9286 |
| ชุดเซลล์ยึดเกาะ (AC) | 30.20 | y=-0.0038x+2.1077 | 0.0038 | 0.7550 |
| ชุดเซลล์ดักติด (EC) | 36.33 | y=-0.0049x+2.0933 | 0.0049 | 0.8387 |

**หมายเหตุ : y คือ ln (ความเข้มข้นของ TC) และ X คือ เวลา (h)**

### 3.3 ผลการวัดกรด-เบส (pH)

ผลการติดตามค่ากรด-เบส ทุก 8 h เป็นเวลา 72 h (รูปที่ 5) พบว่า ทุกชุดทดลองมีค่ากรด-เบส อยู่ในช่วง 7.02-8.31 จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่ากรด-เบสของทุกชุดทดลองมีค่าคงที่จนกระทั่งครบเวลา 72 h โดยค่ากรด-เบสเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเป็นช่วงที่จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตในน้ำเสียและยังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อไปได้ [26,27]

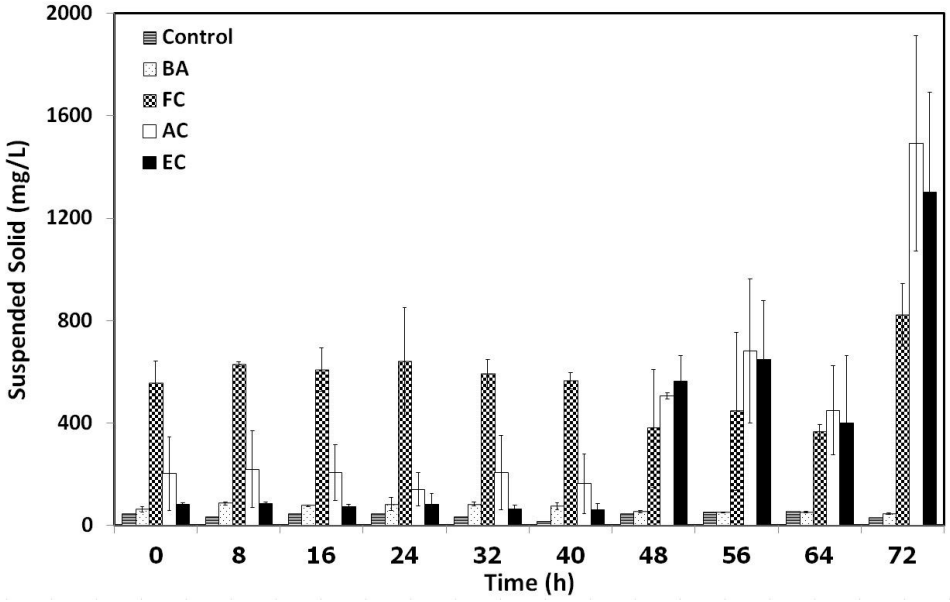



**รูปที่ 5** ความเป็นกรด-เบส

### 3.4 ผลการวัดปริมาณของแข็งแขวนลอย

ผลการติดตามค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) ทุก 8 h เป็นเวลา 72 h (รูปที่ 6) พบว่า ของแข็งแขวนลอยในชุดควบคุม (Control) ชุดทดลองแบเรียม แอลจิเนต (BA) ชุดทดลองเซลล์อิสระ (FC) ชุดทดลองเซลล์ยึดเกาะ (AC) และชุดทดลองเซลล์ดักติด (EC) มีปริมาณอยู่ระหว่าง 15-55, 47-86, 380-823, 141-681 และ 81-1,300 mg/L ตามลำดับ โดยชุด Control มีปริมาณของแข็งแขวนลอยน้อยในช่วงเวลาเริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากในชุดนี้ไม่มีการเติมจุลินทรีย์ในระบบจึงส่งผลให้มีปริมาณของแข็งแขวนลอยในระบบไม่มาก และชุดทดลอง BA มีปริมาณของแข็งแขวนลอยน้อยเช่นเดียวกับชุด Control เนื่องจากไม่มีการเติมเซลล์ในชุดทดลอง BA แต่พบปริมาณของแข็งแขวนลอยพบมากกว่าชุด Control ซึ่งอาจเกิดจากการหลุดลอกของวัสดุตรึง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ทำการตรวจสอบปริมาณของแข็งแขวนลอยของวัสดุตรึงหลังการบำบัดน้ำเสีย พบว่า มีปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น และลักษณะทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบผิวบางส่วนของวัสดุตรึงมีความเสียหาย [28] สำหรับการติดตามปริมาณของแข็งแขวนลอยในชุดทดลอง AC และชุดทดลอง EC พบว่าทั้ง 2 ชุดทดลองมีปริมาณของแข็งแขวนลอยใกล้เคียงกัน แต่จะพบปริมาณของแข็งแขวนลอยในชุดทดลอง AC มากกว่าชุดทดลอง EC ซึ่งเกิดจากกลไกการยึดเกาะอาศัยการดูดซับทางกายภาพที่ผิววัสดุ ดังนั้นจึงทำให้เซลล์สามารถหลุดลอกออกจาก AC ได้ง่ายกว่า EC ส่วนชุดทดลอง FC พบปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงที่สุดเนื่องจากชุดทดลองนี้เป็นเซลล์ที่แขวนลอยในน้ำเสียของระบบ จึงทำให้พบปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงกว่าชุดทดลองอื่น

