

## ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไหลเวียนบนหลังคา โดยใช้แบบจำลองการควบคุมอุณหภูมิในโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ

### Performance of Recirculation Flow Roof in Wastewater Treatment Systems for Temperature Control Modeling in Floating Melon Greenhouses

รัฐพล สุขสมบุญ และ ละองดาว ภู่อารอง

Rattapol Suksomboon and Laongdaw Poomsumrong

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ประเทศไทย

Department of Management Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajabhat Maha Sarakham University, Thailand

Received : 24 October 2024, Received in revised form : 12 January 2025, Accepted : 21 January 2025

Available online : 18 February 2025

#### บทคัดย่อ

**วัตถุประสงค์และที่มา :** การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผสมผสานครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อต่อ ยอดความยั่งยืน ในวิถีเกษตรกรรมของบริเวณที่ลุ่มลำนน้ำชี โดยพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียในโรงเรือนปลูกพืชที่ให้ผล ตอบแทนสูง ที่จะคาดว่าจะช่วยลดความเสี่ยงต่อภาวะขาดทุนจากปัญหาการเกิดอุทกภัย และลดผลกระทบจากความเสื่อม ของสภาพลำนน้ำที่เพิ่มขึ้นทุกปี ผู้วิจัยจึงได้คิดค้นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไหลเวียนบนหลังคา โดยใช้แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ สำหรับควบคุมอุณหภูมิในโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ เพื่อบรรเทาปัญหาอุทกภัยและปัญหาน้ำเสีย โดยได้ใช้พื้นที่ หลังคาโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำที่ทำมุมเอียง 20 องศา กับแนวระนาบในการกำจัดค่าบีโอดี (BOD) แอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) และ ไนเตรท (NO<sub>3</sub>) ในน้ำเสีย และได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควบคุมอุณหภูมิโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ (Control Temperature in Floating Melon Greenhouses; CTFMG) ได้แก่ แบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กอุณหภูมิจริง ปริมาตร (Plug-Flow Volume Temperature Reactor: PFVTR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนผสม อุณหภูมิ (Completely-Mixed Stirred Volume Temperature Reactor: CSVTR) ปฏิกริยาลำดับที่หนึ่งและสอง ( $n = 1$  และ  $n = 2$ ) ของระบบ CTFMG ทั้งสองแบบจำลองจะลดความเข้มข้นอุณหภูมิ (T) ด้วยอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) ของน้ำเสีย และเวลาการกักเก็บ (Hydraulic Retention Time: HRT) โดยใช้หลักเกณฑ์อัตราส่วน พื้นที่หน้าตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C: A_L$ ) สำหรับหาค่าความเข้มข้นพื้นหลังของอุณหภูมิ ( $T^*$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Coefficient of Temperature:  $kT$ ) ในการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองคณิตศาสตร์

**วิธีดำเนินการวิจัย :** ลักษณะระบบ CTFMG ความกว้างประมาณ 5.0 เมตร สูง 3.0 เมตร และความยาว 6.0 เมตรมีค่า แฟรงก์เตอร์ความหนาแน่นเมล่อนลอย (f) เท่ากับ 0.5 ของปริมาตรโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ (Volume; V) เท่ากับ 90 ลูกบาศก์

มีพื้นที่หน้าตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C: A_L$ ) ( $< 1:4$ ) ระบบใช้พื้นที่หลังคาประมาณ 18 ตารางเมตร ทำมุมเอียง 20 องศาวัสดุทำจากแผ่นพลาสติก โดยทำการเปิดบ่มน้ำหมุนเวียนเท่ากับ 3, 4, 5, 6 และ 7 ลิตร/นาที่ และปล่อยน้ำเสียเข้า ( $Q_{in}$ ) เท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ให้น้ำกระจายทั่วหลังคามีค่าอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) เป็น 3, 4, 5, 6 และ 7 โดยเก็บค่าน้ำเสียได้แก่ ค่าบีโอดี (BOD) แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) และไนเตรท ( $NO_3$ ) ส่วนพดลมน้ำเข้า และพดลมนระบายอากาศออกด้วยอัตราการไหล (Air Flow;  $Q_{Ain}$  &  $Q_{Aout}$ ) เท่ากับ 576 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะเป็นการไหลแบบราบเรียบโดยใช้เวลากักเก็บ (HRT) ที่ 22.33 และ 44.66 วัน ทำการเก็บอุณหภูมิในช่วงเดือนเมษายนเพราะเป็นเดือนที่ร้อนที่สุดส่งผลต่อการผลิตลูกเมล่อน จากค่าอุณหภูมิเข้า (Temperature<sub>in</sub>:  $T_{in}$ ) ซึ่งควบคุมให้เท่ากับ  $36 \pm 2.5$  °C และค่าอุณหภูมิออก (Temperature<sub>out</sub>:  $T_{out}$ ) จะทำให้ได้อัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) นำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลในโปรแกรม Microsoft Excel หาค่าความเข้มข้นพื้นหลังของอุณหภูมิ ( $T^*$ ) โดยใช้ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งและสอง ( $n = 1$  และ  $n = 2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลง (kT) ของแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กอุณหภูมิเชิงปริมาตร (Plug-Flow Volume Temperature Reactor: PFVTR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมอุณหภูมิ (Completely-Mixed Stirred Volume Temperature Reactor: CSVTR) และทำการตรวจสอบความแม่นยำ และวิเคราะห์ความคุ้มค่าของโรงเรือนเมล่อนลอยเพื่อการเกษตรจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) และอัตราส่วนของผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit - Cost Ratio; B/C Ratio) เพื่อการเกษตรมีอายุโครงการ 1 ปี

**ผลการวิจัย :** ผลจากการศึกษาระบบควบคุมอุณหภูมิโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ (Control Temperature in Floating Melon Greenhouses; CTFMG) ใช้พื้นที่หลังคาประมาณ 18 ตารางเมตรทำมุมเอียง 20 องศา กับแนวระนาบในการกำจัดน้ำเสีย โดยวัสดุทำจากแผ่นพลาสติก พบว่าค่าอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) เท่ากับ 3, 4, 5, 6 และ 7 มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่า BOD  $NH_3$   $NO_3$  (Removal BOD  $NH_3$   $NO_3$  Efficiency) ได้ถึง ( $5.36 \pm 2.59\%$ ,  $2.83 \pm 2.85\%$  และ  $10.00 \pm 0.031\%$ ), ( $25.07 \pm 2.56\%$ ,  $20.49 \pm 2.83\%$  และ  $10.75 \pm 0.0295\%$ ), ( $30.14 \pm 2.52\%$ ,  $22.07 \pm 2.81\%$  และ  $14.25 \pm 0.0275\%$ ), ( $59.72 \pm 2.49\%$ ,  $31.29 \pm 2.8\%$  และ  $23.50 \pm 0.027\%$ ) และ ( $72 \pm 2.45\%$ ,  $34 \pm 2.78\%$  และ  $32.50 \pm 0.0265\%$ ) ประสิทธิภาพลดลงได้ถึง  $6.81 \pm 2\%$ ,  $8.36 \pm 2\%$ ,  $9.86 \pm 2\%$ ,  $11.32 \pm 2\%$  และ  $12.74 \pm 2\%$  ระบบควบคุมอุณหภูมิโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ (Control Temperature in Floating Melon Greenhouses; CTFMG) มีพื้นที่หน้าตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C: A_L$ ) ( $< 1:4$ ) พบว่าค่าอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) เท่ากับ 7 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดค่า BOD  $NH_3$   $NO_3$  ได้ถึง  $72 \pm 2.45\%$ ,  $34 \pm 2.78\%$  และ  $32.50 \pm 0.0265\%$  และประสิทธิภาพสูงสุดในลดอุณหภูมิได้ถึง  $12.74 \pm 2\%$  สามารถควบคุมอุณหภูมิจากค่าอุณหภูมิเข้า (Temperature<sub>in</sub>:  $T_{in}$ ) เท่ากับ  $36 \pm 2.5$  °C เป็นอุณหภูมิออก (Temperature<sub>out</sub>:  $T_{out}$ ) เท่ากับ  $31.00 \pm 1.5$  °C จากแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กอุณหภูมิเชิงปริมาตร (Plug-Flow Volume Temperature Reactor: PFVTR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวน

ผสมอุณหภูมิ (Completely-Mixed Stirred Volume Temperature Reactor: CSVTR) เกิดปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งและสอง ( $n = 1$  และ  $n = 2$ ) มีค่าความเข้มข้นพื้นหลังของอุณหภูมิ ( $T^*$ ) เท่ากับ  $15.55 \pm 2.0$  °C และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Coefficient of Temperature:  $kT$ ) ของแบบจำลองทั้งสองมีดังนี้ 0.008, 0.00004 1/วัน และ 0.0009, 0.00006 1/วัน และ  $R^2$  เท่ากับ 0.8398, 0.8497 และ 0.9306, 0.9526 จากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของโรงเรือนเมล่อนลอยเพื่อการเกษตรจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) 1,680 บาทต่อตารางเมตร ได้อัตราส่วนของผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit - Cost Ratio; B/C Ratio) เท่ากับ 1.68 มีระยะคืนทุน 1 ปี

