

การออกแบบและพัฒนาใบพัดกวนผสมสำหรับของไหลที่มีความหนืดด้วยองค์ความรู้จากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล

Designing and Developing Mixed Stirring Rotors for Viscous Fluids with Knowledge from Product Design Patents using Computational Fluid Dynamics Technique

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล*

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิชณุโลก

บ้านกร่าง เมือง พิชณุโลก 65000

Werayoot Lahamornchaiyakul*

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

Phitsanulok, Ban krang, Mueang, Phitsanulok, 65000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: werayootrmutl@gmail.com

Received: Jun 09, 2022; Revised: Sep 19, 2022; Accepted: Sep 22, 2022

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อแสดงรูปแบบสนามการไหลแบบปั่นป่วนภายในถังกวนผสม โดยของไหลที่ทำการจำลองเป็นผลิตภัณฑ์มะม่วงกวนที่มีความหนืดเฉลี่ยเท่ากับ 1.8 Pa.s ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ขั้นตอนการศึกษาเริ่มต้นจากการใช้ใบพัดกวนผสมแบบทำมุม 45 องศา (Pitch blade) ที่ได้จากการพัฒนามาจากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์เลขที่ 62881 หลังจากนั้น พลังงานสำหรับการผลิตของเครื่องกวนผสมก็ได้รับการปรับให้เหมาะสมกับการทำงานจริง ใบพัดกวนผสมที่ออกแบบใหม่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 334 มม. และถังผสมที่คำนวณได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,002 มม. และมีความสูง 1,002 มม. เครื่องผสมมะม่วงถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียวขนาด 1 แรงม้า โดยใช้สายพานส่งกำลัง การออกแบบและจำลองผลลัพธ์เชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้ นักวิจัยต้องการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของความเร็วในการหมุนสำหรับการกวนผสม ดังนั้นจึงเลือกความเร็วในการผสมที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 รอบต่อนาที ตามลำดับ ผลการจำลองเชิงตัวเลขและการเปรียบเทียบเพื่อแสดงผลกระทบของการออกแบบต่อตัวแปรที่คำนวณด้วยมือ ตัวแปรที่ได้จากการคำนวณและการจำลองเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องกวนผสมในแบบต่าง ๆ ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: สิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์, เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล, เครื่องกวนผสมมะม่วง

Abstract

The purpose of this study is to show a turbulent flow field pattern inside a mixing stirring tank, with the simulated fluid being a viscosity is 1.8 Pa. s at 98 degrees Celsius. The study process began with the use of a 45-degree angled mixing rotor (pitch blade) developed from product design patent no. 62881. After that, the production power of the mixing machines was optimized. The redesigned mixing rotor has a diameter of 334 millimeters, and the calculated mixing tank is 1,002 millimeters in diameter and has a height of 1,002 millimeters. The mango mixing machine was driven by a 1 horsepower, single-phase electric motor and used a transmission belt. Numerical simulation results and comparisons show the effect of design on hand-computed variables. The variables

in this study were obtained by calculation and computational fluid dynamics techniques. And can be applied to the design and development of various stirrers in the future.

Keywords: Product design patent, Computational fluid dynamics technique, Mango mixing machine

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ใบพัดกวนผสมชนิดต่าง ๆ ได้ถูกนำไปใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมมากมาย ทั้งในส่วนของกลุ่มธุรกิจอาหาร เครื่องสำอาง สารเคมี และอาหารสัตว์ เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการผสมของเหลวชนิดต่าง ๆ เข้าด้วยกันจนเป็นเนื้อเดียว รูปแบบของงานด้านการกวนผสมที่มีประสิทธิภาพ สามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่คำนึงถึงกำลังการผลิต และค่าความหนืดของของไหล [1] ระบบการทำงานที่มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีการออกแบบใบกวนผสมให้สามารถทำงานได้ตามข้อกำหนด โดยจะต้องอาศัยองค์ความรู้หลายด้าน ทั้งในส่วนการออกแบบชิ้นส่วนทางกล อาทิเช่น การออกแบบเพลลา การออกแบบระบบส่งกำลัง และการออกแบบมุมปะทะของใบพัดกวนผสม เป็นต้น โดยมีรายงานวิจัยต่าง ๆ ได้ทำการเลือกนำเอาเทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลเข้ามาจำลองสนามการไหลขณะที่มีการกวนผสมภายในถังผสม ก็เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการกวนผสมของใบกวนแต่ละประเภทให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2],[3] และนอกจากนั้นยังพบงานวิจัยที่ได้นำหลักการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลมาใช้ในการออกแบบใบกวนภายในถังผสม โดยจะใช้รูปแบบการจำลองผลด้วยสมการเวียร์-สโตคส์แบบค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน K-epsilon [4] ส่วนการทดสอบจริงเพื่อการศึกษาประสิทธิภาพของการผสมในถังปั่นกวนนั้น มีข้อเสียคือ ต้องใช้เวลานาน ค่าใช้จ่ายสูง และมีความยากลำบากในการเก็บผลลัพธ์ของตัวแปรบางชนิดในทางกลับกัน หลักการทางพลศาสตร์ของไหลจะใช้รูปแบบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขและสามารถทำการเพื่อกำหนดลำดับขั้นตอนในการเก็บผลการควบคุมการไหลภายในถังผสม ซึ่งจะสามารถลดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายได้มาก การออกแบบใบพัดกวนผสมสามารถออกแบบได้หลายวิธีเพื่อให้เหมาะสมกับงานที่ใช้หรือออกแบบให้สามารถง่ายต่อการทำการปรับปรุงหรือการบำรุงรักษา ในการการปรับปรุงสามารถทำการถอดประกอบใบพัดกวนผสมได้ เพื่อให้สามารถทำงานได้หลากหลายประเภท

[5]จากการศึกษาที่ผ่านมาได้พบรายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องการออกแบบและวิเคราะห์รูปร่างของกังหันกวนผสมโดยใช้หลักการทางพลศาสตร์ของไหล โดยมีการศึกษาบางส่วนได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับใบพัดกวนผสมด้วยการใช้หลักการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [6] โดยรายงานว่า มุมปะทะ 30 องศาของใบกวนผสมที่ใช้ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที สามารถผสมกันได้ 60% ที่เวลา 8 วินาที และการใช้ใบกวนแบบ 35, 40 และ 45 องศา แอปเปิ้ลสามารถเคลื่อนที่ไปผสมกับน้ำได้ 30% ที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที นอกจากนี้การใ้ใบกวนที่มุม 30 องศาจะให้ค่าการหมุนวนของของเหลวได้ดีกว่ามุม 35, 40 และ 45 องศา เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน ส่วนงานวิจัยที่ทำการศึกษารูปแบบของความเร็วในแนวรัศมีที่ใช้ใบกวนผสมแบบ Helix Blade และ Curve Blade ผลของงานวิจัยพบว่าค่าความเร็วในแนวรัศมีที่ใช้ใบกวนผสมแบบ Helix Blade และ Curve Blade จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปทรงใบกวนผสม [7] จากความสำคัญของงานวิจัยที่ผ่านมา ทำให้รู้ว่าการพัฒนาต้นแบบใบกวนผสมให้เหมาะสมกับงานจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวนผสม อีกทั้งยังสามารถลดพลังงานที่สูญเสียไปกับการกวน

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำเอาแนวคิดที่ได้จากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์ เลขที่ 62881 เรื่อง ชิ้นส่วนเครื่องกลเติมอากาศในน้ำ [5] มาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาใบพัดกวนผสมสำหรับผลิตภัณฑ์มะม่วงกวน เพื่อใช้ในการพัฒนาและการแปรรูปอาหารประเภทต่าง ๆ สำหรับชุมชน และสามารถช่วยเหลือกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรที่กำลังประสบกับปัญหาการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส CO-VID19 ในประเทศไทย ส่งผลทำให้ขาดแคลนรายได้ต่อครัวเรือนตลอดระยะเวลา 2 ปี ทำให้เกิดปัญหาเศรษฐกิจอย่างร้ายแรงและทำให้ธุรกิจส่วนใหญ่ของประเทศชะลอตัวลง ส่งผลให้รัฐบาลเห็นความสำคัญของการพัฒนาและฟื้นฟูเศรษฐกิจของประเทศไทยอย่างเร่งด่วน ดังนั้นวิสาหกิจชุมชนจึงถือได้ว่าเป็นหน่วยงานท้องถิ่นที่สำคัญในการขับเคลื่อนและสามารถช่วยฟื้นฟูเศรษฐกิจได้อย่างเหมาะสมในปัจจุบัน และใน

ปัจจุบันวิสาหกิจชุมชนยังมีบทบาทสำคัญในการช่วยพัฒนาต้นแบบสินค้าเกษตรในด้านต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ สิ่งทอ เป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้ นักวิจัยได้คัดเลือกกลุ่มแม่บ้าน ตำบลคงคู่ อำเภอสหัสขันธ์ จังหวัดสุโขทัย เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา หลังจากนั้นผู้วิจัยลงพื้นที่วิจัยเพื่อเก็บข้อมูล พบว่ากลุ่มแม่บ้านเกษตรกรในพื้นที่ดังกล่าว มีอาชีพในการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากมะม่วงเพื่อจัดหน่วยในพื้นที่และต่างจังหวัดใกล้เคียง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กลุ่มแม่บ้าน ต.คงคู่ อ.ศรีสัชนาลัย จ.สุโขทัย