จากผลการติดตามปริมาณของแข็งแขวนลอยในภาพรวมพบว่า ในชุดทดลองที่ไม่มีเซลล์จะพบของแข็งแขวนลอยในปริมาณน้อย ส่วนชุดที่มีเซลล์อิสระจะพบของแข็งแขวนลอยในปริมาณมากที่สุด ซึ่งจากการติดตามพบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (เวลา 0-24 h) จนกระทั่งเวลา 32 h พบปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลงจนถึงเวลา 48 h และหลังจากเวลา 48 h ของแข็งแขวนลอยเพิ่มปริมาณขึ้นสูงมาก ซึ่งคาดว่าในช่วงเวลา 32 - 48 h จุลินทรีย์อาจถูกเตตราไซคลีนยับยั้งการทำงานหรือทำลาย ส่งผลให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลง และหลังจากเวลาที่ 48 h จุลินทรีย์สามารถปรับสภาพเข้ากับสภาวะที่มีเตตราไซคลีนได้ จึงทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตในระบบต่อไป ส่วนชุดทดลอง AC และ EC ในช่วงแรก (0-40 h) พบของแข็งแขวนลอยในปริมาณน้อย หลังจากนั้นที่เวลา 56-72 h พบของแข็งแขวนลอยปริมาณมาก ซึ่งเกิดจากจุลินทรีย์ที่อยู่ที่ผิวหรือภายในวัสดุตรึงมีการเจริญภายนอกวัสดุตรึงเป็นจำนวนมาก สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยเซลล์ยึดเกาะหรือเซลล์ดักติดพบว่ามีจุลินทรีย์เจริญภายนอกวัสดุ โดยเวลาในการกักน้ำเสียมีผลต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยและส่งผลต่อประสิทธิภาพอีกด้วย [18,15]




**รูปที่ 6** ค่าของแข็งแขวนลอย

## 4. สรุป

จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพการบำบัด น้ำเสียปนเปื้อนเตตราไซคลีนของจุลินทรีย์เซลล์อิสระ (FC) จุลินทรีย์เซลล์ยึดเกาะ (AC) และจุลินทรีย์เซลล์ดักติด (EC) สามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนเตตราไซคลีนได้ ซึ่งจุลินทรีย์FC AC และ EC กำจัด COD ได้ร้อยละ 43.02, 68.99 และ 83.93 ตามลำดับ และกำจัดเตตราไซคลีนได้ร้อยละ 10.36, 30.20 และ 36.33 ตามลำดับ โดยจุลินทรีย์ FC สามารถกำจัดเตตราไซคลีนได้เล็กน้อย เนื่องจากเตตราไซคลีนมีคุณสมบัติเป็นยาปฏิชีวนะจึงทำให้จุลินทรีย์ FC ถูกยับยั้งการทำงานจากสารเตตราไซคลีน

ส่วนจุลินทรีย์ EC มีประสิทธิภาพการบำบัดเตตรา ไซคลีนสูงกว่า AC เนื่องจากการดักติดเซลล์เป็นการกักเก็บเซลล์ไว้ในแบเรียมแอลจิเนต ทำให้จุลินทรีย์ลดโอกาสในการสัมผัสกับสารพิษโดยตรง และแบเรียมแอลจิเนตมีรูพรุนที่มีสภาพแวดล้อมเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ส่งผลให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์และสารพิษได้ ส่วนจุลินทรีย์ AC มีลักษณะการเกาะของจุลินทรีย์อยู่บริเวณพื้นผิวของแบเรียมแอลจิเนตจึงมีโอกาสสัมผัสกับเตตราไซคลีนมากกว่า ส่งผลให้จุลินทรีย์ถูกยับยั้งการทำงาน