**สรุปผลการวิจัย :** ระบบระบบควบคุมอุณหภูมิโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ (Control Temperature in Floating Melon Greenhouses; CTFMG) เกิดปฏิกิริยาลำดับสอง ( $n = 2$ ) ของแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวผสมอุณหภูมิ (Completely-Mixed Stirred Volume Temperature Reactor: CSVTR) มีค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ( $kT$ ) เท่ากับ 0.00006 1/วัน ความคุ้มค่าของโรงเรือนเมล่อนลอยจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) อัตราส่วนของผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit - Cost Ratio; B/C Ratio) มีระยะคืนทุน 1 ปี

**คำสำคัญ :** แบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กอุณหภูมิเชิงปริมาตร ; แบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวผสมอุณหภูมิ ; ระบบบำบัดน้ำเสียในควบคุมอุณหภูมิโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ

### Abstract

**Background and Objectives :** This study on hybrid mathematical modeling aims to enhance the sustainability of agricultural practices in the Chi River basin by developing a wastewater treatment system for high-yield greenhouse cultivation. This system is expected to reduce financial risks associated with flooding and mitigate the worsening degradation of the Chi River. The researcher has designed a rooftop wastewater treatment system using mathematical modeling to regulate the temperature in floating melon greenhouses, addressing both flood-related challenges and wastewater issues. The system utilizes the sloped greenhouse roof (tilted at 20 degrees) to remove biochemical oxygen demand (BOD), ammonia ( $NH_3$ ), and nitrate ( $NO_3$ ) from wastewater. Furthermore, mathematical models were developed to regulate greenhouse temperature, including the Plug-Flow Volume Temperature Reactor (PFVTR) and the Completely-Mixed Stirred Volume Temperature Reactor (CSVTR). These models, based on first-order and second-order reactions ( $n = 1$  and  $n = 2$ ), control temperature ( $T$ ) by adjusting the recirculation ratio ( $QR/Q_{in} = R$ ) and hydraulic retention time (HRT), utilizing the ratio of cross-sectional area to longitudinal area ( $A_C: A_L$ ) to determine background concentration temperature ( $T^*$ ) and the Coefficient of Temperature ( $kT$ ) for model validation.

**Methodology :** The CTFMG system (Control Temperature in Floating Melon Greenhouses) measures 5.0 meters in width, 3.0 meters in height, and 6.0 meters in length with a floating melon density factor ( $f$ ) of 0.5 and a total volume of 90 cubic meters. The cross-sectional to longitudinal area ratio ( $A_C:A_L$ ) is less than 1:4. The system's 18-square-meter plastic-sheet rooftop is inclined at 20 degrees. Water recirculation rates were set at 3, 4, 5, 6, and 7 liters per minute, while wastewater inflow ( $Q_{in}$ ) was maintained at 1 liter per minute. The treated wastewater was analyzed for BOD,  $NH_3$ , and  $NO_3$  levels. The air exchange system operated with an airflow rate ( $Q_{Ain}$  &  $Q_{Aout}$ ) of 576 cubic meters per day, utilizing laminar flow with hydraulic retention times (HRT) of 22.33 and 44.66 days. Temperature measurements were taken during April, the hottest month, to assess the impact on melon production. The input temperature ( $T_{in}$ ) was controlled at  $36 \pm 2.5^\circ C$ , and the output temperature ( $T_{out}$ ) was recorded to determine the effect of different recirculation ratios ( $QR/Q_{in} = R$ ). Data were processed using Microsoft Excel to calculate background concentration temperature ( $T^*$ ), first- and second-order reaction rates ( $n = 1$  and  $n = 2$ ), and the Coefficient of Temperature ( $kT$ ) for both PFVTR and CSVTR models. The accuracy of the mathematical models was verified, and the feasibility of floating melon greenhouses was assessed based on Net Present Value (NPV) and Benefit-Cost Ratio (B/C Ratio), with a one-year project lifecycle.

**Main Results :** Results from the study on the Control Temperature in Floating Melon Greenhouses (CTFMG) utilize a roof area of approximately 18 square meters, inclined at 20 degrees from the horizontal, for wastewater treatment using plastic sheet materials. The recirculation ratio (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) tested at values of 3, 4, 5, 6, and 7 achieved removal efficiencies for BOD,  $NH_3$ ,  $NO_3$  (Removal BOD  $NH_3$   $NO_3$  Efficiency) as follows: ( $5.36 \pm 2.59\%$ ,  $2.83 \pm 2.85\%$ , and  $10.00 \pm 0.031\%$ ), ( $25.07 \pm 2.56\%$ ,  $20.49 \pm 2.83\%$ , and  $10.75 \pm 0.0295\%$ ), ( $30.14 \pm 2.52\%$ ,  $22.07 \pm 2.81\%$ , and  $14.25 \pm 0.0275\%$ ), ( $59.72 \pm 2.49\%$ ,  $31.29 \pm 2.8\%$ , and  $23.50 \pm 0.027\%$ ) and ( $72 \pm 2.45\%$ ,  $34 \pm 2.78\%$ , and  $32.50 \pm 0.0265\%$ ). The efficiency of temperature reduction decreased by  $6.81 \pm 2\%$ ,  $8.36 \pm 2\%$ ,  $9.86 \pm 2\%$ ,  $11.32 \pm 2\%$ , and  $12.74 \pm 2\%$ , respectively. The Control Temperature in Floating Melon Greenhouses (CTFMG) system, with a cross-sectional area to longitudinal-section area ratio ( $A_C:A_L$ ) ( $< 1:4$ ), achieved the highest treatment efficiency at  $R = 7$ , with removal rates of  $72 \pm 2.45\%$  BOD,  $34 \pm 2.78\%$   $NH_3$ , and  $32.50 \pm 0.0265\%$   $NO_3$ , and a maximum temperature reduction efficiency of  $12.74 \pm 2\%$ . The system controlled the temperature from an inlet temperature (Temperature<sub>in</sub>:  $T_{in}$ ) of  $36 \pm 2.5^\circ C$  to an outlet temperature (Temperature<sub>out</sub>:  $T_{out}$ ) of  $31.00 \pm 1.5^\circ C$ .

From the Plug-Flow Volume Temperature Reactor (PFVTR) and Completely-Mixed Stirred Volume Temperature Reactor (CSVTR) models, first-order and second-order reactions ( $n = 1$  and  $n = 2$ ) were observed. background concentration temperature ( $T^*$ ) was  $15.55 \pm 2.0^\circ\text{C}$ . The Coefficient of Temperature ( $kT$ ) values for both models were as follows: 0.008, 0.00004 (1/day) and 0.0009, 0.00006 (1/day). The coefficient of determination ( $R^2$ ) values were 0.8398, 0.8497, 0.9306, and 0.9526. From the economic feasibility analysis of the floating melon greenhouse for agriculture, based on Net Present Value (NPV), the system yielded 1,680 THB per square meter, with a Benefit – Cost Ratio (B/C Ratio) of 1.68 and a payback period of 1 year.

**Conclusions :** The Control Temperature in Floating Melon Greenhouses (CTFMG) system exhibited a second-order reaction ( $n = 2$ ) in the Completely-Mixed Stirred Volume Temperature Reactor (CSVTR) model. The Coefficient of Temperature ( $kT$ ) was determined to be 0.00006 1/day. In terms of economic feasibility, the floating melon greenhouse demonstrated a Net Present Value (NPV) and a Benefit-Cost Ratio (B/C Ratio) that supported its financial viability, with a payback period of 1 year.

**Keywords :** Dynamic model of Plug-Flow Volume Temperature Reactor ; Dynamic model of Completely-Mixed Stirred Volume Temperature Reactor ; Mathematical of Control Temperature in Floating Greenhouse for Wastewater Treatment

\*Corresponding author. E-mail : Rpol9@hotmail.com

## Introduction

อุทกภัยเป็น“ภัยพิบัติ” ที่นับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อชีวิต ที่สร้างความเสียหายทำลายต่อมวลมนุษย์และทรัพย์สินในวงกว้าง ทั้งทางสังคมวัตถุหรือสภาพแวดล้อม เกิดความสูญเสียเกินกว่าความสามารถของสังคมที่จะจัดการได้ (United Nations, 1992) ประเทศไทยมีความเสี่ยงจากภัยพิบัติอุทกภัยอยู่ในระดับความเสี่ยงที่สูงภัยพิบัติอุทกภัยเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นประจำทุกปีของประเทศไทย นับเป็นภัยพิบัติที่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ประเทศมากที่สุด (Shook, 1997) และได้เผชิญปัญหาความเสื่อมสภาพทั้งคุณภาพน้ำ เสื่อมโทรม อุทกภัยจากน้ำ ล้นตลิ่ง และปริมาณน้ำ ลดลงในช่วงฤดูแล้ง โดยในประเทศไทยในระยะเวลหลายสิบปี ที่ผ่านมาได้เผชิญปัญหาเกี่ยวกับน้ำ อย่างต่อเนื่อง ซึ่งวิกฤตน้ำดังกล่าวที่เกิดขึ้นได้สร้างความเสียหายทางด้านเศรษฐกิจสังคม และการดำรงวิถีชีวิตของประชาชนอย่างมหาศาล และมีแนวโน้มความรุนแรงเพิ่มขึ้น (Environment Canada, 2017; Samart *et al.*, 2019) ความเสื่อมสภาพของแม่น้ำ ได้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพสังคมของเกษตรกร

จากปัญหาอุทกภัยและความเสื่อมสภาพทั้งคุณภาพน้ำของจังหวัดมหาสารคามซึ่งเป็นพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซากเป็นประจำโดยประสบน้ำท่วมซ้ำ 8-10 ครั้งในรอบ 10 ปี และเสี่ยงต่อการลงทุนพัฒนาทางการเกษตร (Ahern *et al.*, 2005) มีลักษณะบริเวณลุ่มน้ำสำคัญเช่น แม่น้ำชี มีน้ำท่วมเกือบทุกปี ระยะเวลาท่วมหนึ่งถึงสองเดือน และเป็นช่วงที่ผลผลิตกำลังจะได้ผล ทำให้ต้องสูญเสีย หรือได้รับความเสียหาย ขาดทุนซ้ำ ทั้งที่ปริมาณน้ำมีมาก ทั้งนี้ถ้าการจัดการโดยใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่ การแก้ปัญหาหรือปรับเปลี่ยนการผลิตจากทำนาข้าวให้เป็นปลูกพืชที่มีราคาสูงและเป็นที่ต้องการของตลาดแทน และลดความเสี่ยงต่อภาวะขาดทุน เพื่อความยั่งยืนในการผลิต ทางการเกษตร จึงควรมีการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับบำบัดน้ำเสียและระบบโรงเรือนปลูกพืชให้ผลตอบแทนสูง (Jongpluempiti *et al.*, 2020; Ruaypom & Yartjaroen, 2022) ในพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมซ้ำซากในการแก้ปัญหาให้ชุมชนท้องถิ่น (Ruaypom *et al.*, 2015)

จากพื้นที่วิจัยมีสภาพปัญหาอุทกภัย และปัญหาน้ำเสียของบ่อเลี้ยงปลา ลักษณะบ่อเป็นแก้มลิงของลำน้ำชีทุกปี นักวิจัยจึงได้คิดค้น ศักยภาพระบบบำบัดน้ำเสียการไหลแบบหมุนเวียนบนหลังคาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควบคุมอุณหภูมิโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ เพื่อแก้ปัญหาอุทกภัยและปัญหาน้ำเสีย โดยได้ใช้พื้นที่หลังคาโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำที่ทำมุมเอียง 20 องศา กับแนวระนาบในกำจัดน้ำเสียด้วยอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) (Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021b; Suksomboon *et al.*, 2021c) พร้อมด้วยพัดลมไอน้ำ (fan vapor) ในการควบคุมอุณหภูมิโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควบคุมอุณหภูมิโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ (Control Temperature in Floating Melon Greenhouses; CTFMG) คือแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กอุณหภูมิจริง ปริมาตร (Plug-Flow Volume Temperature Reactor: PFVTR) เป็นการไหลตามแนวยาวของแรงลมกับไอน้ำในทิศทางไปข้างหน้าอย่างสม่ำเสมอการไหล และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังผสมอุณหภูมิ (Completely-Mixed Stirred Volume Temperature Reactor: CSVTR) เป็นลักษณะถังปฏิกรณ์แนวสั้นในขบวนการกวนแบบผสมผสานกันค่อนข้างทั่วถึงด้วยแรงลมและไอน้ำความเข้มข้นในระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลจะเท่ากันตลอดทั้งสองแบบจำลองจะลดลงความเข้มข้นอุณหภูมิ (T) ด้วยอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) และเวลาการกักเก็บ (Hydraulic Retention Time: HRT) (Jirasak, 1985; Kadlec & Wallace, 2009) โดยใช้หลักเกณฑ์อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C: A_L$ ) สำหรับแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด ค่าบีโอดี (BOD) แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) และไนเตรท ( $NO_3$ ) ของอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) บนหลังคาทำมุมเอียง 20 องศาโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ และนำค่าดังกล่าวผนวกเข้าในแบบจำลองพลวัต PFVTR และแบบจำลองพลวัต CSVTR ปฏิกริยาลำดับที่หนึ่งและสอง ( $n = 1$  และ  $n = 2$ ) ของระบบ CTFMG เพื่อหาค่าความเข้มข้นพื้นหลังของอุณหภูมิ ( $T^*$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (kT) (Metcalf, 1991; Kadlec & Knight, 1996) ในการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองคณิตศาสตร์

## Methodology

### การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์

แบบจำลองพลวัต PFVTR และ CSTTR จะต้องพิจารณาใช้หลักเกณฑ์พื้นที่หน้าตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C:A_L$ ) ( $>1:4$ ) และพื้นที่หน้าตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C:A_L$ ) ( $<1:4$ ) (Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021b) ของปฏิกริยาอันดับหนึ่งและสอง ( $n = 1$  และ  $n = 2$ ) จากการไหลความเข้มข้นอุณหภูมิ ( $T$ ) เข้า influent เป็น  $T_{in}$  ความเข้มข้นอุณหภูมิ ( $T$ ) ออก Effluent เป็น  $T_{out}$  เข้าออกของเครื่องปฏิกรณ์ และค่าความเข้มข้นพื้นหลังของอุณหภูมิ ( $T^*$ ) (Jirasak, 1985; Kadlec & Wallace, 2009) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ( $kT$ ) (Metcalf, 1991; Kadlec & Knight, 1996)

### การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กอุณหภูมิเชิงปริมาตร (PFVTR)

แบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กอุณหภูมิเชิงปริมาตร (PFVTR) ใช้หลักเกณฑ์พื้นที่หน้าตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C:A_L$ ) ( $>1:4$ ) เป็นการไหลดาวแนวยาวของแรงลมกับไอน้ำในทิศทางไปข้างหน้าอย่างสม่ำเสมอความเข้มข้นอุณหภูมิ ( $T$ ) ลดลงด้วยอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) และเวลาการกักเก็บ (hydraulic retention time: HRT) สมการของความต่อเนื่องซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในแต่ละองค์ประกอบของปริมาตรในทิศทางไหลดังนี้ (Reynolds, 1982; Jirasak, 1985; Kadlec & Wallace, 2009) (Figure 1)

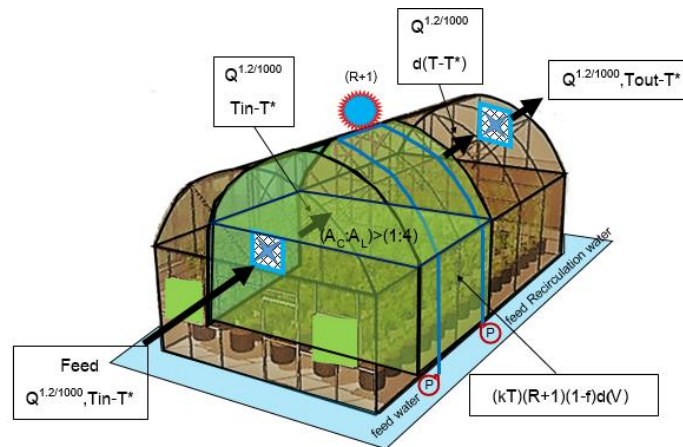


Figure 1 Plug-Flow Volume Temperature Reactor Reactor (PFVTR)



จาก Figure 1 ให้  $(Q^{1.2/1000})$  เป็นอัตราการไหลเข้ามีเลขชี้กำลังเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นอากาศ ( $\rho_{air}$ ) และความหนาแน่นของน้ำ ( $\rho_{water}$ ) ในทิศทางปริมาตรเริ่มต้นค่า  $(R+1)$  ของ  $V$  เป็นปริมาตร เคลื่อนที่เต็มปริมาตรลูกสูบ (capacity of volume,  $V_c$ ) เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมวลสาร ( $dV$ ) โดยมีความเข้มข้นอุณหภูมิเข้า influent เป็น  $T_{in}-T^*$  ความเข้มข้นอุณหภูมิออก Effluent เป็น  $T_{out}-T^*$  ตามลำดับ (Kadlec & Wallace, 2009) สามารถเขียนสมการมวลภายในใต้การควบคุมปริมาตร ได้ดังสมการที่ 1 ดังนี้พิจารณาปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ( $n=1$ )

$$Q^{1.2/1000} (T - T^*) = Q^{1.2/1000} [(T - T^*) - d(T - T^*)] - (kT_{1st})(T - T^*)(R + 1)(1 - f)d(V) \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) แสดงดังสมการที่ (2)

$$Q^{1.2/1000} d(T - T^*) = -(kT_{1st})(R + 1)(T - T^*)(1 - f)d(V) \quad (2)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2) ทั้งสองได้สมการที่ (3)

$$\int_{T_{in}}^{T_{out}} \frac{d(T - T^*)}{(T - T^*)} = \frac{-(kT_{1st})}{\left(Q^{1.2/1000}\right)} (1 - f) \int_0^V d(V) \quad (3)$$