ซึ่งพื้นที่วิจัยที่ได้เก็บข้อมูล พบว่ามีการปลูกมะม่วงจำนวนมากและมะม่วงส่วนใหญ่เป็นพันธุ์น้ำดอกไม้ การคัดเลือกผลมะม่วงของกลุ่มแม่บ้านนั้น จะมีการคัดขนาด 2 แบบ คือ ผลมะม่วงที่มีขนาดใหญ่จะกำหนดเป็นเกรด A ส่วนผลมะม่วงน้ำดอกไม้มีขนาดกลางและขนาดเล็ก จะกำหนดเป็นเกรด B และผลมะม่วงที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ที่มีขนาดไม่เหมาะสมจึงนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เรียกว่ามะม่วงกวน เพื่อเพิ่มมูลค่าสินค้าต่อไป ปัจจุบันกรรมวิธีแปรรูปผลมะม่วงของแม่บ้านเกษตรกรยังใช้แรงงานคนเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้ปริมาณการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด จึงไม่สามารถแปรรูปผลมะม่วงจำนวนมากได้ ส่งผลให้ผลมะม่วงเน่าเสียเป็นจำนวนมาก ในงานวิจัยเมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีการพัฒนาเครื่องต้นแบบของเครื่องผสมแบบต่างๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งานและความต้องการของชุมชน [8] เขาได้พัฒนาเครื่องผสมมะม่วงที่ใช้ความร้อนจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) สำหรับชุมชน พบว่าความเร็วที่เหมาะสมในการกวนมะม่วงสุกคือ 21 รอบต่อนาที นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องกวนขนมเปียกปูนรูปสี่เหลี่ยมสำหรับใช้ในชุมชน โดยพบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกวนขนมเปียกปูนรูปสี่เหลี่ยมคือ 54 รอบต่อนาที [9] และนอกจากนี้ยังพบงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาและทำการทดลองเพื่อพัฒนาเครื่องกวน

น้ำปลาร้าสำหรับใช้ในวิสาหกิจชุมชนด้วยความเร็วรอบ 25 รอบต่อนาที สามารถทำงานได้ที่ 160 กก. ต่อวัน [10] จากปัญหาในรูปแบบดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหากระบวนการทางวิศวกรรมสำหรับกระบวนการผลิตและรูปแบบของการแปรรูปผลมะม่วงสำหรับกลุ่มแม่บ้านที่ยังคงประสบปัญหาการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาดในด้านต่างๆ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้มองถึงความสำคัญในการพัฒนาชุมชนด้านการผลิตมะม่วงกวน ตามแผนการฟื้นฟูเศรษฐกิจและสังคมจากผลกระทบของไวรัสโควิด-19 จึงได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลทางเทคนิค เช่น เวลาการผสม ความร้อนและความหนืดของการกวนมะม่วง เป็นต้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมมะม่วง และสามารถแก้ไขปัญหาของการผลิตมะม่วงกวนไม่เพียงพอ เพื่อแก้ปัญหานี้เราจะออกแบบเครื่องผสมมะม่วงใหม่ทั้งหมด ความหนาแน่นของมะม่วงเป็นคุณสมบัติหลักในการสร้างแรงบิดสูงบนใบพัดของเครื่องกวนผสม ดังนั้นเราจะพิจารณาการออกแบบถึงผสมและใบมีดผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้กับความหนาแน่นเฉลี่ยของมะม่วงกวนเท่ากับ 1.79 Pa.s ที่อุณหภูมิคงที่ 97 องศาเซลเซียส [8]

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาใบพัดกวนผสมที่ได้จากองค์ความรู้ของสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์ เรื่อง ชิ้นส่วนเครื่องกลเติมอากาศ เลขที่ 62881

2.2 เพื่อจำลองและทำการเปรียบเทียบสนามความเร็วในถังกวนผสมเนื้อมะม่วงเหลวที่ระดับความเร็วการหมุน 10, 15, 20, 25 และ 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

3. ระเบียบวิธีวิจัย

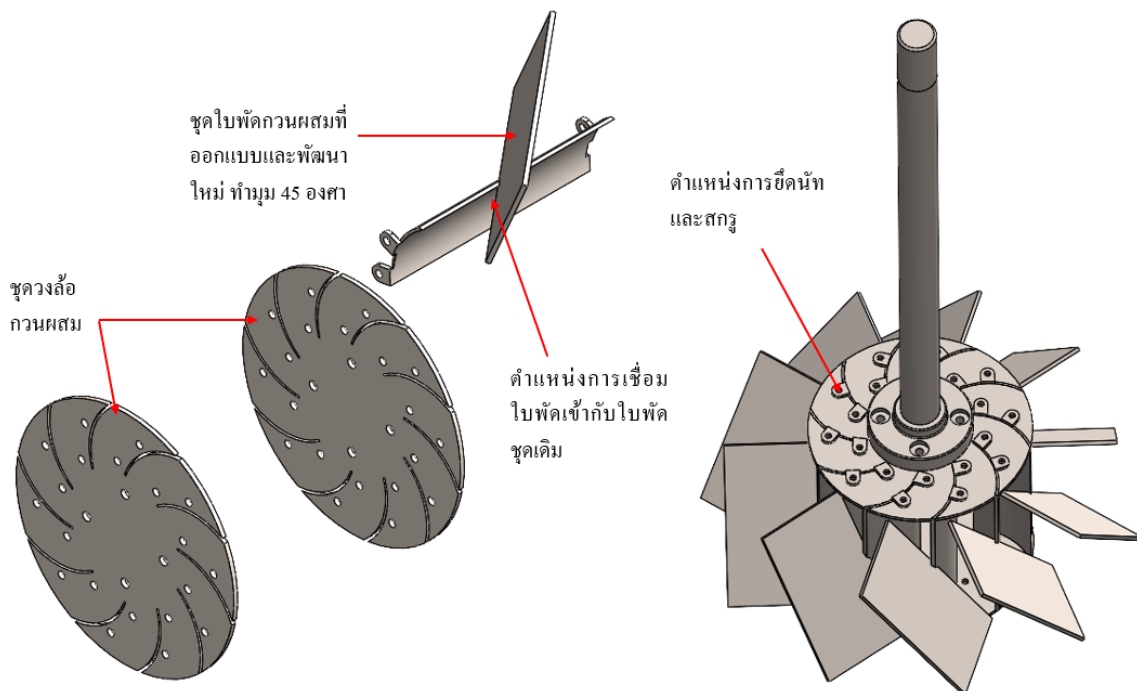
ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เริ่มดำเนินการทำวิจัยโดยได้ลงพื้นที่จริงในตำบลคงคู่ อ.ศรีสัชนาลัย จ.สุโขทัย และได้ทำการพูดคุยกับกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรที่ได้ทำการแปรรูปมะม่วงกวน พบว่ามีปัญหาและต้องการเครื่องมือทุนแรงมาช่วยในการทำงานเพื่อเพิ่มผลผลิต จากการศึกษาข้อมูลในเบื้องต้น

ผู้วิจัยจึงได้กำหนดทิศทางการออกแบบสำหรับพัฒนาใบกวนผสมขึ้นมาใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับมะม่วงกวน โดยได้ทำการศึกษาต้นแบบจากชิ้นส่วนเครื่องกลเติมอากาศในน้ำสำหรับการกวนผสมของเหลว ที่ได้จากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์ เลขที่ 62881 [5] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองเครื่องกลเติมอากาศในน้ำ [5]

จากรูปที่ 2 พบว่าแบบจำลองชิ้นส่วนเครื่องกลเติมอากาศในน้ำที่ได้จากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์มีจุดเด่นคือ ชุดใบพัดกวนผสมสามารถทำการถอดประกอบออกจากชุดวงล้อได้ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำแนวคิดนี้มาทำการออกแบบและพัฒนาชุดใบพัดขึ้นมาใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับการกวนผสมเนื้อมะม่วงกวนที่มีความหนืดสูงในงานวิจัย และชุดใบพัดที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนา ยังสามารถทำการประกอบเข้ากับชุดวงล้อเดิมได้ตามปกติโดยไม่มีการดัดแปลงอะไรเพิ่มเติม ชุดใบพัดที่ทำการออกแบบใหม่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3

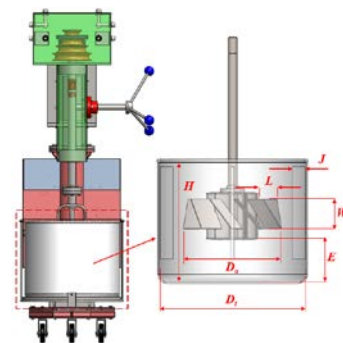


รูปที่ 3 แบบจำลองใบพัดกวนผสมเนื้อมะม่วงกวนที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาจากสิทธิบัตรการออกแบบ

ระเบียบวิธีการวิจัยในงานวิจัยนี้ จะประกอบไปด้วยกระบวนการออกแบบและพัฒนาใบกวนผสมเนื้อมะม่วงกวน โดยมีข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญดังนี้คือ

3.1 ทฤษฎีสำหรับการออกแบบและการกำหนดสัดส่วนใบพัดและถังกวนผสม

ระบบการทำงาน การออกแบบใบพัดกวนผสมและถังผสมเนื้อมะม่วงกวน จะเริ่มต้นจากการกำหนดขนาดและสัดส่วนต่าง ๆ ทางทฤษฎี [11], [12] ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 อัตราส่วนการกำหนดขนาดระหว่างใบพัดกวนผสมและถังผสมเนื้อมะม่วงกวน

จากรูปที่ 4 ผู้วิจัยสามารถแจกแจงรายละเอียดของตัวแปรอัตราส่วนขนาดทางทฤษฎีสำหรับการออกแบบใบพัดและถึงกวนผสมเนื้อมะม่วงเหลวได้ดังนี้ [12]

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

$$\frac{H}{D_t} = 1 \quad (2)$$

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12} \quad (3)$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (4)$$

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

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \quad (6)$$

เมื่อ D_a คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสม

D_t คือ เส้นผ่านศูนย์กลางถังกวนผสม

H คือ ความสูงของถังกวนผสม

E คือ ระยะห่างระหว่างวงล้อกวนผสมกับพื้นผิวล่างสุดของถังผสม

J คือ ความหนาของคิริบ (Baffle)

