



## วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

### การจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการผสมของไหลสองชนิดโดยใช้เทคนิคการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค

### Numerical simulation of two- fluid mixture process using move particle simulation technique

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล\*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Werayoot Lahamornchaiyakul\*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok Campus Phitsanulok 65000

\* Corresponding author.

E-mail: werayootrmutl@gmail.com; Telephone: 0-5529-8438

#### บทคัดย่อ

ขั้นตอนการออกแบบและการวิเคราะห์พื้นฐานแบบใหม่สำหรับการจำลองกระบวนการผสมของไหลสองชนิดได้รับการพัฒนาโดยใช้การจำลองอนุภาคแบบเคลื่อนที่ (Moving Particle Simulation (MPS)) ซึ่งการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของเหลวสองชนิดถูกจำลองโดยขั้นตอนวิธีการไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method (FVM)) การจำลองเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method (FEM)) ร่วมกับอัลกอริธึมแบบหลายขั้นตอน โดยถูกนำมาใช้ในวิธีการจำลองอนุภาคแบบเคลื่อนที่ เพื่อคำนวณผลกระทบของการมีปฏิสัมพันธ์หรือการสัมผัสระหว่างเนื้อของไหลสองชนิดและระหว่างตัวใบพัดกับผนัง ผลจากการวิเคราะห์พบว่าที่รอบการหมุนของใบพัดกวนผสม 100 รอบต่อนาทีที่หมุนในแนวแกนตั้งและแกนนอน พร้อมถูกติดตั้งตัว สเตเตอร์ เข้าใบที่ชุดใบพัดทั้งสองแนวแกน สามารถสร้างอัตราการผสมของไหลได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นที่ไม่ถูกติดตั้งตัว สเตเตอร์ วิธีการการจำลองอนุภาคแบบเคลื่อนที่ ที่ได้นำเสนอโดยใช้แบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการไฟไนต์วอลุ่มที่ดีที่สุดถูกนำไปใช้กับกระบวนการผสม แนวคิดของแนวทางที่นำเสนอสามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางกับการออกแบบรูปแบบกระบวนการผสม 3 มิติหรือรูปแบบผลิตภัณฑ์ส่วนผสมอื่น ๆ ซึ่งผลของการติดตั้งตัว สเตเตอร์ และรอบการหมุนต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผสมได้รับการตรวจสอบโดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์

#### คำสำคัญ

การจำลองอนุภาคแบบเคลื่อนที่ เทคนิควิธีการไฟไนต์วอลุ่ม การวิเคราะห์ผลเชิงตัวเลข

#### Abstract

A new basic design and analysis for two-fluid mixture process simulation were developed using moving particle simulation (MPS). The interaction between two-fluid was modeled by the finite volume method (FVM). The numerical simulation in this research using the Finite Element Method (FEM) together with a multi-time-step algorithm was introduced into the MES method to calculate the effects of interaction and contact between two-fluid bodies and between blade rotor bodies and walls. The results of the analysis showed that at 100 rpm of the agitator rotation in the vertical and the horizontal axis. Ready to be installed a stator into the blade of the agitator set on both axes, the best mixing rate of the fluid was achieved compared to other models. The proposed MES method using the optimized FEA and FVM model was then applied to a mixture process. The concept of the proposed approach is expansively applicable

to 3D mixture process form design or other consumer product forms. The effect of impeller-blade angle and revolutions per minute on performance of mixture process was investigated using commercial software.

## Keywords

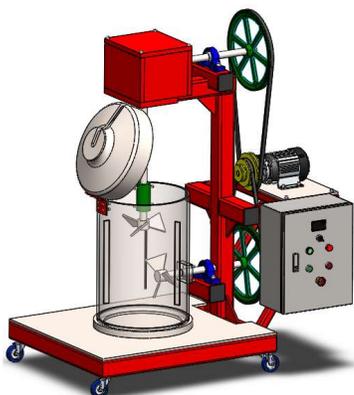
move particle simulation; finite element method; numerical simulation

## 1. บทนำ

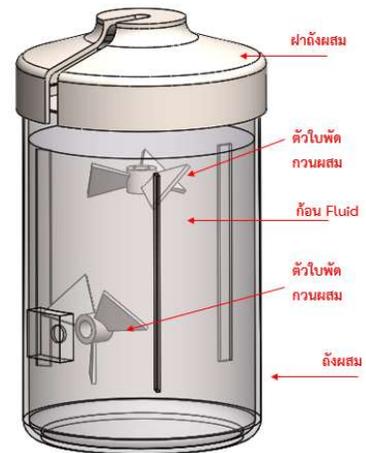
ปัจจุบันกระบวนการผสมของไหลมีให้เห็นกันอย่างแพร่หลายในวงการอาหาร เครื่องดื่ม ยารักษาโรค และสารเคมี ซึ่งวัตถุดิบและกลุ่มผลิตภัณฑ์เหล่านี้ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการแปรรูปในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งในส่วนการผสม การบด การนวด ตลอดจนการย่อยสลายจนได้รูปแบบของผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่เกิดขึ้น เป็นต้น โดยเฉพาะขั้นตอนการผสม เป็นขั้นตอนการแปรรูปอาหาร และสารเคมีแบบหนึ่ง ที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก รวมไปถึงอุตสาหกรรม SME ที่นิยมนำไปใช้ในการกวนผสมน้ำผลไม้ รวมไปถึงการกวนผสมวัตถุดิบที่มีความหนืด ที่เกี่ยวกับการกวนขนมหวานแบบต่าง ๆ ดังนั้นการออกแบบเครื่องกวนผสมอย่างถูกต้อง และเหมาะสมบนพื้นฐานตามหลักการทางทฤษฎี จึงมีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูลทางเทคนิคในด้านต่าง ๆ อาทิเช่น ความหนืด อุณหภูมิ และรอบการกวนผสม มาใช้สำหรับการอ้างอิงเพื่อทำการออกแบบระบบการทำงานของเครื่องกวนผสมให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด นอกจากนี้ งานวิจัยที่ผ่านมา ที่เกี่ยวข้องกัขั้นตอนการออกแบบเครื่องกวนผสมแบบต่าง ๆ ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจ และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดได้ โดยปกติรูปแบบของถังผสม และวิธีการออกแบบในปัจจุบันมีหลากหลายวิธี และรูปร่างของถังผสมที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดที่จะนำไปใช้งาน เช่น ถังกวนผสมแบบไม่ใช้อากาศ Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) เป็นเทคโนโลยีการกวนผสมในรูปแบบหนึ่งที่ใช้สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเครื่องกวนผสมแบบนี้ จะประกอบไปด้วยตัวอุปกรณ์การกวนภายในถัง โดยมีหลักการที่ว่า ให้สามารถทำการกวนผสมและสามารถหยุดเป็นช่วง ๆ ได้ จากการวิจัยในเรื่องนี้พบว่า ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบจะต้องสามารถทำให้ถังผสมที่ออกแบบสามารถสร้างอัตราการกวนผสมผลิตภัณฑ์ได้อย่างทั่วถึง [1,2] กระบวนการออกแบบใบพัดกวนผสมและถังกวนผสมให้สามารถทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพสูงจะอาศัยพื้นฐานการกำหนดขนาดมิติของถัง,

อัตราส่วนของถัง, รูปแบบของใบพัดกวนผสม, จำนวนใบพัดกวนผสม, ลักษณะการติดตั้งใบพัดกวนผสม และรอบการหมุนของใบพัดกวนผสม [3] ขั้นตอนการออกแบบใบพัดกวนผสมและรูปแบบของถังผสมสำหรับการกวนผสมอาหารและสารเคมี โดยการออกแบบจะมีขั้นตอนและปัจจัยที่จำเป็นหลายด้านที่ต้องใช้สำหรับการกำหนดการออกแบบในเบื้องต้น ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการผสมของอนุภาคของแข็งที่ต้องการให้มีการกระจายตัวภายในถังผสมได้ดียิ่งขึ้น พร้อมทั้งได้ทำการทดสอบการกระจายอนุภาคของแข็งในลักษณะต่าง ๆ โดยทำการกำหนดขั้นตอนการศึกษา โดยทำการกำหนดจำนวนอนุภาคของแข็ง พร้อมทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) ผลจากการศึกษาพบว่า ขนาดของแผ่นกั้น T/12 โดยมีจำนวนแผ่นกั้น 4 แผ่น ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ โดยที่ตัวแปร T คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังผสม [4] เทคนิคการออกแบบที่ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในกระบวนการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบถังกวนผสมของเหลวและอนุภาคของแข็งในปัจจุบันนั้น มีหลากหลายวิธี อาทิเช่น รูปแบบการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล Computational Fluid Dynamics (CFD) การวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง Discrete Element Method (DEM) และเทคนิคการจำลองผลการเคลื่อนที่ของอนุภาค Move Particle Simulation (MPS) ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวสามารถใช้ในการจำลองสนามการไหล ทั้งในส่วนของความเร็ว ความดัน และค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมุนของใบพัดกวนผสม เป็นต้น เทคนิคการจำลองผลการเคลื่อนที่ของอนุภาค เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจำลองอนุภาคของของไหลผสมที่สามารถแสดงผลในรูปแบบของผิวของไหลอิสระ Free Surface และแบบอนุภาคของไหลเคลื่อนที่ Move Particle Simulation ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การจำลองของไหลที่ใช้อนุภาคโดยมีสิ่งกีดขวางที่ทำให้เสียรูป โดยอาศัยขั้นตอนและวิธีการ Moving Particle Semi-implicit (MPS) ซึ่งเป็น