นำ  $(R+1)$  และ ค่าแทนที่ความหนาแน่นของมวล  $(1-f)$  เป็นค่าแฟกเตอร์ของ  $V$  เป็นปริมาตร

$$\ln \left( \frac{(T_{out} - T^*)}{(T_{in} - T^*)} \right) = -(kT_{1st})(R + 1) \frac{(1 - f)V}{\left(Q^{1.2/1000}\right)} \quad (4)$$

จัดสมการในรูปค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ( $kT$ )



$$kT_{1st} = - \frac{\ln \left( \frac{T_{out} - T^*}{T_{in} - T^*} \right)}{\frac{(R+1)(1-f)V}{\left( Q^{\frac{1.2}{1000}} \right)}} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) จัดในรูปความเข้มข้นอุณหภูมิออก ( $T_{out}$ ) แสดงดังสมการที่ (6) แบบจำลองพลวัตเครื่อง PFVTR ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง

$$T_{out} = T^* + (T_{in} - T^*) e^{(-kT_{1st}) \frac{(R+1)(1-f)V}{\left( Q^{\frac{1.2}{1000}} \right)}} \quad (6)$$

พิจารณาปฏิกริยาอันดับสอง ( $n = 2$ )

$$Q^{\frac{1.2}{1000}} (T - T^*) = Q^{\frac{1.2}{1000}} [(T - T^*) - d(T - T^*)] - (kT_{2nd})(T - T^*)^2 (R+1)(1-f)d(V) \quad (7)$$

จัดรูปสมการ

$$Q^{\frac{1.2}{1000}} d(T - T^*) = -(kT_{2nd})(T - T^*)^2 (R+1)(1-f)d(V) \quad (8)$$

อินทิเกรต สมการที่ (8) ทั้งสองข้าง

$$\int_{T_{in}}^{T_{out}} \frac{d(T - T^*)}{(T - T^*)^2} = \frac{-(kT_{2nd})}{\left( Q^{\frac{1.2}{1000}} \right)} (R+1)(1-f) \int_0^V d(V) \quad (9)$$

$$\frac{1}{(T_{out} - T^*)} - \frac{1}{(T_{in} - T^*)} = (-kT_{2nd}) \frac{(R+1)(1-f)V}{\left( \frac{1.2}{Q^{1000}} \right)} \quad (10)$$

จัดสมการในรูปค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ(kT)

$$kT_{2nd} = - \frac{\frac{1}{(T_{out} - T^*)} - \frac{1}{(T_{in} - T^*)}}{\frac{(R+1)(1-f)V}{\left( \frac{1.2}{Q^{1000}} \right)}} \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) จัดในรูปความเข้มข้นอุณหภูมิออก (T<sub>out</sub>) แสดงดังสมการที่ (12) แบบจำลองพลวัตเครื่อง PFVTR ปฏิกริยาอันดับสอง

$$T_{out} = T^* + \frac{(T_{in} - T^*)}{1 - (kT_{2nd})(T_{in} - T^*) \frac{(R+1)(1-f)V(T_{in} - T^*)}{\left( \frac{1.2}{Q^{1000}} \right)}} \quad (12)$$

#### การพัฒนาแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมอุณหภูมิ (CSVTR)

ในแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมอุณหภูมิ (CSVTR) ใช้หลักเกณฑ์พื้นที่หน้าตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C: A_L$ ) (<1:4) สามารถใช้แทนเป็นลักษณะถังปฏิกรณ์แนวสั้นในขบวนการกวนแบบผสมผสานกันค่อนข้างทั่วถึงด้วยแรงลมและไอน้ำความเข้มข้นในระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลจะเท่ากันตลอด ความเข้มข้นอุณหภูมิ (T) ลดลงด้วยอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) และเวลาการกักเก็บ (hydraulic retention time: HRT) สมการของความต่อเนื่องซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในแต่ละองค์ประกอบของปริมาตรในทิศการไหลดังนี้ (Reynolds, 1982; Jirasak, 1985; Kadlec & Wallace, 2009) (Figure 2)

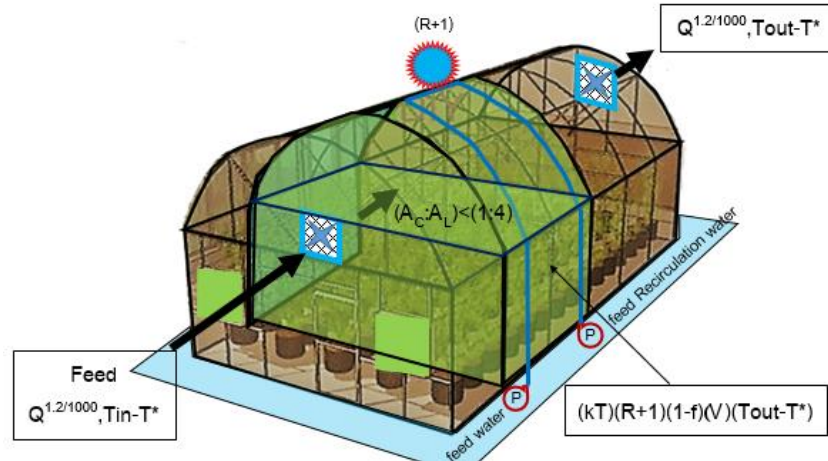


Figure 2 Completely-Mixed Stirred Volume Temperature Reactor (CSVTR)

จาก Figure 2 ถ้ากำหนดให้อัตราการไหลเข้ามีเลขชี้กำลังเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นอากาศ ( $\rho_{air}$ ) และความหนาแน่นของน้ำ ( $\rho_{water}$ ) เข้า และออกของของเหลวเท่ากัน และเท่ากับ  $Q^{1.2/1000}$  และมีค่า  $R+1$  ของ  $V$  เป็นปริมาตร และให้อุณหภูมิเข้าเป็น  $T_{in}-T^*$  และอุณหภูมิออกเป็น  $T_{out}-T^*$  (Kadlec & Wallace, 2009) เนื่องจากภายในถังปฏิกรณ์มีความเข้มข้นเท่ากันทุกจุด ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการดุลมวลในถังปฏิกรณ์ได้ดังนี้ พิจารณาปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ( $n = 1$ )

$$V \frac{dT}{dt} = Q^{1.2/1000} (T_{in} - T^*) - Q^{1.2/1000} (T_{out} - T^*) - (R + 1)(1 - f)V(kT_{1st})(T_{out} - T^*) \quad (13)$$

สภาวะคงที่,  $VdC/dt=0$  จากสมการที่ (13), แสดงดังสมการที่ (14)

$$0 = Q^{1.2/1000} (T_{in} - T^*) - Q^{1.2/1000} (T_{out} - T^*) - (R + 1)(1 - f)RV(kT_{1st})(T_{out} - T^*) \quad (14)$$

$$\frac{(T_{in} - T^*)}{(T_{out} - T^*)} - 1 = (kT_{1st}) \frac{(R + 1)(1 - f)V}{\left(Q^{1.2/1000}\right)} \quad (15)$$

จัดสมการในรูปค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ( $kT$ )

$$kT_{1st} = \frac{\left(Q^{\frac{1.2}{1000}}\right)(T_{in} - T_{out})}{(T_{out} - T^*)(R + 1)(1 - f)V(T_{out} - T^*)} \quad (16)$$

จากสมการที่ (16) จัดในรูปความเข้มข้นอุณหภูมิออก ( $T_{out}$ ) แสดงดังสมการที่ (17) แบบจำลองพลวัตเครื่อง PFVTR ปฏิบัติงานอันดับหนึ่ง

$$T_{out} = T^* + \frac{(T_{in} - T^*)}{1 + (kT_{1st}) \frac{(R + 1)(1 - f)V}{\left(Q^{\frac{1.2}{1000}}\right)}} \quad (17)$$

พิจารณาปฏิกริยาอันดับสอง ( $n = 2$ )

$$V \frac{dT}{dt} = Q^{\frac{1.2}{1000}} (T_{in} - T^*) - Q^{\frac{1.2}{1000}} (T_{out} - T^*) - (R + 1)(1 - f)(R + 1)V(kT_{2nd})(T_{out} - T^*)^2 \quad (18)$$

สภาวะคงที่,  $VdC/dt=0$  จากสมการที่ (18), แสดงดังสมการที่ (19)

$$0 = Q^{\frac{1.2}{1000}} (T_{in} - T^*) - Q^{\frac{1.2}{1000}} (T_{out} - T^*) - (R + 1)(1 - f)V(kT_{2nd})(T_{out} - T^*)^2 \quad (19)$$

$$\frac{(T_{in} - T_{out})}{(T_{out} - T^*)^2} = (kT_{2nd}) \frac{(R + 1)(1 - f)V}{\left(Q^{\frac{1.2}{1000}}\right)} \quad (20)$$

