

การศึกษาค่ากำลังในการกวนยางรักด้วยใบกวนแบบรatchet แบบพิตช์เบลด
และแบบแพดเดิล

STUDY ON POWER USED FOR STIRRING MELANORRHOEA USITATA BY
RHUSTON, PITCH BLADE AND PADDLE TURBINES



T120082



สถาพร อุดลเศรษฐพงศ์
SATAPORN ADUNSATTAPONG

Q.P.
ก182ก
2554

ทำ en

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 120082
วัน, เดือน, ปี. ๕.1.๒๕๕๕

b. 120082
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2554
KMITL-2011-EN-M-030-153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON POWER USED FOR STIRRING MELANORRHOEA USITATA BY
RHUSTON, PITCH BLADE AND PADDLE TURBINES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2011
KMITL-2011-EN-M-030-153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2011

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาค่ากำลังในการกวนยางรักด้วยใบกวนแบบบริชตัน แบบพิทช์เบลตและแบบแพดเดิล |
| นักศึกษา | นายสถาพร อุดลเศรษฐพงศ์ |
| รหัสประจำตัว | 50060321 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเครื่องกล |
| พ.ศ. | 2554 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.ชินรัชช์ เจียรพงษ์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาถึงการออกแบบถังกวนและใบกวนเพื่อให้เหมาะสมกับงานกวนยางรัก โดยมีการทำการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อทำการหาค่ากำลังที่ใช้ในการกวนยางรัก โดยในการทดลองจะประกอบด้วย การออกแบบถังกวนด้วยหลักทฤษฎีการออกแบบถังกวนทั่วไป ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในถัง 250 mm. สูง 350 mm. และภายในถังติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) ขนาดความกว้าง 25 mm ตลอดความสูงของถังกวน จำนวน 4 แผ่น และเลือกใช้รูปแบบใบกวนชนิดต่างๆเพื่อใช้ในการทดลองคือ แบบบริชตัน (Rhuston) แบบพิทช์เบลต (Pitch blade turbine) และแบบแพดเดิล (Paddle) แต่ละแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 120 mm. เพื่อให้เกิดการไหลแบบในแนวแกนในแนวรัศมีและในแนวทแยง อีกทั้งยังศึกษาการสร้างแบบจำลองและทำการคำนวณเชิงตัวเลขหาค่ากำลังที่เกิดขึ้นจากการกวนเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของใบกวนแต่ละแบบ และสามารถมองเห็นลักษณะการไหลเป็นไปตามคุณลักษณะของใบกวนที่ได้เลือกใช้ สามารถมองเห็นการกระจายตัวของความเร็วของของเหลวในถังกวน ความดันที่เกิดขึ้นที่ใบกวน จากผลการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่าใบกวนทั้งสามแบบมีลักษณะการไหลเป็นไปตามรูปแบบใบกวนที่ได้เลือกใช้ แนวโน้มของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) มากขึ้นเนื่องจากความเร็วที่ใช้การกวนเพิ่มสูงขึ้น และค่าเพาเวอร์นัมเบอร์ (Power number) มีค่าลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ค่าความหนืดลดน้อยลง ส่งผลให้ค่ากำลังที่ใช้ในการกวนที่มีความเร็วสูงมีค่าลดน้อยลง จากการทดลองใบกวนทั้งสามแบบพบว่าใบกวนแบบบริชตัน (Rhuston) มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะใช้กวนยางรักที่ความเร็ว 400 rpm ที่อุณหภูมิ 60 °c เนื่องจากมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงที่สุดค่าเพาเวอร์นัมเบอร์น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--------------------------|---|
| Thesis | Study on power used for stirring melanorrhoea usitata by rhuston, pitch blade and paddle turbines |
| Student | Mr.Sataporn Adunsattapong |
| Student ID. | 50060321 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Mechanical Engineering |
| Year | 2011 |
| Thesis Advisor | Assoc.Prof.Dr.Chinnaruk Teinpong |
| Thesis Co-Advisor | Assoc.Prof.Dr.Chamlong Prabkeao |

Abstract

The objective of this study was to stirring tank and blade design in order to be suitable with melanorrhoea usitata. To figure out a power for melanorrhoea usitata stirring, the design of stirring tank need to be experiment and numerical methods. The result of general stirring tank design theory is the stirring tank prototype sizing is 250 mm. diameter with 350 mm. height. Inside surface of the tank is installed with 4 pieces of 25 mm. width baffle. They align longitudinally and throughly height of tank on surface. To decide for the type of blade were base on difference of stirring tank flow which are rhuston, pitch blade turbine and paddle,in each type the diameter for testing is 120 mm. In numerical calculation for stirring of each type can see velocity distribution happening on each type and pressure on blade on each type. From the experiment and numerical calculation, 3 types of blade create different flow formation as purpose. Reynolds number increases when the stirring velocity increases. Power number and viscosity reduces when operating temperature increases. Thus, in high temperature operation, the stirring takes low power consumption. And the most proper blade type is Rhuston 400 rpm and 60 degree Celsius condition is the most effective that generates highest Reynolds Number and lowest power number.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ชินรัชย์ เขียรพงษ์ และความกรุณาจาก รศ.ดร.จำลองปราบแก้ว ที่สละเวลาอันมีค่ารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมให้คำแนะนำถึงประเด็นต่างๆที่ใช้ในการทดลอง การค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม ช่วยแก้ปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ ดร.ยอดชาย เตียบ่ล ที่ให้คำแนะนำในการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ เพื่อน พี่ และน้อง ที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจตลอดมา

สุดท้ายขอพระคุณ พ่อ แม่ ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำและที่ขาดไม่ได้คือการสนับสนุนทุนการศึกษา ค่าใช้จ่ายต่างๆ ในระหว่างการศึกษานี้

สำหรับคุณงามความดี ประโยชน์ บุญกุศล ที่เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กระผมขอมอบให้กับพ่อและแม่ ซึ่งเป็นที่รักและเคารพ รวมถึงครูและอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้อบรม สั่งสอน วิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่กระผม