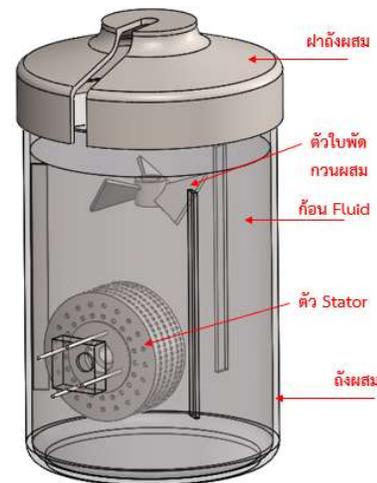
หนึ่งในวิธีการที่ใช้อุณหภูมิสำหรับการไหลแบบไม่บีบอัด [5] จากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและทบทวนเนื้อหาทางทฤษฎีเกี่ยวข้องกับกระบวนการผสมและเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบ จำลอง เพื่อทำการแก้ปัญหาในด้านต่าง ๆ ของกระบวนการผสมผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับของไหลในลักษณะต่าง ๆ ทำให้เห็นถึงประโยชน์ในด้านของการออกแบบ วิจัย และช่วยลดเวลาในการสร้างต้นแบบจริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการศึกษาและทำการออกแบบกระบวนการผสมของของไหลสองชนิดคือ น้ำและน้ำผึ้ง ซึ่งของไหลสองชนิดนี้จะมีคุณสมบัติของไหลที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน การศึกษาการกวนผสมจะอาศัยเครื่องผสมแบบ 2 ใบพัดดังแสดงในรูปที่ 1 มาจำลองกระบวนการวิจัยโดยใช้หลักการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค MPS เพื่อทำการศึกษานามการไหล ความเร็วภายในถังผสม ตลอดจนการกระจายตัวของความดันที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองที่มีการติดตั้งตัวสเตเตอร์ (Stator) และแบบไม่มีตัว สเตเตอร์ ซึ่งขั้นตอนในการทำวิจัย จะทำการเริ่มต้นโดยนำเทคโนโลยีและเทคนิคการวิเคราะห์ผลด้วย MPS มาทำการสร้างจำลองคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพของกระบวนการผสม สำหรับงานตัวอย่างในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS 2014 โดยทำการสร้างต้นแบบและได้ทำการกำหนดกรณีศึกษาไว้ 3 กรณี คือ แบบจำลองที่ไม่มีการติดตั้งตัวสเตเตอร์ เข้าไปกับชุดใบพัดกวนผสม ส่วนแบบจำลองที่สองมีการติดตั้งตัว สเตเตอร์ที่ใบพัดกวนผสมในแนวแกนนอน และแบบจำลองที่สาม ทำการติดตั้งตัว สเตเตอร์ เข้าไปกับใบพัดกวนผสมทั้งในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน ดังแสดงในรูปที่ 2



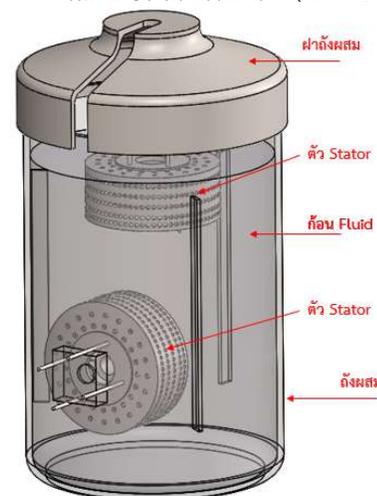
รูปที่ 1 แสดงแบบองค์ประกอบเครื่องผสมแบบ 2 ใบพัด



ก. แบบจำลองที่ไม่มีติดตั้งตัว สเตเตอร์ (ไม่ติดตั้งสเตเตอร์)



ข. แบบจำลองที่ติดตั้งตัวสเตเตอร์ ที่ใบพัดกวนผสมในแนวแกนนอนและ ไม่มีการติดตั้งตัวสเตเตอร์ ในแนวแกนตั้ง (ติดตั้ง 1 สเตเตอร์)



ค. แบบจำลองที่ทำการติดตั้งตัว สเตเตอร์ เข้าไปกับใบพัดกวนผสมทั้งใน แนวแกนตั้งและแนวแกนนอน (ติดตั้ง 2 สเตเตอร์)

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ MPS

## 2. หลักการและทฤษฎี

### 2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MPS

เทคนิคการวิเคราะห์ผลด้วย MPS สามารถเข้ามาช่วยในการจำลองผลเชิงตัวเลขและอธิบายพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคและแบบผิวของไหลอิสระได้อย่างชัดเจน โดยสามารถช่วยในการคำนวณหาค่าของความเร็วในสนามการไหล การเคลื่อนที่ของอนุภาคขณะมีการผสมกัน ในทางทฤษฎีเทคนิคการวิเคราะห์ผลด้วย MPS สามารถเข้ามาช่วยในการจำลองการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ Incompressible flow และรูปแบบการไหลของผิวของไหลแบบอิสระภายใต้รูปแบบของระบบสมการควบคุม governing equation ที่ใช้ในการพิจารณาและปัญหาด้วยกฎการอนุรักษ์มวลและสมการของนาเวียร์-สโตกส์ [6] ระบบสมการพื้นฐานการวิเคราะห์แบบ MPS สามารถแสดงพฤติกรรมตามระบบสมการดังนี้

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 v + g \quad (1)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (2)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (3)$$

เมื่อ  $v, \rho, P, \nu$  และ  $g$  คือ ค่าความเร็ว ค่าความหนาแน่นของของไหล ความดัน ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ และค่าความแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อทำการพิจารณาเทอมของความดันในระบบการวิเคราะห์  $\alpha_i^{Press}$  คือ การได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้ [6]

$$\alpha_i^{Press} = -\frac{D}{\rho n^0} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{P_j^{k+1} - \hat{P}_i^{k+1}}{\|r_j^* - r_i^*\|^2} \cdot (r_j^* - r_i^*) \omega \right] \quad (4)$$

- เมื่อ  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ  
 $D$  คือ จำนวนมิติเชิงพื้นที่  
 $n^0$  คือ ค่าความหนาแน่นของจำนวนอนุภาค

$n_i$  ที่สถานะเริ่มต้นของการคำนวณ

$\hat{P}_i^{k+1}$  คือ ค่าต่ำสุดของความดันในรัศมีที่มี

ประสิทธิผลในกระบวนการผสม

$r_i^*$  คือ ตำแหน่งของ Particle

$k$  คือ time step

$i, j$  คือ สัญลักษณ์ใช้แทนตำแหน่งอนุภาค

เมื่อทำการพิจารณาค่าความหนาแน่นของจำนวนอนุภาค  $n_i$  และค่าฟังก์ชันน้ำหนัก  $\omega(r)$  สามารถแสดงพฤติกรรมได้ดังสมการที่ 5 และ 6

$$n_i = \sum_{j \neq i} \omega(\|r_j - r_i\|) \quad (5)$$

$$\omega(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \leq r < r_e) \\ 0 & (r \leq r_e) \end{cases} \quad (6)$$

เมื่อ  $r_e$  คือ รัศมีประสิทธิผล ซึ่งค่าความดัน  $\{\hat{P}_i^{k+1}\}$  ซึ่งได้จากตัวอย่างของระบบเชิงเส้น และสามารถเขียนพฤติกรรมของระบบสมการได้เป็น

$$-\frac{\rho 0}{\Delta t^2} \left( \frac{n_i^* - n^0}{n^0} - \alpha P_i^{k+1} \right) = \frac{2D}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} \left[ (P_j^{k+1} - P_i^{k+1}) \omega(\|r_j^* - r_i^*\|) \right] \quad (7)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ค่าการบีบอัดตัวของของไหล และ  $\lambda$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดตัวแปรทางสถิติ

### 2.2 รูปแบบสมการทางพลศาสตร์ของไหล

รูปแบบของระบบสมการทางพลศาสตร์ของไหลใน ถูกทำการพิจารณาขึ้นมาจากระบบสมการของนาเวียร์-สโตกส์ ซึ่งระบบสมการของนาเวียร์-สโตกส์จะประกอบไปด้วยกฎต่าง ๆ เช่น กฎการอนุรักษ์มวล Conservation of mass กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม Conservation of Momentum และกฎการอนุรักษ์พลังงาน Conservation of Energy ซึ่งกฎเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการอธิบายและทำนายพฤติกรรมของรูปแบบการไหลในแบบต่าง ๆ ในกระบวนการผสม ซึ่งรูปแบบสมการที่กล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.2.1 กฎการอนุรักษ์มวล [1]

สมการอนุรักษ์มวล คือรูปแบบของสมการที่ว่าด้วยเรื่องของอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในระบบควบคุม หรือ ปริมาตรควบคุม Control volume จะเท่ากับผลต่างของมวลที่ไหลเข้าและไหลออกปริมาตรควบคุม สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (8)$$

โดยที่  $t$  คือ เวลา

$\vec{V}$  คือ เวกเตอร์ความเร็วของสนามการไหล

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของไหล

### 2.2.2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม [1]

ในงานวิจัยนี้ระบบของสมการอนุรักษ์โมเมนตัม คือรูปแบบของสมการที่ว่าด้วยเรื่องของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของอนุภาคของเหลวจะต้องเท่ากับผลรวมของแรงที่อนุภาคของเหลว และสามารถเขียนสมการอธิบายพฤติกรรมได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + S_{My} \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + S_{Mz} \quad (11)$$

โดยที่  $P$  คือ ค่าความดันของระบบการวิเคราะห์

$u$  คือ ค่าโมเมนตัมในแนวแกน  $x$

$v$  คือ ค่าโมเมนตัมในแนวแกน  $y$

$w$  คือ ค่าโมเมนตัมในแนวแกน  $z$

$\nu$  คือ ค่าความหนืดของของไหล

$\tau$  คือ ค่าความเค้นเฉือนเนื่องจากความหนืด

$\sigma$  คือ ค่าเทนเซอร์ของความเค้น

$S$  คือ ค่า Body force ที่ถูกรวมเป็นเทอม  $S$

### 2.2.3 กฎการอนุรักษ์พลังงาน [1]

ในงานวิจัยนี้ สามารถอธิบายรูปแบบของระบบสมการสำหรับการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้ คือ รูปแบบของระบบสมการที่ว่าด้วยเรื่องของอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของของไหล ซึ่งจะเท่ากับอัตราของค่าพลังงานความร้อนสุทธิที่เพิ่มขึ้นในตัวอนุภาคของเหลวและหลังจากนั้นถูกบวกเข้ากับเทอมของอัตราการสุทธินำความร้อนสุทธิที่นำเข้ามาในระบบการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถเขียนรูปแบบของระบบสมการและสามารถทำการอธิบายพฤติกรรมในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\phi}{Dt} \left( e + \frac{V^2}{2} \right) &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &- \left( \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \\ &+ \rho \vec{f} \cdot \vec{y} \end{aligned} \quad (12)$$

โดยที่

$\phi$  คือ ค่าฟังก์ชันการกระจาย (dissipation Function)