จัดสมการในรูปค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ( $kT$ )

$$kT_{2nd} = \frac{\left(Q^{\frac{1.2}{1000}}\right)(T_{in} - T_{out}) - (T_{out} - T^*)}{(R + 1)(1 - f)V(T_{out} - T^*)^2} \quad (21)$$

จากสมการที่ (21) จัดในรูปความเข้มข้นอุณหภูมิออก ( $T_{out}$ ) แสดงดังสมการที่ (22) แบบจำลองพลวัตเครื่อง PFVTR ปฏิบัติงานอันดับสอง

$$T_{out} = T^* - \frac{\left(Q^{1.2}\right)}{2(kT_{2nd})(R+1)(1-f)V} + \sqrt{\frac{\left(Q^{1.2}\right)}{(kT_{2nd})(R+1)(1-f)V} \left(T_{in} - T^* + \frac{\left(Q^{1.2}\right)}{4(kT_{2nd})(R+1)(1-f)V}\right)} \quad (22)$$

โดยที่  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  คือ คือ อุณหภูมิเข้า และออกในหนึ่งเซลล์ ตามลำดับ (เซลเซียส/ลิตร)

$Q$  คือ อัตราการไหลเข้า และออกของมวลสารในหนึ่งเซลล์ (ลูกบาศก์เมตร /วัน)

$f$  คือ ค่าแฟร็กเตอร์

$V$  คือ ปริมาตรในหนึ่งเซลล์ (ลูกบาศก์เมตร)

$KT_{1st}$  คือ ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ( $n = 1$ ) (1/วัน)

$KT_{2nd}$  คือ ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิปฏิกิริยาอันดับสอง ( $n = 2$ ) (1/วัน)

#### การทดลองระบบ CTFMG

ลักษณะระบบ CTFMG ความกว้างประมาณ 5.0 เมตร สูง 3.0 เมตร และความยาว 6.0 เมตรมีค่าแฟร็กเตอร์ความหนาแน่นเมล็ดลอย ( $f$ ) เท่ากับ 0.5 ของปริมาตรโรงเรือนเมล็ดลอยน้ำ (Volume;V) เท่ากับ 90 ลูกบาศก์ (Jongpluempiti *et al.*, 2020; Ruaypom & Yartjaroen, 2022) มีพื้นที่หน้าตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C: A_L$ ) ( $< 1:4$ ) (Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021b; Suksomboon *et al.*, 2021c) ระบบใช้พื้นที่หลังคาประมาณ 18 ตารางเมตร ทำมุมเอียง 20 องศากับแนวระนาบในการกำจัดน้ำเสียโดยวัสดุทำจากแผ่นพลาสติก (หลังคามีความกว้างประมาณ 3 เมตร และความยาว 6.0 เมตร) โดยทำการเปิดบิมน้ำหมุนเวียนเท่ากับ 3, 4, 5, 6 และ 7 ลิตร/นาที่ และปล่อยน้ำเสียเข้า ( $Q_{in}$ ) เท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ให้น้ำกระจายทั่วหลังคา (Suksomboon *et al.*, 2021b; Suksomboon *et al.*, 2021c) โดยเก็บน้ำตัวอย่างตำแหน่งที่ 1 และ 2 จำนวน 3 ครั้ง ได้แก่ ค่า บีโอดี (BOD) แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) และไนเตรท ( $NO_3$ ) ก่อนทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำตาม Standard Method (APHA *et al.*, 1999; Kadlec & Wallace, 2009) (Figure 3) และ (Table 1)

**Table 1** The quality of wastewater at recirculation ratios (R)

R	BOD <sub>in</sub> (mg/L)	BOD <sub>out</sub> (mg/L)	NH <sub>3in</sub> (mg/L)	NH <sub>3out</sub> (mg/L)	NO <sub>3in</sub> (mg/L)	NO <sub>3out</sub> (mg/L)
3	173.84 ± 2.63	164.53 ± 2.56	27.67 ± 2.87	26.89 ± 2.83	0.200 ± 0.043	0.18±0.019
4	173.84 ± 2.63	130.25 ± 2.49	27.67 ± 2.87	22.00 ± 2.80	0.200 ± 0.043	0.18±0.016
5	173.84 ± 2.63	121.45 ± 2.42	27.67 ± 2.87	21.56 ± 2.76	0.200 ± 0.043	0.17±0.012
6	173.84 ± 2.63	70.03 ± 2.35	27.67 ± 2.87	19.01 ± 2.73	0.200±0.043	0.15±0.011
7	173.84 ± 2.63	48.08 ± 2.28	27.67 ± 2.87	18.26 ± 2.69	0.200±0.043	0.14±0.010

**Table 2** The temperature at recirculation ratios (R)

R	T <sub>in</sub> (C <sup>o</sup> )	T <sub>mid</sub> (C <sup>o</sup> )	T <sub>out</sub> (mg/L)
3	36 ± 2.5	34.5 ± 2.0	33.50 ± 1.5
4	36 ± 2.5	34.00 ± 2.0	33.00 ± 1.5
5	36 ± 2.5	33.50 ± 2.0	32.00 ± 1.5
6	36 ± 2.5	33.00 ± 2.0	31.50 ± 1.5
7	36 ± 2.5	32.00 ± 2.0	31.00 ± 1.5



**Figure 3** Unit Operation Control Temperature in Floating Melon Greenhouses for Wastewater Treatment: CTFMG

และเมื่อเปิดพัดลมไอน้ำเข้า และพัดลมระบายอากาศออกด้วยอัตราการไหลของอากาศ (Q) เข้าและออก (Air Flow; Q<sub>Ain</sub> & Q<sub>Aout</sub>) เท่ากับ 576 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ใช้ความเร็วลมอยู่ที่ 0.00022 เมตรต่อวินาที เป็นการไหลของของอากาศผ่านวัตถุทรงลูกบาศก์ (Reynolds number, Re<sub>L</sub>) คือ  $Re_L \leq 103$  จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Schlichting, 1979; Bell & Mehta, 1989; Catalano *et al.*, 2003) โดยใช้เวลากักเก็บ (HRT) ที่ 22.33 และ 44.66 วัน ในการเก็บอุณหภูมิในช่วงเดือนเมษายนเพราะเป็นเดือนที่ร้อนที่สุดส่งผลต่อการผลิตลูกเมล่อน โดยค่าอุณหภูมิเข้า (T<sub>in</sub>) เท่ากับ 36 ± 2.5 °C และออก (T<sub>out</sub>) ตำแหน่งที่ 3, 4 และ 5 จำนวน 3 ครั้ง จาก (Figure 3) และ (Table 2) นำตัวแปรอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio: Q<sub>R</sub>/Q<sub>in</sub>= R) นำข้อมูลที่ได้ประมวลผลในโปรแกรม Microsoft Excel หาค่าความเข้มข้นพื้นหลังของอุณหภูมิ (T\*) โดยใช้สมการที่ (4), สมการที่ (10), สมการที่ (15) และสมการที่ (20) เปรียบเทียบหาค่าปฏิบัติการลำดับที่หนึ่งและสอง (n = 1 และ n = 2) และค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลง (kT<sub>1st</sub>PFVTR, kT<sub>2nd</sub>PFVTR, kT<sub>1st</sub>CSVTR และ kT<sub>2nd</sub>CSTVR) ของแบบจำลองพลวัต (PFVTR) และแบบจำลองพลวัต (CSTVR) ใช้สมการที่ (5), สมการที่ (11), สมการที่ (16) และสมการที่ (21)

และทำการตรวจสอบความแม่นยำโดยใช้สมการที่ (6), สมการที่ (12), สมการที่ (17) และสมการที่ (22) และวิเคราะห์ความคุ้มค่าของโรงเรือนเมลอนลอยเพื่อการเกษตรจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) อัตราส่วนของผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit - Cost Ratio; B/C Ratio) เพื่อการเกษตรมีอายุโครงการ 1 ปี (Meenaphant, 2007)

## Results

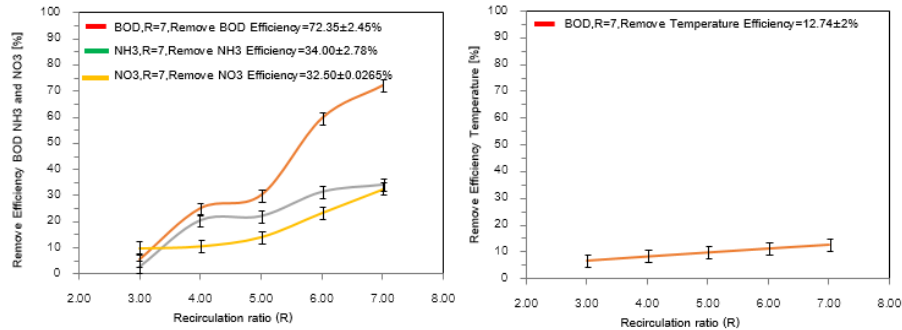
### ประสิทธิภาพการบำบัด กับ อัตราส่วนหมุนเวียน (R) ของระบบควบคุมอุณหภูมิโรงเรือนเมลอนลอยน้ำ