สถาพร อุดลเศรษฐพงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | VI |
| สารบัญรูป | VIII |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ | XII |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา | 1 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย | 2 |
| 1.4 ระเบียบวิธีการดำเนินการศึกษา | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา | 2 |
| 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| บทที่ 2 หลักพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง | 8 |
| 2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของยางรัก | 10 |
| 2.2 ทฤษฎีการออกแบบภาชนะกวนหรือถังกวน | 11 |
| 2.3 รูปแบบใบกวน | 13 |
| 2.3.1 ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวแกน (Axial flow) | 13 |
| 2.3.2 ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมี (Radial flow) | 16 |
| 2.3.3 ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลแนวทแยง (Tangential flow) | 18 |
| บทที่ 3 ทฤษฎีการคำนวณเชิงตัวเลข | 22 |
| 3.1 การคำนวณทางพลศาสตร์ของเหลว | 22 |
| 3.1.1 สมการอนุรักษ์ (Conservation Equation) | 22 |
| 3.1.2 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) | 22 |
| 3.1.3 สมการการเคลื่อนที่ (Momentum Equation) | 24 |
| 3.1.4 สมการความปั่นป่วน (Turbulence Equation) | 24 |
| 3.2 กริด | 27 |
| 3.2.1 รูปแบบของกริด(Grid Form) | 27 |
| 3.2.2 ขนาดและจำนวนของกริด (Grid Size & Number of Grid) | 28 |
| 3.2.3 เทคนิคในการสร้างกริด (Technique of Grid Creation) | 28 |
| บทที่ 4 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขในการกวนในถังกวน | 29 |
| 4.1 การสร้างแบบจำลองใบกวนและถังกวน | 29 |
| 4.1.1 แบบจำลองถังกวนและใบกวนแบบรัศมี | 29 |
| 4.1.2 แบบจำลองถังกวนและใบกวนแบบพิทช์เบลต | 30 |
| 4.1.3 แบบจำลองถังกวนและใบกวนแบบแพดเดิล | 32 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.1.4 รูปทรงและการสร้างกริด | 33 |
| 4.2 การกำหนดค่าขอบเขต (Boundary Condition) | 34 |
| 4.3 การคำนวณและผลการคำนวณเชิงตัวเลขในการกวน | 35 |
| บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง | 43 |
| 5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง | 43 |
| 5.1.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง | 43 |
| 5.1.2 เครื่องกวนยางรัก | 44 |
| 5.1.3 รูปแบบใบกวน | 44 |
| 5.1.4 ถังกวนหรือภาชนะกวน | 45 |
| 5.1.5 เครื่องมือวัด | 45 |
| 5.2 วิธีการทดลอง | 49 |
| 5.3 ผลการทดลอง | 50 |
| บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง | 56 |
| เอกสารอ้างอิง | 57 |
| ภาคผนวก ก | |
| ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขของใบกวนแบบต่างๆ | 60 |
| ภาคผนวก ข | |
| ภาพแสดงลักษณะการกระจายตัวของความเร็วและภาพการกระจายตัวของแรงดันที่เกิดขึ้นที่ใบกวน | 82 |
| ภาคผนวก ค | |
| ค่าพิกัดของใบกวนที่ใช้ในการทดลองและการจำลอง | 101 |
| ภาคผนวก ง | |
| การคำนวณ | 105 |
| ภาคผนวก จ | |
| ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ | 108 |
| ประวัติผู้เขียน | 116 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 2.1 | ตารางแสดงลักษณะที่ใช้ในการออกแบบถังกวน | 12 |
| 4.1 | การกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองของใบกวนแบบรัชตัน | 30 |
| 4.2 | การกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองของใบกวนแบบพิตช์เบลต | 32 |
| 4.3 | การกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองของใบกวนแบบแพดเดิล | 33 |
| ก.1 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\varepsilon$ ของใบกวนแบบพิตช์เบลต ที่ $28^\circ c$ | 61 |
| ก.2 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\varepsilon$ ของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ $28^\circ c$ | 62 |
| ก.3 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\varepsilon$ ของใบกวนแบบรัชตัน ที่ $28^\circ c$ | 63 |
| ก.4 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\varepsilon$ ของใบกวนแบบพิตช์เบลต ที่ $40^\circ c$ | 64 |
| ก.5 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\varepsilon$ ของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ $40^\circ c$ | 65 |
| ก.6 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\varepsilon$ ของใบกวนแบบรัชตัน ที่ $40^\circ c$ | 66 |
| ก.7 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\varepsilon$ ของใบกวนแบบพิตช์เบลต ที่ $60^\circ c$ | 67 |
| ก.8 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\varepsilon$ ของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ $60^\circ c$ | 68 |
| ก.9 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\varepsilon$ ของใบกวนแบบรัชตัน ที่ $60^\circ c$ | 69 |
| ก.10 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบพิตช์เบลต ที่ $28^\circ c$ | 70 |
| ก.11 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ $28^\circ c$ | 71 |
| ก.12 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบรัชตัน ที่ $28^\circ c$ | 72 |
| ก.13 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบพิตช์เบลต ที่ $40^\circ c$ | 73 |
| ก.14 | แสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ $40^\circ c$ | 74 |
| ก.15 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบรัชตัน ที่ $40^\circ c$ | 75 |
| ก.16 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบพิตช์เบลต ที่ $60^\circ c$ | 76 |
| ก.17 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ $60^\circ c$ | 77 |
| ก.18 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบรัชตัน ที่ $60^\circ c$ | 78 |
| ก.19 | ตารางแสดงค่าแรงดันที่ปลายใบกวนแบบพิตช์เบลต | 79 |
| ก.20 | ตารางแสดงค่าแรงดันที่ปลายใบกวนแบบแพดเดิล | 80 |
| ก.21 | ตารางแสดงค่าแรงดันที่ปลายใบกวนแบบรัชตัน | 81 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---------------------------------------|------|
| ค.1 | ตารางแสดงค่าพิกัดของใบกวนแบบแพดเดิล | 102 |
| ค.2 | ตารางแสดงค่าพิกัดของใบกวนแบบพิทช์เบลต | 103 |
| ค.3 | ตารางแสดงค่าพิกัดของใบกวนแบบรัชตัน | 104 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วยกกับค่าความหนืดต่ออัตราเฉือน | 3 |
| 1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับค่าความเค้นยืดหยุ่น | 4 |
| 1.3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของการกวนร่วม | 5 |
| 1.4 แสดงภาพตัดแนวตั้งของภาชนะกวนกับแผ่นกั้น | 5 |
| 1.5 แสดงแบบใบกวนที่ใช้ในการศึกษา | 6 |
| 1.6 กราฟเปรียบเทียบค่า Po กับ Re ของกลีเซอร์รอลในการทดลองกับการคำนวณเชิงตัวเลข | 6 |
| 2.1 ภาพแสดงต้นรักใหญ่ภาพ | 8 |
| 2.2 แสดงขั้นตอนการกรีดยางรัก | 9 |
| 2.3 แสดงยางรักพร้อมใช้งาน | 9 |
| 2.4 ขั้นตอนการลงรักบนวัสดุจักสาน | 10 |
| 2.5 แสดงโครงสร้างของสารประกอบที่พบในยางรัก | 11 |
| 2.6 ภาพแสดงถังกวนที่ได้จากการออกแบบเพื่อใช้ในการกวน | 11 |
| 2.7 ภาพแสดงรายละเอียดของถังกวน | 12 |
| 2.8 ตัวอย่างใบกวนแบบโพรเพลเลอร์ (Propeller) | 13 |
| 2.9 ตัวอย่างใบกวนแบบไฮโดรฟอยล์ (Hydrofoil) | 14 |
| 2.10 ตัวอย่างใบกวนแบบไฮเอฟฟิเซียนซี (High efficiency (HE-3)) | 14 |
| 2.11 ใบกวนแบบพิทช์เบลด์เทอร์ไบน์ (Pitched blade turbine) | 15 |
| 2.12 ตัวอย่างใบกวนแบบไฮโดรฟอยล์ที่มีความหนา (Hydrofoil with high Solidity) | 15 |
| 2.13 ใบกวนชนิดรัชตันเทอร์ไบน์ (Rushton turbine) | 16 |
| 2.14 ใบกวนชนิดบาร์ดิส (Bar disc) | 17 |
| 2.15 ใบกวนชนิดใบเลื่อยวงเดือน (Saw disc or Saw tooth) | 17 |
| 2.16 ใบกวนชนิดโรเตอร์สเตเตอร์ (Rotor stator) | 18 |
| 2.17 ใบกวนชนิดแพดเดิล (Paddle) | 19 |
| 2.18 ใบกวนชนิดเทเปอร์แพดเดิล (Traper paddle) | 19 |
| 2.19 ใบกวนชนิดเซบ้าแพดเดิล (Seba paddles) | 20 |
| 2.20 ใบกวนชนิดซีเอสแพดเดิล (CS paddles) | 20 |
| 2.21 ใบกวนชนิดสมอ (Anchor) | 21 |
| 3.1 ภาพปริมาตรกล่องสี่เหลี่ยมที่มีการไหลเข้า-ออก หาค่าได้จาก (conservation equation) | 23 |
| 4.1 แสดงแบบจำลองใบกวนแบบรัชตัน | 29 |
| 4.2 ด้านซ้ายแสดงรายละเอียดของถังกวนและใบกวนแบบรัชตัน ด้านขวาแสดงการเมชถังกวนและใบกวน | 30 |
| 4.3 แสดงแบบจำลองใบกวนแบบพิทช์เบลด์ | 31 |
| 4.4 ด้านซ้ายรายละเอียดของถังกวนและใบกวนแบบพิทช์เบลด์ ด้านขวาแสดงการเมช | 31 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.5 แสดงแบบจำลองใบกวนแบบแพดเดิล | 32 |
| 4.6 ด้านซ้ายรายละเอียดของถังกวนและใบกวนแบบแพดเดิล ด้านขวาแสดงการเมฆ | 33 |
| 4.7 แสดงการเรียกชื่อและระบุตำแหน่งในแต่ละบริเวณ | 34 |
| 4.8 แสดงรายละเอียดในแต่ละส่วนของค่าขอบเขตบนแบบจำลองของถังกวน- และใบกวน | 35 |
| 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิห้อง ได้จากการจำลอง | 37 |
| 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ ได้จากการจำลอง | 38 |
| 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ ได้จากการจำลอง | 39 |
| 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ปลายใบกับความเร็ว- รอบของใบกวนแบบรัชตัน | 40 |
| 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ปลายใบกับความเร็ว- รอบของใบกวนแบบพิทช์เบลต | 41 |
| 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ปลายใบกับความเร็ว- รอบของใบกวนแบบแพดเดิล | 42 |
| 5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 43 |
| 5.2 ขนาดของเครื่องกวนยางรัก | 44 |
| 5.3 ใบกวนเรียงจากซ้ายไปขวาดังนี้ใบกวนแบบรัชตัน แบบพิทช์เบลต แบบแพดเดิล | 44 |
| 5.4 ลักษณะถังกวนที่ใช้ในการกวนยางรัก | 45 |
| 5.5 เครื่องวัดความเร็วรอบ | 45 |
| 5.6 เครื่องวัดค่าการใช้กำลังไฟฟ้า | 46 |
| 5.7 แบบแสดงรายละเอียดเครื่องวัดค่าความชื้นใส | 47 |
| 5.8 เครื่องวัดค่าความชื้นใส | 48 |
| 5.9 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องกวนผสมที่ใช้ในการทดลอง | 49 |
| 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิห้อง ได้จากการทดลอง | 51 |
| 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ ได้จากการทดลอง | 52 |
| 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ ได้จากการทดลอง | 53 |
| 5.13 กราฟเปรียบเทียบค่า Re กับ Po ของการทดลองกับการจำลองเชิงตัวเลข ที่ อุณหภูมิห้อง | 54 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.14 กราฟเปรียบเทียบค่า Re กับ Po ของการทดลองกับการจำลองเชิงตัวเลข ที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ | 54 |
| 5.15 กราฟเปรียบเทียบค่า Re กับ Po ของการทดลองกับการจำลองเชิงตัวเลข ที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ | 55 |
| ข.1 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของใบกวนพิทช์เบลต ที่อุณหภูมิห้อง | 83 |
| ข.2 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของใบกวนพิทช์เบลต ที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ | 84 |
| ข.3 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของใบกวนพิทช์เบลต ที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ | 85 |
| ข.4 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของใบกวนรัชตัน ที่อุณหภูมิห้อง | 86 |
| ข.5 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของใบกวนรัชตันที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ | 87 |
| ข.6 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของใบกวนรัชตัน ที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ | 88 |
| ข.7 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของใบกวนแพดเดิล ที่อุณหภูมิห้อง | 89 |
| ข.8 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของใบกวนแพดเดิล ที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ | 90 |
| ข.9 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของใบกวนแพดเดิลที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ | 91 |
| ข.10 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบพิทช์เบลต ที่อุณหภูมิห้อง | 92 |
| ข.11 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบพิทช์เบลต ที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ | 93 |
| ข.12 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบพิทช์เบลต ที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ | 94 |
| ข.13 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบรัชตัน ที่อุณหภูมิห้อง | 95 |
| ข.14 แสดงการเกิดแรงดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบรัชตัน ที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ | 96 |
| ข.15 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบรัชตันที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ | 97 |
| ข.16 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบแพดเดิล ที่อุณหภูมิห้อง | 98 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| ข.17 | แสดงการเกิดความตึ้นบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบ- กวนแบบแพตเติล ที่อุณหภูมิ 40 °c | 99 |
| ข.18 | แสดงการเกิดความตึ้นบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบ- กวนแบบแพตเติล ที่อุณหภูมิ 60 °c | 100 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | |
|-------------|--|
| CFD | วิธีคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) |
| D | ขนาดใบกวน |
| N | ความเร็วรอบ |
| P | กำลัง, ความดัน |
| Po | ค่า Power number |
| Re | ค่า Reynolds number |
| T | อุณหภูมิ |
| U_i | ส่วนของความเร็ว |
| V | ความเร็ว |
| Y | เทอมการสลายตัวของ k และ ω |
| d | ขนาดท่อ |
| g | ความโน้มถ่วงโลก |
| t | เวลา |
| u | ความเร็วตามแนวแกน x |
| \bar{u} | เวกเตอร์ความเร็ว |
| u' | ความผันผวนของความเร็วแนวแกน x |
| v | ความเร็วตามแนวแกน y |
| v' | ความผันผวนของความเร็วแนวแกน y |
| w | ความเร็วตามแนวแกน z |
| w' | ความผันผวนของความเร็วแนวแกน z |
| μ | ค่าความหนืด |
| μ_t | ค่าความหนืดของ Eddy |
| μ_{eff} | ค่าความหนืดที่มีผล |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การกวนของเหลวหนืด เป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมผลิตของใช้ประจำวันต่างๆ เช่น ยาสระผม ครีมนวดผม เป็นต้น ในกระบวนการกวนดังกล่าว จะต้องคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการกวน การกระจายตัว ของเหลวที่กวน การศึกษารูปแบบของใบกวนให้เหมาะสมต่อการใช้งานกับของเหลวแต่ละชนิด ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของพลศาสตร์ของไหลในการกวนและทำการทดลองเพื่อหาค่ากำลังในการกวนยางรักซึ่งเป็นของเหลวหนืด ที่ได้จากต้นรัก ก่อนที่จะนำไปใช้ จะต้องนำมากรองสิ่งเจือปนออกก่อนและทำการกวนให้ยางรักเข้ากัน แล้วจึงนำไปใช้ในงานลงรัก ปิดทอง หรือทาเคลือบภาชนะ ในอุตสาหกรรมเครื่องเงินซึ่งนิยมทำกันมากในประเทศพม่า จีน และจังหวัดทางภาคเหนือของประเทศไทย ปัจจุบันการกวนยางรักนั้นใช้ไม้พายกับกระทะเหล็ก และให้ความร้อนด้วยไม้ฟืน เมื่อนำยางรักไปใช้จะถือเอาลักษณะทางภายนอกของยางรัก คือสี และความชื้นเหลว จากการยกไม้พายขึ้นแล้วให้ยางรักไหลลงบนกระทะ แล้วสังเกตด้วยสายตา ถ้ายังไม่เหมาะสมจึงทำการกวนต่อไปเรื่อยๆ ด้วยเหตุนี้จึงทำการวัดค่าความหนืดของยางรักที่พร้อมนำไปใช้งานเก็บเป็นข้อมูล แล้วจึงทำการออกแบบถังกวนและเลือกใช้ใบกวนที่มีรูปแบบแตกต่างกันเพื่อหาค่ากำลังที่ใช้ในการกวนจนมีค่าความหนืดอยู่ในช่วงที่จะนำไปใช้งานด้วยใบกวนที่มีรูปแบบต่างกันซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพาเวอร์นัมเบอร์ และเรย์โนลด์นัมเบอร์ จากนั้นจึงทำการจำลองการกวนโดยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) เพื่อหาค่าแรงบิดที่ใช้ในการหมุนใบกวนแล้วจึงนำมาคำนวณหาค่ากำลัง เพื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังที่ใช้ของใบกวน ระหว่างใบกวนแบบรัชตัน แบบพิทช์เบลตและแบบแพดเดิล ซึ่งจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกใช้ลักษณะใบกวนให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ออกแบบถังกวนและเลือกใช้ใบกวนสำหรับงานกวนยางรัก
2. ใช้การคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหาค่ากำลังที่ใช้ในการกวนยางรักด้วยใบกวนแบบ-

รัชตัน แบบพิทช์เบลตและแบบแพดเดิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทดลองหาค่ากำลังที่ใช้ในการกวนยางรักเมื่อใช้ไบกวนแบบรัชตัน แบบพิทช์เบลตและแบบแพตเติล

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาและออกแบบถังกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 mm. ที่ใช้ไบกวนแบบรัชตัน แบบพิทช์เบลตและแบบแพตเติล
2. ทำการทดลองการกวนยางรักด้วยไบกวนแบบรัชตัน แบบพิทช์เบลตและแบบ-แพตเติลเพื่อหาค่ากำลังและวัดค่าความหนืด ในการกวนยางรักที่ความเร็ว 50, 100, 200 และ 400 rpm
3. ศึกษาการสร้างแบบจำลองถังกวนและไบกวนแบบรัชตัน แบบพิทช์เบลตและแบบแพตเติล เพื่อใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม Fluent version 6.3.26 เพื่อหาค่ากำลังที่เกิดขึ้นจากการใช้ไบกวนทั้ง 3 แบบ

1.4 ระเบียบวิธีการดำเนินการศึกษา

1. สืบค้นและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรืองานวิจัยที่คล้ายคลึงก่อนหน้า
2. สร้างแบบจำลองของถังกวนและแบบจำลองไบกวน
3. ทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อหาค่ากำลังของไบกวนที่เลือกใช้
4. ทำการทดลองการกวนด้วยไบกวนที่เลือกใช้
5. แสดงผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขและผลที่ได้จากการทดลอง
6. สรุปผลการวิจัย
7. จัดทำรายงานสรุปผลการศึกษา

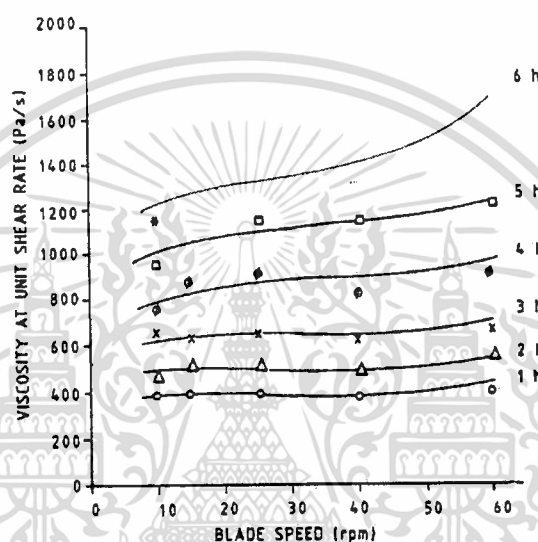
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

1. เข้าใจถึงประโยชน์จากการใช้ยางรัก
2. ได้แบบจำลองทางทฤษฎีที่เปรียบเทียบกับผลจากการทดลองจริง
3. สามารถใช้แบบจำลองเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้แบบไบกวนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