W คือ ความกว้างของใบพัดกวนผสม

L คือ ความยาวของใบพัดกวนผสม

t คือ ความหนาของใบพัดกวนผสม

3.2 ระบบสมการพื้นฐาน Navier-Stokes

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณารูปแบบของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุมพบว่าจะมีค่าเท่ากับผลต่างของสนามความเร็วของการไหลที่ไหลเข้าและไหลออกจากปริมาตรควบคุม และสามารถนำมาทำการเขียนในรูปของสมการของระบบควบคุมของสนามการไหลสำหรับงานวิจัยนี้ได้ดังนี้

3.2.1 สมการอนุรักษ์มวล [12], [13]

รูปแบบพื้นฐานของระบบสมการอนุรักษ์มวลสำหรับการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (7)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (7)$$

3.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม [12], [13]

อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของสนามการไหลของของไหล เมื่อเราทำการพิจารณาจะพบว่า อัตราของ

โมเมนตัมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจะเท่ากับผลรวมของแรงที่เกิดในสนามการไหล ซึ่งสามารถนำมาเขียนในรูปสมการได้ดังสมการที่ (8)-(10)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} + S_{Mz} \quad (10)$$

3.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

อัตราการเพิ่มขึ้นของรูปแบบพลังงานในระบบของของไหล เมื่อเราทำการพิจารณาจะพบว่า อัตราของพลังงานของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าเท่ากับอัตราความร้อนสุทธิที่มีค่าเพิ่มขึ้นในของไหล และบวกด้วยอัตราของงานสุทธิที่กระทำต่อของไหล โดยสามารถเขียนรูปสมการเพื่อทำการอธิบายพฤติกรรมได้ดังสมการที่ (11) [12],[13]

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial(u p)}{\partial x} + \frac{\partial(v p)}{\partial y} + \frac{\partial(w p)}{\partial z} \right) + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \tau_{zz})}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{y} \quad (11)$$

3.3 รูปแบบการสิ้นเปลืองพลังงานในการกวนผสม

การสิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากการผสม เป็นการพิจารณากำลังงานที่เกิดจากการผสมสำหรับของไหลผสมแต่ละชนิด โดยการพิจารณาตัวแปรดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของของไหล (ρ) และอัตราความหนืดสมบูรณ์ (μ) ของของไหลแต่ละชนิด นอกจากนั้นยังอาจรวมไปถึง สัดส่วนของขนาดใบพัดกวนผสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสม ความสูงของถังผสม และค่าความเร็วรอบการหมุน เป็นต้น ในการออกแบบระบบการทำงานของเครื่องจักรกวนผสมแต่ละชนิด จะทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ เช่น ตัวเลขกำลัง (Power Number, N_p) และเลขเรย์โนลด์ (Reynolds

Number, N_{Re}) [12],[13] ซึ่งรูปแบบของสมการตัวเลขกำลังและตัวเลขเรย์โนลด์ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (12) และ (13) [12]

$$N_p = \frac{P}{N^3 D_a^5 \rho} \quad (12)$$

$$N_{Re} = \frac{\rho N D_a^5}{\mu} \quad (13)$$

การพิจารณารูปแบบการไหลของสนามการไหลภายในถังกวนผสม เราสามารถทำการพิจารณาได้จากตัวเลขเรย์โนลด์ โดยช่วงการไหลแบบต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้ ถ้าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Zone) จะมีตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 10,000 แต่ถ้าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Zone) จะพบว่ามีตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 10-20 และถ้าเป็นการเปลี่ยนผ่านการไหลที่อยู่ระหว่างการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน (Transition Zone) จะมีตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 20-10,000 [6],[9] ดังนั้น รูปแบบของค่าพลังงานที่เกิดจากการผสมแบบปั่นป่วนในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (14) และค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการกวนผสมแบบราบเรียบสามารถคำนวณหาได้ด้วยสมการที่ (15)

$$P = K_T N^3 D_a^5 \rho \quad (14)$$

$$P = K_T N^2 D_a^3 \rho \quad (15)$$

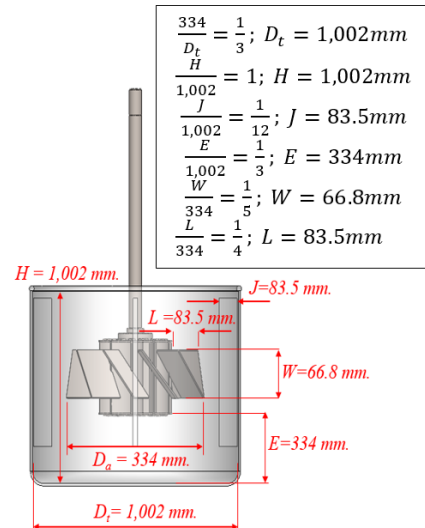
โดยค่าตัวแปร K_T จะขึ้นอยู่กับชนิดของใบพัดกวนผสมแต่ละชนิด และพิจารณาการติดตั้งครีป (Baffle) และไม่มีการติดตั้งครีปภายในถังกวนผสม

3.4 การออกแบบและการคำนวณ

3.4.1 การออกแบบสัดส่วนสำหรับการกวนผสม

จากรูปที่ 4 เราสามารถทำการออกแบบสัดส่วน โดยทำการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสมเบื้องต้นเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบกระบวนการผสมในงานวิจัยนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะทำการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสมเบื้องต้นเท่ากับ 334 มิลลิเมตร หลังจากนั้นสามารถคำนวณหาขนาดสัดส่วนที่เหมาะสมของใบพัดกวนผสม

เนื้อเมมเบรนเหลวและถังกวนผสมเนื้อเมมเบรนเหลวได้จากสมการที่ (1)–(6) พร้อมทั้งจะได้ผลลัพธ์ของสัดส่วนต่าง ๆ ของการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงรายการของสัดส่วนต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

3.4.2 การคำนวณกำลังงานสำหรับกวนผสม

ในการคำนวณกำลังงานสำหรับการกวนผสมเมมเบรนเหลว ผู้วิจัยจะอาศัยค่าของน้ำหนักของเนื้อเมมเบรนเหลวที่ผ่านกรรมวิธีด้วยอุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส พบว่ามีน้ำหนักเท่ากับ 75 กิโลกรัมโดยประมาณ และส่วนของใบพัดกวนผสม ผู้วิจัยได้กำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางในเบื้องต้นเท่ากับเท่ากับ 334 มิลลิเมตร พร้อมกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวนผสมเท่ากับ 1,002 มิลลิเมตร และมีความสูงของถังกวนผสมเท่ากับ 1,002 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5 และสามารถนำมาคำนวณหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. การคำนวณหาความหนาแน่นของเนื้อเมมเบรนเหลวสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (16)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (16)$$

$$\text{โดยที่ } V = \left(\frac{3.14 \times 1.002^2}{4} \right) \times 0.5 = 0.394 \text{ m}^3$$

$$\rho = \frac{75 \text{ kg}}{0.394 \text{ m}^3} = 190.36 \text{ kg/m}^3$$

2. คำนวณหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (17)

$$Re = \frac{\rho D_a^2 n}{\mu} \quad (17)$$

$$\text{จะได้ } Re = \frac{(190.36 \frac{kg}{m^3}) \times (0.334^2) m^2 \times (\frac{30}{60}) \frac{1}{s}}{1800 cP \times 0.1 \frac{kg}{m \cdot s}} = 5.89$$

3. คำนวณหาพลังงานสำหรับการกวนผสม (P)

เนื่องจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่คำนวณหาได้จากสมการที่ (17) พบว่ามีค่าที่น้อยกว่า 10 เพราะเป็นของไหลที่มีความหนืดแบบนอนนิวโตเนียน ดังนั้นเราจึงเลือกใช้สมการเพื่อคำนวณหาพลังงานสำหรับการกวนผสมได้ดังสมการที่ (18) และในงานวิจัยนี้ จำนวนใบพัดกวนผสมมีจำนวน 10 ใบพัด ซึ่งค่า K_L สำหรับใบพัดกวนผสมที่เป็นแบบก้านหัน ที่แสดงในตารางที่ 1 มีค่าสูงสุดที่ 44.5 [14] ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่านี้ในการสมมติในเบื้องต้นสำหรับการคำนวณ

$$P = \frac{K_L n^2 D_a^3 \mu}{g_c} \quad (18)$$

$$\text{จะได้ } P = \frac{44.5 \times (\frac{30}{60})^2 \frac{1}{s^2} \times (0.334^3) m^3 \times (1800 cP \times 0.1 \frac{kg}{m \cdot s})}{1 \frac{kg \cdot m}{N \cdot s^2}}$$

$$\therefore P = 0.746 kW$$

$$\therefore P = 1 HP$$

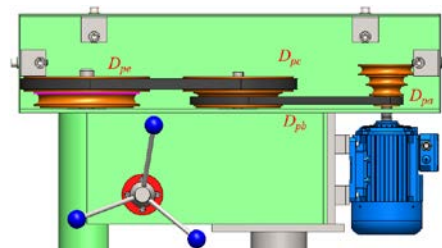
ตารางที่ 1 ตารางแสดงตัวประกอบการคูณ K_L

Type of Impeller	K_L
(Propeller, three blades)	
- (Pitch 1.0)	41
- (Pitch 1.5)	55
Turbine	
- (Six-blade disk) (S3=0.25, S4=0.2)	65
- (Six-curved blades (S4=0.2)	-
- (Six-curved pitch) 45o (S4=0.2)	70
- (Four-curved pitch) 45o (S4=0.2)	44.5
- (Flat paddle, two blades (S4=0.2)	36.5
- (Anchor)	300

