

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการผสมของไหลโดยใช้แกนใบพัด แบบแกนตั้งและแกนใบพัดแบบเอียง

Computational Fluid Dynamics of Fluid Mixing by using the Vertical Impeller Axis and Inclined Impeller Axis

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล *

Werayoot Lahamornchaiyakul *

Received: 15 February 2021, Revised: 3 October 2022, Accepted: 17 October 2022

บทคัดย่อ

การศึกษาได้ทำการวิจัยการผสมสารละลาย (Slurry) ที่ผสมกับน้ำ และคำนวณประสิทธิภาพการผสมในถังผสมที่ใช้ใบพัดแบบเอียงและแบบแกนตั้งที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยระบบพิกัดรูปร่างแอร์พอยล์ การศึกษาได้ทำนายการผสมที่ทำให้เกิดการปั่นป่วนในพื้นที่ของการผสมที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมเคมี ระเบียบวิธีการวิจัยเริ่มต้นจากการออกแบบ วิเคราะห์ และคำนวณเพื่อหาเวลาและประสิทธิภาพในการผสมที่ใช้ใบพัดแบบเอียงและใบพัดแบบแกนตั้งในกระบวนการทำสารละลาย (Slurry) โดยใช้ระเบียบวิธีการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อคำนวณผลแบบผิวอิสระ ตัวแปรที่สำคัญคือ ใบพัดแบบเอียง และแบบแกนตั้ง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตรที่รอบการหมุน 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 rpm. ผลงานวิจัยพบว่าใบพัดแบบเอียงสามารถลดเวลาการผสมได้ดีเมื่อเทียบกับใบพัดแบบแกนตั้งในสนามการไหลแบบปั่นป่วน ผลการวิเคราะห์ได้ทำการพิจารณาการหมุนของใบพัดแบบเอียงและใบพัดแบบแกนตั้งในช่วงเวลาผสมและศึกษาถึงผลการลดเวลาการผสมอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อยืนยันผลการทดลองจึงได้ทำการแสดงผลลัพธ์โปรไฟล์ความเร็วที่ถูกคำนวณเป็นผลลัพธ์เชิงตัวเลขและเสนอถึงการพัฒนาวิธีการจำลองเชิงตัวเลขแบบใหม่ของแบบจำลองทั้งสองวิธี จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เพื่อการพัฒนาระบบการทำงานของกังหันกวนผสมให้ดีขึ้น

คำสำคัญ: ใบพัดแบบเอียง, การวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล, การจำลองผลเชิงตัวเลข

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก ตำบลบ้านกร่าง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Department of Mechanical of Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok, Bankrang, Mueang, Phitsanulok 65000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): werayootmutl@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to research the characteristics of mixing between slurry with water and efficiency calculate in a tank agitated by an impeller that inclined itself and vertical axis impeller obtained from forming with air foil coordinates. This research predicted of agitation within the optimum mixing area for the chemical industry. Research methods featured design, analysis, and calculation for mixing time by the computational fluid dynamics technique for free surface calculation. The important variables in this research were impellers that inclined itself and vertical axis impeller with an impeller diameter of 400 mm. The rotations of impeller in this research are 50, 100, 150, 200, 250 and 300 rpm. The results of the research showed that the inclined impeller could reduce mixing time compared to that obtained by the vertically axis impeller in turbulence flow region. The effect of eccentric position of inclined impeller on mixing time was also studied and a significant reduction of mixing time was observed. To confirm the experimental results in this research, the results of velocity profiles were calculated numerically and two novel numerical simulation methods were proposed. According to this research, it can be used for the improvement of higher performance, and it would be needed for development of better agitation turbine system.

Key words: impeller hat inclined itself, computational fluid dynamics, numerical simulation

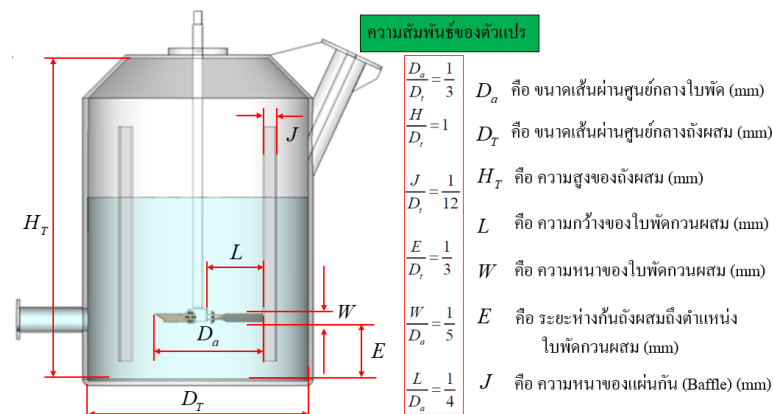
บทนำ

ในปัจจุบันเครื่องกวนผสมได้มีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรมทางด้านเคมีและอาหาร เครื่องกวนผสมได้เข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการกวนผสมผลิตภัณฑ์ในแบบต่าง ๆ และในหลายปีที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยและวิศวกรจำนวนมากได้ทำการประดิษฐ์ คิดค้นและพัฒนาเครื่องจักรกวนผสมขึ้นมาใช้อย่างมากมาย มีทั้งที่เป็นเครื่องจักรขนาดเล็ก ที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมชุมชน SME ไปจนถึงเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่ใช้กับขนาดกำลังการผลิตที่สูงในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีความพยายามทำการออกแบบใบพัดกวนผสมให้มีประสิทธิภาพที่สูงในงานกวนผสมที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถใช้งานกับกลุ่มอุตสาหกรรมโดยทั่วไปได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดเล็ก SME ที่กำลัง

เป็นจุดเริ่มต้นใหม่ให้กับนักธุรกิจแนวใหม่ของประเทศ ซึ่งเครื่องกวนผสมได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรมครัวเรือนของประเทศมากขึ้นทุกปี เพราะประเทศไทยเป็นศูนย์กลางในด้านอาหารที่สำคัญต่อตลาดทั้งในเอเชียและและถูกนำไปส่งออกไปในหลากหลาย ๆ ประเทศในแถบยุโรป เป็นต้น (Lahamornchaiyakul, 2020) อีกทั้งรัฐบาลยังกำหนดนโยบายหลักของแผนงานสำหรับการพัฒนาประเทศ โดยให้เน้นงานด้านอุตสาหกรรมเกษตร เทคโนโลยี อุตสาหกรรม และด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี มาพัฒนาด้านนวัตกรรมไปพร้อมกับการพัฒนาด้านแบบในธุรกิจอาหารของกลุ่มงานทางอุตสาหกรรมเกษตร และงานทางวิศวกรรม (Lahamornchaiyakul, 2021) เพื่อผู้การแข่งขันและการดำเนินการใช้ภายในประเทศ และการ ส่งออก (Lahamornchaiyakul *et al.*, 2018) นอกจากกลุ่มด้านธุรกิจอาหาร เครื่องจักรกวนผสมยัง

ถูกนำไปใช้กับงาน SME ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมสารเคมีและเครื่องสำอางมากขึ้น เพื่อลดแรงงานคนและค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตลง (Piya and Puzu, 2019) ขั้นตอนการออกแบบใบพัดกวนผสมและถังกวนผสมให้สามารถทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพสูงจะอาศัยพื้นฐานการกำหนดขนาดมิติของถัง (Piya and Puzu, 2019; Cabe *et al.*, 1993) การออกแบบถังกวนและใบพัดกวนผสมสำหรับการกวนผสมสารเคมีประเภทอนุภาคของแข็งและเหลว นั้น มีขั้นตอนและปัจจัยที่จำเป็นหลายด้านที่ต้องใช้สำหรับการกำหนดการออกแบบ โดยงานวิจัยของ Kevin *et al.* (2019) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการผสมของอนุภาคของแข็งที่ต้องการให้มีการกระจายตัวภายในถังผสม หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบการกระจายอนุภาคของแข็ง ขั้นตอนการศึกษาจะอาศัยการนับจำนวนอนุภาคของแข็ง พร้อมทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) ผลจากการศึกษาพบว่า ขนาดของแผ่นกั้น T/12 โดยมีจำนวนแผ่นกั้น 4 แผ่น ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด จากผลการทดลองของ Um and Thomas (2008) ได้ทำการศึกษาและแสดงผลลัพธ์ของการทดลองให้เห็นว่าค่าความเร็วในแนวแกนจะมีค่าที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปทรงเรขาคณิต งานวิจัยของ Shengchao *et al.* (2015) ได้ทำการออกแบบและศึกษารูปแบบของความสูงใบพัดกวนผสมต่อการเปลี่ยนแปลงขอบเขตการไหลสำหรับสารที่เป็นของเหลวผสม นอกจากการออกแบบถังผสมและใบพัดกวนผสมแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงถึงและจำเป็นต่อการศึกษาคือ ตำแหน่งการติดตั้งใบพัดกวนผสม เนื่องจากลักษณะของการติดตั้งจะส่งผลต่อรูปแบบของโปรไฟล์การไหลภายในถังผสมทั้งที่เป็นของเหลวและของแข็ง และทั้งที่เป็น

การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน Koji *et al.* (2012) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการติดตั้งรูปแบบใบพัดกวนผสมแบบเอียง และทำการศึกษาเพื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งใบพัดในแนวแกนตั้ง ผลลัพธ์จากการศึกษาและเปรียบเทียบพบว่า ใบพัดเอียงสามารถลดเวลาการผสมได้ดีเมื่อเทียบกับใบพัดแบบแกนตั้งในสนามการไหลแบบลามินาร์และปั่นป่วน และ Bakker *et al.* (1996) ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นกับรูปทรงใบพัดกวนผสมแบบ 4 ใบพัด โดยใช้เทคนิค Laser Doppler Velocimetry (LDV) และ PIV เทียบกับแบบจำลองการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) พบว่า บริเวณ รอบ ๆ ใบพัดจะมีลักษณะของการไหลเป็นแบบแนวรัศมีสำหรับการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งจะมีค่ามากกว่ารูปแบบการไหลแบบแนวแกน ในปัจจุบันการออกแบบใบพัดกวนผสมมีอยู่หลายแบบที่นำมาใช้งานที่แตกต่างกัน แต่ละแบบจะมีลักษณะของหน้าตัดใบพัดที่ไม่เหมือนกัน บางชนิดเป็นแบบรูปทรงสี่เหลี่ยม บางชนิดเป็นแบบใบโค้งดังแสดงในภาพที่ 1 ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการประยุกต์เพื่อออกแบบใบพัดกวนผสมแบบใหม่ และศึกษาสำหรับทำการวิเคราะห์ผลของสนามการไหลของใบพัดกวนผสมที่ขึ้นรูปหน้าตัดโปรไฟล์ใบพัดเป็นแบบรูปทรงแอร์ฟอยล์ (Airfoil) รุ่น NACA 0006 ที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างเครื่องจักรทางอากาศยานต่าง ๆ (Dadone, 1978) และทำการเปรียบเทียบสนามการไหลและอัตราการผสมเทียบกับช่วงเวลาของทิศทางการติดตั้งใบพัดกวนผสมแบบเอียง 25 องศาและแบบแกนตั้ง ดังนั้นการออกแบบสัดส่วนต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1



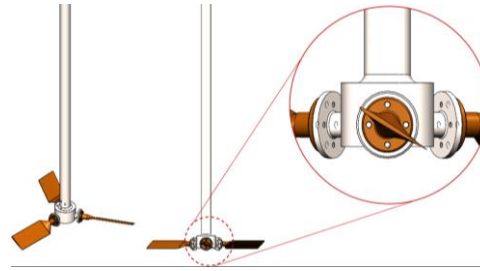
ภาพที่ 1 แสดงการหาสัดส่วนต่าง ๆ ทางทฤษฎีสำหรับถังผสมของไหล

วิธีดำเนินการวิจัย

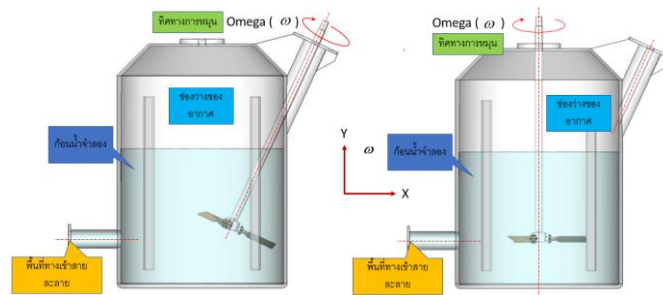
1. ขั้นตอนการออกแบบ แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์

ในงานวิจัยได้ทำการออกแบบรูปทรงใบพัด โดยทำการขึ้นรูปโปรไฟล์โดยการอาศัยรูปแบบของ พิกัดรูปทรงแอร์ฟอยล์รุ่น NACA 0006 โดยคำว่า NACA นั้นจะหมายถึง “องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ” ส่วนตัวเลขหลักแรกใช้อธิบายส่วนโค้งสูงสุดที่คิดเป็นร้อยละของคอร์ด โครงร่างแอร์ฟอยล์ ส่วนตัวเลขตัวที่สองใช้ในการอธิบายระยะห่างของแคมเบอร์ (Camber) สูงสุดจากขอบหน้าของแอร์ฟอยล์ที่ทำการออกแบบ และตัวเลขสองหลักสุดท้ายใช้ในการอธิบายความหนาสูงสุดของแอร์ฟอยล์เป็นเปอร์เซ็นต์ของคอร์ด (John, 2001) จากงานวิจัย ผู้วิจัยได้ใช้แอร์ฟอยล์รุ่น NACA 0006 เนื่องจากรูปทรงมีส่วนโค้งที่เหมาะสมต่อการลดแรงต้านทานของไหล และพบได้จากงานวิจัยของ (Lahamornchaiyakul, 2022) ที่เขาเลือกใช้ NACA63-212 ที่สามารถกวนผสมน้ำส้มกับน้ำได้ดี ความสามารถในการขึ้นรูปของโปรแกรม SOLIDWORK 2020 ทำให้ขึ้นรูปใบพัด

กวนผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร จะได้ผลลัพธ์ของการออกแบบดังภาพที่ 2 ในการออกแบบถังผสมโดยทั่วไปสามารถออกแบบตามหลักการและความสัมพันธ์ดังภาพที่ 1 แต่ในงานวิจัยนี้ผู้ออกแบบเลือกกำหนดขนาดถังผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 700 มิลลิเมตร สูง 1,000 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นขนาดถังผสมของเหลวที่มีใช้ในอุตสาหกรรมชุมชน และสามารถทำการติดตั้งใบพัดกวนได้ทั้งที่เป็นแบบแกนตั้งและแบบแกนเอียง ในส่วนของแกนเอียงถูกออกแบบให้ทำมุมกับแนวแกน 25 องศา และภายในถังผสมได้ทำการติดตั้งชุดแผ่นกั้นที่มีขนาดความหนา 8 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชุด โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ (Kevin *et al.*, 2019) ที่กล่าวว่าสามารถทำการกวนผสมได้ดีที่สุด จนได้แบบจำลองการวิเคราะห์ที่ผ่านการออกแบบดังภาพที่ 3 และการออกแบบมุมติดตั้งใบพัด 25 องศา ที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากหลักการในงานวิจัยของ (Rahimi and Parvareh, 2007) ได้อ้างว่าเวลาที่ทำการกวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันได้เกิดจากการวางและติดตั้งชุดใบพัด (Impeller) ที่มีมุม 15 และ 60 องศา



ภาพที่ 2 การออกแบบรูปทรงใบพัดกวนผสมแบบใหม่โดยทำการขึ้นรูปโปรไฟล์แอร์ฟอยล์ NACA 00006



ก) ต้นแบบใบพัดแบบเอียง 25 องศา

ข) ต้นแบบใบพัดแบบแกนตั้ง

ภาพที่ 3 ต้นแบบที่ถูกออกแบบและใช้สำหรับการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล

ในงานวิจัยได้กำหนดรูปแบบการวิเคราะห์ออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีแรกคือกำหนดให้ระบบพิกัดในการวิเคราะห์อยู่ในทิศทางแกน Y ซึ่งเป็นแนวแกนตั้งที่มีทิศทางเดียวกันกับแกนเพลลาของใบกวนผสมแบบตั้ง และส่วนที่สองคือการกำหนดให้ใบพัดกวนเอียง 25 องศา ตามแนวโครงสร้างหลักของถังผสม ซึ่งรูปแบบการวิเคราะห์กำหนดเป็นแบบ Internal flow ที่มีการหมุนในผิวอิสระ (free surface) ที่รอบการหมุน 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาทีตามลำดับในส่วนการกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์แบบ Free surface ในการวิเคราะห์นี้ ผู้วิจัยจะทำการรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบช่วงเวลา (Time-dependent) โดยใช้เวลา 10 วินาที พร้อมกำหนดก่อนน้ำจำลองที่จะใช้กำหนดคุณสมบัติของน้ำเริ่มต้น และในส่วนของการเข้าจะกำหนดให้สารละลาย (Slurry) ไหลเข้ามาผสมกับน้ำและทำการกวนผสม ส่วนพื้นที่ด้านบนที่อยู่เหนือผิวของก้นน้ำจำลอง ผู้วิจัยจะทำการสมมุติให้เป็นช่องว่างของอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 3

2. โมเดลในการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม SOLIDWORK Flow Simulation 2020 มาใช้ เนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS อยู่แล้ว จึงสามารถนำไฟล์ที่ออกแบบเข้าไปใช้ใน SOLIDWORK Flow Simulation ได้เลยโดยไม่ต้องทำการปรับแบบจำลองใด ๆ ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดโดเมนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการนำชิ้นงาน 3 มิติที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS เข้ามาสู่โหมดฟังก์ชันของ SOLIDWORK Flow Simulation หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ผล นำเข้ามานำไปทำการสร้างเมชเอลิเมนต์ โดยมีขั้นตอนที่สำคัญดังนี้คือ

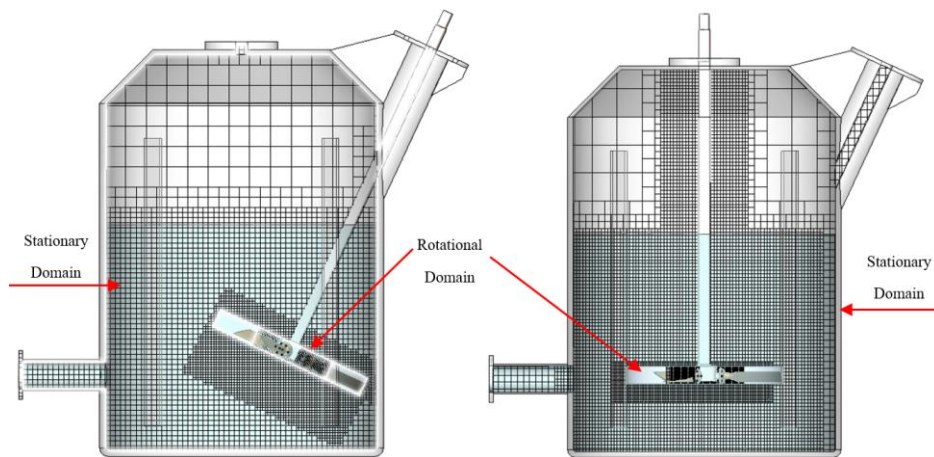
2.1 กำหนด Local mesh เพื่อทำการกำหนดขอบเขตในการสร้างเมช

2.2 ทำการปรับค่าตัวแปรในส่วน Refining cell โดยกำหนดคุณสมบัติของ Level of Refining

Fluid Cell เท่ากับ 4 พร้อมปรับค่าตัวแปรในส่วนของ Level of Refining Cells at Fluid/Solid Boundary ให้อยู่ในระดับ 4