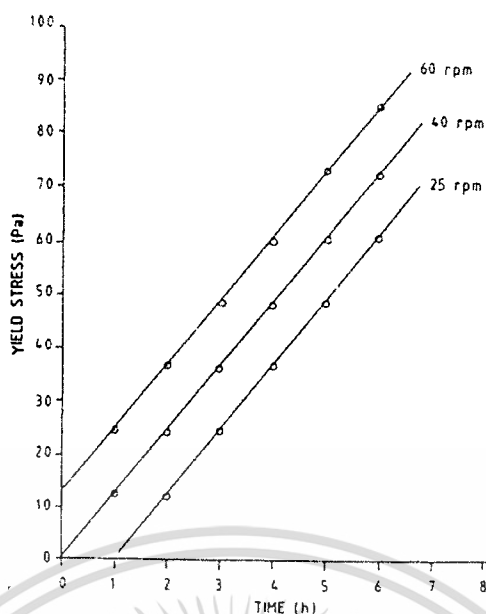
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Rm. Muthiah, R.Manjari, V.N. Krishnamurth[1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบระหว่างเวลาและความเร็วในการกวนผสมของเชื้อเพลิงในจรวด (HTPB) จากการทดลองพบว่าเวลาและความเร็วของใบกวนแปรผันตรงกับความหนืดและความเค้นเฉือน อีกทั้งเวลาและความเร็วของใบกวนยังแปรผกผันกับความเป็น Pseudoplastic จากการทดลองทำให้พบว่าที่ความเร็ว 25 rpm เป็นความเร็วที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับค่าความหนืดต่ออัตราเฉือน เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นค่าความหนืดต่ออัตราเฉือนเพิ่มมากขึ้น



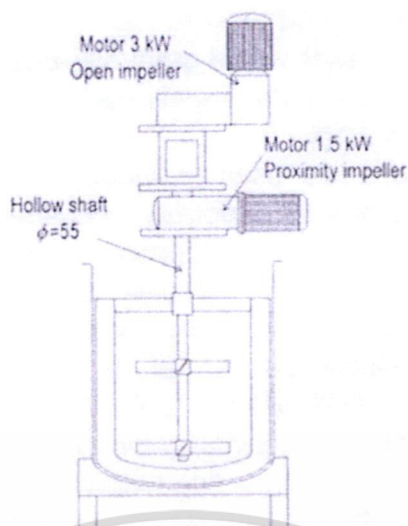
รูปที่ 1.1 กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วรอบกับค่าความหนืดต่ออัตราเฉือน[1]

รูปที่ 1.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับค่าความเค้นยืดหยุ่น เมื่อเวลาที่ใช้ในการกวนเพิ่มมากขึ้นค่าความเค้นยืดหยุ่นเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวน ค่าความเค้นยืดหยุ่นเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการกวนเพิ่มสูงขึ้นอีกเช่นกัน



รูปที่ 1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับค่าความเค้นยืดหยุ่น[1]

2. L.Rudolph, M. Schafer, V. Atiemo-Obeng and Kraume[2] ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขของค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการกวนของเหลวที่มีความหนืดสูงแบบนิวโทเนียนคือ กลูโคส ค่าความหนืด 19.4 Pas ความหนาแน่น $1,415 \text{ kg m}^{-3}$ น้ำเชื่อม 111 Pa s ความหนาแน่น 1400 kg m^{-3} และนอนิวโทเนียน ไฮดรอกซี-เอทิล-เซลลูโลส ค่าความหนืด 29.2-154.8 Pas ด้วยใบกวนแบบสมอ กับแบบพิตเบิลด์เทอร์ไบน์ ระหว่างการกวนร่วมในแนวแกนกับการกวนแบบเปิด พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในการกวนด้วยการกวนแบบเปิดนั้นไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนการกวนร่วมในแนวแกนดังนั้นมีเปลี่ยนแปลง จึงใช้เส้นโค้งมาตรฐานการใช้กำลังไฟในการออกแบบการกวนแบบเปิดและกำลังที่ใช้ในการกวนแบบเปิดมีผลเกี่ยวข้องกับอัตราความเร็วในการหมุน กล่าวคือ การใช้กำลังไฟในการกวนที่ความเร็วสูงของการกวนร่วมมีค่าน้อยกว่าการกวนแบบเชิงเดี่ยว (stand-alone) อย่างไรก็ตามการกวนร่วมในแนวแกนนั้นใช้เวลาในการแตกตัวของสาร ลดความหนืด



รูปที่ 1.3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของการกวนร่วม[2]

3. Wilfried F. Schierholz[3] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการกวนของเหลวแบบ non-newtonian ในถังกวนโดยจำลองลักษณะการกวนทำให้พบว่าหากใช้ความเร็วในการกวนที่ความเร็วเท่ากันแต่ใช้ของเหลวต่างชนิดกันลักษณะความเค้นเฉือนและความหนืดจะเป็นไปตามรูปแบบของของไหลโดยแบ่งเป็น Shear thinning, Newtonian, Shear thickening อีกทั้งยังแนะนำว่าในการวิเคราะห์ค่าความเค้นเฉือนนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนไม่ควรพิจารณาที่บริเวณใบกวนแต่อย่างใดแต่ควรพิจารณาบริเวณโดยรอบใบกวนร่วม

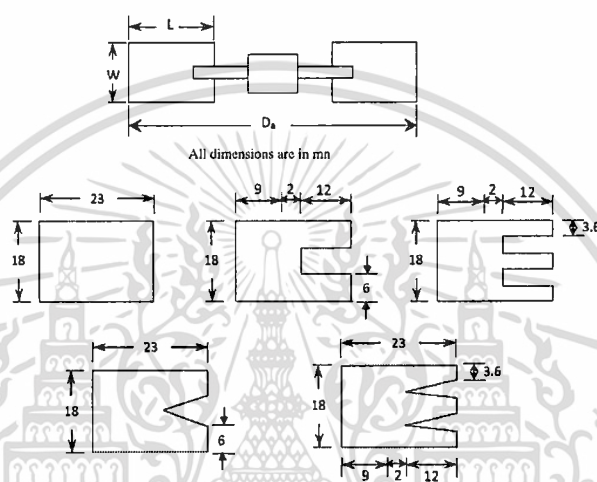


รูปที่ 1.4 แสดงภาพตัดแนวตั้งของภาชนะกวนกับแผ่นกั้น[3]

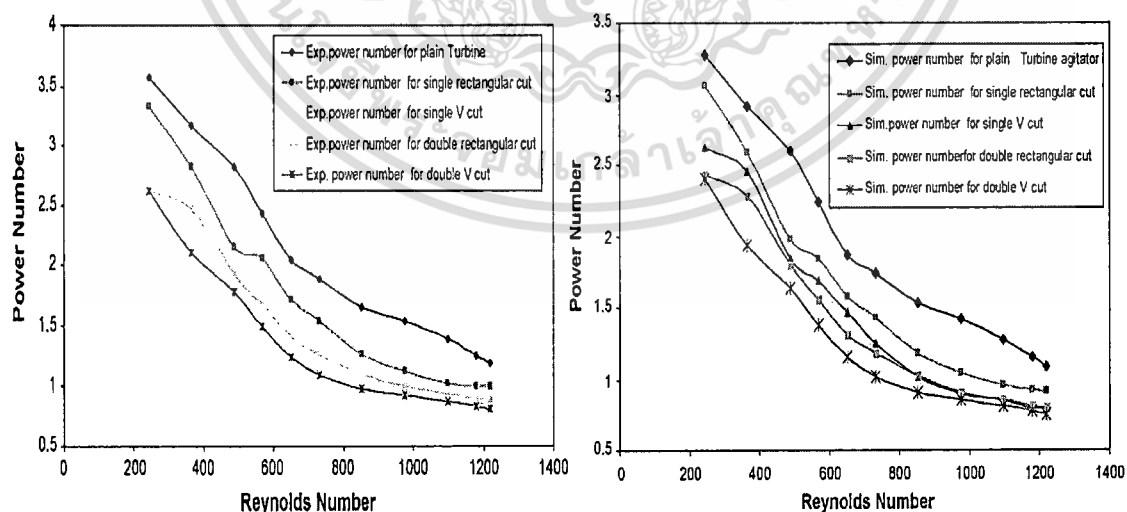
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.4 ถึงกวนมีขนาด 0.26 m สูง 0.32 m ใบกวนขนาด 0.166 m ระยะห่างจากก้น ถึงกวน 0.07 m ขนาดแผ่นกั้น 0.02 m จำนวนเมฆ 321,000 รูปแบบเมฆแบบทรงหกหน้า ทำการ กวนของเหลวที่มีความหนืด 5 Pas ความหนาแน่น 1,000 kg m⁻³

4. D.Ankamna Rao, P.Sivasshanmugam [4] ได้ทำการศึกษถึงการลดค่ากำลังที่ใช้ใน ใบกวน ระหว่างการทดลองกับการคำนวณเชิงตัวเลข โดยการปรับแต่งใบกวนที่บริเวณปลายใบกวน จากแบบเรียบ, แบบสี่เหลี่ยม, แบบตัววี, สี่เหลี่ยมสองชั้น และแบบตัววีสองชั้น ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แสดงแบบใบกวนที่ใช้ในการศึกษา[4]



รูปที่ 1.6 กราฟเปรียบเทียบค่าPo กับ Re ของกลีเซอรอลในการทดลองกับการคำนวณเชิงตัวเลข[4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.6 เป็นภาพแสดงการเปรียบเทียบค่า Power number กับ Reynolds number ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณเชิงตัวเลข พบว่า จากการทดลองพบว่าค่ากำลังที่ใช้ในการกววนของเหลวคือน้ำและกลีเซอรอลนั้นมีค่าลดลงโดยเรียงลำดับค่ากำลังที่ใช้ลดน้อยลงดังนี้ แบบเรียบ > สี่เหลี่ยม > แบบตัววี > แบบสี่เหลี่ยมสองชั้น > แบบตัววีสองชั้น จากนั้นนำผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่ามีความใกล้เคียงกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ต้นรัก เป็นไม้ยืนต้นอยู่ในวงศ์ไม้มะม่วง (Anacardiaceae) เป็นคนละชนิดกับต้นรัก *Calotropis gigantea* linn ซึ่งเป็นไม้พุ่มอยู่ในวงศ์ Asclepiadaceae ออกดอกเป็นช่อกลีบดอกสีม่วงหรือขาว ที่นำมาใช้ร้อยพวงมาลัย ต้นรักหรือต้นไม้ในวงศ์มะม่วงมีอยู่ ๒ สกุล ที่ใช้เจาะเก็บยางรัก คือ สกุล *Rhus* และสกุลไม้รักใหญ่ (*Melanorrhoea*) ต้นรักในสกุลไม้รักใหญ่ มีอยู่ด้วยกัน ๔ ชนิด คือ ต้นรักใหญ่ (*Melanorrhoea ustata*) รักน้ำเกลี้ยง (*Melanorrhoea laccifera*) รักเขา (*Melanorrhoea pilosa*) และรัก (*Melanorrhoea glabra*) แต่ต้นรักที่มีความสำคัญและใช้เจาะเก็บยางรัก เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมเครื่องรักและเครื่องเงินของไทยและพม่า คือ ต้นรักใหญ่ การนำยางรักจากต้นรักมาใช้ ทำด้วยการกรีดหรือสับด้วยมีดที่ลำต้นรักให้เป็นรอยยาวๆ ยางรักจะไหลออกมาตามรอยที่กรีดและสับนั้น แล้วจึงนำภาชนะเข้ารองรับน้ำยางเป็นครั้งๆไป และเก็บรวบรวมไว้ใช้งานต่อไป ยางรักเรียกว่า ยางรักดิบ รักน้ำเกลี้ยง [7]



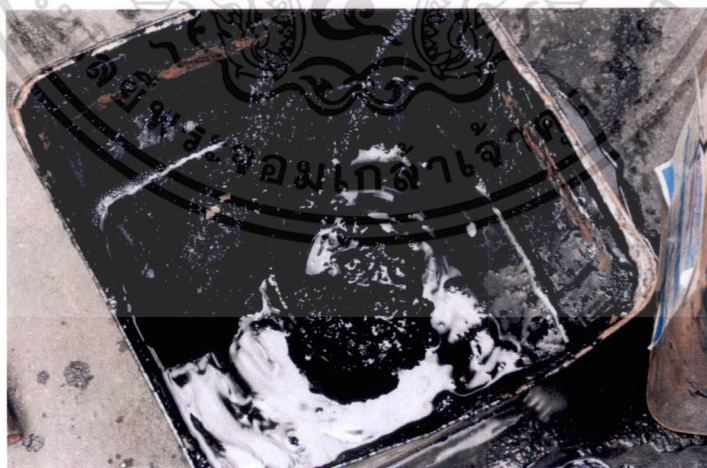
รูปที่ 2.1 ไม้รักใหญ่ ปาดอยเชียงดาว จ.เชียงใหม่[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติแล้วการเก็บยางรักนิยมเก็บกันในช่วงปลายฤดูฝนถึงปลายฤดูหนาวซึ่งเป็นช่วงที่พืชให้น้ำยางมากที่สุด การกรีดต้องกรีดต้นรักที่มีขนาดใหญ่พอที่จะกรีดยางรักได้ ก็จะสกัดยางรักโดยการกรีดเปลือกของยางรักออกเป็นแนวเฉียงคล้ายการยางพารา แต่นิยมกรีดให้ลึกถึงเนื้อไม้เป็นรูปตัววีแล้วใช้กระบอกลูกไม้ไฟ ผูกไว้หรือตอกไว้ตรงรอยกรีด ยางรักที่ออกมาจะค่อยๆ ไหลลงไปในภาชนะที่กักเก็บ โดยตอนแรกจะไหลออกมาเป็นสีฟางใสแล้วจึงค่อยเปลี่ยนเป็นสีดำเมื่อถูกกับอากาศนานๆ