3.4.3 การคำนวณหาขนาดเพลาส่งกำลังและต้นกำลังทางกลของเครื่องกวนผสมมะม่วง

1. คำนวณหาการหมุนสำหรับการกวนผสม

พลังงานที่ได้จากการกวนผสมที่คำนวณหาได้อยู่ที่ 0.746 kW หรือประมาณ 1 HP เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาขนาดมอเตอร์กำลังที่มีขายในท้องตลาดพบว่า มอเตอร์ขนาด 1 HP จะให้รอบการหมุนที่ 1,000 รอบต่อนาที สำหรับการหมุนแบบซิงโครนัส (Synchronous) จะได้รอบการหมุนจริงเท่ากับ 930 รอบต่อนาที แต่ในการกวนผสมสำหรับมะม่วงกวนจะใช้รอบการหมุนสูงสุดที่ 30 รอบต่อนาที ดังนั้นจำเป็นต้องทำการทดรอบ ซึ่งตัวแปรที่สำคัญสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวแปรขนาดของ Pulley สำหรับการคำนวณ

จากรูปที่ 6 กำหนดให้ ขนาดของ Pulley มีค่าเท่ากับ: $D_{pa} = 30mm$, $D_{pb} = D_{pc} = 500mm$, $D_{pe} = 900mm$

จากสมการที่ (19) และ (20) จะได้

$$i_1 = \frac{N_{pa}}{N_{pb}} = \frac{D_{pb}}{D_{pa}} \quad (19)$$

$$i_2 = \frac{N_{pc}}{N_{pe}} = \frac{D_{pe}}{D_{pc}} \quad (20)$$

$$\text{โดย } i_1 = \frac{930 \text{ rpm}}{N_{pb}} = \frac{500 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} \approx 55.8 \text{ rpm}$$

$$i_2 = \frac{55.8 \text{ rpm}}{N_{pe}} = \frac{900 \text{ mm}}{500 \text{ mm}} \approx 31 \text{ rpm} \approx 30 \text{ rpm}$$

2. ความเร็วเฉลี่ยของเหลวภายในถังผสม ($\bar{u}$) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (21) [15]

$$\bar{u} = \frac{1.586 \omega D^2}{(T^2/Z)^{1/3}} \quad (21)$$

$$\text{โดยที่ } 30 = \frac{\omega \times 60}{2\pi} \approx 3.14 \text{ rad/s และค่า } Z = 0.5 \text{ m}$$

$$\text{จะได้ } \bar{u} = \frac{1.586 \times 3.14 \times 0.334^2}{(1.002^2/0.5)^{1/3}} = 0.44 \text{ m/s}$$

3. การคำนวณหาแรงบิด (T) ดังสมการที่ (22) [16]

$$P = \frac{2\pi NT}{60} \quad (22)$$

$$\text{จะได้ } 746 = \frac{2 \times 3.14 \times 30 \times T}{60} \quad T = \frac{746 \times 60}{2 \times 3.14 \times 30} = 237.58 \text{ N.m}$$

4. คำนวณแรงบนใบพัดกวนผสมและค่าโมเมนต์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (23) [16]

$$F = \frac{P}{u} \quad (23)$$

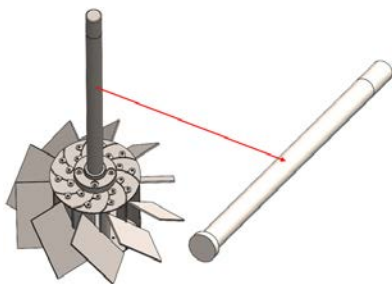
$$\text{จะได้ } F = \frac{746}{0.44} \approx 1,695 \text{ N} \quad M = 1,695 \text{ N} \times 0.167 \text{ m} \approx 283 \text{ N.m}$$

5. คำนวณหาเพลาส่งกำลัง

การคำนวณหาขนาดเพลาส่งกำลังในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (24) ผู้วิจัยจะเลือกใช้ค่า $\tau_d = 55 \text{ N/mm}^2$ และทำการกำหนดค่าสำหรับความล้าจากแรงกระตุกอย่างสม่ำเสมอในส่วนของ $C_m = 3.0$ และค่า $C_t = 3.0$ [16] และจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 7

$$d^3 = \frac{16}{\pi \tau_d} [(C_t T)^2 + (C_m M)^2]^{1/2} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } d^3 &= \frac{16 \times 10^3}{3.14 \times 55} [(3 \times 238)^2 + (3 \times 283)^2]^{1/2} \\ d &= \sqrt[3]{\frac{16 \times 10^3}{3.14 \times 55} [(3 \times 238)^2 + (3 \times 283)^2]^{1/2}} \\ d &= 45.39 \text{ mm} \text{ เลือกใช้ที่ } d = 40 \text{ mm} \end{aligned}$$

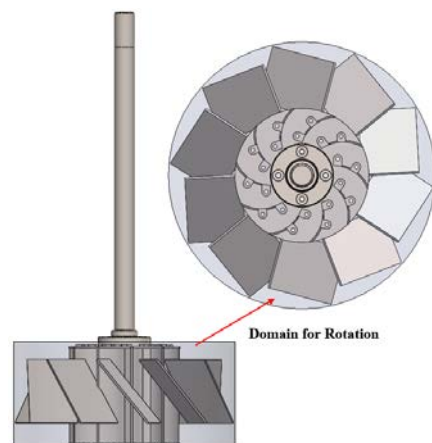


รูปที่ 7 แสดงขนาดเพลาส่งกำลังที่ได้จากการคำนวณ

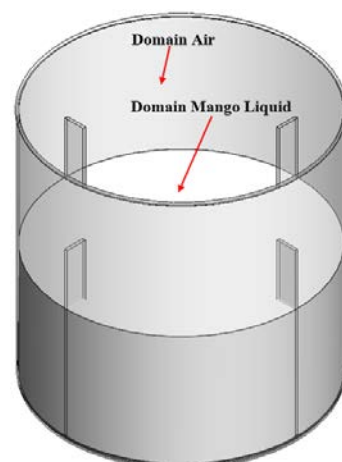
3.5 การสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเริ่มต้นจากการกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลเป็นแบบระบบการวิเคราะห์แบบภายใน (Internal Flow

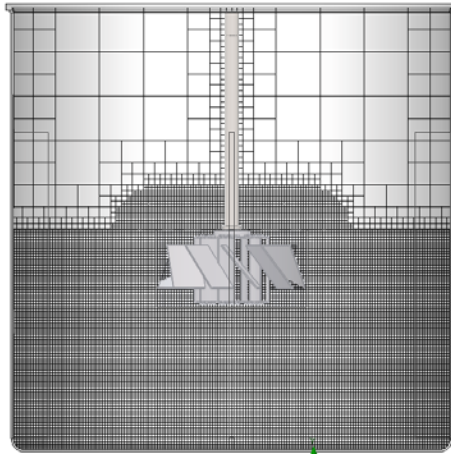
Analysis) ภายใต้การวิเคราะห์แบบการไหลสองสถานะแบบผิวอิสระ (Free Surface) คืออากาศและของเหลว หลังจากนั้นทำการสร้างโดเมนการหมุนให้กับชุดใบพัดกวนผสม ดังรูปที่ 8 พร้อมทำการกำหนดการหมุนของชุดใบพัดกวนผสมเป็นแบบ Local region (Sliding) ที่มีความเร็วรอบคงที่ดังนี้ 10, 15, 20, 25 และ 30 รอบต่อนาที ตามลำดับ และทำการสร้างโดเมนของก้อนของไหลที่ใช้สำหรับการจำลองการกวนมะม่วง ดังรูปที่ 9 พร้อมทำการกำหนดคุณสมบัติของมะม่วง (Initial Condition) ดังตารางที่ 2 และขั้นตอนสุดท้ายคือการสร้างเมชเอลิเมนต์ โดยทำการปรับคุณสมบัติเมชเอลิเมนต์เป็นแบบ Equidistant refinement โดยทำการปรับค่า Maximum equidistant level เท่ากับ 5 และทำการปรับค่าตัวแปรของ Offset distance เท่ากับ 0.1 เมตร จะได้ผลลัพธ์การสร้างเมชเอลิเมนต์สำหรับงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 8 แสดงโดเมนสำหรับการหมุน



รูปที่ 9 แสดงโดเมนสำหรับของไหล (ก้อนของเหลวสำหรับมะม่วงกวน)

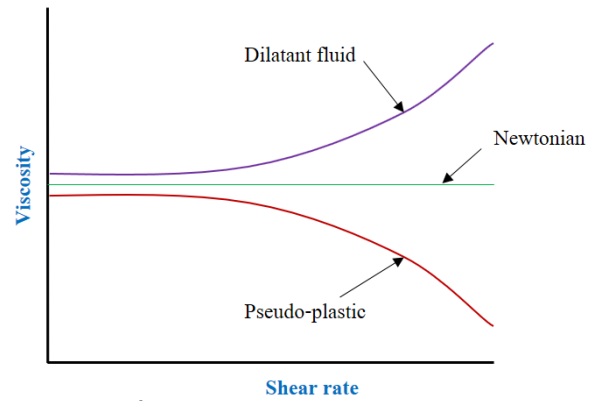


รูปที่ 10 แสดงเมชเอลิเมนต์ของโคเมนโบปัดและก้อนของไหลเหลวสำหรับมะม่วงหวาน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมะม่วงหวาน

Type of values	Parameter
Density	190.36 kg / m ³
Specific Heat	3,390 J / (kg.k)
Thermal Conductivity	0.5 W / (m.k)
Viscosity	Herschel-Bulkley Model
Consistency Coefficient	1.8 Pa. s
Yield Stress	3.0 Pa
Power Law Index	0.23

จากตารางที่ 2 พบว่าเนื้อมะม่วงหวานที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 98 องศา ได้มีพฤติกรรมของความหนืดเป็นไปตามรูปแบบของ Herschel-Bulkley Model หรือเป็นแบบ Pseudo plastic [17], [18] กล่าวคือ เนื้อมะม่วงหวานเมื่อได้รับความร้อนจนถึงช่วงเวลาหนึ่ง และเหลวนี้ได้รับแรงกระทำจากการกวนผสมที่เกิดจากใบพัดกวนผสมเพียงพอ ก็จะสามารถเอาชนะค่าความเค้น ณ ตำแหน่งของจุดคราก (Yield stress) ผลที่เกิดขึ้นนั้น สามารถทำให้เนื้อมะม่วงหวานสามารถเคลื่อนที่หรือไหลได้ เมื่อเราทำการพิจารณาพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudo plastic พบว่ารูปแบบการไหลแบบนี้เป็นของไหลประเภทนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid) [19] และรูปแบบของการไหลประเภทนี้มีคุณสมบัติเฉพาะคือ เมื่อทำการเพิ่มอัตราเฉือน (Shear rate) ให้สูงขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) มีค่าลดลง ซึ่งสามารถแสดงรูปแบบของพฤติกรรมได้จากรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงรูปแบบพฤติกรรมกรไหล

ในการทดสอบผู้วิจัยได้ทำการกำหนดเวลาในการคำนวณเท่ากับ 10 วินาที และกำหนด Step time เท่ากับ 0.2 วินาที ซึ่งสามารถคำนวณหา Step time ได้จากสมการที่ (25)

$$\text{Step time} = \frac{60}{n \times z} \quad (25)$$

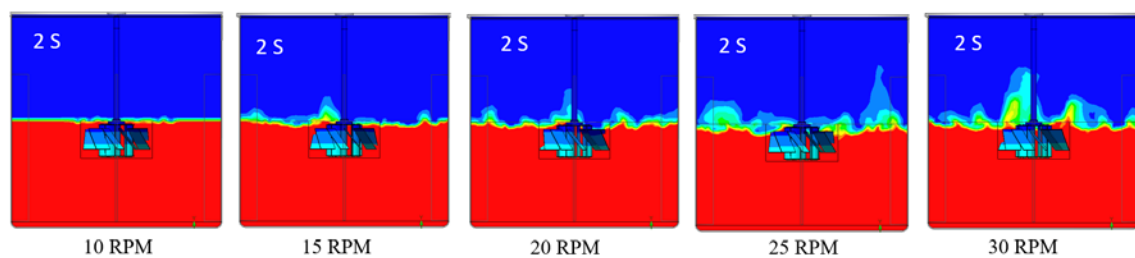
โดยที่ n คือ รอบการหมุน (rpm)

z คือ จำนวนใบพัดกวนผสม

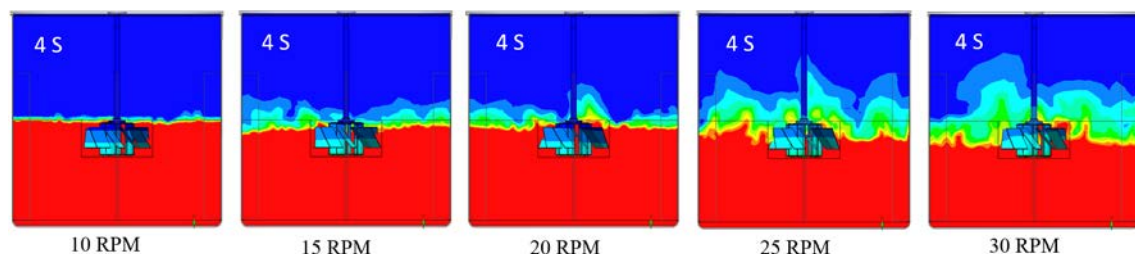
4. ผลการจำลองเชิงตัวเลข

4.1 การจำลองผล Volume Fraction

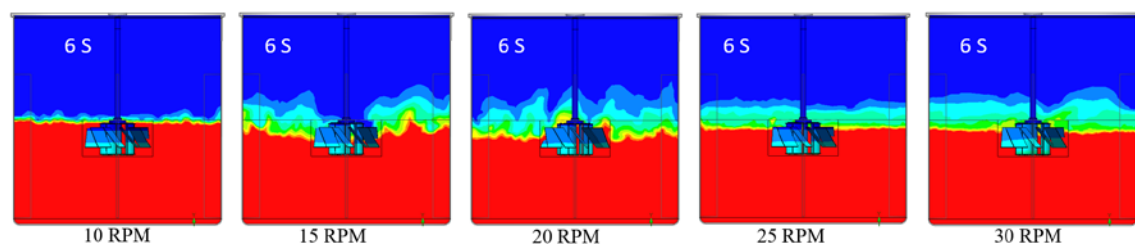
ขั้นตอนของกระบวนการจำลองผลลัพธ์สำหรับ Volume Fraction หรือการจำลองแบบ VOF (Volume of Fluid) สำหรับผิวอิสระของเนื้อมะม่วงหวานสำหรับการวิเคราะห์การกวนผสมในงานวิจัยนี้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12 และนอกจากนี้ ผู้วิจัยยังสามารถทำการจำลองการไหลระหว่างการผสมของของไหล 2 ชนิด คือมะม่วงหวานและอากาศภายในถังผสม ด้วยส่วนต่อประสานที่เคลื่อนไหวได้อย่างอิสระระหว่างของเหลวสองชนิด คือ อากาศและเนื้อมะม่วงหวาน ที่ไม่สามารถผสมเข้ากัน และจะแสดงผลอยู่ในรูปของ Immiscible Non-Newtonian Liquid ดังแสดงในรูปที่ 13 หลังจากนั้นผู้วิจัยได้นำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหล มาทำการคำนวณหาค่าตัวเลขกำลังโดยทำการพิจารณาจากตัวเลขค่าเรย์โนลด์ส เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสม และรอบการหมุนที่ใช้สำหรับการกวนผสมมะม่วงหวาน ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 14



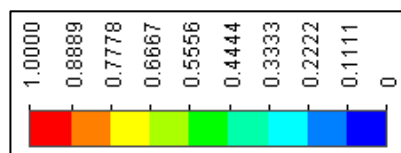
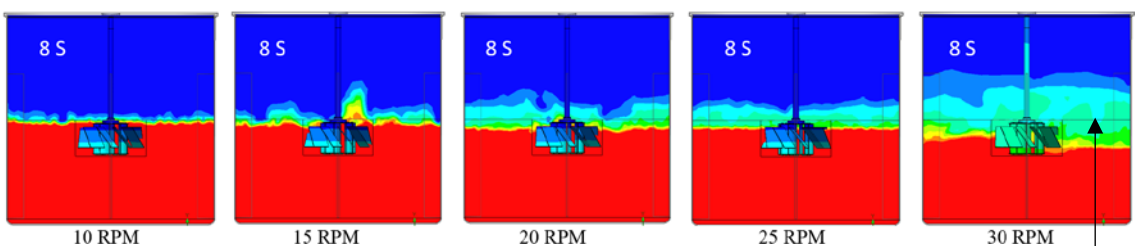
(a) Volume Fraction ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 2 วินาที



(b) Volume Fraction ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 4 วินาที

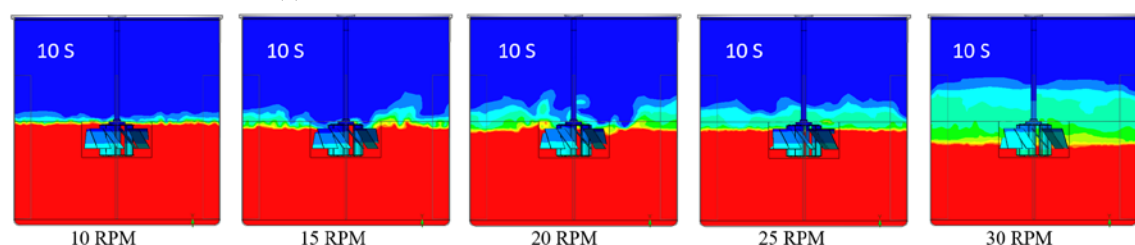


(c) Volume Fraction ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 6 วินาที



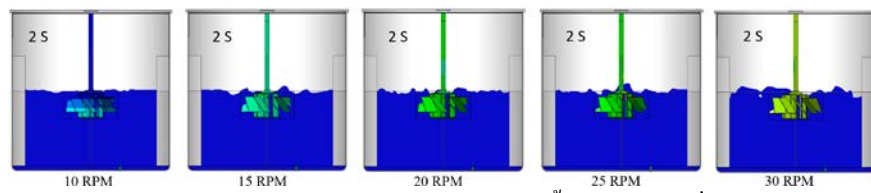
ตำแหน่งชั้นของการแตกตัวของอนุภาคของไหล

(d) Volume Fraction ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 8 วินาที

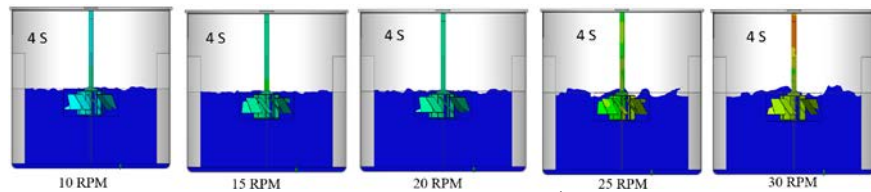


(e) Volume Fraction ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 10 วินาที

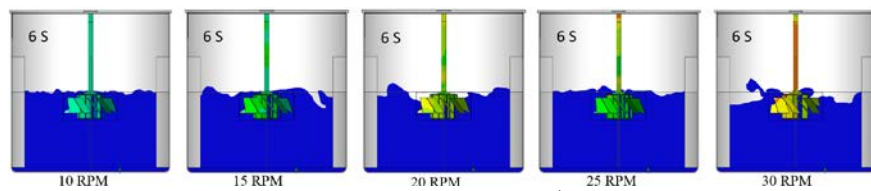
รูปที่ 12 แสดงผลการจำลอง Volume Fraction ที่รอบการหมุนของใบพัดกวนผสมต่าง ๆ



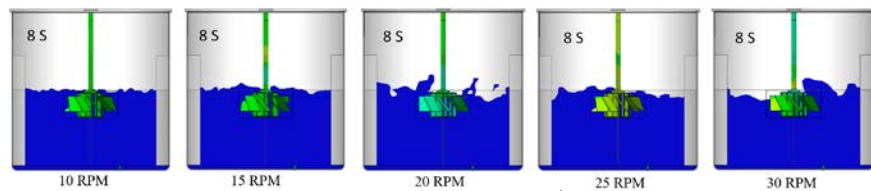
(a) Immiscible Non-Newtonian Liquid ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 2 วินาที