$e$  คือ ค่าตัวแปรพลังงานภายใน

$V$  คือ ค่าตัวแปรขนาดของความเร็ว

$\dot{q}$  คือ ค่าการนำความร้อนต่อหน่วยพื้นที่

$k$  คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$T$  คือ ค่าตัวแปรของอุณหภูมิ

$u$  คือ ส่วนประกอบความเร็วในแกน  $x$

$v$  คือ ส่วนประกอบความเร็วในแกน  $y$

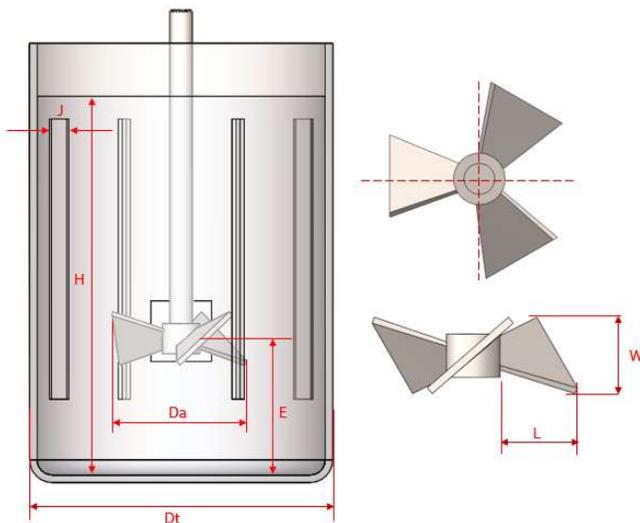
$w$  คือ ส่วนประกอบความเร็วในแกน  $z$

$p$  คือ ส่วนประกอบความดันในระบบ

$f$  คือ ระบบของแรงในเทอมของงานสุทธิ

## 2.3 การออกแบบถังกวนผสมและกำหนดสัดส่วนของใบพัดกวนผสม

ระบบของของการออกแบบถังกวนผสมในกระบวนการกวนผสมของไหลแบบต่าง ๆ ในภาคอุตสาหกรรม ไม่มีหลักการตายตัว โดยการออกแบบจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน [1,10] ซึ่งจะมีตัวแปรในการออกแบบถังผสมที่แตกต่างกัน เช่น ชนิดของรูปทรงถังผสม การติดตั้งครีบบใบพัด (Baffle) และรูปทรงใบพัด ตลอดจนรอบการหมุนที่เหมาะสมกับการกวนผสมแบบต่าง ๆ เป็นต้น จุดเริ่มต้นในการออกแบบจะใช้พื้นฐานในการกำหนดขนาดมิติของการออกแบบถังผสมของไหล [1,7] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อัตราส่วนการออกแบบถังกวนผสมในงานวิจัย

จากรูปที่ 3 แสดงอัตราส่วนการออกแบบถังกวนผสมในงานวิจัย โดยตัวแปรที่แสดงสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 13-18

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (13)$$

$$\frac{H}{D_t} = 1 \quad (14)$$

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12} \quad (15)$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (16)$$

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad (17)$$

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \quad (18)$$

เมื่อ $D_a$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด
$D_t$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของถังผสม
$H$	คือ ค่าความสูงของระดับลิกของไหล
$E$	คือ ค่าความสูงของใบพัดจากก้นถัง
$J$	คือ ค่าความหนาของแผ่นครีบบ (Baffle)
$W$	คือ ค่าความกว้างของใบพัดกวนผสม
$L$	คือ ค่าความยาวของใบพัด
$t$	คือ ค่าความหนาของใบพัดกวนผสม

## 2.4 การเลือกใช้ใบพัดกวนผสม

ประสิทธิภาพในการกวนผสมของเหลวจะขึ้นอยู่กับ การเลือกชนิดของใบพัดให้เหมาะสม ซึ่งการเลือกชนิดของใบพัดกวนผสมถือได้ว่าเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบการทำงานของเครื่องจักรกวนผสมแบบต่าง ๆ ซึ่งใบพัดกวนผสมที่มีใช้งานกันในปัจจุบัน แบ่งออกได้ 3 แบบ คือ ใบพัดกวนผสมแบบการไหลในแนวแกน การไหลแบบแนวรัศมี และการไหลในแนวสัมผัส ถ้าพิจารณาตามรูปทรงใบพัดกวนผสม ก็จะสามารถทำการแบ่งรูปแบบออกได้ 3 ชนิด คือ ชนิด Propellers, Paddles และแบบ Turbine เป็นต้น จากรูปทรงและลักษณะการไหลทางกายภาพของใบพัด จะส่งผลโดยตรงทำให้รูปแบบการไหลในถังผสมมีการไหลของของไหลที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ใบพัดที่มีลักษณะการไหลในแนวแกนจะเป็นรูปทรงใบพัดกวนผสมชนิด Propellers เช่น Pitched blade turbine และแบบ Hydrofoil turbine ส่วนใบพัดที่มีลักษณะการไหลในแนวรัศมีคือใบพัดแบบ Paddles เช่น Rushton turbine และ Concave blade turbine เป็นต้น [1,8] โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะเลือกใช้ใบพัดกวนผสมเป็นแบบ Pitched blade turbine

## 2.5 รูปแบบของการวิเคราะห์พลังงานกวนผสม

รูปแบบของการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้สำหรับการกวนผสมของเหลวภายในถังกวนผสมจะขึ้นอยู่กับตัวแปรคุณสมบัติของเหลวที่ต้องการกวนหรือต้องการผสม ซึ่งค่าตัวแปรดังกล่าวที่ใช้ในการพิจารณา คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว ( $\rho$ ) ค่าความหนืดสัมบูรณ์ ( $\mu$ ) ชนิดของใบพัดกวนผสมและสัดส่วนขนาด เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด ความสูงของใบพัดและรอบการหมุนของใบพัดกวนผสม เป็นต้น [1,11] ในขั้นตอนการวิเคราะห์จะทำการพิจารณาตัวแปรในรูปแบบอัตราส่วนทอมไร้มิติ อาทิเช่น ตัวแปรเลขกำลัง Power number ( $N_p$ ) และค่าตัวแปรเรย์โนลด์ Reynolds number ( $N_{Re}$ ) ซึ่งตัวแปรทั้งสองสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ 19 และ 20 [1]

$$N_p = \frac{P}{N^3 D_a^5 \rho} \quad (19)$$

$$N_{Re} = \frac{\rho N D_a^2}{\mu} \quad (20)$$

พลังงานที่ใช้ในการกวนผสมของเหลวจะสามารถพิจารณาจากรูปแบบการไหล โดยรูปแบบการไหลสามารถใช้ตัวเลขเรย์โนลด์ในการแบ่งชนิดการไหลในถังกวนผสมว่ามีรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน หรือราบเรียบ ซึ่งช่วงการแบ่งรูปแบบการไหลทางทฤษฎีมีหลักการดังนี้คือ ถ้าค่าตัวแปร  $N_{Re} > 10,000$  ถือได้ว่าเป็นช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนการไหลแบบราบเรียบ ค่าตัวแปร  $N_{Re} < 20$  และถ้าค่าตัวแปร  $N_{Re}$  อยู่ระหว่างค่าตัวแปร 20–10,000 จะเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลทั้งราบเรียบและปั่นป่วนผสมกันอยู่ จึงเรียกการเปลี่ยนแปลงทั้งสองแบบนี้ว่า Transition zone [1,8]

การคำนวณค่าตัวแปรของพลังงานในการกวนผสมแบบปั่นป่วน สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 21 และค่าตัวแปรของพลังงานในการกวนผสมแบบราบเรียบ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 22

$$P = K_T N^3 D_a^5 \rho \quad (21)$$

$$P = K_L N^2 D_a^3 \mu \quad (22)$$

เมื่อ  $K_T$  คือ ค่าคงที่ไร้หน่วยประกอบการคำนวณสำหรับรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน

$K_L$  คือ ค่าคงที่ไร้หน่วยประกอบการคำนวณสำหรับรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ

โดยค่าตัวแปร  $K_T$  และ  $K_L$  สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับการออกแบบ โดยสามารถเลือกใช้ได้จากตารางที่ 1

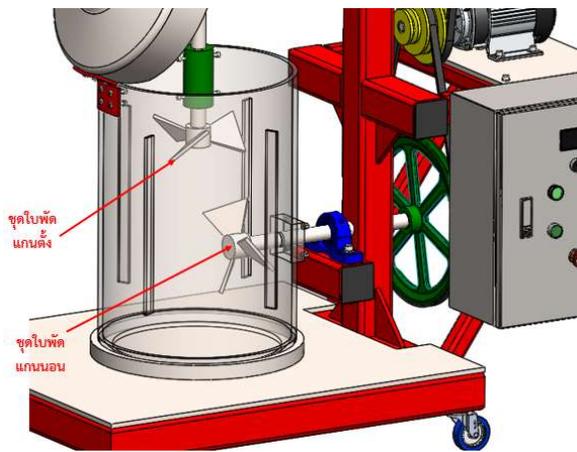
ตารางที่ 1 ค่าคงที่  $K_T$  และ  $K_L$  ประกอบการคำนวณ [1, 8]

ชนิดของใบพัดแบบ Propeller	$K_T$	$K_L$
- Propeller 3 blades, pitch 1.0	41.0	0.32
- Turbine 4 Flat blades, vaned disc	60.0	5.31
- Flat paddles, 4 blade, $D_a / W = 6$	49.0	2.75
- Turbine 6 pitched blades at 45°	-	1.63
- Turbine 4 pitched blades at 45°	44.5	1.27