นอกจากนี้ อัตราการบำบัด COD สูงสุดในทุกชุดการทดลองที่เวลา 24 h ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมในการกักน้ำเสียไว้ในระบบเพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ การติดตามความเป็นกรด-เบส พบว่า ตลอดระยะเวลาในการบำบัด ค่ากรด-เบส อยู่ในช่วง 7.02-8.31 ซึ่งมีค่าเป็นกลาง ส่วนการติดตามปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นทุกชุดการทดลอง โดยพบปริมาณของแข็งแขวนลอยในชุดทดลอง FC มากที่สุด รองลงมาคือชุดทดลอง AC และต่ำที่สุดคือชุดทดลอง EC ปริมาณของแข็งแขวนลอย ที่สูงขึ้นเกิดจากจุลินทรีย์และผิวของแบเรียมแอลจิเนตหลุดลอกออก

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าในอนาคตมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เซลล์ตะกอนเร่งดักติดในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของเตตราไซคลีน แต่อย่างไรก็ตามการนำผลดังกล่าวไปประยุกต์ใช้จำเป็นต้องมีการศึกษาผลของประสิทธิภาพในการบำบัดเตตราไซคลีนในน้ำเสียจริงก่อนนำไปใช้

**กิตติกรรมประกาศ**

การศึกษาครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ และได้รับความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ จากสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏ ศรีสะเกษเป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามความคิดเห็น ผลการศึกษา การสรุปผลและข้อเสนอแนะในเอกสารนี้ไม่เกี่ยวข้องกับผู้ให้ทุน

**เอกสารอ้างอิง**


[1] Ahn KC, Kasagami T, Tsai H, Schebb NH, Ogunyoku T, Gee SJ, Young TM, Hammock BD. An Immunoassay to evaluate human/ environmental exposure to the antimicrobial triclocarban. *Environmental Science & Technology*. 2012; 46: 374–381.

[2] Borghi AA. Palma MSA. Tetracycline: production, waste treatment and environmental impact assessment. Brazilian J*ournal of Pharmaceutical Sciences*. 2014; 50(1): 25-38.

[3] Su YL, Wang JX, Huang ZT, Xie B. On-site removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from leachate by aged refuse bioreactor: effects of microbial community and operational parameters. *Chemosphere*.2017;178: 486-495.

[4] Manyi-Loh C, Mamphweli S, Meyer E, Okoh A. Antibiotic use in agriculture and its consequential resistance in environmental sources: potential public health implications. *Molecules*. 2018; 23(795): 1-48.

[5] Conde-Cid M, Núñez-Delgado A, Fernández-Sanjurjo MJ, Álvarez-Rodríguez E, Fernández-Calviño D, Arias-Estévez M. Tetracycline and sulfonamide antibiotics in soils: presence, fate and environmental risks. *Processes*. 2020; 8(1479): 1-40.

[6] Hosseini SH, Borghei SM. The treatment of phenolic wastewater using a moving bed bio-reactor. *Process Biochemistry.* 2005; 40: 1027–1031.

[7] Xing ZP, Sun DZ, Yu XJ, Zou JL, Zhoua W. Treatment of antibiotic fermentation-based pharmaceutical wastewater using anaerobic and aerobic moving bed biofilm reactors combined with ozone/ hydrogen peroxide process. *Environmental Progress & Sustainable Energy*.2014; 33(1): 170-177.

[8] Shao S, Hu Y, Cheng C, Cheng J, Chen Y. Simultaneous degradation of tetracycline and denitrification by a novel bacterium. *Klebsiella* sp. SQY5. *Chemosphere*. 2018; 209: 35-43.

[9] Robinson TP, Bu DP, Carriqque-Mas J, Fèvre EM, Gilbert M, Grace D, et al. Antibiotic resistance is the quintessential one health issue. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygine*. 2016; 110: 377–380.

[10] Wang X, Chen Z, Kang J, Zhaob X, Shen J. Removal of tetracycline by aerobic granular sludge and its bacterial community dynamics in SBR. *RSC Advances*. 2018; 8(33): 18284-18293.