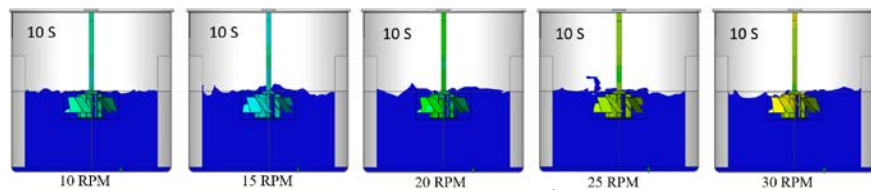
(b) Immiscible Non-Newtonian Liquid ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 4 วินาที



(c) Immiscible Non-Newtonian Liquid ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 6 วินาที



(d) Immiscible Non-Newtonian Liquid ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 8 วินาที

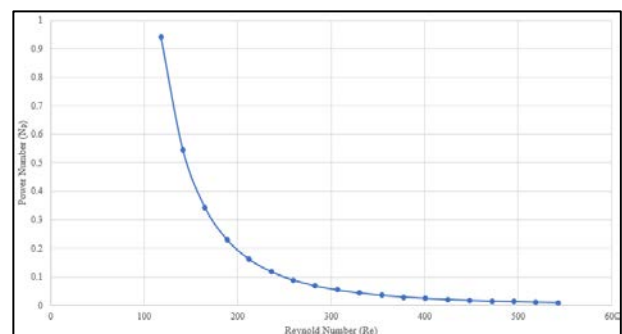


(e) Immiscible Non-Newtonian Liquid ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 10 วินาที

รูปที่ 13 แสดงผลการจำลอง Immiscible Non-Newtonian Liquid ที่รอบการหมุนของใบพัดความเร็วต่าง ๆ

จากรูปที่ 13 สามารถอธิบายผลลัพธ์ในรูปแบบ Immiscible Non-Newtonian Liquid เพิ่มเติมได้ดังนี้คือ รูปแบบของ Immiscible Non-Newtonian Liquid ในโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation จะใช้สำหรับจำลองการไหลด้วยส่วนต่อประสานที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระระหว่างของเหลวสองชนิดที่เข้ากันไม่ได้ เช่น น้ำ และอากาศ โดยเฉพาะงานที่ต้องการแสดงผลในรูปแบบการแตกตัวของอนุภาคหรือการกระเพื่อมในการไหลประเภทต่าง ๆ จากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้มองเห็นถึงหลักการและเทคนิคสำคัญที่ค้นพบ จึงได้นำเทคนิคดังกล่าวของการจำลองผลเชิงตัวเลขสำหรับฟิสิกส์ของไหลมาเสนอ

เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของรูปแบบการเคลื่อนที่ของฟิสิกส์บนเนื้อมะม่วงเหลวที่เกิดจากรอบการหมุนต่าง ๆ



รูปที่ 14 แสดงค่า Power Number ที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 14 ผลจากการศึกษาและทำการคำนวณผลโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของใบพัดกวนผสมจำนวน 10 ใบพัด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 334 มิลลิเมตร และถังผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,002 มิลลิเมตร โดยใช้ค่าความหนาแน่นของเนื้อมะม่วงเหลวที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียสเท่ากับ 190.36 kg/m^3 ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (16) และทำการคำนวณผลโดยทำการพิจารณารอบการหมุนในช่วง 2-30 รอบต่อนาที ผลที่ได้พบว่าค่าตัวเลขเรย์โนลด์จะมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ในทำนองเดียวกัน เมื่อเราทำการเพิ่มรอบการหมุนที่สูงขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าตัวเลขกำลังมีค่าที่ลดลง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า รูปแบบของการไหลที่เกิดขึ้นในระบบ ได้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนทิศทางในการไหลอย่างกระทันหัน กล่าวคือเมื่อมีการเพิ่มรอบการหมุนให้สูงขึ้น จะส่งผลให้เกิดการปรับเปลี่ยนจากการไหลวนขนาดเล็กให้กลายเป็นโครงสร้างการไหลวนขนาดใหญ่เกิดขึ้นในระบบการกวนผสม ทำให้ของไหลแบบนอนนิวโตเนียนที่มีความหนืดสูงมีการเคลื่อนที่ของการไหลได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่ากำลังงานสำหรับการกวนผสมของของไหลที่มีความหนืดสูงมีค่าที่ลดลง เนื่องจากความต้องการที่น้อยลงในการใช้พลังงานกวนผสมที่ต้องการชนะแรงเฉื่อยในระบบการกวนผสม

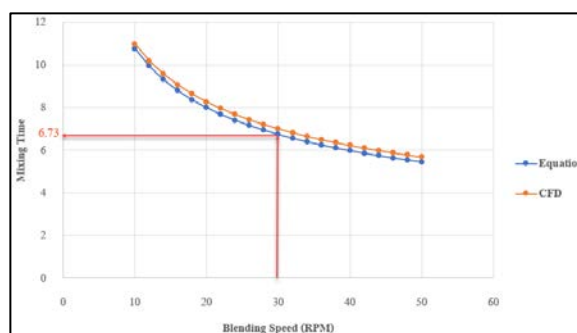
ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหล ในรูปแบบการวิเคราะห์แบบผิวอิสระ (VOF) ผลที่ได้พบว่า ค่าความเร็วรอบการหมุนในการกวนผสมที่ 30 รอบต่อนาที จะให้ผลอัตราการผสมที่ดีที่สุด เมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบกับรอบการหมุนการกวนผสมที่ 10, 15, 20 และ 25 รอบต่อนาที ส่วนการวิเคราะห์ในรูปแบบ Volume Fraction และ Immiscible Non-Newtonian Liquid ดังรูปที่ 12 และ 13 ผลที่ได้พบว่า ที่ค่าความเร็วรอบการหมุนสำหรับการกวนผสมที่ 30 รอบต่อนาที ที่เวลา 10 วินาที จะแสดงผลในการติของไหลให้เกิดการแตกตัวของอนุภาคของชั้นการไหลที่สูงกว่าความเร็วรอบอื่น ๆ เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน ซึ่งแสดงว่าการกระเพื่อมทำให้เกิดลูกคลื่นหรือการแตกตัวของของเหลวของเนื้อมะม่วงในงานวิจัยนี้ยังมีการกระเพื่อมหรือเกิดลูกคลื่นสูงเท่าไร ก็ยังทำให้

อัตราการกวนผสมของเหลวมีประสิทธิภาพที่สูงตามไปด้วย และจะส่งผลให้การสิ้นเปลืองกำลังงานในการกวนผสมที่น้อยลง ทำให้ประหยัดไฟฟ้าได้ดีขึ้น จากรูปที่ 14 เมื่อทำการพิจารณาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ได้จากการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลพบว่า เมื่อค่าความเร็วรอบสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าที่สูงตามไปด้วย และจะส่งผลทำให้ค่าตัวเลขกำลังมีค่าที่ลดลง หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการพิจารณารอบการหมุนของการกวนผสมเนื้อมะม่วงเหลวที่เกิดจากรอบของมอเตอร์ขับ และทำการคำนวณหาเวลาในการกวนผสมทางทฤษฎี โดยใช้สมการที่ (26) [15]

$$t_{mix,95\%} = 28.23N^{-0.41} \quad (26)$$

$$\text{แทนค่าจะได้ } t_{mix,95\%} = 28.23 \times (30)^{-0.41} = 6.73 \text{ s}$$

จากการคำนวณด้วยสมการพบว่า ที่รอบการหมุน 30 รอบต่อนาที ใช้เวลาสำหรับการกวนอยู่ที่ 6.73 วินาที และเมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบเวลาในการผสมระหว่าง CFD และสมการทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 15 ผู้วิจัยได้ทำการสร้างสมการที่ (26) ลงในโปรแกรม SOLIDWORK Flow Simulation และได้ใช้ฟังก์ชันของ New Parametric Study เข้ามาช่วยในการคำนวณผล เนื่องจากต้องการคำนวณผลในแต่ละรอบการหมุนไปพร้อมกัน ผลที่ได้พบว่าค่าอัตราของเวลาการผสม (Mixing Time) จะแปรผันไปกับรอบการหมุน และมีค่าที่ใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่ง

ผลการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในส่วนของอัตรา การผสมจะอยู่ในช่วงเวลา 7-8 วินาที เมื่อพิจารณาถึง ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ที่เกิดขึ้นพบว่ามีความเท่า 3.85 เปอร์เซ็นต์

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองทาง พลศาสตร์ของไหลของการกวนผสมเพิ่มเติม เพื่อ คำนวณหาผลลัพธ์จากการจำลองเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ ของไหลในการผสมเนื้อมะม่วงเหลวที่มีความหนืด 1.8 Pa.s ที่ใช้รอบการหมุน 30 รอบต่อวินาที และทำการตั้งค่า ลีกลงไปในเนื้อมะม่วงเหลว 135 มิลลิเมตร ในทิศทาง แนวแกน Z หรือในแนวแกน Y ใน โปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation และนำไปทำการ เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Dular และคณะ [20] ที่รอบ การหมุนเดียวกัน ความลึกเดียวกัน และใช้ขนาดของเวลา ในการวิเคราะห์ (Time step size) เท่ากันที่ 0.5×10^{-3} วินาที โดยเขาได้ทำการกวนผสมวัสดุเป็นคาร์บอนซีเมติก เซลลูโลสหรือซีเอ็มซี ที่มีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 1-10 Pa.s และใช้ใบพัดจำนวน 6 ใบพัด ที่มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 160 มิลลิเมตร ความสูงใบพัด 150 มิลลิเมตร ผลการจำลองเชิงตัวเลขในงานวิจัยที่ได้พบว่า ค่าความเร็ว ของสนามการไหลของของไหลที่มีความหนืดที่เกิดจาก ใบพัดกวนผสมจำนวน 10 ใบในงานวิจัยนี้ มีค่าความเร็ว ของสนามการไหลที่สูงกว่างานวิจัยของ Dular และคณะ โดยจะมีค่าเฉลี่ยของความเร็วภายในถังกวนผสมอยู่ที่ ประมาณ 0.14-0.15 เมตรต่อวินาที ส่วนความเร็วเฉลี่ยใน งานวิจัยของ Dular และคณะ จะอยู่ในช่วงประมาณ 0.075-0.1 เมตรต่อวินาที [20]