2.3 กำหนดคุณสมบัติของ Equidistant Refinement และกำหนดตัวแปร Number of shells

เท่ากับ 1 พร้อมทำการตั้งค่า Maximum Equidistant Level ให้อยู่ระดับ 3 ตลอดจนทำการกำหนดค่า Offset Distant เท่ากับ 0.1 เมตร จะได้ผลลัพธ์ของแบบจำลองทั้ง 2 ดังภาพที่ 4



ก) เมชเอลิเมนต์ของแบบจำลองใบพัดแบบเอียง 25 องศา ข) เมชเอลิเมนต์ของแบบจำลองใบพัดแบบตั้ง

ภาพที่ 4 เมชเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล

ขั้นตอนการกำหนดให้ค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณของก๊อนน้ำจำลองมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 999.79 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความหนืดเท่ากับ 0.00179 ปาสคาล-วินาที (SolidWorks, 2020) และกำหนดปริมาตรการไหลของสายละลาย (Slurry) ที่ทางเข้ามีค่าเท่ากับ 0.00365 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยสายละลาย (Slurry) มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1647.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความหนืดเป็นแบบ Herschel - Bulkley Model (Skadsem and Saasen, 2019) โดยสมมติให้สายละลาย (Slurry) ไหลเข้าไปผสมกับก๊อนน้ำจำลองจึงทำการการผสมเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous mixing) และทำการกำหนดรอบการหมุนของใบกวนผสมที่รอบการหมุนคงที่ระหว่าง 50 ถึง 300 รอบต่อนาที

โดยทั่วไปการวิเคราะห์การไหลในถังกวนผสมจะมีอยู่ 2 วิธี คือ การวิเคราะห์แบบ Multiple Reference Frame (MRF) และแบบ Sliding Mesh

approach (SM) (Piya and Puzu, 2019) โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกรูปแบบการหมุนที่นำมาใช้เป็นแบบ Local Region Sliding ซึ่งจะอาศัยหลักการของ (MRF) กล่าวคือ หลักการของ (MRF) จะทำการกำหนดองค์ประกอบของแบบจำลองการวิเคราะห์ทั้งหมด 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นชิ้นส่วนที่ทำการหมุน (Rotation Domain) และส่วนที่สองคือ ส่วนที่วัตถุอยู่กับที่ (Stationary Domain) โดยรูปแบบการวิเคราะห์เป็นการไหลเป็นแบบอิสระ Free Surface ซึ่งรูปแบบการจำลองการไหลเป็นแบบระบบ 3 มิติแบบช่วงเวลา (Time-dependent) ซึ่งกำหนดเวลาเท่ากับ 10 วินาที และกำหนด Step time เท่ากับ 0.02 วินาที โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบบ k-epsilon ในการวิเคราะห์ปัญหาในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้คอมพิวเตอร์รุ่น MSI และมีคุณสมบัติของเครื่องคอมพิวเตอร์ดังนี้ Intel(R) Core(TM)i7 RAM 12 GB

3. แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon model

กฎพื้นฐานสำหรับกระบวนการกวนผสมของไหลประกอบไปด้วยหลักการดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) ตัวแปรของดัชนี (j) แสดงถึงคำมิติของเวกเตอร์ และในระบบการวิเคราะห์พิจารณาเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) ดังนั้นระบบสมการที่ใช้จึงพิจารณาอยู่ในรูปของ

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม คือ สมการที่ใช้ในการคำนวณหาแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) เมื่อทำการพิจารณารูปแบบสมการทั้ง 3 เทอมทางด้านขวามือพบว่า ระบบสมการจะแสดงถึงระบบแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมในทุกแนวแกน ซึ่งจะประกอบไปด้วย แรงเนื่องจากความดัน (P) แรงเนื่องจากความหนืด (τ_{ij}) และแรงเนื่องจากน้ำหนัก (Body force (f_i)) เนื่องจากระบบการวิเคราะห์ในงานวิจัยเป็นการกวนผสมซึ่งมี

สมการอนุรักษ์มวล คือ ระบบสมการที่ใช้อธิบายอัตราการไหลเข้าและออกปริมาตรควบคุม

ค่าเฉลี่ยเรโนลด์ (Reynold-Averaging) สำหรับปัญหาของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible) และสามารถเขียนพฤติกรรมของสมการได้ดังสมการที่ (2)

รูปแบบการหมุนในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงพิจารณาการไหลในรูปแบบโครงร่างการอ้างอิงการหมุน (Rotating Frame of Reference) ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ระบบแรงทั้งในส่วนองแรง Coriolis และแรง Centrifugal ถูกรวมอยู่ในแบบจำลองด้วย ดังนั้นแรงของระบบสมการในเทอมของ Body force จะมีรูปแบบพฤติกรรมเป็นดังสมการที่ (4)

$$f_i = -(2\vec{\Omega} \times \vec{U} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r})) \quad (4)$$

สำหรับของไหลที่อยู่ในรูปนิวโตเนียน (Newtonian) เทอมของสมการ (τ_{ij}) คือค่า Stress tensor สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5)

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \mu_b \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

โดยที่ (μ_b) คือ Bulk Viscosity มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{3} \mu$ และค่า (μ) คือค่าความหนืดไดนามิก (Dynamic Viscosity) ส่วนค่าตัวแปร (δ_{ij}) คือ Kronecker Delta

เมื่อทำการพิจารณาสมการที่ (4) ด้วย
ค่าเฉลี่ยเรโนลด์ในการไหลแบบอัดตัวไม่ได้พบว่า
เทอมของสมการ Body Force จะมีค่าน้อยมาก

ดังนั้นสามารถพิจารณาและตัดเทอมนี้ทิ้งได้และจัด
รูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (6)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{U}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} + \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) \quad (6)$$

เทอมของสมการ $\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$ เป็นเทอมที่แสดง
การไหลแบบปั่นป่วนแบบการไหลเฉลี่ย และเรียก
เทอมนี้ว่า Reynold Stress Tensor สำหรับของไหล
แบบนิวโตเนียนแบบจำลอง k-epsilon model

k-epsilon model เป็นเทอมของ Reynolds
Stress จะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ Mean

Stress Rate โดย Eddy Viscosity จะกำหนดให้มี
ความสัมพันธ์กับค่าของตัวแปรของ Turbulent
Kinetic Energy, (k) และค่าตัวแปรของ Dissipation
Rate (ε) โดยใช้ความสัมพันธ์ Boussinesq
approximation คือ (Lahamornchaiyakul, 2011)

$$t_{ij} = -\frac{2}{3} \delta_{ij}(\rho k) + u_i \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

โดยที่ $u_t = \rho C_u k^2 / \varepsilon$ คือ Turbulent Eddy Viscosity สมการของ Turbulent Kinetic Energy (TKE) (k) จะ
แสดงอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_e}{\sigma_k} + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (8)$$

สมการของ Dissipation Rate ของ Turbulent Kinetic Energy (Shengchao *et al.*, 2015) คือ

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_e}{\sigma_k} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (9)$$

ซึ่ง G แทน Generation Rate of Turbulent Kinetic Energy ขณะที่ $\rho \varepsilon$ เป็น Dissipation Rate โดย G จะเป็น

$$G = u_e \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

ค่าตัวแปรขอบเขตต่าง ๆ ของ Turbulent ที่ใกล้ผนังสามารถหาค่าได้จาก Wall Function โดยมีค่าคงที่ ที่
เกี่ยวข้องกับค่าสมการต่าง ๆ ที่ผ่านมามีดังนี้คือ

$\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$, และ $C_u=0.09$ เป็นค่าคงที่โดยที่ $u_e = u_t + u$
(Lahamornchaiyakul, 2011; Choi *et al.*, 2004)

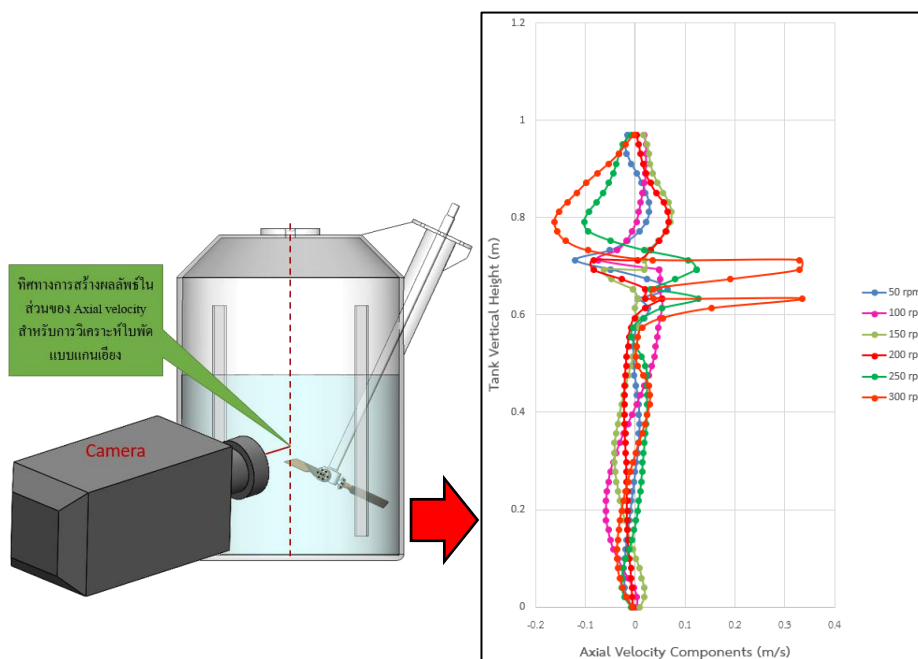
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหล สำหรับการผสมของสารละลาย (Slurry) และน้ำในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการศึกษาและวิจัย 2 แบบคือ ส่วนแรกจะทำการศึกษาค่าความเร็วรอบในแนวแกนและแนวรัศมีรอบใบพัดแบบเอียง 25 องศา และใบพัดแบบตั้งจากภาพที่ 3 ที่ความเร็วรอบการหมุน 50 ถึง 300 รอบต่อนาทีตามลำดับ และส่วนที่สองจะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทดสอบใบพัดกวนผสมแบบเอียงและแบบแกนตั้ง เพื่อทำการแสดงสนามการไหลของของไหลผสมระหว่างสารละลาย (Slurry) และน้ำโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation 2020 โดยทำการยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัย เพื่อแสดงความเร็วสนามการไหล ความเร็วในระนาบในทิศทางแกน YZ (ทิศทางแกน YZ ในส่วนของ SOLIDWORKS Flow Simulation คือระนาบการแสดงผลในทิศทางด้านข้างหรือ Right plane) การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบใบกวนผสม ความเร็วในแนวรัศมีและแนวแกน และการจำลองอนุภาครวมตลอดจนระยะเวลาใน