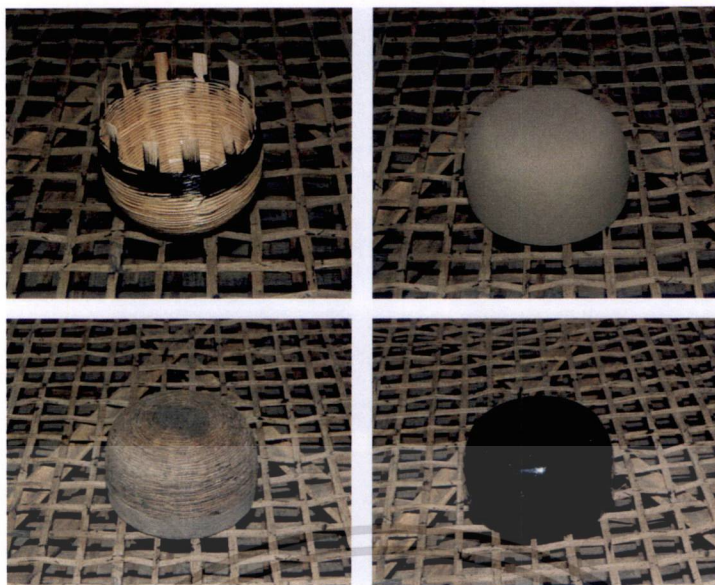


รูปที่ 2.2 การกรีดยางรัก



รูปที่ 2.3 ยางรักดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

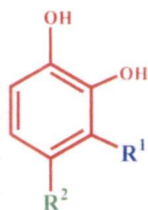


รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการลกรักบนวัสดุจักสาน

2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของยางรัก

ยางรักประกอบด้วย Catechol/phenol derivatives 60-70%, น้ำ 20-30%, Gum ละลายน้ำได้ 4-10%, Enzyme laccase 1.5-2%, Glycoproteins ละลายน้ำได้ 3-5% ยางรักเป็นอิมัลชันของสารอินทรีย์ในน้ำ เมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศจะแข็งตัวได้โดยกระบวนการเกิดโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงชันและมีโครงสร้างเชื่อมโยงเป็นร่างแห ทำให้มีความแข็งตัวมากขึ้น ระยะเวลาในการแข็งตัวของยางรักขึ้นกับอุณหภูมิ ความชื้นและปริมาณเอนไซม์[7] โดยทั่วไปยางรักในประเทศไทยจะแข็งตัวโดยมีความชื้นสัมพัทธ์ 90% อุณหภูมิ 35-40 °c ยางรักนั้นมีข้อเด่นในด้านต่างๆ คือ มีความคงทนต่อต่าง แรงเกาะติดบนวัตถุโลหะดี สารเร่งการป้องกันสนิม กั้นน้ำ ทนความร้อน (150-300 °c) ใช้เป็นยารักษาโรค ยางรักเป็นวัสดุธรรมชาติและเป็นวัสดุเคลือบผิวที่ไม่ได้ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์(อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพ) แต่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ แต่อย่างไรก็ตามยางรักยังมีข้อเสียเปรียบคือ สมบัติไม่หลากหลายเท่าโพลีเมอร์สังเคราะห์ มีความแปรปรวนของสมบัติตามธรรมชาติขึ้นกับพันธุ์ต้นรัก ภูมิอากาศ แหล่งเพาะปลูก และฤดูกาลที่ผลิต และการผลิตในปริมาณมากระดับอุตสาหกรรมทำได้ยากกว่า รวมทั้งการควบคุมคุณภาพให้สม่ำเสมอและต้นทุนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



| | R ¹ | R ² |
|------|-------------------------------|-------------------------------|
| (1) | (Z)-pentadec-7'-enyl | H |
| (2) | pentadecyl | H |
| (3) | H | pentadecyl |
| (4) | (Z,Z)-heptadeca-8',11'-dienyl | H |
| (5) | (Z)-heptadec-8'-enyl | H |
| (6) | (E)-heptadec-8'-enyl | H |
| (7) | H | (Z,Z)-heptadeca-8',11'-dienyl |
| (8) | H | (Z)-heptadec-8'-enyl |
| (9) | heptadecyl | H |
| (10) | 10'-phenyldecyl | H |
| (11) | H | 10'-phenyldecyl |
| (12) | 12'-phenyldodecyl | H |
| (13) | H | 12'-phenyldodecyl |
| (14) | H | heptadecyl |

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของสารประกอบที่พบในยางรัก

2.2 ทฤษฎีการออกแบบภาชนะกวนหรือถังกวน

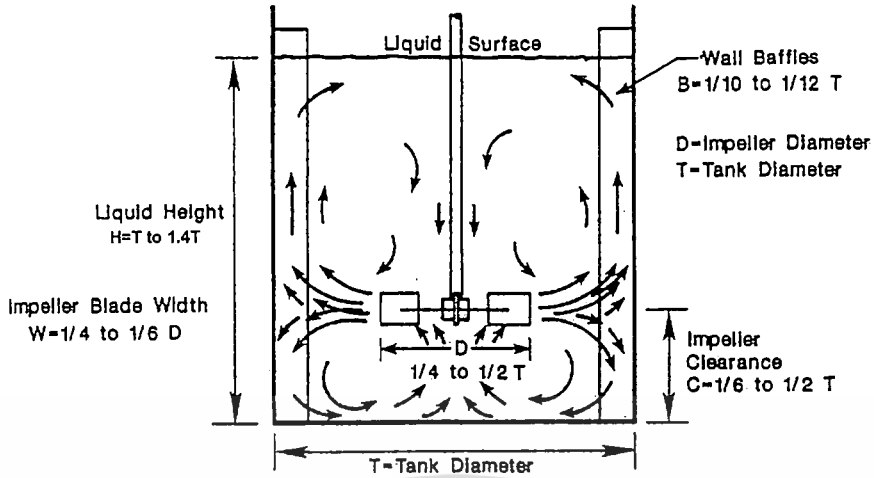
ในการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆนั้นมีความหลากหลาย ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการกวนและปัญหาที่เกิดขึ้นหลักการคิดในการออกแบบเบื้องต้นนั้นคือ ขนาดต้องเหมาะกับงาน(Scale matching) และเลือกใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสมกับงาน (Getting right equipment for the job)[6]

ลักษณะการออกแบบมาตรฐานให้เหมาะสมกับการกวนผสมแบบปั่นป่วนในภาชนะกวน แต่ถึงอย่างไรก็ดีการออกแบบนั้นต้องมีการพัฒนาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงที่สุด



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงถังกวนที่ได้จากการออกแบบเพื่อใช้ในการกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ภาพแสดงรายละเอียดของถังกวน

ในการออกแบบถังกวนที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ออกแบบตามทฤษฎีออกแบบถังกวนซึ่งใช้ข้อกำหนดต่างๆตามรายการดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงลักษณะที่ใช้ในการออกแบบถังกวน

| Type of Impeller | Liquid Height | Impeller Blade Width | Tank Diameter | Wall Baffles | Impeller Diameter | Impeller Clearance |
|---------------------|-------------------|----------------------|---------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Rhuston | $H = T$ to $1.4T$ | $W = 1/4$ to $1/6 D$ | T | $B = 1/10$ to $1/12 T$ | $D = 1/4$ to $1/2 T$ | $C = 1/6$ to $1/2 T$ |
| pitch blade turbine | $H = T$ to $1.4T$ | $W = 1/4$ to $1/6 D$ | T | $B = 1/10$ to $1/12 T$ | $D = 1/4$ to $1/2 T$ | $C = 1/6$ to $1/2 T$ |
| Paddle | $H = T$ to $1.4T$ | $W = 1/4$ to $1/6 D$ | T | $B = 1/10$ to $1/12 T$ | $D = 1/4$ to $1/2 T$ | $C = 1/6$ to $1/2 T$ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถจำหน่ายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 รูปแบบใบกวน

การเลือกลักษณะใบกวนที่จะนำมาใช้ในการกวนกวนยางรักเพื่อให้เกิดความแตกต่างของการไหลในถังกวน จึงทำการศึกษาถึงการไหลในถังกวนมีด้วยกัน 3 รูปแบบคือการไหลในแนวแกน (Axial flow) การไหลในแนวรัศมี (Radial flow) และการไหลในแนวทแยง (Tangential flow) ซึ่งความแตกต่างของใบกวนจะทำให้เกิดการไหลที่ต่างกันไป อีกทั้งการเลือกใช้ใบกวนแต่ละแบบต้องมีความเหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นการไหลในแนวแกน เลือกใช้ใบกวนแบบพิทเบลด์เทอร์โบเน่ การไหลในแนวรัศมี เลือกใช้ใบกวนแบบรัศมี และ การไหลในแนวทแยง เลือกใช้ใบกวนแพดเดิล

2.3.1 ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวแกน (Axial flow)

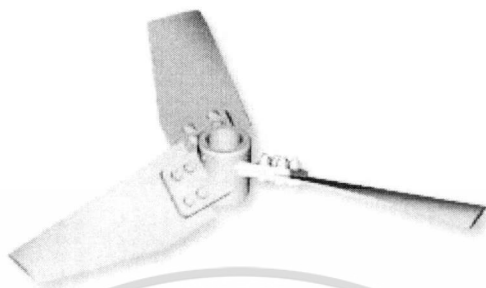
ใบกวนประเภทนี้จะให้การไหลในแนวขนานกับเพลลา เหมาะสำหรับการผสมของเหลวให้เข้ากัน หรือการทำให้ของแข็งแขวนลอยอยู่ในของเหลว ประกอบด้วย

1. ใบกวนแบบโพรเพลเลอร์ (Propeller) [9] หรือเรียกชื่อเต็มว่า มารีนโพรเพลเลอร์ (Marine propeller) ดังรูปที่ 2.8 เป็นใบกวนที่เปลี่ยนมุมไปอย่างต่อเนื่องจากดุมใบถึงปลายใบระยะที่ของเหลวถูกขับเคลื่อนไปเมื่อใบหมุน 1 รอบ เรียกว่า พิต ซึ่งโดยปกติจะมีระยะทางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางใบ เรียกว่า สแควร์พิต (square pitch) โดยทั่วไปใบชนิดนี้จะใช้กับถังขนาดเล็กที่ความเร็วรอบสูง เหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ โดยอาจติดตั้งเยื้องศูนย์กลางโดยไม่มีแผ่นกัน หรือติดตั้งในแนวเอียงกับขอบถัง

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างใบกวนแบบโพรเพลเลอร์ (Propeller)

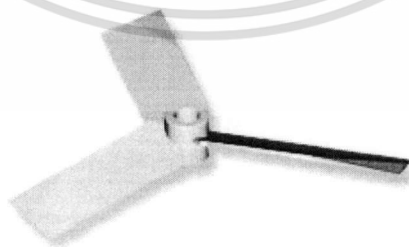
2. ใบกวนแบบไฮโดรฟอยล์ (Hydrofoil) [9] หรือ ฟลูอิดฟอยล์ (Fluidfoil (HF-3)) ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งบางทีเรียกว่า โมดิฟายด์โพรเพลเลอร์ (Modified propeller) การสร้างใบกวนประเภทนี้ ลักษณะใบจะบิดตัวตั้งแต่บริเวณที่ติดกับดุมของใบกวนไปจนถึงปลายของใบกวน ซึ่งมีความยากในไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างใบกวนขนาดใหญ่ ใบกวนประเภทนี้มีลักษณะโค้ง เพื่อลดการเสียดทานการไหล รวมทั้งความกว้างของใบที่ลาดเอียงทำให้แรงดันของเหลวมีขนาดเท่าๆ กันตั้งแต่คมใบถึงปลายใบ จึงลดอัตราการเฉือน (shear rate) ให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทำให้เป็นใบกวนที่ประหยัดพลังงาน เหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดน้อยถึงปานกลาง