## 3. ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

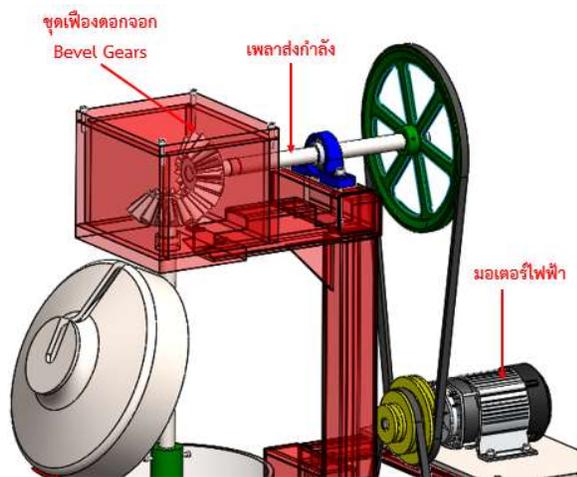
### 3.1 เตรียมชิ้นงานวิเคราะห์

ระเบียบวิธีการของกระบวนการศึกษาในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมชิ้นงาน 3 มิติ สำหรับทำการวิเคราะห์ MPS เป็นขั้นตอนแรกในการดำเนินงาน โดยผู้วิจัยทำการออกแบบระบบการทำงานของชุดโครงสร้างเครื่องจักรกวนผสมแบบใช้ใบพัดกวนผสมชนิด Propeller แบบ 3 ใบพัดจำนวน 2 ชุด ที่มีทิศทางการติดตั้งใบพัดกวนผสมที่แตกต่างกันด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS 2014 กล่าวคือ โดยใบพัดกวนผสมชุดที่ 1 เป็นใบพัดกวนผสมแบบแกนนอน โดยผู้วิจัยจะออกแบบให้เพลลาใบพัดสามารถทำการติดตั้งเข้ากับโครงสร้างถังกวนผสมโดยตรงเพื่อลดกลไกในการติดตั้งให้น้อยที่สุด และออกแบบเพลลาใบพัดให้สามารถเชื่อมต่อกับระบบของเพลลาส่งกำลังที่ถูกเชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยมูเล่และสายพาน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงใบพัดกวนผสมแกนนอนที่ติดตั้งเข้ากับระบบส่งกำลัง

ส่วนใบพัดกวนผสมชุดที่ 2 เป็นใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง ที่สามารถทำการติดตั้งเข้ากับระบบของเพลาส่งกำลังที่ถูกเชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยมูเล่และทำการปรับทิศทางจากแนวแกนนอนของเพล่า และถูกเชื่อมต่อด้วยเฟืองดอกจอก Bevel Gears เพื่อปรับทิศทางให้อยู่ในแนวแกนตั้งดังรูปที่ 5



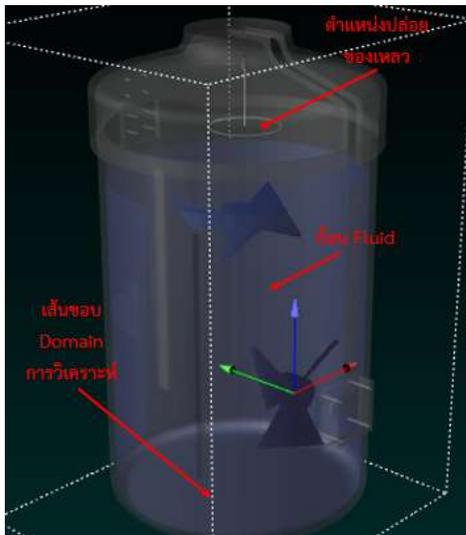
รูปที่ 5 แสดงใบพัดกวนผสมแกนตั้งที่ติดตั้งเข้ากับระบบส่งกำลัง

หลังจากนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับชิ้นงานเครื่องจักรกวนผสม โดยทำการลดจำนวนชิ้นส่วนของแบบจำลองการวิเคราะห์ให้เหลือเพียงบริเวณพื้นที่สำหรับทำการวิเคราะห์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะสนใจเฉพาะถึงผสมและใบพัดกวนผสมเท่านั้น ดังนั้นจะได้ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2 จากแบบจำลองการวิเคราะห์ในรูปที่ 2 ชิ้นงานที่ทำการออกแบบเพื่อใช้เป็น

แบบจำลองการวิเคราะห์ MPS จะประกอบไปด้วยรูปทรงของถังผสมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 400 มิลลิเมตร มีความสูงจากพื้นที่ก้นถังผสมจนถึงพื้นที่ฝาปิดถังผสมด้านบนเท่ากับ 720 มิลลิเมตร ในส่วนของระดับความสูงของของไหลจำลองมีค่าความสูงเท่ากับ 500 มิลลิเมตร ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสมมีขนาดเท่ากับ 190 มิลลิเมตร และในส่วนของแบบจำลอง สเตเตอร์ ครอบใบพัดกวนผสมจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 200 มิลลิเมตร เมื่อได้ชิ้นงานสำหรับทำการวิเคราะห์ตามกำหนดแล้ว หลังจากนั้นขั้นตอนต่อไป ผู้วิจัยจึงทำการบันทึกไฟล์ชิ้นงานวิเคราะห์ที่ได้จากการออกแบบให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์นามสกุล .STL และนำเข้าสู่โปรแกรมวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ParticleWorks เป็นขั้นตอนต่อไป

### 3.2 ขั้นตอนเตรียมการก่อนการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการศึกษารูปแบบของสนามการไหลของของไหลผสม 2 ชนิด เพื่อทำการจำลองสนามการผสมระหว่างน้ำและน้ำผึ้งที่มีค่าตัวแปรคุณสมบัติการไหลที่ต่างกัน เช่น ค่าความหนาแน่น ความหนืดจลน์ และค่าคุณสมบัติทางความร้อนของของไหล เป็นต้น เพื่อวัตถุประสงค์ของการผสมกันในการทำน้ำเชื่อมในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ของธุรกิจ SME โดยของไหลที่เป็นก้อน Fluid ที่สร้างด้วย CAD และแสดงในรูปที่ 2 ผู้วิจัยจะกำหนดเป็นก้อนของไหลที่มีคุณสมบัติเป็นน้ำ ส่วนของไหลอีกชนิดหนึ่งที่จะไหลเข้ามาผสม ผู้วิจัยจะทำการกำหนดเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง โดยกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นน้ำผึ้ง Honey หลังจากนั้นจะทำการตั้งสมมุติฐานให้ภายในถังผสมเป็นของไหลชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเป็นน้ำ โดยทำการตั้งค่าให้เป็นค่าเริ่มต้นก่อนการคำนวณ หลังจากนั้นจะทำการตั้งสมมุติฐานโดยทำการปล่อยของเหลวที่มีค่าความหนืดสูงที่มีคุณสมบัติเป็นน้ำผึ้ง ให้เคลื่อนที่ลงมาผสมทางช่องปล่อยของเหลวด้วยความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที ที่ความจุด้วยอัตราส่วนของปริมาตร 0.03 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 องค์ประกอบการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค MPS

ในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับชิ้นงานวิเคราะห์แต่ละชิ้นที่แสดงในรูปที่ 2 ผู้วิจัยได้ทำการสร้างวัสดุที่มีคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการวิเคราะห์

ชื่อชิ้นงาน	ชื่อตัวแปร	ค่าตัวแปร
Blade สเตเตอร์	Solid Density	1,000 kg/m <sup>3</sup>
	Specific Heat	4,200 J/kg.K
Tank	Thermal Conductivity	0.6 W/m.K
	Thermal Boundary	Adiabatic
Water	Fluid Density	1,000 kg/m <sup>3</sup>
	Kinetic Viscosity	1e-6 m <sup>2</sup> /s
	Surface Tension Coefficient	0.072 N/m
	Specific Heat	4,200 J/kg.K
	Thermal Conductivity	0.6 W/m.K
Honey [9]	Fluid Density	1,413.4 kg/m <sup>3</sup>
	Kinetic Viscosity	2.74e-3 m <sup>2</sup> /s
	Surface Tension Coefficient	0.05 N/m
	Specific Heat	1,895 J/kg.K
	Thermal Conductivity	0.5 W/m.K

หลังจากทำการสร้างวัสดุให้แก่ชิ้นงานวิเคราะห์แต่ละชนิดแล้ว ขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยจะทำการกำหนดคุณสมบัติการหมุนให้กับชิ้นงานของใบพัดกวนผสม โดยทำการตั้งค่าให้กับใบพัด

กวนผสมแบบแกนนอน การหมุนของใบพัดแกนนอนจะหมุนรอบแกน y โดยกำหนดค่าพิกัดการหมุนเป็น 0,1,0 ส่วนการหมุนของใบพัดแกนตั้งจะหมุนรอบแกน z โดยกำหนดค่าพิกัดการหมุนเป็น 0,0,1 และทำการกำหนดรอบการหมุนเป็นแบบเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลา ซึ่งทำการกำหนดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ดังนี้คือ ที่เวลา 0 วินาที รอบการหมุนเท่ากับ 0 rpm ที่เวลา 2 วินาที รอบการหมุนเท่ากับ 0 rpm ที่เวลา 2.5 วินาที รอบการหมุนเท่ากับ 100 rpm และที่เวลา 2.5-10 วินาที รอบการหมุนเท่ากับ 100 rpm

### 3.3 ขั้นตอนกำหนดค่าการคำนวณ MPS

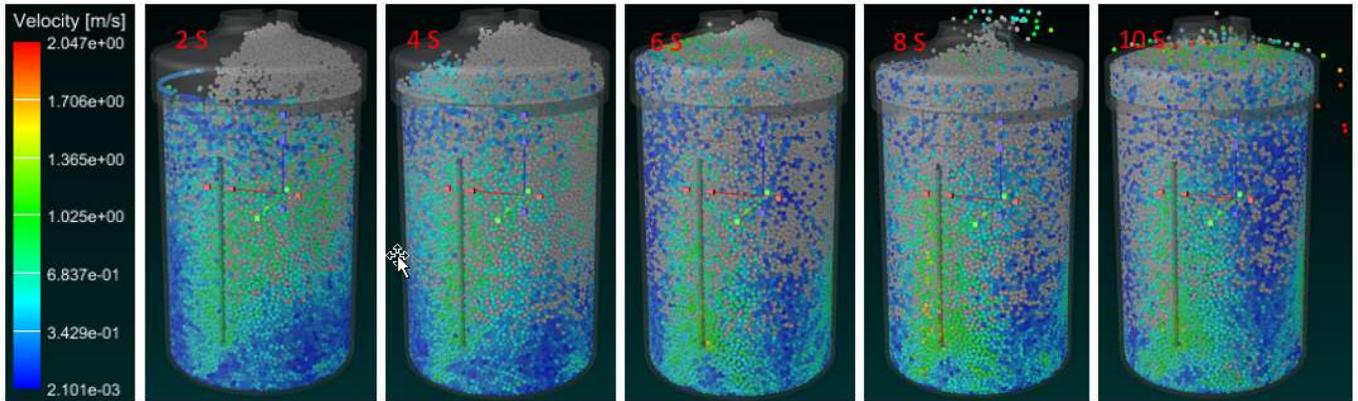
ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยจะทำการกำหนดรูปแบบค่าเริ่มต้นของการคำนวณ สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์แบบ MPS เป็นการกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นที่จะให้โปรแกรมทำการตั้งผลลัพธ์เริ่มต้นต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยกำหนดมาใช้ในการคำนวณผลของแบบจำลองการวิเคราะห์ MPS ทั้ง 3 กรณีศึกษา ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้ทำวิจัยจะทำการกำหนดค่าในส่วนของ ParticleWork Wizard เพื่อกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์ของโหมดความดันในส่วนของชนิดเป็นแบบการวิเคราะห์ Implicit และในส่วนของฟังก์ชัน Mode ผู้วิจัยจะทำการกำหนดรูปแบบเป็น Stabilized หลังจากนั้นทำการตั้งค่าตัวแปรในส่วนของความหนืดของของไหล โดยทำการกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบ Implicit และในส่วนของโหมดความปั่นป่วน ทำการกำหนดรูปแบบของไหลชนิดแบบปั่นป่วน ที่ประกอบไปด้วยตัวแปรที่สำคัญดังนี้คือ Smagorinsky Constant มีค่าเท่ากับ 0.15, Kappa มีค่าเท่ากับ 0.41, ตัวแปรของ B parameter มีค่าเท่ากับ 5.5, Boundary parameter 1 มีค่าเท่ากับ 10, Boundary parameter 2 มีค่าเท่ากับ 200 และค่า Target Physical Property ตั้งค่าเป็น water fluid เป็นต้น