ผลจากการศึกษาระบบ CTFMG ใช้พื้นที่หลังคาประมาณ 18 ตารางเมตรทำมุมเอียง 20 องศากับแนวระนาบในการกำจัดน้ำเสียโดยวัสดุทำจากแผ่นพลาสติก (หลังคามีความกว้างประมาณ 3 เมตร และความยาว 6.0 เมตร) (Ruaypom *et al.*, 2015; Jongpluempiti *et al.*, 2020; Ruaypom & Yartjaroen, 2022) ทำจากแผ่นพลาสติกทำการเปิดปั๊มระบบน้ำหมุนเวียนหัวฉีดน้ำพ่นฝอยบนหลังคา พบว่าค่าอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) เท่ากับ 7 (Zafarzadeh *et al.*, 2010; Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021b; Suksomboon *et al.*, 2021c) มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดค่า BOD NH<sub>3</sub> NO<sub>3</sub> (Removal BOD NH<sub>3</sub> NO<sub>3</sub> Efficiency) ได้ถึง  $72 \pm 2.45\%$ ,  $34 \pm 2.78\%$  และ  $32.50 \pm 0.0265\%$  และ โรงเรือนปลูกเมลอนลอยน้ำมีความกว้างประมาณ 5.0 เมตร สูง 3.0 เมตร และความยาว 6.0 เมตร (Jongpluempiti *et al.*, 2020; Ruaypom & Yartjaroen, 2022) มีพื้นที่หน้าตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C: A_L$ ) (< 1:4) (Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021b; Suksomboon *et al.*, 2021c) ประสิทธิภาพลดอุณหภูมิในโรงเรือนเมลอนลอยน้ำ (CTFMG) ได้ถึง  $12.74 \pm 2\%$  (Table 3) และ (Figure 4)

**Table 3** The removal efficiency quality of wastewater and temperature in terms recirculation ration (R)

R	(%) Removal BOD Efficiency	(%) Removal NH <sub>3</sub> Efficiency	(%) Removal NO <sub>3</sub> Efficiency	(%) Removal temperature Efficiency
3	$5.36 \pm 2.59$	$2.83 \pm 2.85$	$10.00 \pm 0.031$	$6.81 \pm 2$
4	$25.07 \pm 2.56$	$20.49 \pm 2.83$	$10.75 \pm 0.0295$	$8.36 \pm 2$
5	$30.14 \pm 2.52$	$22.07 \pm 2.81$	$14.25 \pm 0.0275$	$9.86 \pm 2$
6	$59.72 \pm 2.49$	$31.29 \pm 2.8$	$23.50 \pm 0.027$	$11.32 \pm 2$
7	$72.35 \pm 2.45$	$34 \pm 2.78$	$32.50 \pm 0.0265$	$12.74 \pm 2$





**Figure 4** Effect of optimum recirculation ratio (R) to the BOD, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub> and temperature removal efficiency in terms recirculation ratio (R) with overflow

#### การศึกษาความเข้มข้นพื้นหลังของอุณหภูมิ ( $T^*$ ) ของระบบ CTFMG

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของ CTFMG ในการกำจัดค่าอุณหภูมิ ( $T$ ) (Removal temperature Efficiency) โดยนำค่าอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) เท่ากับ 3 และ 6 และค่าอุณหภูมิเข้า ( $T_{in}$ ) เท่ากับ  $36 \pm 2.5$  °C กับอุณหภูมิออก ( $T_{out}$ ) เท่ากับ  $33.50 \pm 1.5$  °C และ  $31.00 \pm 1.5$  °C เพื่อแก้สมการ 2 ตัวแปร โดยใช้สมการที่ (4), สมการที่ (10), สมการที่ (15) และสมการที่ (19) พบว่าแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กอุณหภูมิเชิงปริมาตร (PFVTR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมอุณหภูมิ (CSVTR) เกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 และมีค่า 4 ค่าความเข้มข้นพื้นหลังของอุณหภูมิ ( $T^*$ ) เท่ากับ  $54.74 \pm 2.0$  °C,  $36.85 \pm 2.0$  °C,  $30.88 \pm 2.0$  °C และ  $15.55 \pm 2.0$  °C ดังนั้นค่าที่ใช้ความเข้มข้นพื้นหลังของอุณหภูมิ ( $T^*$ ) เท่ากับ  $15.55 \pm 2.0$  °C (Jirasak, 1985; Metcalf, 1991; Kadlec & Knight, 1996; Kadlec & Wallace, 2009)

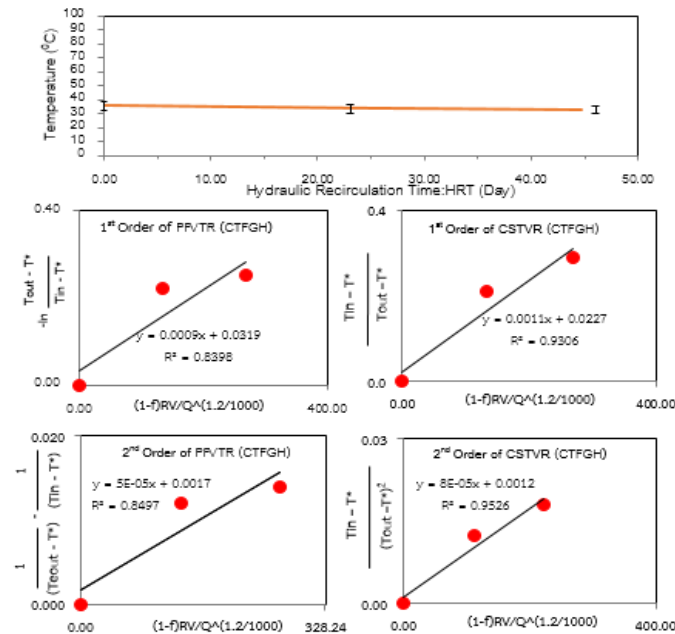
#### การศึกษารับเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลง ( $k$ ) ของอุณหภูมิ ( $T$ ) ของระบบ CTFMG

ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดค่า BOD NH<sub>3</sub> และ NO<sub>3</sub> (Removal BOD NH<sub>3</sub> NO<sub>3</sub> Efficiency) ของระบบ CTFMG ที่อัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) เท่ากับ 7 (Zafarzadeh *et al.*, 2010; Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021b; Suksomboon *et al.*, 2021c) และนำค่าค่าอุณหภูมิเข้า ( $T_{in}$ ) เท่ากับ  $36 \pm 2.5$  °C อุณหภูมิออก ( $T_{out}$ ) เท่ากับ  $31.00 \pm 1.5$  °C มี (Jirasak, 1985; Metcalf, 1991; Kadlec & Knight, 1996; Kadlec & Wallace, 2009) โดยนำข้อมูลที่ได้ประมวลผลในแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กอุณหภูมิเชิงปริมาตร (PFVTR) จากสมการที่ (5) และสมการที่ (11) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมอุณหภูมิ (CSVTR) จากสมการที่ (6) และสมการที่ (20) พบว่าเกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ( $T$ ) ดังนี้  $k_{T1stPFVTR}$ ,  $k_{T2ndPFVTR}$  และ  $k_{T1stCSTVR}$ ,  $k_{T2ndCSTVR}$  เท่ากับ 0.008, 0.00004 1/วัน และ 0.0009, 0.00006 1/วัน

และ  $R^2$  เท่ากับ 0.8398, 0.8497 และ 0.9306, 0.9526 (Jirasak, 1985; Metcalf, 1991; Kadlec & Knight, 1996; Kadlec & Wallace, 2009) (Table 4) และ (Figure 5)

**Table 4** Kinetics of 1<sup>st</sup> order and 2<sup>nd</sup> order models

Reactor	w	Try	Models	Rate constant, k ( day <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
CTFGH	T	PFVTR	1 <sup>st</sup> order , 2 <sup>nd</sup> order	0.008, 0.00004	0.8398, 0.8497
		CSVTR	1 <sup>st</sup> order , 2 <sup>nd</sup> order	0.0009, 0.00006	0.9306, 0.9526



**Figure 5** Prediction of kinetic reactions using 1<sup>st</sup> order and 2<sup>nd</sup> order models kinetic study of T in terms recirculation ration (R = 7)

การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิ (T) ข้อมูลการทดลอง กับแบบจำลอง PFVTR และ CSVTR ของระบบ CTFMG

จาก (Table 4) ทำการการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิ (T) ระหว่างข้อมูลการทดลองกับแบบจำลอง PFVTR และ CSVTR ที่อัตราส่วนการหมุนเวียน (R)เท่ากับ 3,4,5,6 และ 7 โดยสมการที่ (6), สมการที่ (12), สมการที่ (17) และสมการที่ (22) ของแบบจำลองพลวัต PFVTR และแบบจำลองพลวัต CSVTR ค่าอุณหภูมิ (T) ในการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) (Table 5) จากประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด ค่าบีโอดี(BOD) แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) และไนเตรท ( $NO_3$ )