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างใบกวนแบบไฮโดรฟรอยด์

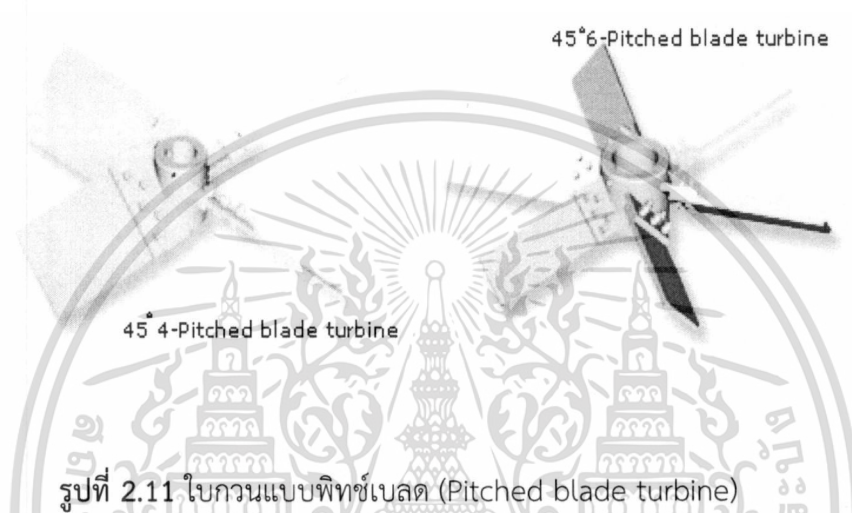
3. ใบกวนแบบไฮเอฟฟิเชนซี (High efficiency (HE-3)) [9] ดังรูปที่ 2.10 เป็นใบกวนที่ทำการปรับแต่งจากใบกวนแบบเทอร์ไบน์ (Turbine) ในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเป็นใบที่ใช้ในการผสมทั่วไป โดยใบที่ทำมุมเอียงกับแนวนอนหรือแนวตั้ง เรียกว่า พิตเชด บเลด (Pitched blade) เมื่อนำใบพิตเชดเทอร์ไบน์ไปกวนของเหลวจะพบว่าเกิดการหมุนวนของเหลว (vortices) ที่หลังใบเป็นจำนวนมาก ลักษณะที่เกิดขึ้นแบบนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการกวนลดลง ดังนั้นจึงมีการปรับให้ขอบนำ (leading edge) มีมุมต่ำลง เพื่อลดการหมุนวนของของเหลวที่บริเวณหลังใบกวน รวมทั้งปรับขนาดของมุมเอียงให้เล็กลง จึงทำให้ได้ใบที่มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้พลังงานต่ำกว่าใบกวนแบบเทอร์ไบน์ (Turbine) จึงเรียกใบกวนแบบนี้ว่าใบกวนแบบไฮเอฟฟิเชนซี



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างใบกวนแบบไฮเอฟฟิเชนซี (High efficiency (HE-3))

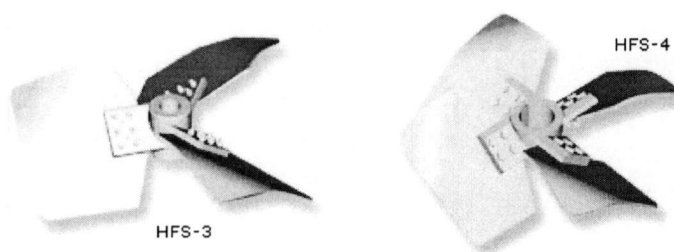
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใบกวนแบบพิทช์เบลตเทอร์ไบน์ (Pitched blade turbine) [9] ในรูปที่ 2.11 เป็นใบกวนที่สามารถใช้งานได้ทั่วไป ตั้งแต่ของเหลวความหนืดต่ำจนถึงความหนืดสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบ รวมทั้งสามารถใช้จำนวนใบได้ตั้งแต่ 4 - 12 ใบ โดยจำนวนใบยิ่งมากก็ยิ่งใช้กำลังงานมาก แต่ก็ให้อัตราการไหลที่มากขึ้น แม้ว่าจะเป็นใบที่ไม่ได้ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกวน แต่ประเภทนี้สามารถทำงานได้ดีกว่าใบ ไฮโดรฟอยล์ (Hydrofoil) และใบกวนแบบไฮเอฟฟิเชนซี (High efficiency) ที่ค่าความหนืดสูงๆ หรือค่า Reynolds number (Re) ต่ำๆ น้อยกว่า 1,000



รูปที่ 2.11 ใบกวนแบบพิทช์เบลต (Pitched blade turbine)

5. ใบกวนแบบไฮโดรฟอยล์ที่มีความหนา [9] Hydrofoil with high solidity (HFS-3 or HFS-4) solidity ratio ดังรูปที่ 2.12 หมายถึงสัดส่วนของพื้นที่ใบต่อพื้นที่ของวงกลมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาดใบ เป็นที่ทราบกันดีว่าใบกวนแบบไฮโดรฟอยล์ โดยทั่วไปมีอัตราส่วนของความหนา (solidity ratio) 31- 35 % เหมาะที่จะใช้กวนของเหลวที่มีความหนืดต่ำ หรือมีค่า Reynolds number มากกว่า 2,000 ขึ้นไป สำหรับ Reynolds number ที่ต่ำกว่า 2,000 ประสิทธิภาพการกวนจะลดลงมาก ดังนั้นใบกวนแบบไฮโดรฟอยล์ ที่มีค่าความหนาของโลหะ มากขึ้นกว่า 65% จึงใช้กวนของเหลวที่มีความหนืดมากขึ้นหรือมีค่า Reynolds number อยู่ระหว่าง 1,000 -2,000



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างใบกวนแบบไฮโดรฟอยล์ที่มีความหนา (Hydrofoil with high Solidity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

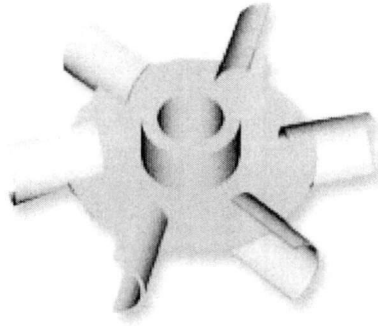
2.3.2 ไบวอนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมี (Radial flow)

ไบวอนประเภทนี้จะผลัดของเหลวออกในแนวรัศมี หรือในแนวตั้งฉากกับแกนเพลลา เหมาะสำหรับการเคลื่อนของเหลวที่ไม่ผสมกันเป็นเนื้อเดียวให้มีขนาดเล็กลง หรือการลดขนาดของของแข็ง เพื่อให้แขวนลอยอยู่ในของเหลวได้เป็นเวลานานๆ โดยทั่วไปเมื่อเทียบขนาดของไบวอนที่เส้นผ่านศูนย์กลางไบวอนและความเร็วรอบที่เท่ากัน ไบวอนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมีจะใช้พลังงานในการหมุนไบวอนมากกว่าไบวอนที่มีการไหลตามแนวแกน ดังนั้นไบวอนประเภทนี้จึงเหมาะกับการใช้งานเฉพาะทางด้าน ไม่เหมาะสำหรับใช้ในกรณีทั่วไป ดังตัวอย่างดังต่อไปนี้

1. ไบวอนแบบเทอร์ไบน์ดิส (Turbine disc) [9] หรือ รัชตันเทอร์ไบน์ (Rushton turbine) ดังรูปที่ 2.13 เป็นไบวอนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมี (radial flow) ในยุคแรกๆ ข้อดีคือทำให้เกิดอัตราเฉือนและอัตราการไหลพอสมควร รวมทั้งสามารถใช้กับขบวนการทางเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนมวล (mass transfer) โดยใช้แก๊ส (aeration process) เนื่องจากมีแผ่น disc ตรงกลางไบวอน ป้องกันไม่ให้แก๊สหลุดออกไปจากของเหลวได้ง่าย รวมทั้งมีใบด้านข้างคอยเฉือนแก๊สให้มีขนาดเล็กลงด้วย แต่มีข้อเสียคือกินกำลังงานมาก

รูปที่ 2.13 ไบวอนชนิดรัชตันเทอร์ไบน์ (Rushton turbine)

2. ไบวอนแบบบาร์ดิส (Bar disc) [9] ดังรูปที่ 2.14 เป็นไบวอนชนิดนี้จะให้แรงเฉือนที่มากกว่าไบวอนแบบเทอร์ไบน์ แต่ใช้กำลังน้อยกว่า อัตราการไหลที่เกิดจากการไหลที่ก่อกำเนิดขึ้นค่อนข้างต่ำ เหมาะสำหรับการใช้คู่กับไบวอนที่มีการไหลในแนวแกน (axial flow) ที่ทำให้เกิดอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น และไบวอนแบบบาร์ดิส (Bar disc) จะให้อัตราเฉือนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.14 ไบกวนชนิดบาร์ดิส (Bar disc)

3. ไบกวนชนิดใบเลื่อยวงเดือน (Saw disc or Saw tooth) [9] ดังรูปที่ 2.15 เป็นไบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมี (radial flow) อีกชนิดหนึ่งที่ใช้กันมานาน โดยในยุคแรกๆ นักวิทยาศาสตร์ใช้แผ่นกลมเรียบๆ มาให้อัตราการเฉือน ต่อมาสังเกตพบว่าแผ่นกลมเรียบนี้ให้อัตราการไหลน้อยมาก จึงนำแผ่นกลมมาบากและตัดเป็นฟันขึ้นลงคล้ายใบเลื่อยจึงเรียกว่า ซอร์ดิส (Saw disc) ไบกวนชนิดนี้ให้แรงเฉือนมากที่ความเร็วรอบสูง และให้อัตราการไหลพอสมควร โดยจะพบในอุตสาหกรรมสีเป็นหลัก

รูปที่ 2.15 ไบกวนชนิดใบเลื่อยวงเดือน (Saw disc or Saw tooth)

4. ไบกวนชนิดโรเตอร์สเตเตอร์ (Rotor stator) [9] ในตัวอย่างรูปที่ 2.16 สำหรับการใช้งานที่ต้องการอนุภาคแขวนลอยในระดับที่เล็กมากเป็น ไมครอน (micron) ไบกวนที่ใช้จะต้องมีอัตราการเฉือนสูงมาก โดยหลักการแล้วถ้าของเหลวถูกบังคับให้วิ่งผ่านช่องแคบเล็กๆ ที่ความเร็วสูงมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเหลวนั้นจะถูกเจือจางมีขนาดอนุภาคเป็นไมครอน โดยสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งจะติดอยู่กับที่จะทำเป็นตะแกรงที่มีรูให้ของเหลววิ่งผ่าน ส่วนโรเตอร์ (Rotor) ตัวหมุนเป็นใบกวนที่มีหลายแฉกและอยู่ห่างสเตเตอร์ (Stator) น้อยมากเพียง 0.75 – 3.00 mm. หรือน้อยกว่า หมุนด้วยความเร็วรอบสูงมาราว 2,800 – 7,500 รอบ คอยดันของเหลวให้วิ่งผ่านช่องแคบๆระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ ซึ่งของเหลวหรือของแข็งที่ได้จะมีขนาดอนุภาคเล็กมาก

รูปที่ 2.16 ใบกวนชนิดโรเตอร์สเตเตอร์ (Rotor stator)

2.3.3 ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลแนวทแยง (Tangential flow)

โดยปกติใบกวนที่มีขนาดใหญ่และหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำจะมีการไหลแนวทแยงรอบถึงกวนรวมอยู่ด้วย เป็นลักษณะการไหลของของเหลวที่หมุนวนรอบขอบถึง ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนหรือความเย็นกับภาชนะที่บรรจุได้ แต่การไหลแนวทแยงไม่ช่วยให้เกิดการผสมของเหลว ดังนั้นจึงใช้แผ่นกั้น (baffles) ในการเปลี่ยนทิศของเหลวให้ขึ้นลงในแนวตั้ง ทำให้การผสมของเหลวให้เข้ากันใช้เวลาน้อยลง ซึ่งสามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ สำหรับของเหลวที่มีความหนืดปานกลางกับสูง เรามักใช้ใบกวนที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนชั้นมากในการกวนของเหลวให้เข้ากัน

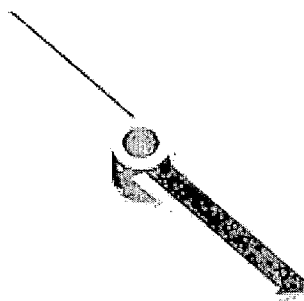
1. ใบกวนชนิดแพดเดิล (Paddle) [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.17 เป็นใบกวนที่รู้จักกันในสมัยแรกๆ เส้นผ่านศูนย์กลางใบมีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดถัง และหมุนที่ความเร็วรอบค่อนข้างต่ำ จึงทำให้เกิดการไหลในแนวทแยงที่ขอบถึง ต่อมาได้ปรับมุมจากตั้งตรง 90° เป็นมุมเอียง 45° ทำให้เกิดการไหลในแนวแกน (axial flow) ร่วมด้วย ทำให้การผสมของเหลวมีประสิทธิภาพดีขึ้น

เนื่องจากมีใบเพียง 2 ใบ ทำให้ใช้กำลังงานน้อยแต่ทำให้เกิดอัตราการไหลไม่มากนัก จึงจำเป็นต้องใช้

ใบหลายชั้นวางตั้งฉากกัน เหมาะสำหรับการกวนที่ค่อนข้างเบาถึงปานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ใบกวนชนิดแพดเดิล (Paddle)