ในส่วนของการกำหนดเวลาการวิเคราะห์ MPS ผู้วิจัยจะทำการกำหนดรูปแบบของช่วงเวลาในการวิเคราะห์ทั้งหมดเท่ากับ 10 วินาที หลังจากนั้นจึงกำหนดค่า Step time เท่ากับ 0.003 วินาที โดยค่า Step time ที่กำหนด จะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้กำหนดความถูกต้องของผลลัพธ์การคำนวณ

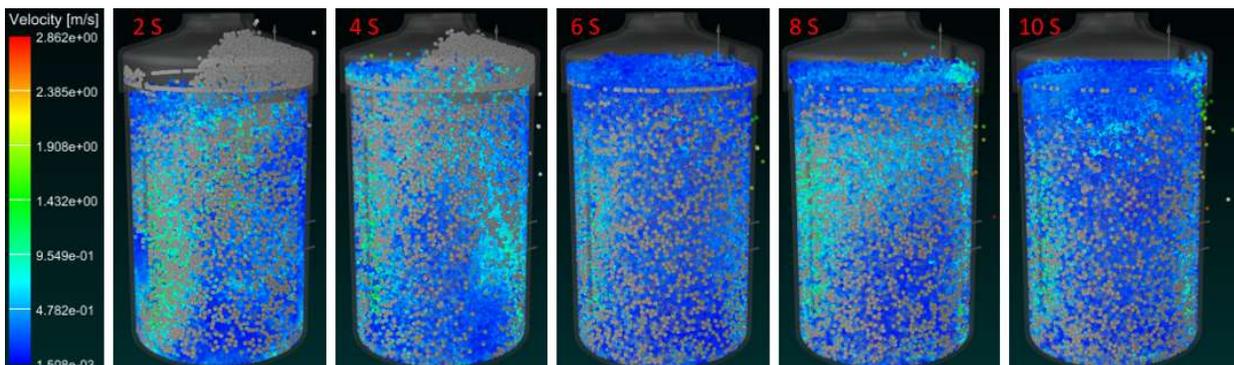
#### 4. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

ผลลัพธ์เชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม ParticleWorks สามารถแสดงและอธิบายภาพรวมได้ดังนี้คือ จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยเทคนิคของ MPS ในการจำลองการหมุนของใบกวนผสมที่ใช้สำหรับการกวนของไหลสองชนิดที่เป็นน้ำและน้ำผึ้งด้วยแบบจำลองที่สร้างขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วย แบบจำลองที่ไม่มีการติดตั้งตัวสเตเตอร์ เข้าไปกับชุดใบพัดกวนผสม แบบจำลองที่มีการติดตั้งตัวสเตเตอร์ที่ใบพัดกวนผสมในแนวแกนนอน และแบบจำลองที่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ เข้าไปกับใบพัดกวนผสมทั้งในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน ผลที่ได้พบว่า แบบจำลองที่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ สามารถสร้างอัตราการผสมได้ดีกว่าแบบจำลองที่ไม่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ เมื่อทำการพิจารณาเป็นช่วงเวลา

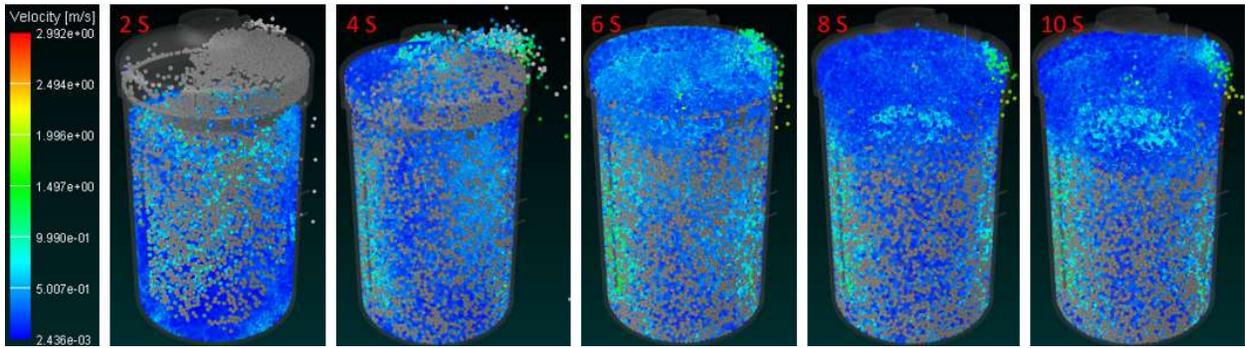
พบว่า แบบจำลองที่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ ทั้งแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน สามารถสร้างอัตราการผสมของของไหลสองชนิดได้ดีที่เวลาประมาณ 8.0 วินาที ส่วนแบบจำลองที่ติดตั้งตัวสเตเตอร์ 1 ตัวที่ใบพัดกวนผสมแกนนอน สามารถสร้างอัตราการผสมของของไหล 2 ชนิดได้ดีที่เวลาประมาณ 8.5 วินาที ส่วนแบบจำลองที่ไม่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ที่ใบพัดกวนผสม สามารถสร้างอัตราการกวนผสมได้ที่เวลา 9.0 วินาที ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นสามารถแสดงในรูปที่ 7, 8, 9 ส่วนรูปที่ 10 จะแสดงการเปรียบเทียบการผสมที่เวลา 10 วินาทีของแต่ละแบบจำลอง ส่วนอัตราการกวนผสมเทียบกับรอบการหมุน (Mixing time) ผู้วิจัยสามารถเปรียบเทียบการได้ดังรูปที่ 17



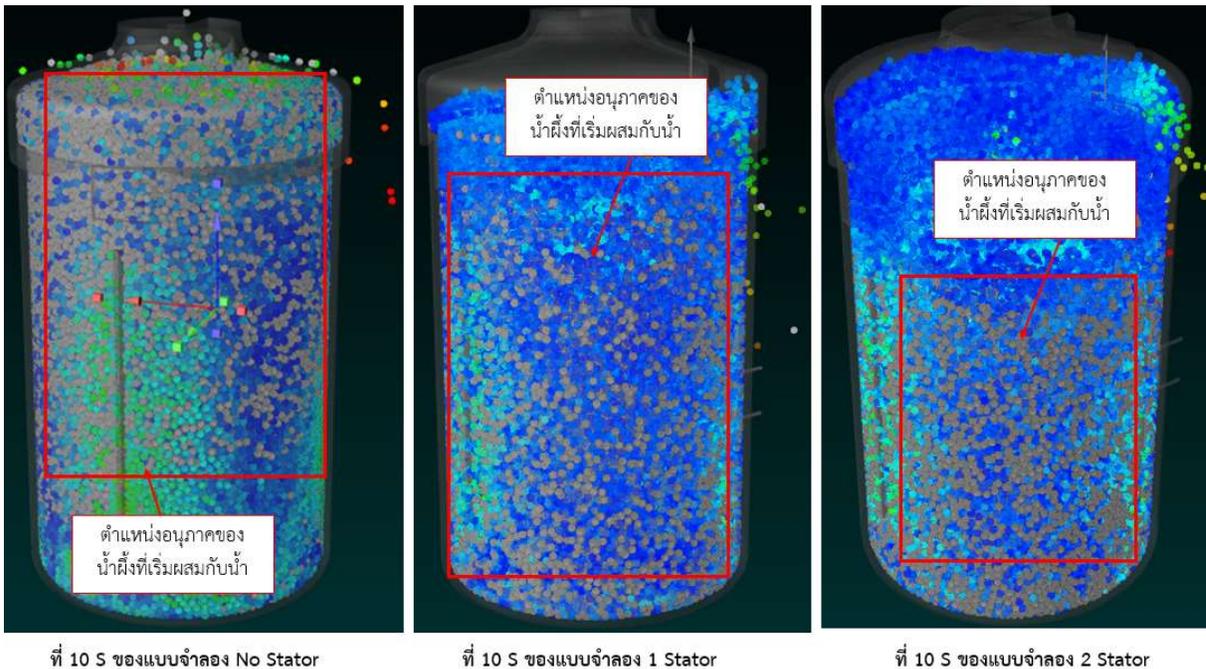
รูปที่ 7 ผลลัพธ์การกวนผสมของอนุภาคของไหลในช่วงเวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองใบพัดกวนผสมที่ไม่ได้ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์



รูปที่ 8 ผลลัพธ์การกวนผสมของอนุภาคของไหลในช่วงเวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองใบพัดกวนผสมที่ติดตั้ง 1 สเตเตอร์ กับชุดใบพัดกวนผสม



รูปที่ 9 ผลลัพธ์การกวนผสมของอนุภาคของไหลในช่วงเวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองใบพัดกวนผสมที่ติดตั้ง 2 สเตเตอร์กับชุดใบพัดกวนผสมทั้งแกนนอนและตั้ง