บนพื้นที่หลังคาทำมุมเอียง 20 องศา กับแนวระนาบและประสิทธิภาพสูงสุดในลดอุณหภูมิของโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำที่อัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R = 7$ ) และ ค่าความเข้มข้นพื้นหลังของอุณหภูมิ ( $T^*$ ) เท่ากับ  $15.55 \pm 2.0$  °C ทำการตรวจสอบความแม่นยำโดยใช้โปรแกรม Microsoft excel พบว่าจะเกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 ของแบบจำลองพลวัต CSTVR มีค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ( $kT_{2nd}CSTVR$ ) เท่ากับ 0.00006 1/วัน ความแม่นยำในการจำลองมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9526 (Suksomboon *et al.*, 2019; Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021c) (Figure 7) จากวิเคราะห์ความคุ้มค่าของโรงเรือนเมล่อนลอยเพื่อการเกษตรจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) 1,680 บาทต่อตารางเมตร อัตราส่วนของผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit - Cost Ratio; B/C Ratio) เท่ากับ 1.68 มีระยะคืนทุน 1 ปี

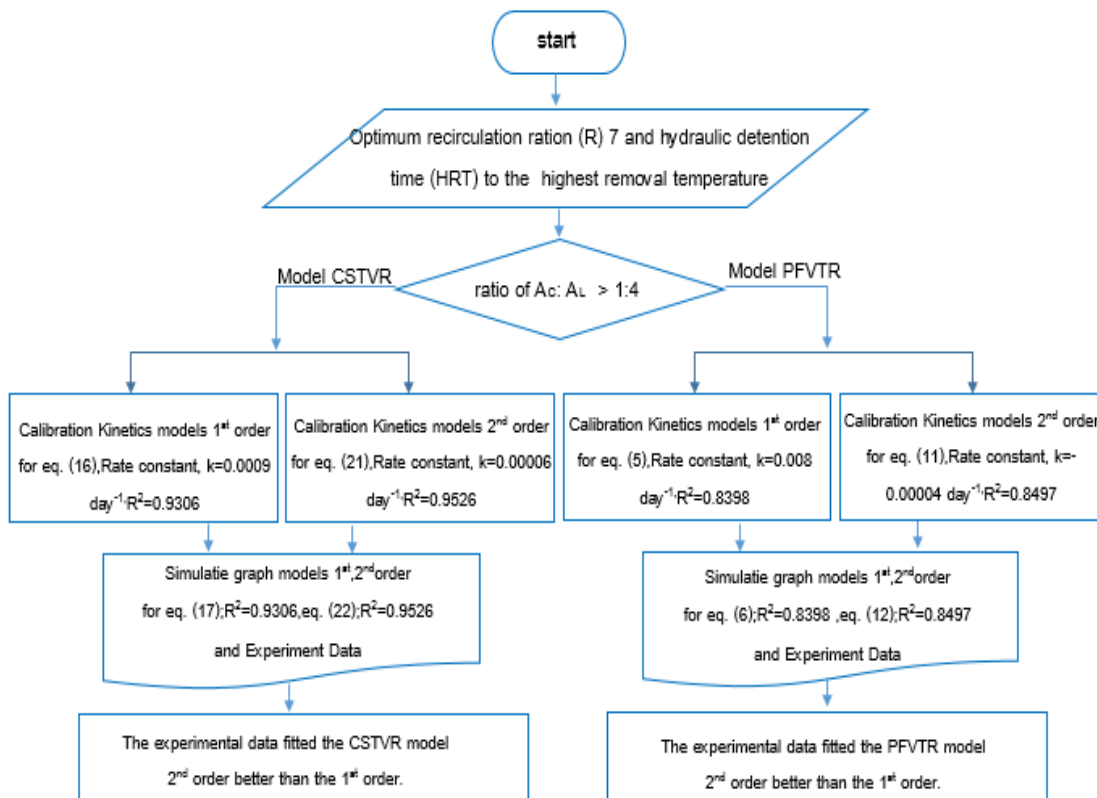


Figure 6 Flow charts of calculation processes using mathematical models

**Table 5** The Comparison of Temperature (T) between Experiment Data with PFVTR and CSVTR models at recirculation ratios (R) 3, 4, 5, 6 and 7

R=3							
Reactor	Try	Models	Rate constant, k (day <sup>-1</sup> )	T <sub>in</sub> (C <sup>o</sup> )	T <sub>mid</sub> (C <sup>o</sup> )	T <sub>out</sub> (C <sup>o</sup> )	
CTFGH	PFVTR	1 <sup>st</sup> order	0.008	36±2.5	35.03±2.0	34.01±1.5	
		2 <sup>nd</sup> order	0.00004	36±2.5	33.49±2.0	31.47±1.5	
	CSVTR	1 <sup>st</sup> order	0.0009	36±2.5	34.69±2.0	33.45±1.5	
		2 <sup>nd</sup> order	0.00006	36±2.5	34.63±2.0	33.50±1.5	
	Experiment Data				36±2.5	34.50±2.0	33.50±1.5
	R=4						
CTFGH	PFVTR	1 <sup>st</sup> order	0.008	36±2.5	34.68±2.0	33.36±1.5	
		2 <sup>nd</sup> order	0.00004	36±2.5	32.76±2.0	30.35±1.5	
	CSVTR	1 <sup>st</sup> order	0.0009	36±2.5	34.26±2.0	32.72±1.5	
		2 <sup>nd</sup> order	0.00006	36±2.5	34.22±2.0	32.87±1.5	
	Experiment Data				36±2.5	34.00±2.0	33.00±1.5
	R=5						
CTFGH	PFVTR	1 <sup>st</sup> order	0.008	36±2.5	34.34±2.0	32.72±1.5	
		2 <sup>nd</sup> order	0.00004	36±2.5	32.09±2.0	29.38±1.5	
	CSVTR	1 <sup>st</sup> order	0.0009	36±2.5	33.85±2.0	32.04±1.5	
		2 <sup>nd</sup> order	0.00006	36±2.5	33.85±2.0	32.31±1.5	
	Experiment Data				36±2.5	33.50±2.0	32.00±1.5
	R=6						
CTFGH	PFVTR	1 <sup>st</sup> order	0.008	36±2.5	34.01±2.0	32.13±1.5	
		2 <sup>nd</sup> order	0.00004	36±2.5	31.47±2.0	28.53±1.5	
	CSVTR	1 <sup>st</sup> order	0.0009	36±2.5	33.55±2.0	31.51±1.5	
		2 <sup>nd</sup> order	0.00006	36±2.5	33.50±2.0	31.82±1.5	
	Experiment Data				36±2.5	33.00±2.0	31.50±1.5
	R=7						
CTFGH	PFVTR	1 <sup>st</sup> order	0.008	36±2.5	32.71±2.0	30.83±1.5	
		2 <sup>nd</sup> order	0.00004	36±2.5	30.89±2.0	27.78±1.5	
	CSVTR	1 <sup>st</sup> order	0.0009	36±2.5	33.08±2.0	30.69±1.5	
		2 <sup>nd</sup> order	0.00006	36±2.5	32.17±2.0	31.37±1.5	
	Experiment Data				36±2.5	32.00±2.0	31.00±1.5

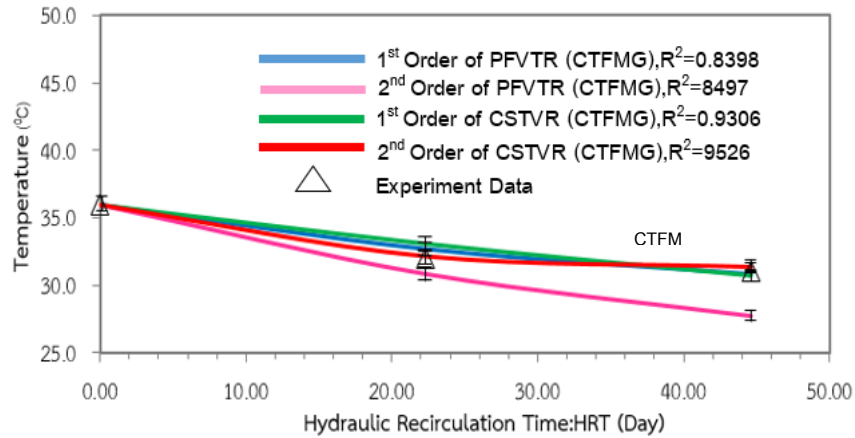


Figure 7 Comparison of PFVTR and CSTVR models (HRT=22.33 and 44.66 days of R=7)