2. ใบกวนแบบเทเปอร์แพดเดิล (Taper paddle) [9] หรือใบกวนแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ในรูปที่ 2.18 ซึ่งมีลักษณะใบโดยทั่วไปที่ปลายทำให้หลู่เล็กลงกว่าที่โคนใบทำให้ความเร็วของของเหลวที่ไหลจากใบมีขนาดใกล้เคียงกัน จึงลดอัตราการเฉือน (shear rate) ที่ใบกวนกระทำกับของเหลวในถังได้ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับกวนของเหลวที่ไม่ต้องการแรงเฉือนหรือแรงเฉือนต่ำ เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารที่ไม่ต้องการให้กลืน รส เปลี่ยนไปหรือในอุตสาหกรรมน้ำเสีย ที่ถังตกตะกอน เป็นต้น



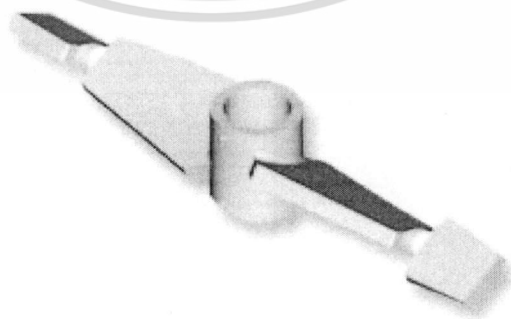
รูปที่ 2.18 ใบกวนชนิดเทเปอร์แพดเดิล (Taper paddle)

3. ใบกวนชนิดเซบ้าแพดเดิล (Seba paddles) [9] ดังรูปที่ 2.19 ใบกวนชนิดนี้ด้านในของใบกวนจะมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมคางหมู โดยปกติจะดันของเหลวลงล่าง ในขณะที่ใบด้านนอกจะดันของเหลวขึ้นและหมุนในแนวเส้นรอบวงในเวลาเดียวกัน รวมทั้งอาจมีตัวปาด (scraper) รอบถัง เพื่อไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำความสะอาดหรือแลกเปลี่ยนฟิล์มของเหลวทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น เหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดปานกลางกับค่อนข้างสูง

รูปที่ 2.19 ใบกวนชนิดเซบ้าแพดเดิล (Seba paddles)

4. ใบกวนชนิดซีเอสแพดเดิล (CS paddles) [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ลักษณะของใบกวนประกอบด้วยด้านในและด้านนอกของใบกวน มี 3 ชั้น ซึ่งสามารถดันของเหลวสวนทางกันคล้ายใบกวนชนิดเซบ้าแพดเดิล ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางใบจะมีขนาดประมาณ 70% - 90% ของเส้นผ่านศูนย์กลางถัง ใบกวนชนิดซีเอสแพดเดิล จะติดตั้งใบกวนในลักษณะตั้งฉากซึ่งกันและกันเหมาะสำหรับกวนของเหลวที่มีความหนืดสูงถึงสูงมากราว 500,000 m.Pas หรือ cP



รูปที่ 2.20 ใบกวนชนิดซีเอสแพดเดิล (CS paddles)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ไบกวนแบบสมอ (Anchor) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งเป็นไบกวนที่ถูกปรับรูปร่างจนมีลักษณะคล้ายภาชนะที่บรรจุของเหลว มีลักษณะคล้ายสมอเรือ (anchor) หรือเกือกม้า (horse shoe) เป็นไบกวนที่รู้จักกันมานาน โดยมีลักษณะเด่นที่สามารถติดตั้งใบปาด (scraper or wiper) ได้ทั้งด้านข้างและด้านล่าง ทำให้การถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ได้ทั่วตลอดมวลของของเหลว อย่างไรก็ตาม Anchor สามารถใช้ได้ดีที่ความหนืดของของเหลวราว 5,000 – 50,000 m.Pas ที่ความหนืดน้อยกว่า 5,000 m.Pas ของเหลวจะไม่มีค้ำความหนืดพอที่จะลากดึง (viscous drag) ตามใบ Anchor ได้ ในขณะที่ความหนืดสูงมากกว่า 50,000 m.Pas



รูปที่ 2.21 ไบกวนชนิดสมอ (Anchor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีการคำนวณเชิงตัวเลข

การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขโดยอาศัยพื้นฐานทางกลศาสตร์เข้ามาช่วยในการสร้างเพื่อให้เกิดกระบวนการกวนในภาชนะกวน ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่ง ในปัจจุบัน กระบวนการที่ดีคือการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำตามแบบโดยทั่วไปคือ มีใบกวนและเพลหรืออาจมีการเพิ่มอุปกรณ์อื่นที่เพิ่มอยู่ในถังกวน การสร้างแบบจำลองการกวนเพื่อใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของเหลว (Computation Fluid Dynamics) สามารถพิจารณาได้หลายรูปแบบในกระบวนการ กล่าวคือการกำหนดขอบเขตในพื้นที่ ที่ให้ความสนใจ ในกรณีการสร้างแบบจำลองการกวนนี้เราให้ความสนใจในส่วนของปริมาตรของเหลวที่บรรจุอยู่ในภาชนะ ซึ่งจะถูกพิจารณาโดยการสร้างกริด ในส่วนของขอบเขตที่เล็กลงนั้นมีส่วนเกี่ยวข้องในการคำนวณคือใบกวน ซึ่งในการคำนวณจำนวนกริดจะต้องมีความเหมาะสมกับภาชนะกวน ตลอดจนพิจารณาถึงความหลากหลายของรูปลักษณ์ ของภาชนะกวน

3.1 การคำนวณทางพลศาสตร์ของเหลว (Computation Fluid Dynamics) [8]

การคำนวณทางพลศาสตร์ของเหลวนั้นคือแบบจำลองเชิงตัวเลขของการเคลื่อนที่ของเหลว อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของเหลวที่เกิดขึ้นในกระบวนการผสมได้แสดงให้เห็นชัดถึงประโยชน์ของ CFD ซึ่งมีอยู่มาก เช่นการไหลในเส้นเลือด การไหลแบบซูเปอร์โซนิกเหนือแอร์พอยด์ การฉีดยางในกระบวนการผลิตของชิ้นส่วนยานยนต์ แบบจำลองเชิงตัวเลขและเทคนิคที่ใช้ในการคำนวณได้มีการพัฒนากันมาหลายปีเพื่อช่วยในการอธิบายถึงความหลากหลายของการเคลื่อนที่ของเหลว ซึ่งในส่วนนี้จะกล่าวถึง สมการพื้นฐานของการไหลของของเหลว ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงรูปแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ในกระบวนการกวนผสม

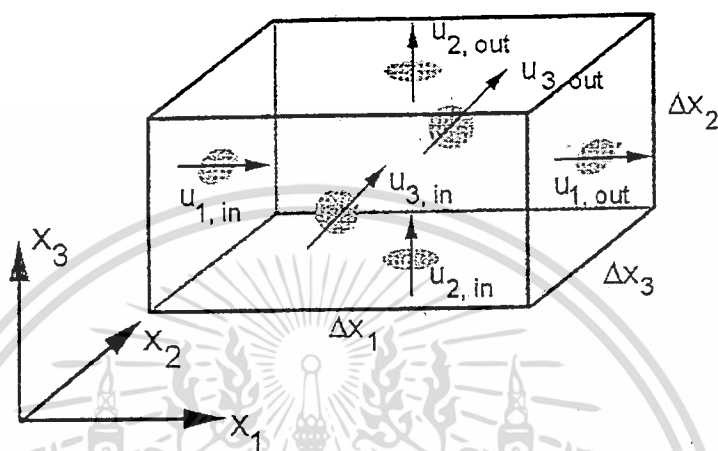
3.1.1 สมการอนุรักษ์ (Conservation equation)

ถ้าในปริมาตรที่เล็กหรือส่วนของของเหลวที่ถูกพิจารณานั้นมีการเคลื่อนที่มี 2 สิ่งที่เปลี่ยนคือ 1. ส่วนของเหลวจะเคลื่อนที่และเป็นไปได้ว่ามีการหมุนหรือเปลี่ยนแปลง 2. อาจจะถูกทำลาย ทั้งสองอย่างนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามแนวแกนเพราะ เกิดการเปลี่ยนรูป ในกระบวนการเคลื่อนที่บ่อยครั้งจะมีการพาหรือการบิดรูปไปจากเดิม ในส่วนของความเร็ว ซึ่งในกระบวนการนี้จะถูกเรียกว่า diffusion ในกรณีอย่างง่ายคือในกระบวนการจะถูกควบคุม การหมุนเวียนของเหลวจากตำแหน่งหนึ่งไปสู่ตำแหน่งต่อไปเนื่องจากสาเหตุหลายประการของกระบวนการ เช่น ความร้อน คุณสมบัติทางเคมี ซึ่งจะทำให้ค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไปจากกระบวนการต่างๆ เหล่านี้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเหลวได้โดย

3.1.2 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการความเกี่ยวเนื่องเป็นส่วนหนึ่งของ Conservation of mass ทำให้เข้าใจถึงจุดกำเนิดพิจารณาความหนาแน่นของของเหลวในการไหลผ่านกล่องสี่เหลี่ยมทั้ง 6 ด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งกล่องมีความยาวแต่ละด้านคือ Δx_1 , Δx_2 และ Δx_3 ส่วนของความเร็วคือ U_1 , U_2 และ U_3 ในทิศทางทั้ง 3 แกน ทำให้ทราบว่ากฎอนุรักษ์เชิงมวลเป็นผลรวมของมวลที่ไหลผ่านกล่องทั้ง 6 ด้าน



รูปที่ 3.1 ภาพปริมาตรกล่องสี่เหลี่ยมที่มีการไหลเข้า-ออก หาค่าได้จาก conservation equation

$$\begin{aligned} & \rho(U_{1,out} - U_{1,in})(\Delta x_2 \Delta x_3) + \rho(U_{2,out} - U_{2,in})(\Delta x_1 \Delta x_3) \\ & + \rho(U_{3,out} - U_{3,in})(\Delta x_1 \Delta x_2) = 0 \end{aligned} \quad 3-1$$

สามารถเขียนสมการในรูปของ $(\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)$

$$\rho \frac{\Delta U_1}{\Delta x_1} + \rho \frac{\Delta U_2}{\Delta x_2} + \rho \frac{\Delta U_3}{\Delta x_3} = 0 \quad 3-2$$

หรือในรูปผลต่างอนุพันธ์คือ

$$\rho \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \rho \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \rho \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0 \quad 3-3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือสามารถเขียนในแบบลดรูปอย่างสั้นคือ

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad 3-4$$

สำหรับสัญลักษณ์ U_i คือส่วนของความเร็วและ partial derivative ซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกับ x_i ซึ่งสมมติให้ตรงกับหนึ่งในสามในทิศของโคออร์ดิเนตโดยรวมความหนาแน่น ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปตามเวลาและช่วงเวลาและสมการความเกี่ยวเนื่องให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_i) = 0 \quad 3-5$$

3.1.3 สมการการโมเมนตัม (Momentum Equation)

สมการการเคลื่อนที่ เป็นส่วนหนึ่งของ Conservation of momentum ซึ่งอยู่ในส่วนประกอบทั้งสามส่วน ซึ่งสมการทั้งสามส่วนนี้ถูกเรียกรวมกันว่า Navier-Stoke equation ในส่วนของสมการการเคลื่อนที่โดยการพาและกระจายตัวทำให้สามารถเขียนออกมาให้อยู่ในรูปดังนี้

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] + \rho g_i + F \quad 3-6$$

จากสมการ 3-6 ส่วนของการพาอยู่ทางด้านซ้ายและในส่วนทางขวามือคือ pressure gradient ในส่วนเพิ่มเติมคือ ไตเวอร์เจนท์ของค่าความเค้นซึ่งตอบสนองถึงการกระจายตัวของสมการเคลื่อนที่ในส่วนของการแรงโน้มถ่วง

3.1.4 สมการความปั่นป่วน (Turbulence Equation)

จำนวนของปริมาณของค่าซึ่งถูกพัฒนาเพื่อที่จะศึกษาเกี่ยวกับพลศาสตร์ของเหลวที่มีความแตกต่างกันของการไหล ข้อมูลต่างๆ เหล่านี้หรือจำนวนตัวเลขที่ใช้ในการแบ่งแยกของเหลวคุณลักษณะของเหลว สิ่งที่จะใช้แบ่งแยกได้ดีที่สุดคือค่า Reynolds number ซึ่งจะบอกถึงอัตราส่วนของแรงเฉื่อยหรือการเคลื่อนที่ ที่มีแรงเสียดทาน ที่ทำให้ของเหลวช้าลง ค่า Reynolds number หาได้โดย

$$\text{Re} = \frac{\rho U d}{\mu} \quad 3-7$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของเหลว

U คือ ความเร็วตามแนวแกนในท่อ

d คือ ขนาดของท่อ

μ คือค่าความหนืด

สำหรับในการคำนวณนั้นจะใช้สมการหาค่า Reynolds number ดังนี้

$$\text{Re} = \frac{ND^2 \rho}{\mu} \quad 3-8$$

เมื่อ N คือ ความเร็วรอบของใบกวน rev/s

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน m

ในค่า Reynolds number ที่มีค่าน้อยหรือในช่วงที่มีความปั่นป่วนที่มีค่า Reynolds number ที่สูง การเปลี่ยนแปลงในช่วงระหว่างช่วงที่มีความราบเรียบกับช่วงที่มีความปั่นป่วนซึ่งจะอยู่ในช่วงของค่า Reynolds number ค่าหนึ่ง สำหรับการไหลในท่อนั้นจะอยู่ในช่วง $\text{Re} = 2000$ to 4000 สำหรับในถึงกวนนั้นค่า Reynolds number จะอยู่ในช่วง $\text{Re} = 50$ to 5000 ขึ้นอยู่กับค่า Power number ของใบกวน ในส่วนของความปั่นป่วนหรือความผันผวนที่เกิดขึ้นของความเร็วและความหลากหลายที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองนั้นควรจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเข้ามาใช้

ในการคำนวณหลายๆแบบนั้นจะเพิ่มเติมในส่วนของความปั่นป่วนเข้าไปในสมการ Navier-Stokes กระบวนการทั้งหมดเหล่านี้เกิดขึ้นในเวลาเฉลี่ยทั้งหมดในกระบวนการของ Conservation equation เมื่อสมการความปั่นป่วนได้ถูกเพิ่มเข้าไปในการเคลื่อนที่ซึ่งสมมติโดยผลรวมของความผันผวน $U_i + u'_i$ หลังจากเวลาเฉลี่ยของหลายๆรอบของความผันผวนซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์จะเหลือแต่ในส่วนที่มีค่าเป็นบวกซึ่งจะเป็นสองส่วนคือในเทอมของสมการ 3-6 และ ในส่วนของสมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) คือ

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i + F \quad 3-9$$

ในส่วนที่เพิ่มเติมเข้าคือ $\overline{u'_i u'_j}$ เรียกว่า Reynolds stresses เป็นตัวบ่งชี้ค่าของเวลาเฉลี่ย ซึ่งมีส่วนทำให้ตัวที่ไม่ทราบค่าในสมการ RANS และต้องการให้มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามรูปแบบจำลองซึ่งจะเรียกโดยรวมว่าแบบจำลองความปั่นป่วน โดยมี Boussinesq Hypothesis นั้นทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้สมมติฐานของ Reynolds stresses นั้นมีค่าเข้าใกล้ความเร็วมากขึ้นซึ่งในส่วนของข้อสันนิษฐานเบื้องต้นที่มีค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความหนืด

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \left[\mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad 3-10$$

μ_t คือ ค่าความหนืดของ Eddy ซึ่งสมการ 3-10 เป็นส่วนหนึ่งของ สมการ 3-9 ซึ่งเป็นเทอมที่อยู่ในรูปของ partial derivatives ซึ่งสามารถรวมกันและปริมาณใหม่ ทำให้เห็นค่าความหนืดที่มีผล (effective viscosity) ดังนี้

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad 3-11$$

ในส่วนของค่าตัวแปรที่มีความหลากหลายคือค่า k (kinetic energy of turbulence) ซึ่งในจำนวนนี้เขียนอยู่ในรูปของความผันผวนของความเร็ว u', v' และ w' ในทั้งสามแกนดังนี้

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad 3-12$$

$k - \varepsilon$ Model แบบจำลองชนิดนี้เป็นแบบจำลองในส่วนของสมการการเคลื่อนที่ในส่วนของ Reynolds stresses ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ค่อนข้างมีความเสถียรในการคำนวณเชิงตัวเลข นิยมใช้ในงานที่มีความหลากหลายซับซ้อน ซึ่งแบบจำลองนี้เหมาะกับการใช้ในกระบวนการกวน ที่มีความหลากหลายของการไหลแบบปั่นป่วน และมีการใช้กันมาอย่างแพร่หลาย ในการไหลที่มีค่า Reynolds-number ค่ากว้าง ในสองส่วนของสมการการเคลื่อนที่ ที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองการแก้สมการการเคลื่อนที่สองสมการในแบบจำลองสำหรับพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน k และอัตราการกระจายตัวของความปั่นป่วน ε

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + G_k - \rho \varepsilon \quad 3-13$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad 3-14$$

ค่า C_1, C_2, σ_k และ σ_ε เป็นค่าคงที่ ที่ได้จากการทดลอง ค่า G_k เป็นค่าที่อยู่ในเทอมของความปั่นป่วน เป็นค่าของความเร็วซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความหนืด

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad 3-15$$

กำหนดให้ C_μ มีค่าเท่ากับ 0.09

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 3-16$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าผลเฉลยของกระบวนการในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ สมการการเคลื่อนที่หาได้จากความปั่นป่วนของพลังงานจลน์และอัตราการกระจายตัว ผลที่ได้จากค่า k และค่า ε ถูกใช้ในการคำนวณของค่าความหนืดปั่นป่วน การใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากค่า μ_t และ k ค่า Reynolds stresses หาได้จากคำนวณ Boussinesq Hypothesis ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสมการ โมเมนตัม ซึ่งสมการโมเมนตัมหาได้จากส่วนประกอบของความเร็วที่เกิดขึ้นใหม่ ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงค่าความปั่นป่วน ซึ่งจะมีการกระทำซ้ำโดยค่า G_k

3.2 กริด[5]

กริด หรือ เมช (Mesh) เป็นส่วนที่สำคัญต่อการทำการจำลองแบบ CFD เนื่องจากการที่จะทำให้ผลการจำลองมีความแม่นยำ ถูกต้อง ประหยัดเวลา และง่ายต่อการใช้งาน จะต้องมีการคิดค้นเทคนิควิธีการ การสร้างกริดให้มีประสิทธิภาพสูงสุดกับการจำลอง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องสืบค้นและสร้างเทคนิคให้เหมาะกับงานนั้นๆ กริด จากการสืบค้น สามารถแยกแยะการสร้าง กริดที่มีผลต่อการจำลองได้ดังนี้

3.2.1 รูปแบบของกริด (Grid Form)

รูปแบบของกริดสามารถแบ่งได้ตามมิติรูปร่างคือ

1. กริดแบบเส้น (Line Grid) ใช้ในการจำลองในมิติเดียว (1D Simulation) ไม่นิยมใช้ในการจำลองแบบของไหล เนื่องจากการไหลของของไหลจะเป็นในรูปแบบของสนามความเร็ว จึงนิยมใช้ในรูปแบบของกริดแบบผิว และกริดแบบเซลล์

2. กริดแบบผิว (Face Grid) ใช้ในการจำลองในสองมิติ (2D Simulation) นิยมใช้ในการจำลองการไหลอย่างง่าย และใช้ในการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากทำให้ประหยัดเวลาในการจำลองเพราะใช้พื้นที่ในการเก็บความจำ (Memory Size) ของคอมพิวเตอร์น้อย กริดแบบผิว ยังแบ่งแยกตามรูปร่างได้อีกสามประเภท ตามลักษณะที่นิยมใช้งาน คือ

ก) กริดแบบสามเหลี่ยม

ข) กริดแบบสี่เหลี่ยม

ค) กริดแบบหกเหลี่ยม

3. กริดแบบเซลล์ (Cell Grid) ใช้ในการจำลองในสามมิติ (3D Simulation) ใช้ในงานที่มีการไหลที่ซับซ้อนแบบสามมิติ เช่น การไหลแบบหมุนวน (Vortex) การไหลผ่านใบจักร การไหลภายในห้องเผาไหม้ เป็นต้น ซึ่งกริดแบบเซลล์ยังมีอีกหลายรูปแบบ เช่น กริดเซลล์แบบปริซึม (Prism) แบบพีระมิด (Pyramid) แบบลูกบาศก์ (Cubic) แบบทรงหกหน้า (Hexahedron) ทั้งนี้การเลือกใช้กริดในรูปแบบต่างๆ ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน

3.2.2 ขนาดและจำนวนของกริด (Grid Size & Number of Grid)

ขนาดและจำนวนของกริด เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญอีกตัวแปรหนึ่ง ที่มีความสัมพันธ์กับจำนวนกริดโดยตรง ซึ่งโดยปกติถ้าขนาดกริดเล็กจำนวนกริดจะมาก และถ้าขนาดกริดใหญ่จำนวนกริดก็จะน้อย ทั้งนี้เมื่อพิจารณาในโดเมนเดียวกัน ขนาดของกริดยังแปรผันกับความชันของกราฟาเดียนท์ (Gradient) เนื่องจาบบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลง กราเดียนท์สูง จำเป็นต้องใช้กริดที่มีขนาดเล็กหลายๆ กริด

3.2.3 เทคนิคในการสร้างกริด (Technique of Grid Creation)

เทคนิคในการสร้างกริด จะเป็นการออกแบบการสร้างลักษณะของกริดให้เหมาะกับงานโดยพิจารณา ตามความเหมาะสมของรูปแบบของงาน เช่น ถ้าแบบจำลองมีรูปทรงที่มีความซับซ้อนมาก จะจำเป็นต้องใช้กริดหลายรูปแบบเข้ามาใช้ ในการสร้างกริด ให้มีความเหมาะสมกับรูปทรง และเหมาะกับบริเวณที่คาดว่าจะเกิดการเดียนท์อันเนื่องมาจากการทำการจำลองสูง เป็นต้น



บทที่ 4

วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขการกวนในถังกวน

ในบทนี้แสดงถึงวิธีการจำลองการกวนในถังโดยแบ่งการสร้างออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือการสร้างแบบจำลองใบกวนและส่วนที่สองคือการสร้างแบบจำลองถังกวน โดยสร้างแบบจากจำลองจากโปรแกรม Gambit 2.3.16 จากนั้นจึงทำการทดสอบด้วยวิธีการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (CFD) โดยใช้โปรแกรม Fluent version 6.3.26 เข้ามาช่วยในการทดสอบ

4.1 การสร้างแบบจำลองใบกวนและถังกวน

การจำลองนั้นได้ทำการสร้างแบบจำลองของใบกวนด้วยกันทั้งหมด 3 แบบ คือ 1.แบบรัชตัน, 2.แบบพิทช์เบลต, 3.แบบแพดเดิล โดยแบบจำลองใบกวนทั้งสามแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบเท่ากับ 120 mm. เพลามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm. ดังนี้

4.1.1 แบบจำลองถังกวนและใบกวนแบบรัชตัน

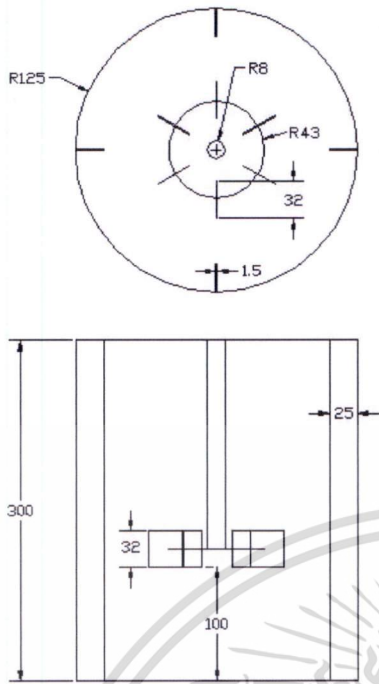


รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองใบกวนแบบรัชตัน

เมื่อสร้างแบบจำลองใบกวนแบบรัชตันดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยใช้รายละเอียดจากรูปที่ 4.2 แล้ว

จากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองถังกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ด้านซ้ายแสดงรายละเอียดของถังกวนและใบกวนแบบรัชตัน ด้านขวาแสดงการเมชถังกวนและใบกวน

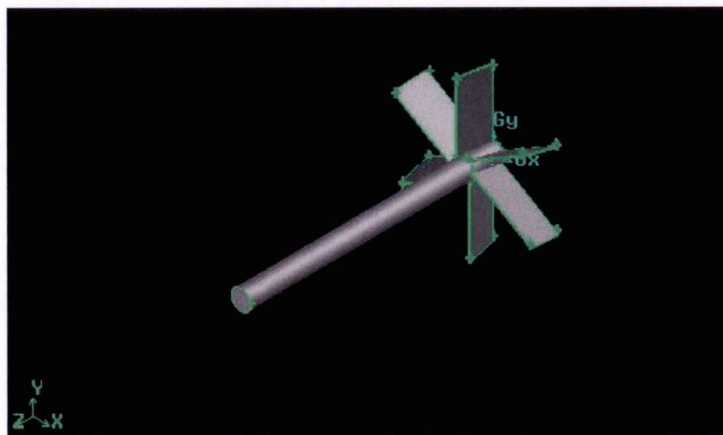
ตารางที่ 4.1 การกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองของใบกวนแบบรัชตัน

| | |
|-----------------|--------------------------|
| Turbulent model | Standard k-epsilon Model |
| Element | Tet/Hybrid |
| Type | T-Grid |
| Number of Grid | 260,000-280,000 |