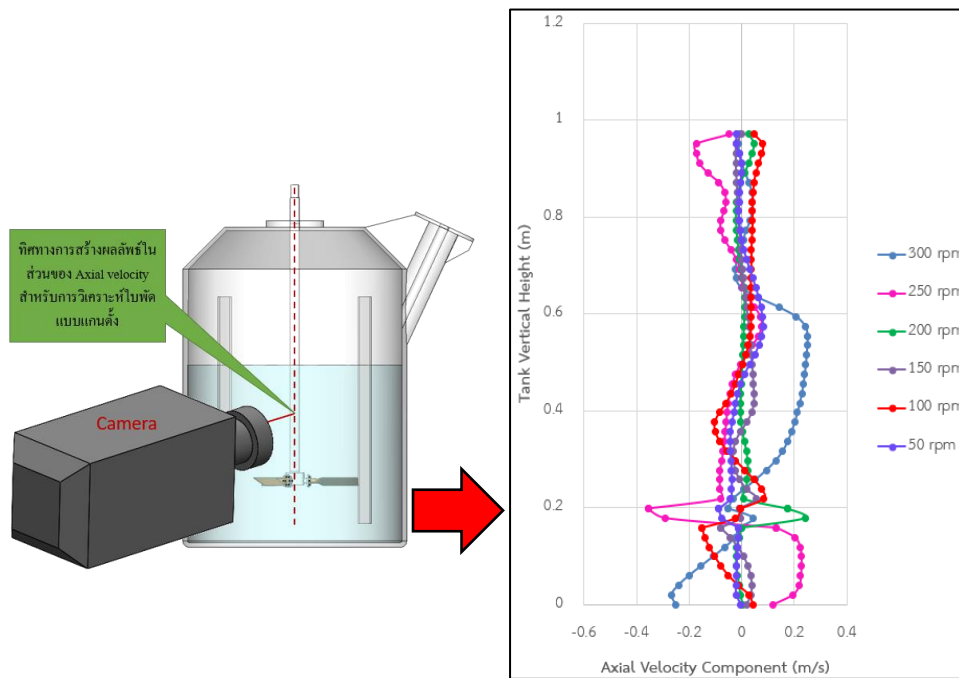
การผสม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. ผลลัพธ์ความเร็วในแนวแกนและแนวรัศมีรอบใบพัดกวนผสม

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยหลักการทางพลศาสตร์ของไหลที่ได้จากงานวิจัยพบว่า ที่รอบการหมุนของใบพัดกวนผสมทั้งสองแบบจำลองที่ทำการวิเคราะห์ จะสามารถสร้างค่าความเร็วในแนวรัศมี (Radial flow velocity) ของใบพัดกวนผสมแบบแกนเอียงและแกนตั้งที่มีค่าสูงกว่าค่าความเร็วในแนวแกน (Axial flow velocity) และเมื่อนำผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ของแบบจำลองทั้งสอง คือแบบใบพัดแบบเอียงและแบบแกนตั้งมาทำการเปรียบเทียบกัน พบว่าที่ใบพัดกวนผสมแบบเอียงจะสามารถสร้างแรงในแนวแกนได้สูงกว่าใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง และที่ใบพัดกวนผสมแบบแกนเอียงสามารถสร้างแรงในแนวแกนของถังผสมได้สูงสุดที่รอบการหมุน 300 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถแสดงผลลัพธ์เชิงตัวเลขได้ดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6



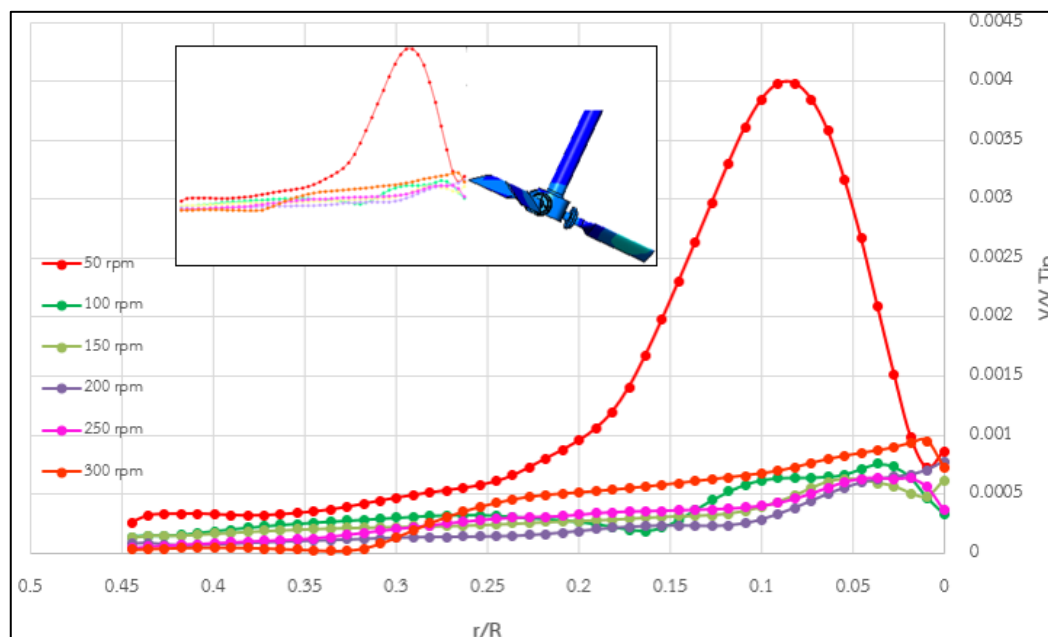
ภาพที่ 5 ค่าความเร็วในแนวแกนของใบพัดกวนผสมแบบแกนเอียง 25 องศาที่รอบการหมุนต่าง ๆ



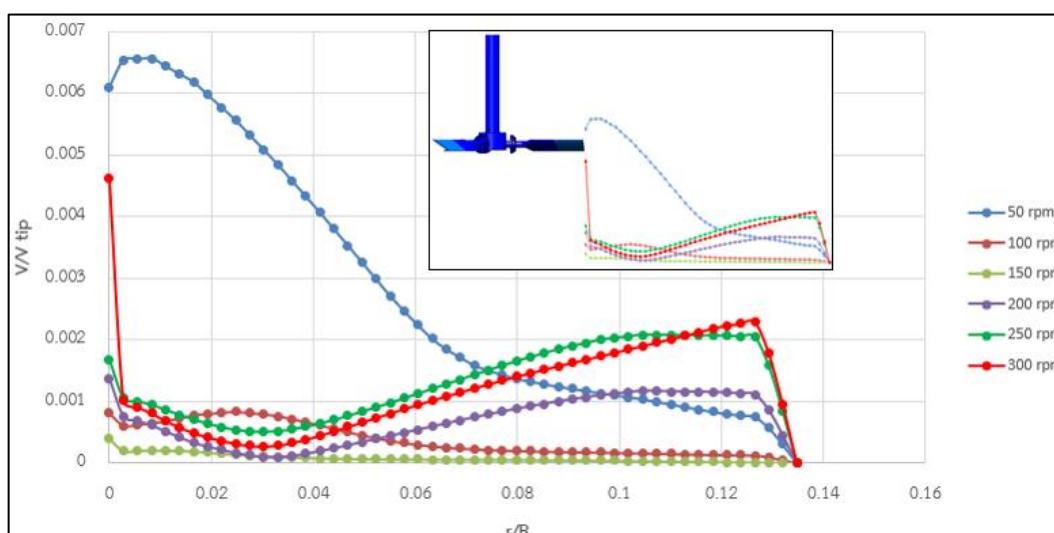
ภาพที่ 6 ค่าความเร็วในแนวแกนของใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งที่รอบการหมุนต่าง ๆ

ผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากการวิเคราะห์ที่ได้ดำเนินการแสดงในภาพที่ 5 และ 6 ซึ่งเป็นการแสดงผลของรูปแบบการวิเคราะห์ที่ได้จากแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นรอบบริเวณใบพัดกวนผสมในทิศทางตามระนาบของแกนการหมุนของใบพัดกวนผสมทั้งสองแบบจำลอง ซึ่งผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นในแบบจำลองการวิเคราะห์ สามารถอธิบายได้ว่าแบบจำลองที่สามารถสร้างแรงในแนวแกนที่สูง จะสามารถส่งถ่ายแรงกระทำที่เกิดจากกำลังทางกลของใบพัดกวนผสมในช่วงที่เกิดการหมุนด้วยค่าความเร็วมอเตอร์คงที่ไปยังสนามการไหลของของไหลได้ดี จึงได้ส่งผลทำให้เกิดแรงของการกระจายตัวของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลในสนามการไหลระหว่างการผสมของไหลทั้งสองชนิดที่ไหลมาผสมกันภายในถังผสมได้ดีกว่าแบบจำลองที่สร้างแรงในแนวแกนที่ได้น้อยกว่า ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Lahamomchaiyakul (2020) ที่ได้ทำการศึกษาการกวนผสมน้ำและน้ำผลไม้ของชุดใบพัดแบบทำมุมองศา หลังจากนั้นเมื่อทำการพิจารณาระบบของแรงในแนวรัศมีที่เกิดขึ้นในระบบ