## Discussion

ในการวิจัยครั้งต่อไปควรพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบบำบัดน้ำเสียการไหลแบบหมุนเวียนบนหลังคา มุมเอียงเพราะมุมมองคาเอียงมีผลต่อประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด ค่าบีโอดี (BOD) แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ไนเตรท ( $\text{NO}_3$ ) และ ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลง (k) (Metcalf, 1991; Kadlec & Knight, 1996) โดยใช้ความเร็วของการไหลในทางน้ำเปิด สมการของ Manning ผนวกในแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กเชิงพื้นที่ไหลแบบหมุนเวียน (Recirculation Plug-Flow Areal Reactor: RPFAR) และเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมหมุนเวียน(Completely-Mixed Stirred Tank Areal Reactor Models: CSTAR) (Suksomboon *et al.*, 2021a; Suksomboon *et al.*, 2021b) และในแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กอุณหภูมิเชิงปริมาตร (Plug-Flow Volume Temperature Reactor: PFVTR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมอุณหภูมิ (Completely-Mixed Stirred Volume Temperature Reactor: CSVTR) ระบบควรทำการก่อสร้างทั้ง 2 หลักเกณฑ์พื้นที่หน้าตัด ขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C: A_L$ ) ( $< 1:4$ ) และ ( $> 1:4$ ) และเพิ่มค่าแฟร็กเตอร์ความหนาแน่นเมล่อนลอย (f) ในการดูดซับ ค่าอุณหภูมิ (T) ในแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ปลั๊กอุณหภูมิเชิงปริมาตร (PFVTR) และแบบจำลองพลวัตเครื่องปฏิกรณ์ ถังกวนผสมอุณหภูมิ (CSVTR) ในโรงเรือนเมล่อนลอยเพื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเมล่อนที่ค่าอุณหภูมิ (T) ต่าง ๆ ในรอบปี

## Conclusions

จากปัญหาอุทกภัยและความเสื่อมสภาพทั้งคุณภาพน้ำของจังหวัดมหาสารคามซึ่งเป็นพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซากเป็นประจำทุกปีเพื่อความเสี่ยงสูงต่อการลงทุนพัฒนาทางการเกษตรจึงได้คิดค้น ศักยภาพระบบบำบัดน้ำเสียการไหลแบบหมุนเวียนบนหลังคาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควบคุมอุณหภูมิโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ โรงเรือนลอยน้ำที่มีความกว้างประมาณ 5.0 เมตร สูง 3.0 เมตร และความยาว 6.0 เมตร ซึ่งมีค่าแฟร็กเตอร์ความหนาแน่นเมล่อนลอย (f) เท่ากับ 0.5 ของปริมาตรโรงเรือนเมล่อนลอยน้ำ (Volume; V) เท่ากับ 90 ลูกบาศก์เมตร มีพื้นที่หน้าตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดตามยาว ( $A_C: A_L$ ) ( $< 1:4$ ) ระบบ CTFMG ใช้พื้นที่หลังคาประมาณ 18 ตารางเมตร (หลังคามีความกว้างประมาณ 3.0 เมตร และความยาว 6.0 เมตร) ทำจากแผ่นพลาสติก ทำการเปิดบ่มระบบน้ำหมุนเวียนหัวฉีดน้ำพ่นฝอยบนหลังคา พบว่าค่าอัตราส่วนหมุนเวียน (Recirculation ratio:  $QR/Q_{in} = R$ ) เท่ากับ 7 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดค่า BOD NH<sub>3</sub> NO<sub>3</sub> (Removal BOD NH<sub>3</sub> NO<sub>3</sub> Efficiency) ได้ถึง  $72 \pm 2.45\%$ ,  $34 \pm 2.78\%$  และ  $32.50 \pm 0.0265\%$  และพบว่าเมื่อเปิดพัดลมไอน้ำเข้า และพัดลมระบายอากาศออกด้วยอัตราการไหลของอากาศ (Q) เข้าและออก (Air Flow; Q<sub>Ain</sub> & Q<sub>Aout</sub>) เท่ากับ 576 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ใช้ความเร็วลมอยู่ที่ 0.00022 เมตรต่อวินาที เป็นการไหลของของอากาศผ่านวัตถุทรงลูกบาศก์ (Reynolds number, ReL) คือ  $ReL \leq 103$  จะเป็นการไหลแบบราบเรียบโดยใช้เวลากักเก็บ (HRT) ที่ 22.33 และ 44.66 วัน มีค่าความเข้มข้นพื้นหลังของอุณหภูมิ (T\*) เท่ากับ 15.55 °C เกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (T) ดังนี้  $kT_{1stPFVTR}$ ,  $kT_{2ndPFVTR}$  และ  $kT_{1stCSTVR}$ ,  $kT_{2ndCSTVR}$  เท่ากับ 0.008, 0.00004 1/วัน และ 0.0009, 0.00006 1/วัน และ R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.8398, 0.8497 และ 0.9306, 0.9526 จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ความถูกต้องพบว่าเกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 ของแบบจำลองพลวัต CSVTR มีค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (T)  $kT_{2ndCSTVR}$  เท่ากับ 0.00006 1/วัน ความแม่นยำในการจำลองมีค่า R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.9526 จากวิเคราะห์ความคุ้มค่าของโรงเรือนเมล่อนลอยเพื่อการเกษตรจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) 1,680 บาทต่อตารางเมตร อัตราส่วนของผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit - Cost Ratio; B/C Ratio) เท่ากับ 1.68 มีระยะคืนทุน 1 ปี

## Acknowledgements

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 และศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่เชื้อเพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำสำหรับการวิจัยครั้งนี้

## References

- Ahern M., Kovats R. S., Wikinson P., Few R. , & Matthies F. (2005). Global Health Impacts of Floods: Epidemiologic Evidence. *Epidemiol Rev.* , 27, 36-46.
- APHA, AWWA, & WEF. (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater.* American Public Health Association.
- Bell, J.H. , & R.D. Mehta. (1989). Boundary-layer predictions for small low-speed contractions. *AIAA Journal* 27(3), 372-374.
- Catalano, P., M. Wang, G. Iaccarino, & P. Moin. (2003). Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers. *Int J Heat Fluid Fl.*, 24(4), 463–469.
- Environment Canada. (2017). *Uses for Water In Southern Alberta.* Alberta: University of Lethbridge.
- Jirasak, J. (1985). *Environmental Process.* Khon Kaen University: Khon Kaen. (in Thai)
- Jongpluempiti, J., Vengsungnle, P., Prapakarn, S., Pannuchaoenwong, N., & Punnok, P. (2020). Supervisory Control for Wireless Automatic Environment Control in Oyster Mushroom House. *Feat Journal*, 6(1), 40-49. (in Thai)
- Kadlec, R.H., & Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetlands* CRC Press. Inc: U.S.A.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands.* (2nd ed). Boca Raton: CRC Press.
- Meenaphant, H. (2007). *Principle Analysis Theory and Practice to Study the Feasibility of the project.* 2nd ed. Bangkok. Chulalongkorn University Publishing House. (in Thai)
- Metcalf, E. (1991). *Wastewater Engineering.* 3rd ed. New York: McGraw – Hill.
- Reynolds, TD. (1982). *Solutions manual for unit operations and processes in environmental engineering.* California: Brooks/Cole Engineering Division.



- Ruaypom, K., Yartjaroen, R., Ruaypom, K., Yartjaroen, R., Boonjue, A., Amattirat1, N., Suttiaprapa, P., Vengsungnle, P., & Nuboon, T. (2015). Investigation of the length and the number of gutter optimals for chilled water circulation in hydroponics planting. *Feat Journal* ,1(2), 67-74. (in Thai)
- Ruaypom, K., & Yartjaroen, R. (2022). The Application of Electrical Energy from Solar cells to Automatic Humidity Control System in Mushroom Farms. *Feat Journal* , 8(1), 58-68. (in Thai)
- Samart, J., Maliwani, P., Wananlak, S., & Jirasan, K. (2019). Social Health Impact on River Deterioration: Case Study of Farmers in Li watershed, Lumphun Province. *Social Sciences Research and Academic Journal*, 14, 79-92. (in Thai)
- Schlichting H., (1979). *Boundary-layer theory*. Engineering University of Braunschweig, Germany. Translated by Kestin J. McGRAW-HILL book company, New York.
- Shook, G. (1997). A Disaster Risk Assessment for Thailand Using a Technique of Decision Analysis. *Journal of Disasters*, 21(1),pp. 77-88.
- Suksomboon, R., Junsiri, C., Kanyakam, S., & Tangjitjaroenkit, S. (2021a). Mathematical Model of Subsurface Recirculation Flow Constructed Wetland Domestic Wastewater Treatment for Household. *Rajabat Chiang Mai Research Journal*, 22, 37-48. (in Thai)
- Suksomboon, R., Chanachai Uanwang, C., Poosumrong, L., & Anantasirichai, W. (2021b). Mathematical Dynamic Recirculation Plug-Flow Areal Reactor Models of Subsurface Recirculation Flow Constructed Wetland Wastewater Treatment for Floating Agriculture Using in Greenhouse. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 28 (2), 55-63. (in Thai)
- Suksomboon, R., Poosumrong, L., & Chuchotsakunleot, A. (2021c). Mathematical Dynamic Recirculation Completely-Mixed Stirred Tank Areal Reactor Models of Subsurface Recirculation Flow Constructed for Wastewater Treatment. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 28 (3), 12-22. (in Thai)

United Nations. (1992). *Internationally agreed glossary of basic terms related to Disaster Management*. Geneva: United Nations.

Zafarzadeh, A., Bina, B., Nikaeen, M., Movahedian Attar, H., & Hajian nejad, M. (2010). Performance of moving bed biofilm reactors for biological nitrogen compounds removal from wastewater nitrification-denitrification process. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 7(4), 353-36.