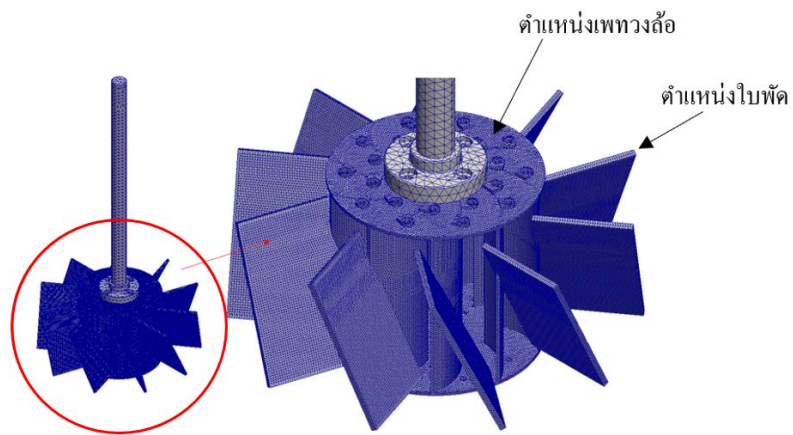
หลังจากผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์และคำนวณผลเชิง ตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลแล้วเสร็จ ขั้นตอนต่อไปใน ส่วนของกระบวนการออกแบบและพัฒนาใบพัดกวน ผสม ผู้วิจัยสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผล ทางพลศาสตร์ของไหลที่เกิดจากผลกระทบของแรงดัน ของของเหลวในระหว่างการกวนผสม แรงกระทำใน แนวแกน และแรงกระทำในแนวรัศมี ตลอดจนรอบการ หมุนสำหรับการกวนผสมของเหลว มาทำการคำนวณต่อ

เพื่อหาความแข็งแรงทางโครงสร้างใบพัดกวนผสม โดย ผู้วิจัยจะอาศัยการส่งออกของชุดข้อมูลการวิเคราะห์ผล ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ได้จากโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation ใน ส่วนของ โมดูล Export results to simulation

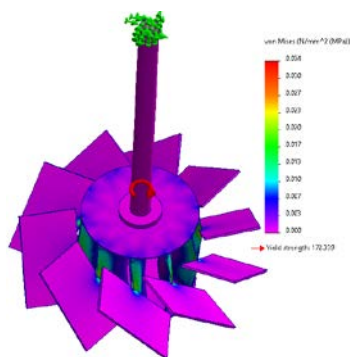
หลังจากนั้นผู้วิจัยจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางไฟ นิค์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการสร้างผลลัพธ์เชิงตัวเลข ผลลัพธ์การจำลองที่ได้พบว่า ใบพัดกวนผสมที่ผ่าน กระบวนการออกแบบอย่างเหมาะสม ทั้งในส่วนการ วิเคราะห์ความแข็งแรงและพลศาสตร์ของไหล สามารถ รับแรงเนื่องจากความหนืดของเนื้อมะม่วงเหลวในการ กวนผสมที่รอบการหมุนต่าง ๆ ได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดบนโครงสร้างใบพัดกวน ผสมนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ทำใบพัด กวนผสม โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุเป็นสแตนเลสที่มี คุณสมบัติเชิงกลดังนี้คือ

1. ค่า Yield strength มีค่าเท่ากับ 172.399 MPa
2. ค่า Elastic modulus มีค่าเท่ากับ 200,000 MPa
3. ค่า Poisson ratio มีค่าเท่ากับ 0.28
4. ค่าความหนาแน่น มีค่าเท่ากับ $7,800 \text{ kg} / \text{m}^3$

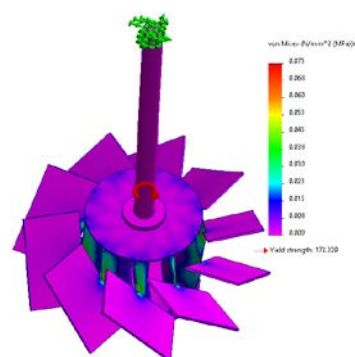
หลังจากที่กำหนดวัสดุให้กับชิ้นงานวิเคราะห์แล้ว ขั้นตอนต่อไป ผู้วิจัยได้ดำเนินการเพื่อทำการปรับปรุงทรง ของแบบจำลองเพื่อนำไปสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล เช่น การลดความยุ่งยากของชิ้นงานของแบบจำลอง เพื่อให้ แบบจำลองการวิเคราะห์มีความเหมาะสมสำหรับการ วิเคราะห์ผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งทำการกำหนด คุณสมบัติของเมชเอลิเมนต์ โดยมีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้คือ ใน ส่วนของ Mesh parameters ผู้วิจัยทำการ กำหนดรูปแบบเป็น Curvature based mesh และทำการ ปรับคุณสมบัติในส่วนของ Mesh control ไปยังบริเวณ ใบพัดและแผ่นเพลทของชุดวงล้อให้มีความละเอียด มากกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการ เปลี่ยนแปลงความเร็วและแรงที่สูง ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังรูป ที่ 17 หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณผลลัพธ์ด้วยเทคนิคการ วิเคราะห์ผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และได้ดังรูปที่ 18



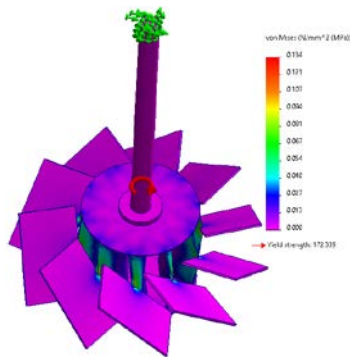
รูปที่ 17 ผลลัพธ์การสร้างเมชเอลิเมนต์สำหรับการจำลองผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์



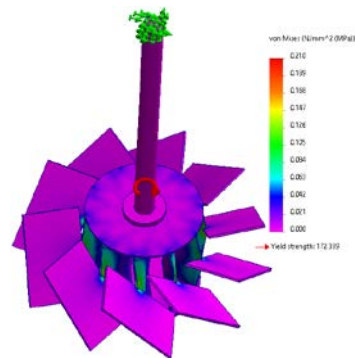
(a) การกระจายตัวความเค้นที่รอบการหมุน 10 RPM



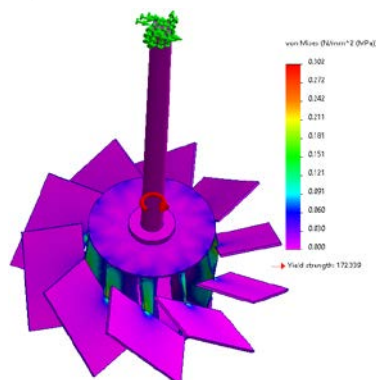
(b) การกระจายตัวความเค้นที่รอบการหมุน 15 RPM



(c) การกระจายตัวความเค้นที่รอบการหมุน 20 RPM



(d) การกระจายตัวความเค้นที่รอบการหมุน 25 RPM

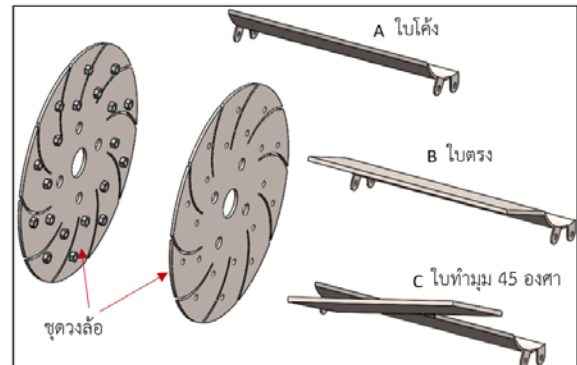


(e) การกระจายตัวความเค้นที่รอบการหมุน 30 RPM

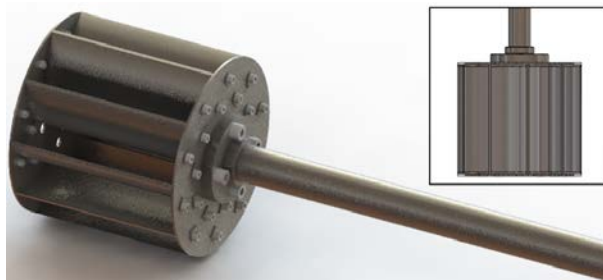
รูปที่ 18 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแข็งแรงทางโครงสร้างใบพัดกวนผสม

จากองค์ความรู้ที่เกิดจากสิทธิบัตรการออกแบบเลขที่ 62881 เรื่อง ชิ้นส่วนเครื่องกลเติมอากาศในน้ำ [5] สามารถนำมาทำการออกแบบและพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้สำหรับการกวนผสมของเหลวที่มีความหนืดสูง เช่น มะม่วงกวน หรือ สับปะรดกวนได้เป็นอย่างดี โดยสามารถพัฒนารูปแบบใบพัดให้มีลักษณะที่แตกต่างกันได้หลายรูปแบบ เนื่องจากวงล้อใบพัดเติมอากาศที่ได้จากสิทธิบัตรการออกแบบเลขที่ 62881 นี้ สามารถถอดประกอบชุดใบพัดได้ โดยใบพัดกวนผสมเติมอากาศจะมีลักษณะเป็นใบโค้ง (A) หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาชุดใบพัดกวนผสมเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้ คือใบพัดชนิดใบตรง (B) โดยใบพัดกวนผสมมะม่วงที่ได้อธิบายและสาริการออกแบบในงานวิจัยนี้จะมีรูปร่างที่ทำมุม 45 องศา ซึ่งตรงกับ