การวิเคราะห์ของใบพัดกวนผสมทั้งสองแบบจำลอง ในระหว่างที่ใบพัดกวนผสมเกิดการหมุนในแต่ละความเร็วรอบการหมุน พบว่า ที่ใบพัดกวนผสมแบบแกนเอียงนั้น จะสามารถสร้างรูปแบบของแรงในแนวรัศมีที่ปลายใบพัดที่มีรอบการหมุนไม่คงที่ในช่วงเริ่มต้นของการเกิดการหมุนบนใบพัดกวนผสม และจะเริ่มสูงขึ้นในช่วงการผสมของไหลที่รอบการหมุน 50 รอบต่อวินาทีในช่วงขณะหนึ่ง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากช่วงเวลาของการวิเคราะห์ได้ที่เวลา 2-3 วินาที โดยมีค่าโปรไฟล์ความเร็วที่แสดงจากกราฟในภาพที่ 7 ที่สูงกว่ารอบการหมุนอื่นเมื่อทำการเปรียบเทียบกัน และเมื่อเวลาการวิเคราะห์ผลผ่านไปทีรอบการหมุนคงที่ แรงในแนวรัศมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมุนจะมีค่าค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ ส่วนใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งนั้น พบว่าจะมีค่าที่สูงตั้งแต่เริ่มต้นการหมุนในขณะที่เริ่มการผสมและเมื่อเวลาผ่านไปจะมีค่าความเร็วในแนวรัศมีลดลงตามลำดับที่รอบการหมุนต่าง ๆ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 7 ค่าความเร็วในแนวรัศมีของใบพัดกวนผสมแบบแกนเอียงที่รอบการหมุนต่าง ๆ

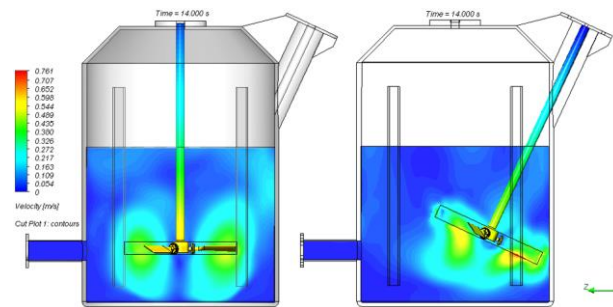


ภาพที่ 8 ค่าความเร็วในแนวรัศมีของใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งที่รอบการหมุนต่าง ๆ

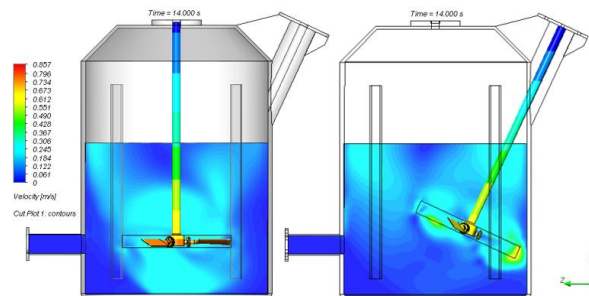
2. ผลลัพธ์ Plot Contour ของความเร็วในถังผสมในระนาบ YZ (ด้านข้าง)

จากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลสามารถแสดงสนามการไหลของอัตราการผสมระหว่างสารละลาย (Slurry) และน้ำภายในถังผสมที่ใช้ความเร็วรอบของมอเตอร์คงที่ ที่ส่งผ่านกำลังงานทางกลจากมอเตอร์มาที่เพลาคูที่เชื่อมต่อกับชุดใบพัด

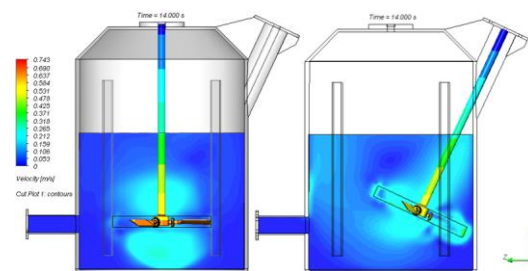
กวนผสมทั้งสองแบบจำลอง โดยใช้รอบการหมุน 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อวินาที ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการกำหนดการวิเคราะห์เป็นแบบช่วงเวลา Time dependent โดยกำหนดเวลาในการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลเท่ากับ 14 วินาที เพื่อจำลองผลลัพธ์ในการผสมระหว่างของไหลสองชนิด ผลการวิเคราะห์จะแสดงได้ดังภาพที่ 9 ถึงภาพที่



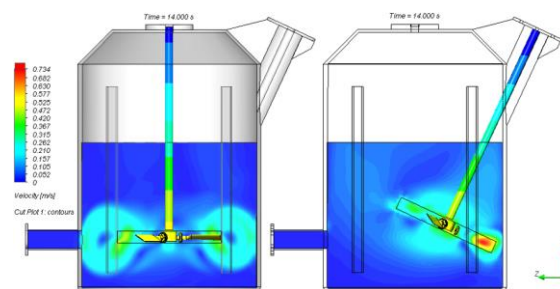
ภาพที่ 9 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 50 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที



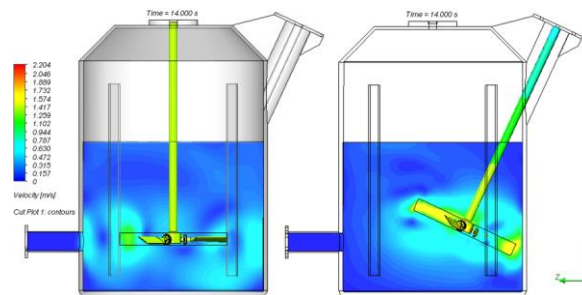
ภาพที่ 10 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 100 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที



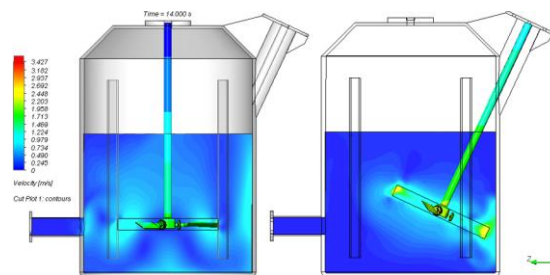
ภาพที่ 11 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 150 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที



ภาพที่ 12 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 200 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที



ภาพที่ 13 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 250 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที



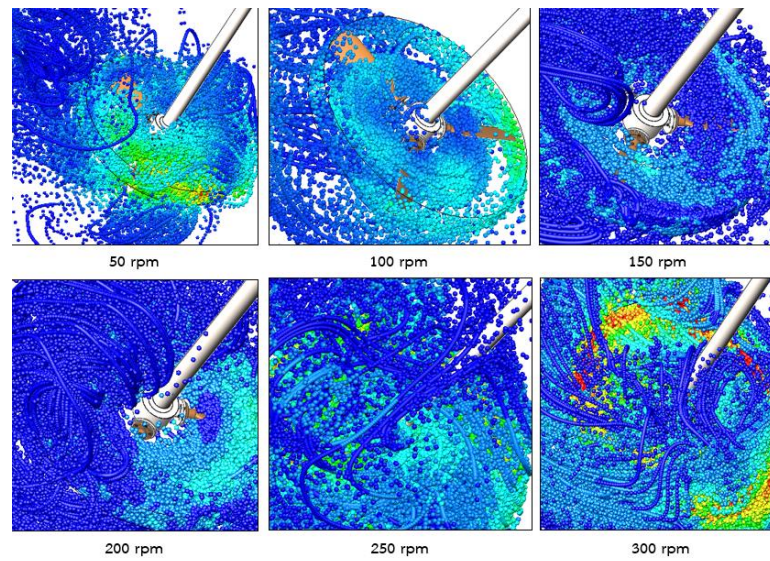
ภาพที่ 14 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 300 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที

จากภาพที่ 9-14 เป็นการจำลองสนามความเร็วของการไหลของของไหลผสมระหว่างสารละลาย (Slurry) และน้ำที่แสดงอยู่ในรูปของ Plot contour ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ช่วงเริ่มต้นทำการผสมของใบพัดแบบเอียงจะสามารถสร้างอัตราของความเร็วที่กระจายตัวไปทั่วถึงผสมได้ดีที่ความเร็วรอบการหมุนเริ่มต้นที่ 50-150 รอบต่อนาที และเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วง 11-14 วินาทีค่าการกระจายตัวของความเร็วในสนามการไหลภายในถังผสมจะมีค่าคงที่เนื่องจากของไหล 2 ชนิดเริ่มมีการผสมตัวเป็นเนื้อเดียวกันและเมื่อทำการพิจารณาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นอาจจะดีกว่าใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง เนื่องจากใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งต้องใช้ระยะเวลาในการผสมที่มากกว่าในช่วงเริ่มทำการผสมเดียวกัน และเมื่อทำการปรับค่าความเร็วรอบให้สูงขึ้นตั้งแต่ 200 ถึง 300 รอบต่อนาที พบว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นของค่าความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นของใบพัดกวนผสมแบบแกน

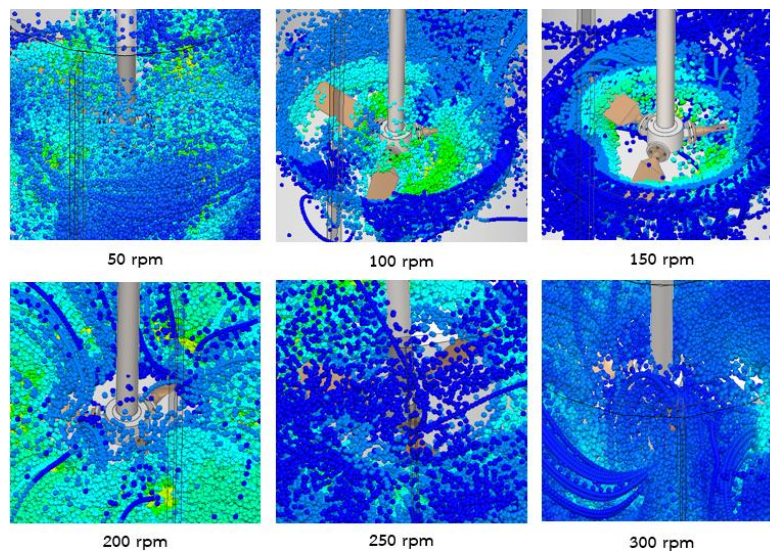
ตั้ง สามารถสร้างความเร็วในการกระจายตัวของสารผสมได้ดีขึ้น ซึ่งจะเห็นภาพได้ชัดที่รอบการหมุน 300 รอบต่อนาทีดังแสดงในภาพที่ 14