[11] อารยา ข้อค้า. ยาปฏิชีวนะและการดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรีย. *วารสารการแพทย์และวิทยาศาสตร์สุขภาพ*. 2563; 27(2): 125-139.

[12] Kovalakova P, Cizmas L, McDonald TJ, Marsalek B, Feng M, Sharma VK. Occurrence and toxicity of antibiotics in the aquatic environment: a review. *Chemosphere*. 2020; 251: 126351.

[13] พงศธร ทวีธนวาณิชย์, สุมนา สิริพัฒนากุล- ราษฎร์ภักดี. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารปฏิชีวนะไตรโคลคาร์บอน (Triclocarban; TCC) ด้วย *Pseudomonas fluorescens* MC46 และ *Ochrobactrum* sp. MC22. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ*. 2562; 12(1): 21-28.

[14] Siripattanakul S, Wirojanagud W, McEvoy J, Khan E. Effect of cell-to-matrix ratio in polyvinyl alcohol immobilized pure and mixed cultures on atrazine degradation. *Water Air Soil Pollution*. 2008;8: 257–266.

[15] พงศธร ทวีธนวาณิชย์, สุมนา สิริพัฒนากุล. การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลโดยใช้แอกทิเวเต็ดสลัดจ์ดักติด. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ*. 2555; 5(1): 21-28.

[16] Zhang N, Wang Q, Ren J, Wang L. (2008). Ammonia– nitrogen and orthophosphate removal by immobilized Scenedesmus sp. isolated from municipal wastewater for potential use in tertiary treatment. *Bioresource Technology*. 2008; 99: 3787–3793.

[17] Taweetanawanit P, Radpukdee T, Giao NT, Siripattanakul-Ratpukdi S, (2017). Mechanical and chemical stabilities of barium alginate gel: Influence of chemical concentrations. *Key Engineering Materials.* 2017;718: 62-66.

[18] ฐาปกรณ์ ปรีเรขา, สัน แอบกระโทก, ฐิติพร ทองเกลี้ยง และสุมนา สิริพัฒนากุล. การเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลแบบติดกับที่ด้วยระบบเซลล์ดักติด เซลล์อิสระและเซลล์ยึดเกาะ. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 2553; 3(10): 52-59.*

[19] Sonsuphab K, Ratpukdi T, Siripattanakul–Ratpukdi S. Influence of infiltration rates during profenofos pesticide removal by attached and entrapped bacterial cells. *Desalination and Water Treatment*. 2018;120: 311-322.

[20] American Public Health Association ( APHA) , American Water Work Association (AWWA), The World Economic Forum ( WEF) . *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed*. Washington DC.: (n.p.); 2005.

[21] Ali RJ, Hawezy HJS, Abdullah MS. Spectrophotometric determination of tetracycline hydrochloride through coupling with sulphanilic acid. *Diyala Journal of Medicine*. 2018;15(2): 15-22.

[22] Ullah H, Ali S. Chapter 1: classification of anti-bacterial agents and their functions. *In: Antibacterial Agents*. Web of Science™; 2017.

[23] Halling-Sorensen B. Algal toxicity of antibacterial agents used in intensive farming. *Chemosphere*. 200;40: 731–739.

[24] Yang C, Liu C, Chang B. Biodegradation of amoxicillin, tetracyclines and sulfonamides in wastewater sludge. *Water*, 2020;2147: 1-18.

[25] นครินทร์ เทิดเกียรติกุล, สุมนา สิริพัฒนากุล-ราษฎร์ภักดี. การกำจัดแมงกานีสในน้ำใต้ดินโดยเซลล์ดักติดด้วยแบเรียมแอลจิเนตเติมผงถ่านกัมมันต์. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2563; 13(2): 77-87.

[26] Qian W, Ma B, Li X, Zhang Q, Peng Y. Long-term effect of pH on denitrification: high pH benefits achieving partial- denitrification. *Bioresource Technology*. 2019; 278: 444-449.

[27] Zhang L, Shen Z, Fang W,Gao G. Composition of bacterial communities in municipal wastewater treatment plant. *Science of the Total Environment*. 2019; 689: 1181-1191.

[28] Taweetanawanit P, Siripattanakul- Ratpukdi S. Wastewater treatment by barium alginate-entrapped activated sludge: Influence of barium chloride and sodium alginate concentrations. *The $^{6}$th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management*, n.d.;2017.