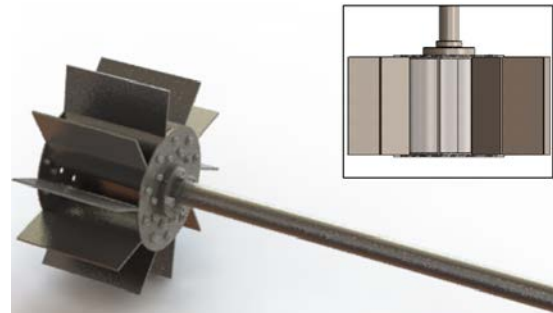
ชนิด (C) และสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 19 และรูปที่ 20



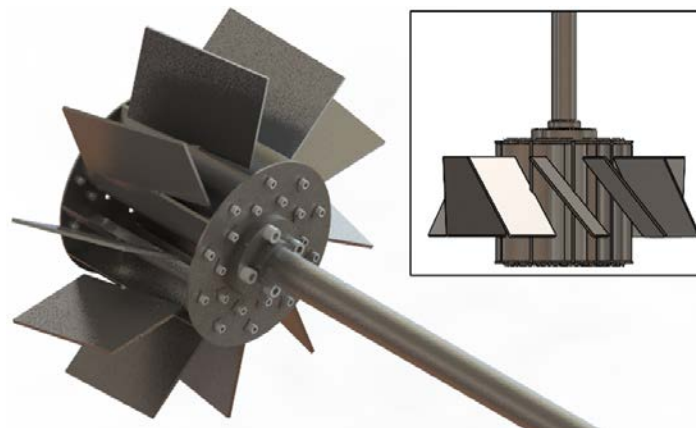
รูปที่ 19 แสดงการพัฒนาชุดใบพัดกวนผสมเพิ่มเติมจากงานวิจัย ที่ได้จากองค์ความรู้ของสิทธิบัตรการออกแบบเลขที่ 62881 [5]



(a) วงล้อชนิดใบโค้ง (A) ที่ใช้สำหรับเติมอากาศในน้ำ จากสิทธิบัตรการออกแบบเลขที่ 62881



(b) วงล้อชนิดใบตรง (B) ที่ได้จากการพัฒนาเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้



(c) วงล้อชนิดใบทำมุม 45 องศา (C) ที่ได้จากการพัฒนาเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้

รูปที่ 20 แสดงรูปแบบใบพัดกวนผสมของเหลวชนิดต่าง ๆ สำหรับของเหลวที่มีความหนืดสูงที่ได้พัฒนาจากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์เลขที่ 62881 [5]

5. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบใบพัดกวนผสมสำหรับมะม่วงกวน ซึ่งมะม่วงกวนถูกหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 98

องศาเซลเซียส โดยอาศัยองค์ความรู้จากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์ เลขที่ 62881 เรื่อง ชิ้นส่วนเครื่องกลเติมอากาศในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยขั้นตอนการ

ออกแบบ จะเริ่มต้นจากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลทางเทคนิค หลังจากนั้นได้นำข้อมูลเทคนิคดังกล่าวมากำหนดทิศทางการออกแบบและคำนวณหาสัดส่วนที่เหมาะสมของใบพัด ถึงผสม ตลอดจนค่าพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการกวนผสมเนื้อมะม่วงเหลวที่จะนำไปผลิตเป็นมะม่วงกวนต่อไป ผลจากการออกแบบและการจำลองผลเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลพบว่า ค่าความเร็วรอบการหมุนที่ 30 รอบต่อนาทีจะส่งผลต่อการกวนผสมเนื้อมะม่วงกวนที่มีความหนืดอยู่ในช่วง 1.8 Pa.s ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ได้ดีที่สุด และเมื่อนำตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลมาทำการวิเคราะห์ต่อในรูปแบบ Static เพื่อจำลองผลความแข็งแรงของใบพัดกวนผสม ผลที่ได้พบว่า ค่าความเค้นที่กระจายตัวบนใบพัดกวนผสมมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุสแตนเลส จึงไม่มีผลต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นกับใบพัดกวนผสมที่จะนำมาใช้กับเนื้อมะม่วงที่มีความหนืด 1.8 Pa.s ด้วยรอบการหมุนสูงสุดที่ 30 RPM ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากงานวิจัยนี้ สามารถใช้ต่อยอดและพัฒนาารูปแบบใบพัดกวนผสมชนิดต่าง ๆ ทั้งในด้านการเรียนการสอนและเชิงพาณิชย์ได้ต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนครุภัณฑ์สำหรับการวิเคราะห์ผล สำหรับการทำงานวิจัยในครั้งนี้ และคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาจนงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. G. Chun, J. W. Jia, P. G. Xue and F. F. Lian, "CFD simulation and PIV measurement of the flow field generated by modified pitched blade turbine impellers," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, no. 6, pp. 1027–1036, 2014, doi: 10.1016/j.cherd.2013.08.024.
- [2] F. Delvigne, J. Destain and P. Thonart, "Structured Mixing Model for Stirred Bioreactors: An Extension to the Stochastic Approach," *Chemical Engineering Journal*, vol. 113, no.1, pp. 1–12, 2005, doi: 10.1016/j.cej.2005.06.007.
- [3] O. Shengchao, W. Rijie, Y. Xiaoxia and Y. Yuefei, "CFD Prediction of mean Flow Field and Impeller Capacity for Pitched Blade Turbine," *Transactions of Tianjin University*, vol.21, no.3, pp. 250–258, 2015, doi: 10.1007/s12209-015-2408-x.
- [4] T. Baramée, N. Apinan, E. Chakron, B. Ekkarat and W. Santi, "Effect of Rushton turbine shapes on mixing performance by computational fluid dynamics," in *Proc. 28th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (TICChE 2019)*, Chonburi, Thailand, Nov. 8–9, 2019, pp.146-152.
- [5] L. Werayoot, "Mechanical Part of Water Aerator," Thailand Patent 62881. May. 9, 2018.
- [6] L. Werayoot, "Design and CFD Simulation of Agitating Blade in Tank for Mixing Fluids," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 37, no.1, pp. 13–20, 2020.
- [7] L. Werayoot, B. Pinich and K. Nuttapong, "Simulation of Fluid Mixing in Food Industry using Computational Fluid Dynamics," in *The, 4th National Food Engineering Conference*, Pathumthani, Thailand, Apr. 3, 2018, pp.10–15.
- [8] S. Suntorn, P. Santri and K. Suntri, "Development of a Mango Machine that uses Heat from Liquefied Petroleum Gas (LPG) for Community Use," in *The, 33rd Conference of Mechanical Engineering Network*, Udon Thani, Thailand, Jul. 2–5, 2019, pp. 243.
- [9] D. Kamonrat, P. Rattapon, N. M. Wisarut, and S. Suntorn, "Development of black coconut sweet pudding agitators for community use," in *The, 32nd*

- Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Mukdahan, Thailand, Jul. 3–6, 2018, p.1.
- [10] J. Ronnarit, and C. Athika, “The Development of a Curry Puff Filling Mixing Machine Using Heat from Liquefied Petroleum Gas (LPG) for Community Use,” *Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology*, vol. 8, no.1, pp. 75-87, 2021.
- [11] W. Worawit, “Tamarind Mixing Machine” Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand, Final Rep., 2007. Accessed: Sep. 16, 2022 [Online]. Available: <https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/642/Tamarind%20Mixing%20Machine.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [12] L. Werayoot, “Design and flow field analysis of agitation turbine using numerical simulation,” *UBU Engineering Journal*, vol. 14, no.1, pp. 105–114, 2021.
- [13] S. Pongsaran and K. Yostana, “Computational Fluid Dynamics Modeling of Anaerobic Continuously Stirred Tank Reactor,” in *Proc. 28th Conference of Mechanical Engineering Network*, Khon Kaen, Thailand, Oct. 15–17, 2014, pp.857–864.
- [14] C. Amonwan, “Mixing Characteristics Improvement in Equalization Tank for Capacity Enhancement of Wastewater,” M.S. thesis, Dept. Chemical and Environment Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2016.
- [15] S. Patigorn, “Study of Flocculation Mixing Efficiency by using Grids Combined with A Dual Rushton Turbine Impeller,” M.S. thesis, Dept. Environment Eng., Suranaree University of Technology., Nakhon Ratchasima, Thailand, 2002.
- [16] T. Charn and U. Variddhi, “Shaft Design,” in *Machine Design*, 1st ed. Bangkok, Thailand: Se-Education Public Company Limited, Thailand, 2013, ch. 9, sec. 9.4-9.7, pp. 267–283.
- [17] B. Suvendu, “Yield Stress and Time-dependent Rheological Properties of Mango Pulp,” *Journal of Food Science*, vol. 64, no.6, pp. 1029–1033, 1999, doi: 10.1111/j.1365-2621.1999.tb12275.x.
- [18] G. Anuradha, S. R. Hosahalli and A. Jasim, “Effect of Soluble Solids Concentration and Temperature on Thermo-Physical and Rheological Properties of Mango Puree,” *International Journal of Food Properties*, vol. 14, no. 5, pp. 1018–1036, 2011, doi: 10.1080/10942910903580876.
- [19] S. Phaokuntha, P.B. Poonlarp, and I. Pongsirikul, “Rheological Properties of Mango Puree and Process Development of Mango Sheet,” *International Symposium on Tropical and Subtropical Fruits*, vol. 1024, pp. 373–379, 2014, doi: 10.17660/ActaHortic.2014.1024.51.
- [20] M. Dular, T. Bajcar, L. Slemenik-Perse, M. Zumer and B. Sirok, “Numerical Simulation and Experimental Study of Non-Newtonian Mixing Flow with a Free Surface,” *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol.23, no. 4, pp. 473–486, 2006, doi: 10.1590/S0104-66322006000400005.