3. การประมาณค่าการผสมด้วยแบบจำลองอนุภาคและแบบจำลองอิสระ

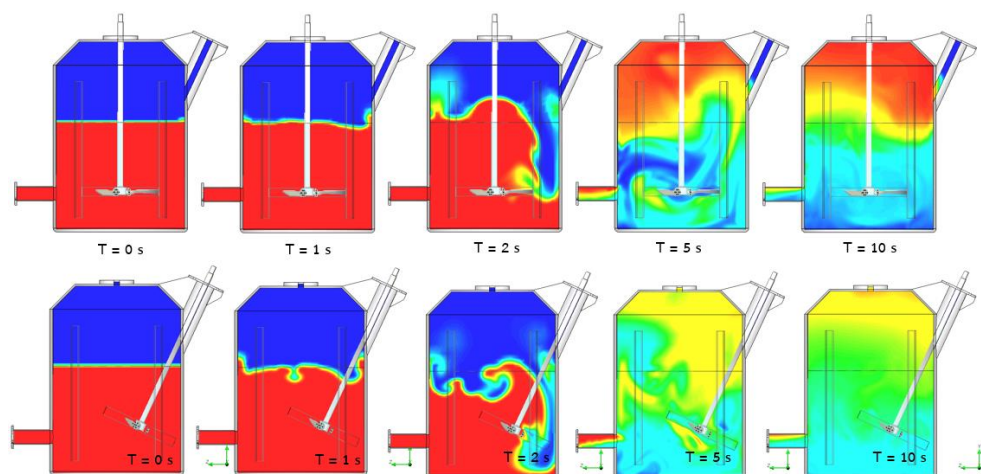
จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยหลักการทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้ ได้อาศัยรูปแบบการประเมินประสิทธิภาพการกวนผสมที่มีการกระจายตัวโดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการจำลองสองวิธีที่ไม่ซ้ำกันตามผลการจำลองการไหลของของไหลผสมระหว่างสารละลาย (Slurry) และน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์ในช่วงต้น วิธีแรกคือการจำลองการกระจายตัวของอนุภาคของไหลผสม ดังภาพที่ 15 และภาพที่ 16 และอีกวิธีหนึ่งคือการผสมของของไหลแบบผิวอิสระ (Free-Surface) ของของไหลสองชนิด ผสมกัน ดังภาพที่ 17-22



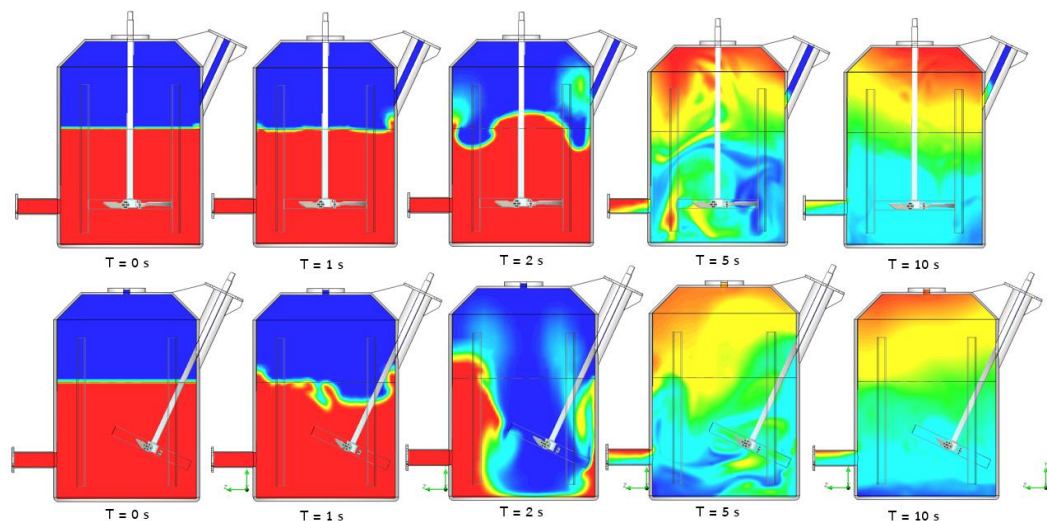
ภาพที่ 15 แสดงการกระจายตัวของอนุภาครอบใบพัดกวนผสมแบบแกนเฉียงที่รอบการหมุนต่าง ๆ



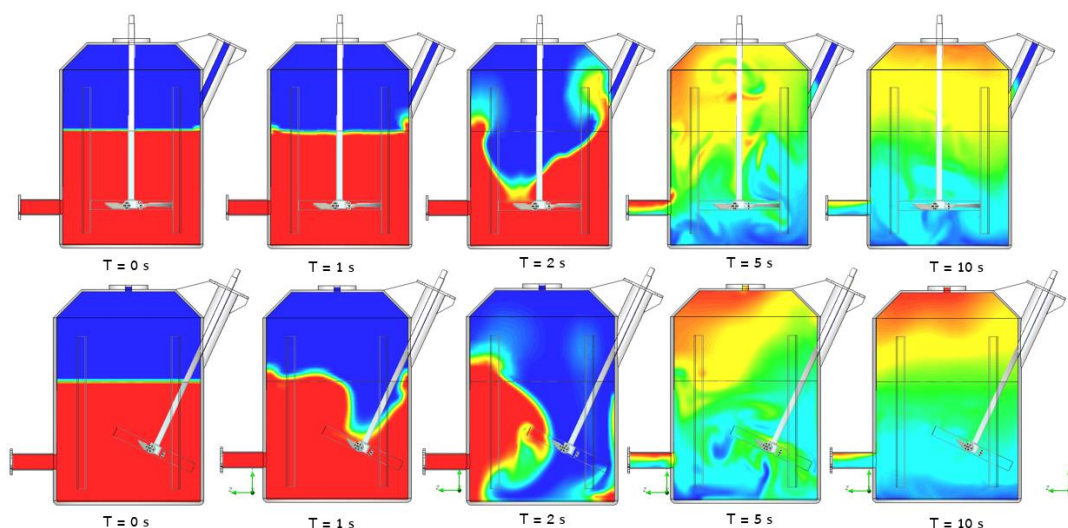
ภาพที่ 16 แสดงการกระจายตัวของอนุภาครอบใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งที่รอบการหมุนต่าง ๆ



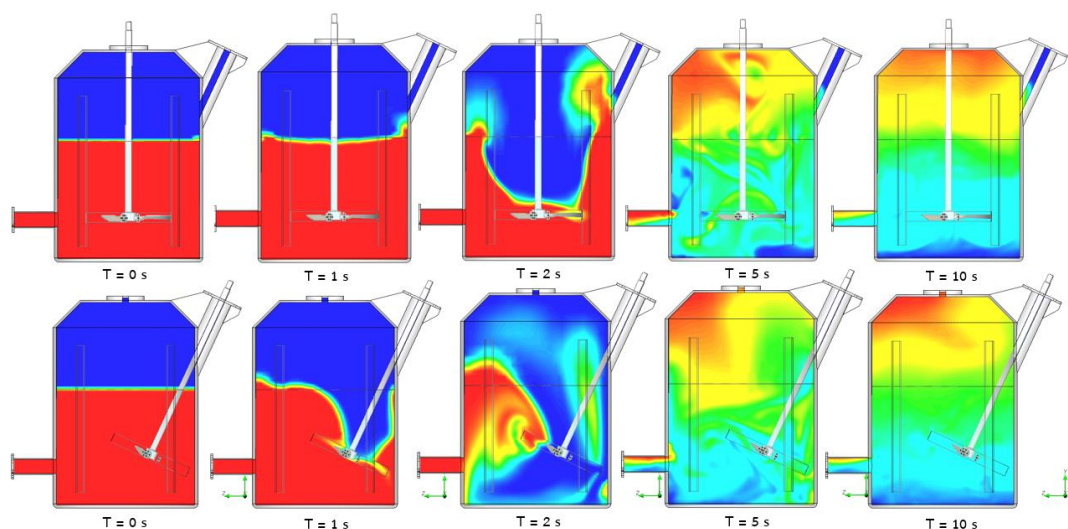
ภาพที่ 17 การผสมของของไหลแบบผิวอิสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 50 รอบต่อวินาที



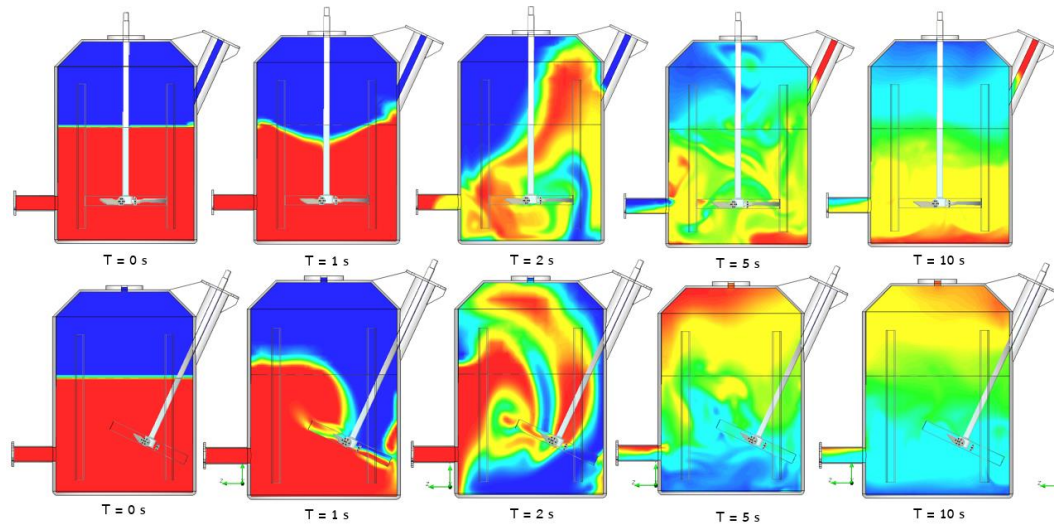
ภาพที่ 18 การผสมของของไหลแบบผิวอิสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 100 รอบต่อนาที