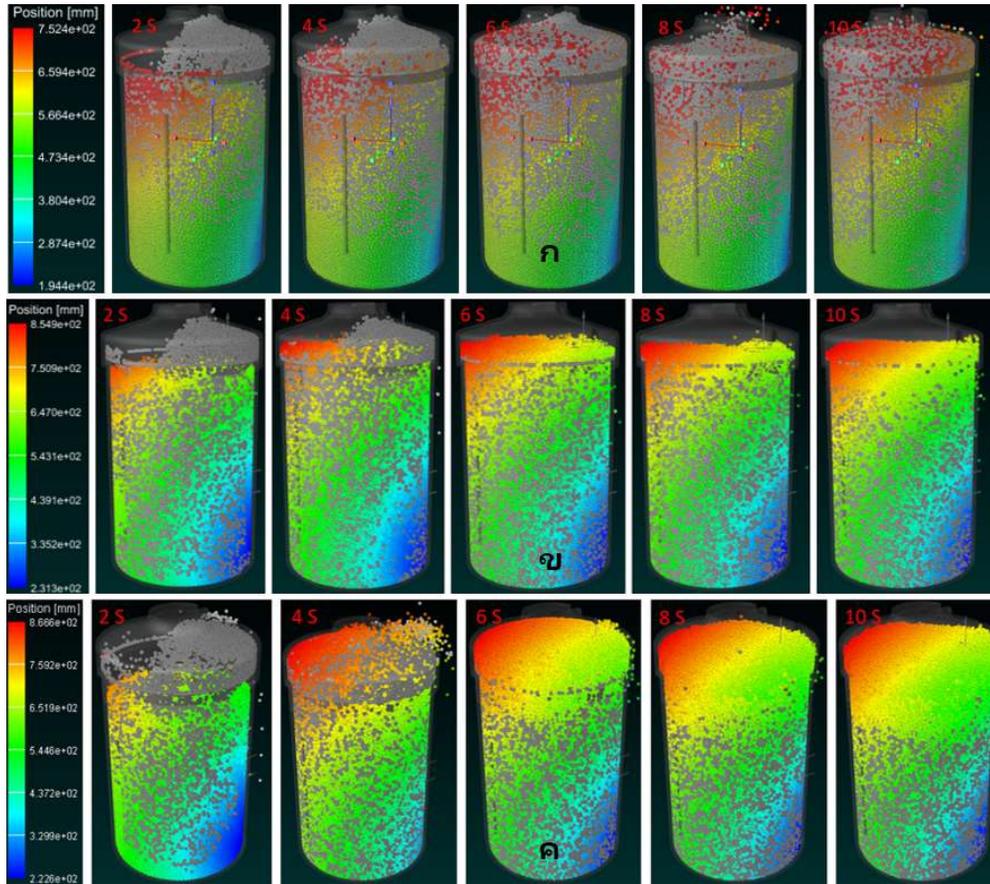
รูปที่ 10 ผลลัพธ์การเปรียบเทียบการกวนผสมของอนุภาคของไหลในช่วงเวลา วินาที 10 ของแบบจำลองใบพัดกวนผสมทั้ง แบบ 3

หลังจากนั้นเมื่อทำการพิจารณาสนามความเร็วในการไหลภายในถังผสมที่ใช้สำหรับการกวนผสมน้ำและน้ำผึ้งสำหรับอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ พบว่าแบบจำลองถังผสมที่ถูกติดตั้งตัวสเตเตอร์ ให้กับใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งและแบบแกนนอนสามารถสร้างสนามความเร็วสูงสุดที่ 2.992 เมตรต่อวินาที และมีค่าความเร็วต่ำสุดที่ 0.002436 เมตรต่อวินาที ส่วนแบบจำลองถังผสมที่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ เข้ากับชุดใบพัดกวนผสมแบบแกนนอน สามารถสร้างสนามความเร็วสูงสุดที่ 2.385 เมตรต่อวินาที และมีค่าความเร็วต่ำสุดที่ 0.001508 เมตรต่อวินาที และแบบจำลองถังผสมที่ไม่ได้ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ เข้ากับชุดใบพัดกวนผสมทั้งแบบแกนนอนและตั้ง

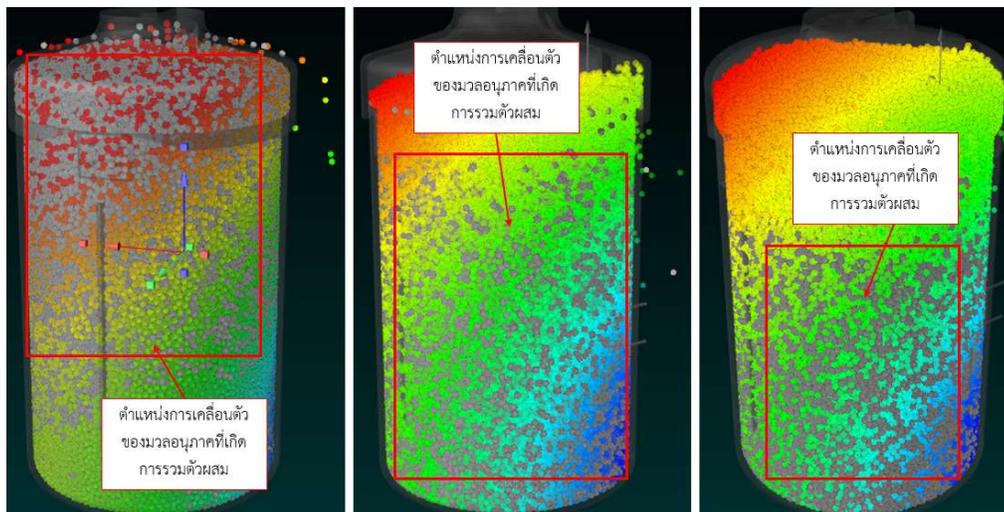
สามารถสร้างสนามความเร็วสูงสุดที่ 2.047 เมตรต่อวินาที และมีค่าความเร็วต่ำสุดที่ 0.0021 เมตรต่อวินาที จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่แสดงถึงสนามความเร็วการไหลที่สูงขึ้นของแบบจำลองที่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ และแบบจำลองที่ไม่มีการติดตั้งตัวสเตเตอร์ สามารถอธิบายและเปรียบเทียบได้ว่า ตัวสเตเตอร์ ที่ทำการออกแบบนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อการสร้างความเร็วของสนามการไหลและทำให้เกิดการแตกตัวของอนุภาคของไหลที่ไหลผ่านช่องว่างเล็ก ๆ ของตัวสเตเตอร์ เมื่อของไหลไหลผ่านช่องว่างเล็ก ๆ จะทำให้เกิดค่าความเร็วที่สูงจึงทำให้อนุภาคของของไหลผสมทั้งสองชนิดเกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาคเข้ามาทำการผสมกันได้ดีกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้ทำการติดตั้งตัว

สเตเตอร์ เมื่อทำการพิจารณาช่วงเวลาการวิเคราะห์ที่ 4 วินาที ของแบบจำลองทั้ง 3 พบว่า แบบจำลองที่ติดตั้งตัว สเตเตอร์ เข้ากับใบพัดแกนตั้งและแกนนอนจะสร้างแรงการหมุนที่เกิด

จากรอบการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 100 รอบต่อนาที ทำให้เกิดการหมุนเหวี่ยงของไหลที่เคลื่อนที่ออกจากใบพัดแกนผสม ได้ดีกว่าแบบจำลองอื่นที่วินาทีเดียวกัน



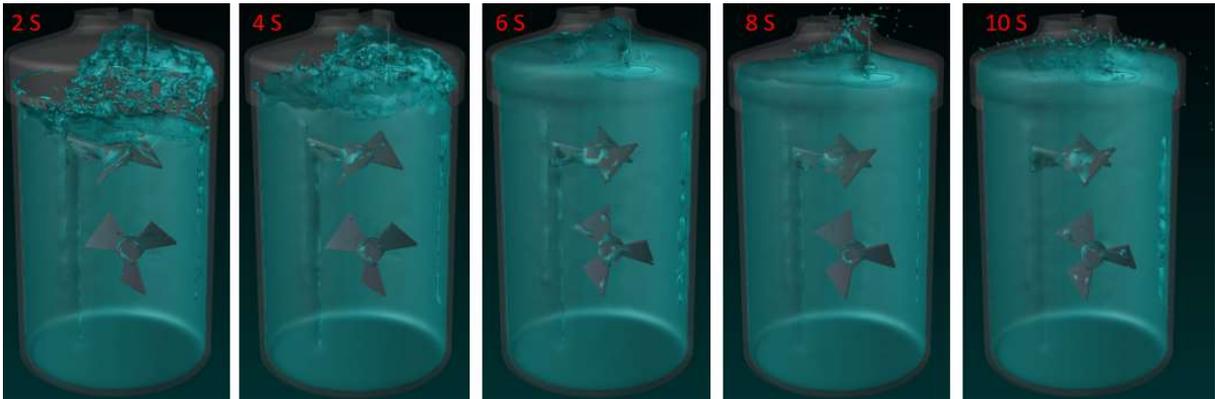
รูปที่ 11 การเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนตัวของอนุภาคของไหลของแบบจำลองต่าง ๆ ก) ไม่ติดตั้งตัวสเตเตอร์ ข) ติดตั้งตัวสเตเตอร์กับชุดใบพัดแกนผสมแกนนอน ค) ติดตั้งตัวสเตเตอร์กับชุดใบพัดแกนผสมแกนตั้ง



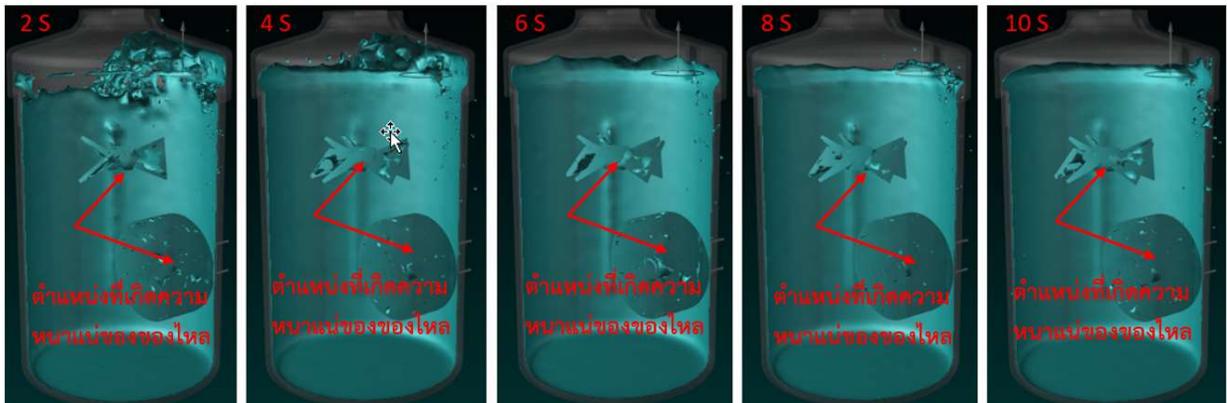
รูปที่ 12 การเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนตัวของอนุภาคของไหลของแบบจำลองต่าง ๆ