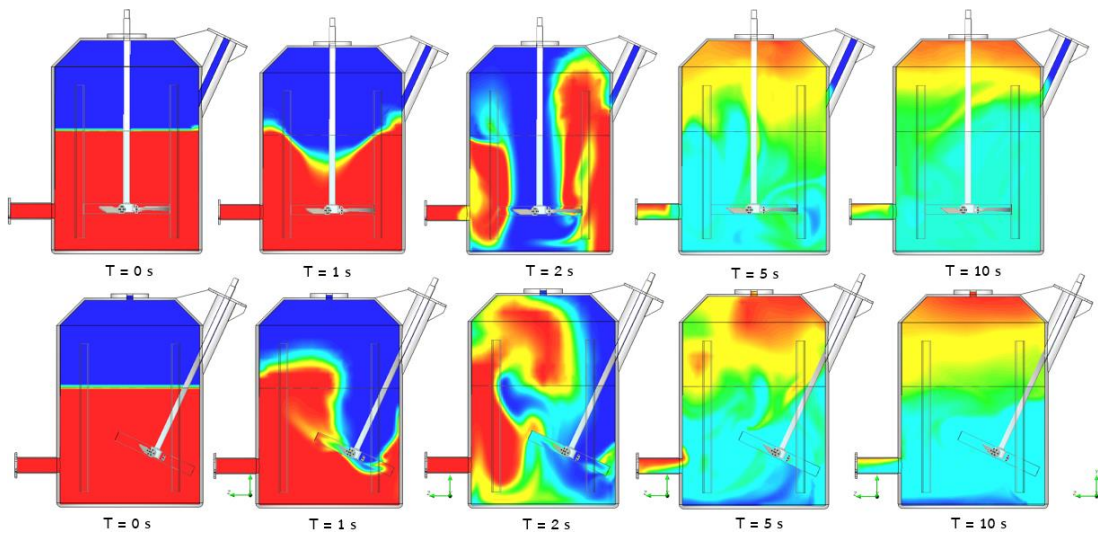
ภาพที่ 19 การผสมของของไหลแบบผิวอิสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 150 รอบต่อนาที



ภาพที่ 20 การผสมของของไหลแบบผิวอิสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 200 รอบต่อนาที



ภาพที่ 21 การผสมของของไหลแบบผิวอิสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 250 รอบต่อนาที



ภาพที่ 22 การผสมของของไหลแบบผิวอิสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 300 รอบต่อนาที

ผลลัพธ์ของการจำลองเชิงตัวเลขของใบพัด กวนผสมแบบเอียงและแบบแกนตั้ง จากภาพที่ 15 และภาพที่ 16 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแสดงในภาพ สามารถอธิบายได้ว่า ค่าสีจะแสดงระยะของตำแหน่ง เริ่มต้นของอนุภาคในทิศทางตามแนวแกนการหมุน ของแต่ละแบบการวิเคราะห์ โดยที่สีแดงจะแสดงถึง ตำแหน่งด้านบนและสีน้ำเงินจะแสดงถึงตำแหน่ง ด้านล่าง ซึ่งผลลัพธ์หลังจากการวิเคราะห์การหมุน และแสดงจำนวนของอนุภาคที่น้อยลง ส่งผลให้เกิด การกระจายตัวของอนุภาคที่มีความสามารถสูงขึ้น ดังนั้นจึงได้รับการยืนยันว่าสภาพใบพัดกวนผสม

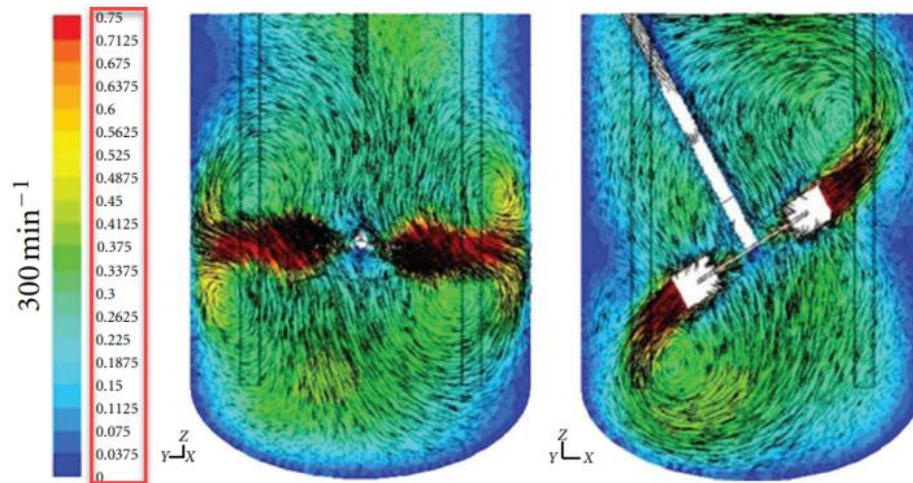
แบบเอียง สามารถสร้างแรงกระจายได้ตัวสูงกว่า ใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง ซึ่งเป็นไปตาม ผลงานวิจัยของ Koji *et al.* (2012) ที่ได้ทำการศึกษา เอาไว้กับชุดใบพัดกวนผสมแบบ 4 ใบพัด นอกจากนี้ งานวิจัยยังได้ทำการศึกษารูปแบบการวิเคราะห์ของ ของไหลผสมสองชนิดที่ผสมกัน เพื่อทำการศึกษา ระยะเวลาของการผสมระหว่างสารละลาย (Slurry) และน้ำ จากภาพที่ 17 ถึงภาพที่ 22 สามารถแสดง ผลลัพธ์ของการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลในการ จำลองกระบวนการผสมของไหลสามชนิดคือ อากาศ สารละลายและน้ำด้วยใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง

และแกนเอียง ซึ่งค่าเริ่มต้นการคำนวณจะกำหนดของไหลเป็นอากาศ ส่วนของไหลผสมทั้งสองคือ สารละลายและน้ำจะกำหนดให้มีค่าความหนาแน่น และค่าความหนืดที่แตกต่างกัน กระบวนการจำลองจะกำหนดให้ภายในถังผสมมีน้ำเป็นสัดส่วนหลัก รองจากอากาศและจะทำการปล่อยสารละลายเข้ามาทางท่อส่งน้ำที่เชื่อมต่อกับถังผสมด้วยอัตรา 0.00365 ผลงานวิจัยของ Piya and Puzu (2019) ได้ทำการจำลองผลแบบ Free-Surface แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มตำแหน่งหรือมีการเปลี่ยนตำแหน่งใบพัดในทิศทางแนวแกนตั้งในทิศทางแกน Z จะส่งผลทำให้เกิดการกระจายความเร็วจากใบพัดกวนผสม ทำให้มีอัตราเร็วที่ลดลง แต่ผลการจำลองเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนเอียง ทำให้สามารถสร้างความเร็วในสนามการไหลได้สูงขึ้น ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ของการผสมทั้งสองแบบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ พบว่า ที่ใบพัดกวนผสมแบบเอียงจะสามารถสร้างอัตราส่วนของการผสมได้ดีและใช้เวลาที่น้อยกว่าการใช้ใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งแบบบมีนัยสำคัญ

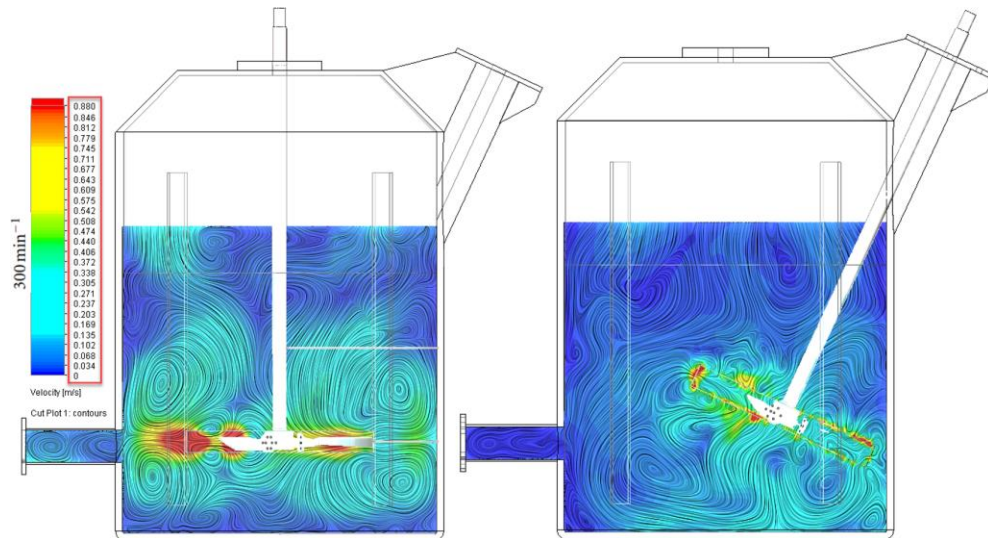
4. การเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้เลือกงานวิจัยของ Koji *et al.* (2012) โดยเขาได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกวนผสมของเหลวที่มีความหนืดอยู่ในช่วง 1.05-1.30

พาสคัล.วินาที (Pa.s) โดยทำการติดตั้งชุดแบบใบตรงที่ 0 องศาและแบบใบพัดแบบเอียงที่ 15 และ 30 องศา ตามลำดับ ซึ่งเขาเลือกทำการศึกษาที่รอบการหมุน 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที โดยกวนผสมภายในถังกวนผสมที่ทำการติดตั้งชุดแผ่นกั้น (baffle) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.24 เมตร (240 มิลลิเมตร) สูง 0.3 เมตร (300 มิลลิเมตร) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสมเท่ากับ 0.119 เมตร (119 มิลลิเมตร) ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ผู้วิจัยได้นำแบบจำลองที่ออกแบบขึ้นใหม่ในงานวิจัยนี้ โดยทำการตั้งค่าของไหลแบบนิวโทเนียน ซึ่งเป็นของผสมระหว่างน้ำและเชื่อมข้าวโพด ที่ความหนืดของของเหลวที่ 1 พาสคัล.วินาที เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Koji *et al.* (2012) และเลือกใช้รอบการหมุนที่ 300 รอบต่อนาที ที่มุมมองการวางใบพัดกวนผสมที่ 25 องศา ผลการเปรียบเทียบความเร็วภายในถังกวนผสมพบว่า แบบจำลองใบพัดกวนผสมที่ออกแบบขึ้นใหม่ในงานวิจัยนี้ โดยใช้รูปทรงของแอร์ฟอยล์รุ่น NACA 0006 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 400 มิลลิเมตร และติดตั้งในถังกวนผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 700 มิลลิเมตร สูง 1,000 มิลลิเมตร สามารถสร้างความเร็วเฉลี่ยรอบใบพัดและภายในถังกวนผสมของเหลวที่มีความหนืดในช่วง 1 พาสคัล.วินาที และได้ผลลัพธ์ความเร็วสนามการไหลที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Koji *et al.* (2012) ดังแสดงในภาพที่ 23



ก. แบบจำลองการวิเคราะห์ของ Koji *et al.* (2012) ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Fluent ที่รอบการหมุน 300 rpm ที่มุม 30 องศา ในการติดตั้งชุดใบพัดกวนผสม



ข. แบบจำลองการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation ที่ 300 rpm ที่มุม 25 องศา ในการติดตั้งชุดใบพัดกวนผสม

ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของแบบจำลองทั้งสองแบบ

จากภาพที่ 23 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองใบพัดกวนผสมที่ขึ้นรูปใบพัดด้วยรูปทรงของแอร์ฟอยล์รุ่น NACA 0006 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 400 มิลลิเมตร สามารถนำไปทำการปรับใช้ในงานกวนผสมของเหลวแบบต่าง ๆ ได้เช่นเดียวกับรูปทรงใบพัดในแบบอื่น ๆ ถ้าสามารถเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับงานที่ทำการกวนผสมของเหลว แต่ละประเภท ก็จะเป็นผลดีต่อประสิทธิภาพเชิงกลและประสิทธิภาพการกวนผสมได้ อีกทั้งยังช่วยในเรื่อง

ของการประหยัดพลังงานที่จะสูญเสียไปกับการกวนผสมต่าง ๆ ที่ไม่จำเป็น

สรุป

ในการศึกษาผู้วิจัยได้เลือกออกแบบใบพัดกวนผสมแบบใหม่โดยใช้โปรแกรมที่มีหน้าตารูปทรงแอร์ฟอยล์รุ่น NACA 0006 มาใช้เป็นกรณีศึกษาในการกวนผสมในงานวิจัยนี้ และผลการทดสอบเชิง

ตัวเลขในการผสมสารละลาย (Slurry) และน้ำที่มีค่าความหนาแน่นและความหนืดที่แตกต่างกันด้วยใบกวนผสมรูปทรงแอร์ฟอยล์แบบเอียงที่ทำมุมเอียง 25 องศา พบว่าสามารถสร้างการกระจายตัวของความเข้มข้นในการผสมสารละลาย (Slurry) กับน้ำให้เข้ากันได้ดีที่สุดใช้เวลา 10 นาที ซึ่งใช้เวลาผสมได้เร็วกว่าใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง 4 วินาที ซึ่งสามารถแสดงได้จากภาพที่ 14 และใบพัดกวนผสมแบบเอียงยังสามารถสร้างแรงกระจายตัวของความเร็วในการผสมกันของสารละลาย (Slurry) และน้ำที่เหมาะสมเพราะความเร็วในสนามการไหลจะมีค่าที่สูงบริเวณรอบใบกวนผสมและพื้นที่การหมุนวนด้านล่างใบพัดกวนผสม และค่าความเร็วในแนวแกนจะมีค่าความเร็วทั้งค่าบวกและค่าลบ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของของไหลผสมไปทั่วทั้งบริเวณถังผสม การเลือกใช้ใบพัดแบบเอียงที่ทำการติดตั้งในงานวิจัย สามารถช่วยในการแก้ปัญหาในการตกตะกอนบริเวณก้นถังกวนผสมได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งสามารถแสดงผลอยู่ในรูปแบบของอัตราการผสมและเวลาผสม ดังนั้นการเลือกใช้กังวาลใบกวนผสมที่สามารถสร้างอัตราการกวนผสมของไหลให้เข้ากันได้ดีและใช้เวลาที่ไม่มาก จะส่งผลดีและสามารถประหยัดในเรื่องของพลังงานที่จะนำไปทำการเลือกใช้ขนาดมอเตอร์ ตลอดจนสามารถประเมินความต้องการและวางแผนการลดค่าของการสิ้นเปลืองพลังงานได้ การจำลองผลเชิงตัวเลขด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้เป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งที่ใช้แสดงรูปแบบแนวคิดด้านการออกแบบใหม่ ๆ ที่นำรูปทรงแอร์ฟอยล์ที่ใช้กับเครื่องจักรทางอากาศยานมาประยุกต์ใช้กับงานด้านการกวนผสมของเหลว เพื่อสร้างแนวทางการใช้งานแบบใหม่และเพิ่มมิติในการออกแบบให้เกิดประโยชน์กับกลุ่มอุตสาหกรรมชุมชนขนาดเล็ก SME เพิ่มมากขึ้นได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่สนับสนุนทุนวิจัยและอุปกรณ์ในด้านต่าง ๆ งานวิจัยนี้แล้วเสร็จตามกำหนด

เอกสารอ้างอิง

- Bakker, A., Myers, J., Ward, R.W. and Lee, C.K. 1996. The laminar and turbulent flow pattern of a pitched blade turbine. **Chemical Engineering Research and Design** 74: 485-491.
- Cabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. 1993. **Unit operations of chemical engineering**. McGraw-Hill, New York.
- Choi, B.S., Wan, B., Philyaw, S., Dhanasekharan, K. and Ring, T.A. 2004. Residence time distributions in a stirred tank: comparison of CFD predictions with experiment. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 43(20): 6548-6556.
- Dadone, L.U. 1978. **Design and Analytical Study of a Rotor Airfoil**. NASA., Washington DC.
- John, D.A. 2001. Incompressible Flows Over, pp. 277-349. In Michael, L. ed. **Airfoils Fundamentals of Aerodynamics**. McGraw-Hill Companies Inc, New York.
- Kevin, J.M., Mark, F.R. and Julian, B.F. 2019. **Optimize Mixing by Using the Proper Baffles**. STUDYLIB. Available Source: <https://studylib.net/doc/8866622/optimize-mixing-by-using-the-proper-baffles>, February 25, 2021.
- Koji, T., Yoshiharu, S., Yasuyuki, T., Hitoshi, S. and Masayuki, N. 2012. Laminar Mixing in Stirred Tank Agitated by an Impeller Inclined.

- International Journal of Chemical Engineering** 2015(5): 1-10.
- Lahamornchaiyakul, W. 2011. Mechanical Design System of Vertical Axis Micro Water Turbine Generator using Computational Fluid Dynamics (CFD), pp. 85-91. *In The 25th Conference Mechanical of Engineering Networks*. Department of Engineering Kasetsart University, Thailand. (in Thai)
- Lahamornchaiyakul, W. 2020. Design and CFD Simulation of Agitating Blade in Tank for Mixing Fluids. **Ladkrabang Engineering Journal** 37(1): 13-20. (in Thai)
- Lahamornchaiyakul, W. 2021. Designing and Flow Field Analysis of Agitation Turbine using Numerical Simulation. **UBU Engineering Journal** 14(1): 105-114. (in Thai)
- Lahamornchaiyakul, W. 2022. CFD Simulation of Airfoil Shape Blade for Mixing in Tank for Mixing Fluid. **Journal of Engineering, RMUTT** 20(1): 1-12. (in Thai)
- Lahamornchaiyakul, W., Booniam, P. and Kaemthapim, N. 2018. Simulation of Fluid Mixing in Food Industry using Computational Fluid Dynamics, pp. 10-15. *In The 4th National Food Engineering Conference*. Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT). (in Thai)
- Piya, I. and Puzu, N.O. 2019. Numerical CFD Simulation Flow of Radial Impellers in Reactor Tanks for Durian Peel Synthesis. **Princess of Naradhiwas University Journal** 11(3): 128-139. (in Thai)
- Rahimi, M. and Parvareh, A. 2007. CFD study on mixing by coupled jet-impeller mixers in a large crude oil storage tank. **Computers and Chemical Engineering** 31: 737-744.
- Shengchao, Q., Rijie, W., Xiaoxia, Y. and Yuefei, Y. 2015. CFD Prediction of Mean Flow Field and Impeller Capacity for Pitched Blade Turbine. **Transactions of Tianjin University** 21(3): 250-258.
- Skadsem, H.J. and Saasen, A. 2019. Concentric cylinder viscometer flows of Herschel-Bulkley fluids. **Applied Rheology** 29(1): 173-181.
- SolidWorks. 2020. **SolidWorks Flow Simulation Online Tutorials**. Available Source: https://www.academia.edu/41718721/Solid_works_flow_simulation_2020_tutorial, May 22, 2020.
- Um, B.H. and Thomas, R.H. 2008. A CFD model for predicting the flow patterns of viscous fluids in a bioreactor under various operating conditions. **Korean Journal of Chemical Engineering** 25(5): 1094-1102.