รูปที่ 11 และ 12 แสดงผลลัพธ์เชิงตัวเลขของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลที่เป็นน้ำฝิ่งที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วการไหล 1 เมตรต่อวินาที ที่มีความจุเชิงปริมาตรเท่ากับ 0.03 ลูกบาศก์เมตร ให้ไหลมาทำการผสมกับน้ำภายในถังผสม พบว่าอัตราการเคลื่อนตัวของกลุ่มอนุภาคของไหลที่เป็นน้ำฝิ่งและน้ำจะเกิดการแตกตัวของอนุภาคที่เกิดจากแรง

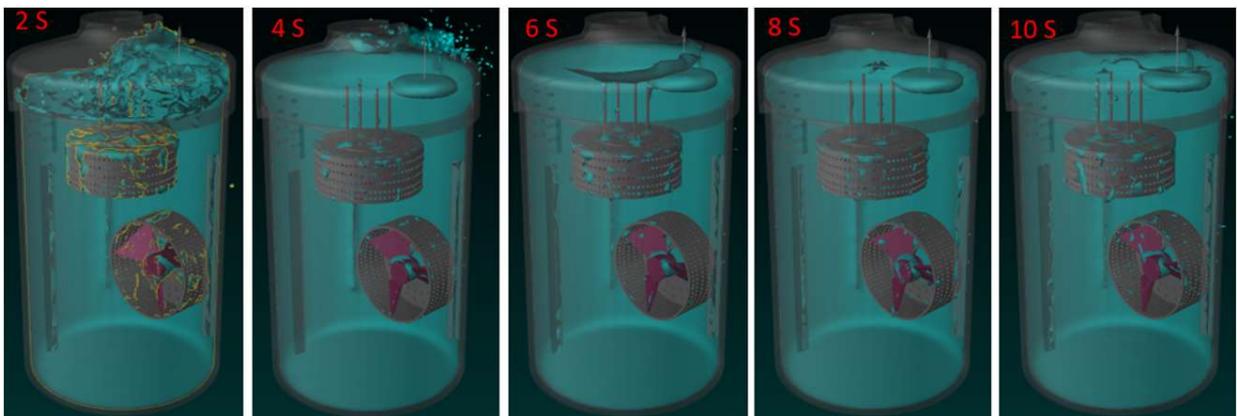
เหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากความเร็วยรอบการหมุนของใบพัดผสม และถูกเหวี่ยงอนุภาคของไหลที่เป็นน้ำและน้ำฝิ่งด้วยแรงที่เกิดจากการหมุน โดยถูกส่งให้ไหลผ่านช่องว่างเล็ก ๆ ของตัวสเตเตอร์ ที่ทำการติดตั้งไว้กับชุดใบพัดกวนผสมทั้งแบบแกนตั้งและนอน ด้วยเหตุนี้การติดตั้งตัวสเตเตอร์กับชุดใบพัดกวนผสมแบบตั้งและนอนจึงให้ผลลัพธ์ดีกว่าแบบจำลองอื่น ๆ



ก. การจำลองผลแบบ Free surface สำหรับแบบจำลองที่ไม่ติดตั้งตัวสเตเตอร์ (Stator)



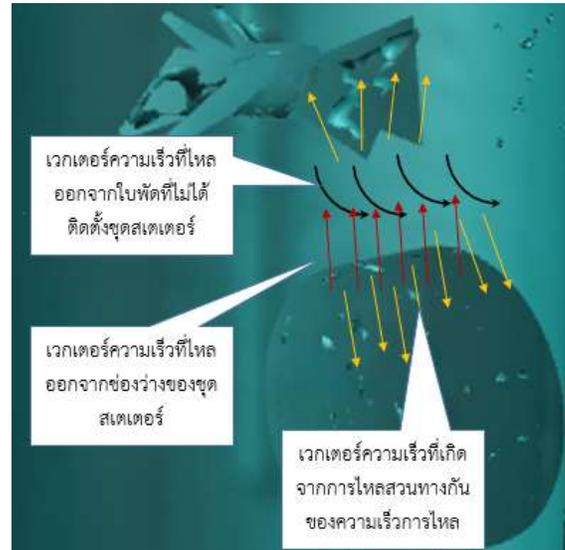
ข. การจำลองผลแบบ Free surface สำหรับแบบจำลองที่ติดตั้งตัวสเตเตอร์ (Stator) จำนวน 1 ตัว



ค. การจำลองผลแบบ Free surface สำหรับแบบจำลองที่ติดตั้งตัวสเตเตอร์ (Stator) จำนวน 2 ตัว

รูปที่ 13 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของอนุภาคของไหลแบบ Free Surface ของแบบจำลองต่าง ๆ

จากรูปที่ 13 เป็นผลการจำลองเชิงตัวเลขแบบผิวอิสระของของไหลผสม (Free surface) ซึ่งผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นสามารถแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนตัวของของไหลสองชนิดที่อยู่ในรูปคลื่นการไหลในแต่ละช่วงเวลา ตลอดจนการแสดงผลการไหลในรูปคลื่นบริเวณรอบใบพัดที่ส่งผลต่อแบบจำลองการวิเคราะห์ทั้งสามกรณีศึกษา โดยผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองเชิงตัวเลขแบบผิวอิสระของของไหลที่มีการผสมกัน พบว่ามวลการไหลของผิวอิสระจะมีความหนาแน่นเกิดขึ้นบริเวณรอบใบพัดกวนผสมและบริเวณภายในพื้นที่รัศมีของตัวสเตเตอร์ เนื่องจากความเร็วของใบพัดจะส่งถ่ายกำลังงานทางกลไปทำให้ของไหลผสมเกิดการเคลื่อนที่ และมีค่าความเร็วเกิดขึ้นในสนามการไหลของการผสม หลังจากที่ของไหลผสมเกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วของใบพัดกวนผสมจึงถูกเปลี่ยนรูปให้กลายเป็นพลังงานจลน์เกิดขึ้นในกระบวนการผสม และเมื่อค่าความเร็วที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลวิ่งผ่านช่องว่าง ๆ ของตัวสเตเตอร์ จึงทำให้ของไหลมีความเร็วสูงขึ้น แต่จะทำให้ของไหลผสมไม่สามารถเกิดการเคลื่อนตัวผ่านช่องว่างได้อย่างอิสระ จึงส่งผลทำให้เกิดการปั่นป่วน การกระเพื่อมและมีมวลการไหลเกิดขึ้นรอบบริเวณใบพัดและตัวสเตเตอร์ที่มากกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์เข้าในระบบการทำงาน แต่การปั่นป่วนและการกระเพื่อมที่เกิดขึ้นได้ส่งผลทำให้การผสมของไหลได้เร็วกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ ส่วนแบบจำลองที่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ที่ใบพัดกวนผสมแบบแกนนอน และไม่ได้ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ที่ใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง ผลที่เกิดขึ้นพบว่า เกิดการไหลวนของผิวอิสระที่ไม่เป็นระเบียบและไม่มีความสม่ำเสมอของอัตราการผสม เกิดความหนาแน่นระหว่างน้ำผึ้งที่ยังไม่ผสมกับน้ำรอบใบพัดและภายในตัวสเตเตอร์เป็นจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 13 (ข) และค่าความหนาแน่นของการไหลที่เกิดขึ้นรอบใบพัดกวนผสมและภายในตัวสเตเตอร์ที่ได้กล่าวในเบื้องต้น สามารถเกิดขึ้นได้จากค่าเวกเตอร์ความเร็วของใบพัดที่ไหลสวนทางกันระหว่างความเร็วที่ออกจากใบพัดกวนผสมที่ไม่มีตัวสเตเตอร์ กับความเร็วการไหลที่ไหลออกจากช่องว่างเล็ก ๆ ของตัวสเตเตอร์ที่มีความเร็วสูงที่ไหลพุ่งสวนขึ้นมาในทิศทางแกน Y ทำให้เกิดการต้านทานการไหลของความเร็วทั้งสองเกิดขึ้นในระบบการทำงาน ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพในการผสมเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 เวกเตอร์ความเร็วที่ไหลสวนทางกันในกระบวนการผสม

จากรูปที่ 14 เวกเตอร์ความเร็วที่อธิบายด้วยเส้นสีเหลืองคือเวกเตอร์ความเร็วที่ไหลออกจากใบพัดกวนผสมที่ไม่ได้ติดตั้งตัวสเตเตอร์ ซึ่งจะมีการไหลอยู่ 2 ทิศทางในแนวแกน (Y) คือทิศ (+Y) และ (-Y) กล่าวคือ ทิศทาง (+Y) นั้นจะเกิดจากแรงผลึกของเวกเตอร์ความเร็วที่ออกจากใบพัดกวนผสมที่ติดตั้งตัวสเตเตอร์ ซึ่งจะแสดงด้วยเส้นสีแดง ทำให้เกิดทิศทางพุ่งขึ้นส่วนทิศทาง (-Y) นั้นจะเกิดจากแรงของการหมุนของใบพัดกวนผสมที่ไม่ได้ติดตั้งตัวสเตเตอร์และความเร็วที่เกิดขึ้นสามารถเอาชนะแรงผลึกที่ออกจากใบพัดกวนผสมที่ติดตั้งตัวสเตเตอร์ได้ เลยส่งผลทำให้มีทิศทางพุ่งลง ส่วนเวกเตอร์ที่แสดงด้วยเส้นสีดำนั้น จะแสดงพฤติกรรมของการไหลแบบวนที่เกิดขึ้นในสนามการไหลของการผสมของงานวิจัยนี้ ซึ่งจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน (x)

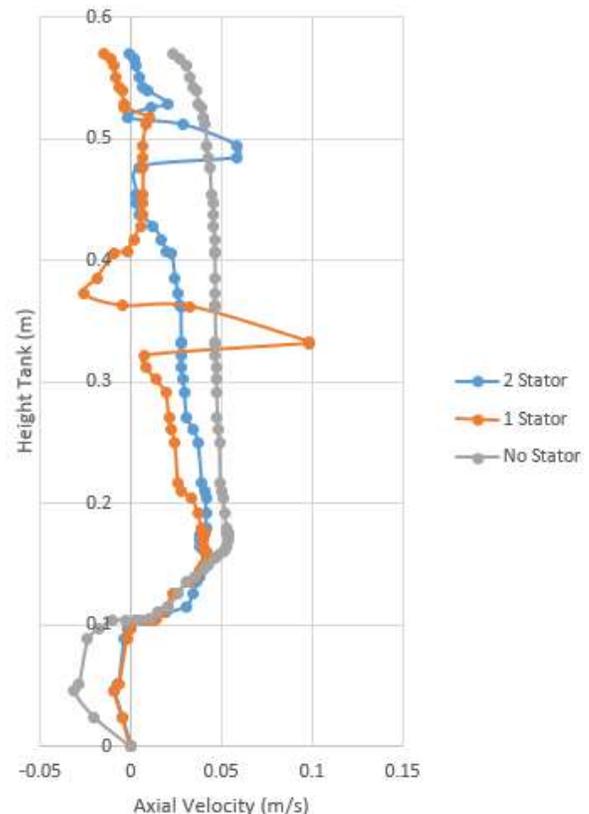
นอกจากนี้ผลจากการศึกษายังพบว่า บางจุดของถังมีการเกิดความเร็วที่สูงและบางจุดมีอัตราความเร็วที่ต่ำ ซึ่งส่งผลทำให้ความดันภายในสนามการผสมที่ไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในการกวนผสมที่มากขึ้นกว่าแบบจำลองอื่น จึงส่งผลทำให้เกิดอัตราการผสมระหว่างน้ำและน้ำผึ้งได้ไม่เต็มที่เท่าที่ควรเมื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ทั้งตัวใบพัดกวนผสมแนวแกนตั้งและแกนนอน เมื่อนำแบบจำลองทั้งสามมาทำการพิจารณาาร่วมกันสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองที่ติดตั้งตัวสเตเตอร์ที่ใบพัดกวนผสมแนวแกนตั้งและแกนนอนจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด ส่วน

ประสิทธิภาพลดลงมาคือแบบจำลองที่ไม่ได้ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ และประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุดคือแบบจำลองที่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ในส่วนของใบพัดกวนผสมแกนนอน และเมื่อทำการพิจารณาค่าความเร็วที่เกิดขึ้นในแนวแกนการไหลของถังผสมตามความสูงของถังผสมพบว่า ค่าระดับของโปรไฟล์ความเร็วในการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังกวนผสมทั้งสามแบบจำลองที่ทำการวิเคราะห์จะมีการขยายออกมากขึ้นจากตำแหน่งของแกนใบพัดกวนผสมทั้งสามแบบจำลอง เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระดับโปรไฟล์ความเร็วการไหลที่เกิดขึ้นของใบพัดกวนผสมทั้งสามแบบจำลองที่มีคุณลักษณะที่แตกต่างกันสามารถสรุปได้ว่า ใบพัดกวนผสมที่ได้ทำการติดตั้งตัว สเตเตอร์ ทั้งใบพัดกวนผสมแกนนอนและแกนตั้ง จะให้ค่าความเร็วและอัตราการผสมได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ดังแสดงในรูปที่ 15 และเมื่อทำการพิจารณารูปแบบของค่าความเร็วในแนวรัศมีการไหลภายในถังผสมพบว่า แบบจำลองที่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ ทั้งแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนจะให้อัตราการผสมที่ดีและส่งผลให้การเคลื่อนตัวของของไหลสองชนิดวิ่งเข้ามาผสมกันได้อย่างเหมาะสม ลดการกระเพื่อมของของไหลในทิศทางแกน y ทำให้เกิดการปั่นป่วนของของไหลรอบใบพัดที่น้อยลงดังรูปที่ 16

## 5. สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อทำการออกแบบระบบการกวนผสมของของไหลสองชนิดคือ น้ำและน้ำผึ้ง สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ เพื่อทำการจำลองสนามการไหลของของไหลผสมสองชนิดที่ทำการผสมกัน โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุภาคเคลื่อนที่ Move Particle Simulation (MPS) ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์อนุภาคเคลื่อนที่กระทำอยู่บนหลักการพิจารณาทางทฤษฎีบทของสมการนาเวียร์-สโตกส์ร่วมกับการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน มาช่วยในการคำนวณเพื่อหาคำตอบ จากการเปรียบเทียบของแบบจำลองการวิเคราะห์ MPS ทั้งสามพบว่าแบบจำลองที่ทำการติดตั้งตัวสเตเตอร์ ทั้งแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนจะให้ค่าผลการทดลองที่ดีที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ และสามารถยอมรับได้ในทางวิศวกรรม และนอกจากนี้แบบจำลองที่ทำการติดตั้งตัว

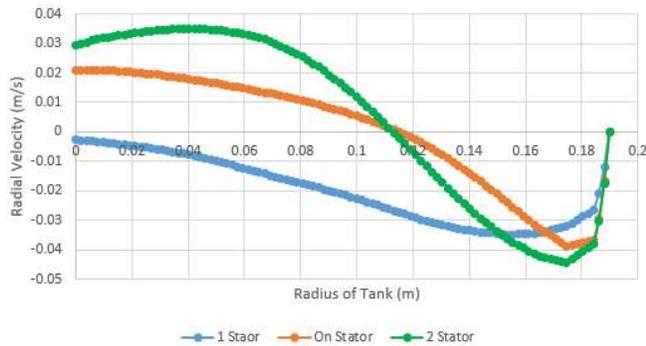
สเตเตอร์ทั้งแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนยังใช้เวลาในการผสมของไหลสองชนิดน้อยที่สุด ที่เวลา 8 วินาที ซึ่งให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับใบพัดกวนผสมแบบใบโค้ง [10] และเมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นจะให้ผลการทดสอบที่ดีกว่า ความสามารถของเทคนิค MPS สามารถสร้างผลกระทบได้โดยตรงจากการจำลองผลเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้ เพราะสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและออกแบบเพื่อต่อยอดในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการกวนผสมทั้งในส่วนของการอาหารและเครื่องสำอางค์ต่อไปได้



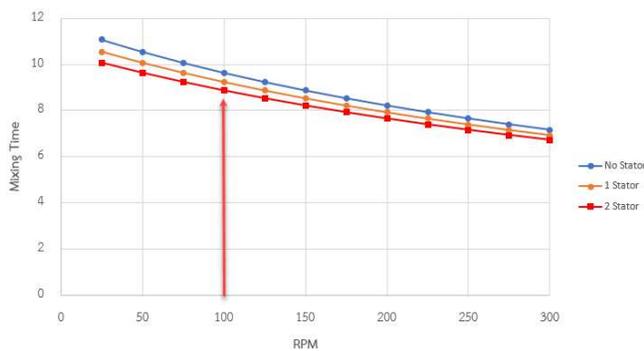
รูปที่ 15 โปรไฟล์ของความเร็วในแนวแกนที่ระดับความลึกต่าง ๆ ที่เวลา วินาทีของ 10 ใบพัดกวนผสมแบบต่าง ๆ

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาช่างยนต์และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก ที่อำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือวิจัยและเงินทุนต่าง ๆ ตลอดจนระยะเวลาที่ส่งผลให้งานวิจัยนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์



รูปที่ 16 โปรไฟล์ของความเร็วในแนวรัศมี ที่เวลา วินาทีของ 10 ใบพัด กวนผสมแบบต่าง ๆ



รูปที่ 17 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขเปรียบเทียบอัตราการกวนผสม Mixing Time ที่รอบการหมุนต่าง ๆ ทั้ง แบบจำลอง 3

### เอกสารอ้างอิง

- [1] พงษ์สร้อย สัจจรัตนันท์, ยศธนา คุณาทร. แบบจำลอง การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลของถังกวนผสมแบบไม่มีใช้อากาศ. ใน: งานประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28. มหาวิทยาลัยขอนแก่น: ขอนแก่น; 2557. หน้า 857-864.
- [2] Stanley MW. *Chemical Process Equipment Selection and Design 3<sup>rd</sup> Ed.* USA: Butterworth-Heinemann; 2012.
- [3] Piya I, Puzu NO. Numerical CFD simulation flow of radial impellers in reactor tanks for durian peel synthesis. *Princess of Naradhiwas University Journal.* 2019; 11(3): 128-139.
- [4] Kevin TM, Mark FR, Julian BF. Optimize mixing by using the proper baffles. เข้าถึงได้จาก :

www.cepomagazine.org [ Accessed February 2019].

- [5] Yasutomo K, Yasuaki S, Susumu N. Moving particle semi-implicit method for fluid simulation with implicitly defined obstacles. In: *Journal of Physics: Conference Series 574*, 2015, 1-4. DOI: 10.1088/1742-6596/574/1/012079.
- [6] Seiichi K, Yoshiaki O. Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. *Nuclear Science and Engineering.* 1996; 123(3): 421-4343.
- [7] Warren LM. *Unit Operations of Chemical Engineering 7<sup>th</sup> Ed.* New York: McGraw-Hill; 2004.
- [8] Tatterson GB. *Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitation Tanks 2<sup>nd</sup> Ed.* New York: McGraw-Hill; 2003.
- [9] Bozikova A, Hlavac P. Comparison of thermal and rheologic properties of Slovak mixed flower honey and forest honey. *Research in Agricultural Engineering.* 2013; 59: S1-S8.
- [10] วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล. การออกแบบและวิเคราะห์การ สนามการไหลของกังหันกวนผสมโดยวิธีเชิงตัวเลข. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2564; 14(1):105-114.
- [11] วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล. การออกแบบและจำลอง พลศาสตร์ของไหลของใบกวนผสมในถังสำหรับของไหลผสม. *วิศวกรรมลาดกระบัง.* 2563; 37(1): 13-20.