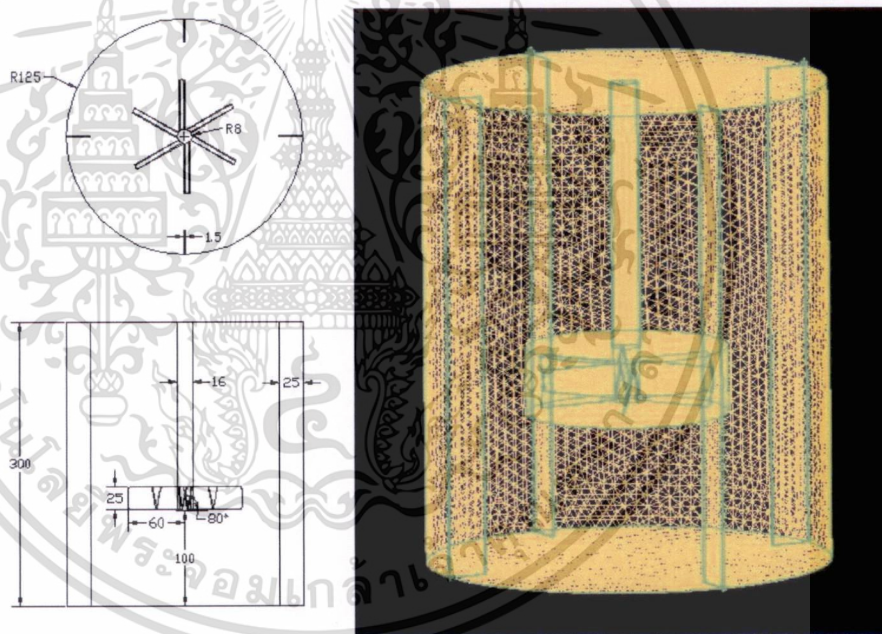
4.1.2 แบบจำลองถังกวนและใบกวนแบบพิทซ์เบลต

แบบจำลองใบกวนแบบพิทซ์เบลตดังแสดงในรูปที่ 4.3 สร้างโดยอาศัยรายละเอียดจากรูปที่ 4.4 ซึ่งทราบให้ทราบถึงขนาดของใบกวน มุมเอียง จากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองถังกวน เมื่อรวมทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันจะทำให้เกิดรูปทางด้านซ้ายของรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองใบกวนแบบพิตช์เบลต



รูปที่ 4.4 ด้านซ้ายรายละเอียดของถังกวนและใบกวนแบบพิตช์เบลต ด้านขวาแสดงการเมช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองของใบกวนแบบพิทซ์เบลด

| | |
|-----------------|--------------------------|
| Turbulent model | Standard k-epsilon Model |
| Element | Tet/Hybrid |
| Type | T-Grid |
| Number of Grid | 340,000-360,000 |

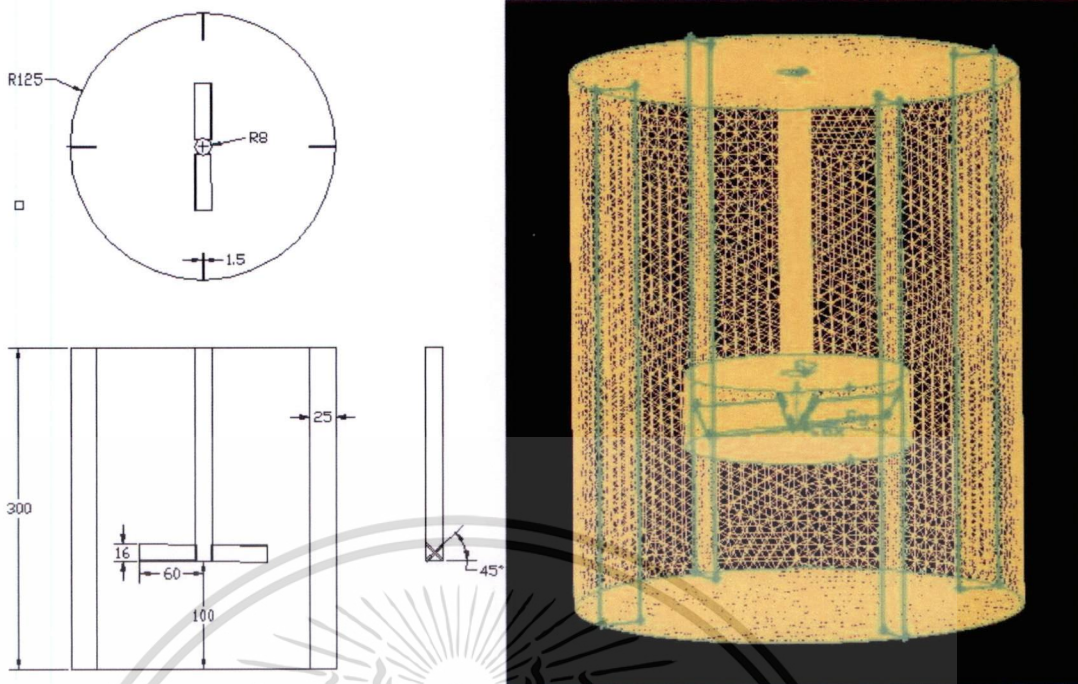
4.1.3 แบบจำลองของถังกวนและใบกวนแบบแพดเดิล

แบบจำลองใบกวนแบบแพดเดิลดังแสดงในรูปที่ 4.5 สร้างโดยอาศัยรายละเอียดจากรูปที่ 4.6 ซึ่งทราบให้ทราบถึงขนาดของใบกวน มุมเอียง จากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองถังกวน เมื่อรวมทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันจะทำให้เกิดรูปทางด้านซ้ายของรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 แสดงแบบจำลองใบกวนแบบแพดเดิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ด้านซ้ายรายละเอียดของถึงกวนและใบกวนแบบแพดเดิล ด้านขวาแสดงการเมช

ตารางที่ 4.3 การกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองของใบกวนแบบแพดเดิล

| | |
|-----------------|--------------------------|
| Turbulent Model | Standard k-epsilon Model |
| Element | Tet/Hybrid |
| Type | T-Grid |
| Number of Grid | 310,000-320,000 |

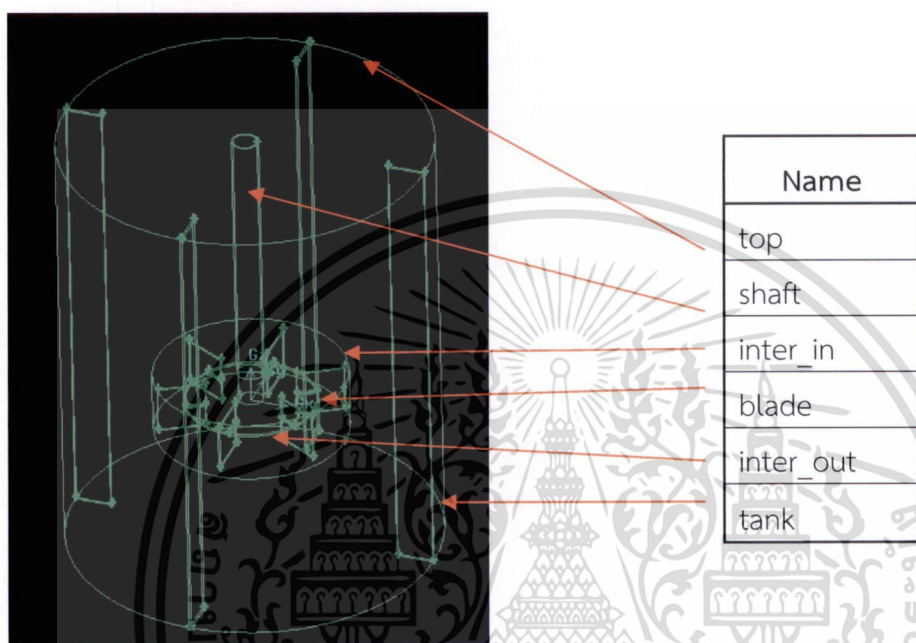
4.1.4 รูปทรงและการสร้างกริด

รูปแบบจำลองของภาชนะกวนและใบกวน ในการสร้างกริด กำหนดชนิดกริดเป็นแบบ T-Grid และรูปแบบของกริดเป็นแบบทรงสี่หน้า โดยความละเอียดของกริดที่สร้างขึ้นในแบบจำลองมีขนาด 0.0001 mm. ใบส่วนที่เป็นใบกวน และหยาบที่สุ่มมีขนาด 0.05 mm. ในส่วนที่เป็นถึงกวนโดยใช้โปรแกรม Gambit สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การกำหนดค่าขอบเขต (Boundary Condition)

เมื่อทำการสร้างเมชของแบบจำลองทั้งสองแบบจำลองแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการกำหนด Boundary Condition ในส่วนต่างๆ ของใบกวนทั้ง 3 แบบ ดังต่อไปนี้

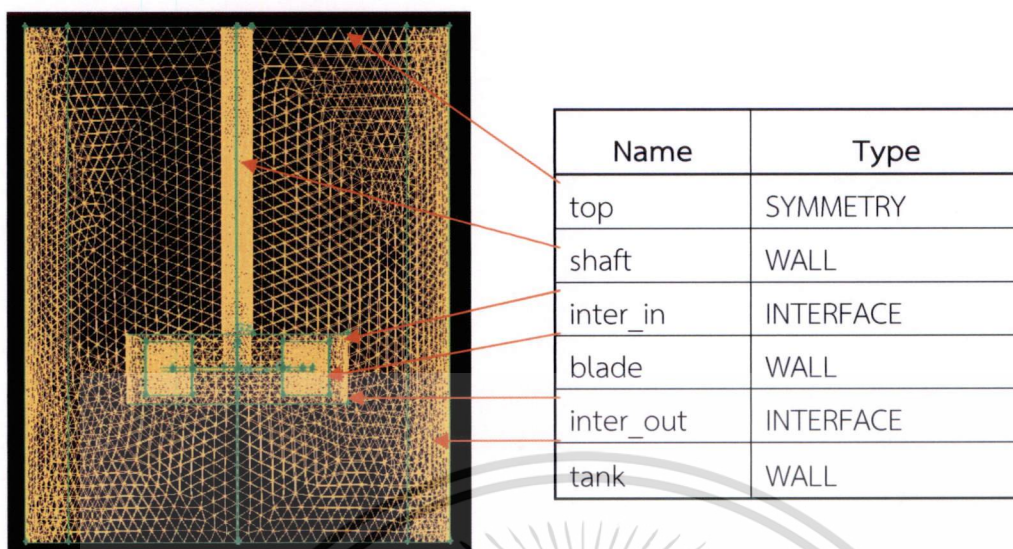


รูปที่ 4.7 แสดงการเรียกชื่อและระบุตำแหน่งใน

แต่ละบริเวณ

การกำหนดค่าขอบเขตในบริเวณต่างดังนี้ บริเวณผิวบนของเพลาดำแหน่ง top บริเวณนี้กำหนดให้เป็น symmetry บริเวณด้านข้างถังกวน tank กำหนดให้เป็น wall ที่เพลากวน shaft กำหนดให้เป็น wall ใบกวน blade กำหนดให้เป็น wall บริเวณโดเมนที่รอบใบกวนและเพลากำหนดให้เป็น interface ดังแสดงในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงรายละเอียดในแต่ละส่วนของค่าขอบเขตบนแบบจำลองของกังหันและใบกวน

จากนั้นทำการทดสอบโดยการคำนวณเชิงตัวเลขตามรายการที่ได้ทำการออกแบบการทดลองดังต่อไปนี้

1. ใช้ค่าความหนืดที่วัดได้จากการทดลอง มาเป็นค่าความหนืดในการคำนวณเชิงตัวเลขที่อุณหภูมิห้อง (28°C), 40°C และ 60°C ของใบกวนทั้ง 3 แบบ
2. ทำการทดลองการกวนโดยใช้ความเร็วรอบ 50, 100, 200, 400 rpm
3. ใช้ค่าความหนืดที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา 10, 20, 30 min ของใบกวนทั้ง 3 แบบมาเป็นค่าความหนืดที่ใช้ในการทดสอบ

4.3 การคำนวณและผลการคำนวณเชิงตัวเลขในการกวน

วิธีการจำลองการกวนนั้นจะกำหนดให้ของเหลวหมุนผ่านใบกวน โดยความเร็วที่หมุนผ่านใบกวนนั้นจะเป็นความเร็วที่ใช้ในการกวน และค่าความหนืดที่ใช้ในการจำลองเป็นค่าที่ได้จากการทดลองตามอุณหภูมิ เวลา และความเร็วในการกวน มาแทนค่าลงในรายละเอียดของวัสดุ โดยการเปลี่ยนค่าความหนืด จะเปลี่ยนตามความเร็ว ที่ใช้ในการกวนและเวลาที่เพิ่มขึ้น เพื่อหาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการใช้ใบกวนแต่ละแบบ โดยเมื่อได้ค่าแรงบิดจากการจำลองแล้ว จะต้องนำมาคำนวณหาค่ากำลังที่ใช้ในการหมุนใบกวน จากนั้นนำค่ากำลังที่ได้ไปหาค่า Power Number (Po), Reynolds Number (Re) แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเขียนกราฟค่าความสัมพันธ์ของค่า Power Number กับ Reynolds Number ที่อุณหภูมิต่างๆ

$$P = \omega\tau \quad 5.1$$

$$Po = \frac{P}{N^3 D^5 \rho} \quad 5.2$$

เมื่อ P คือ กำลังที่ใช้ของมอเตอร์ (Watts)

N คือ ความเร็วรอบในการหมุน (s)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน (m)

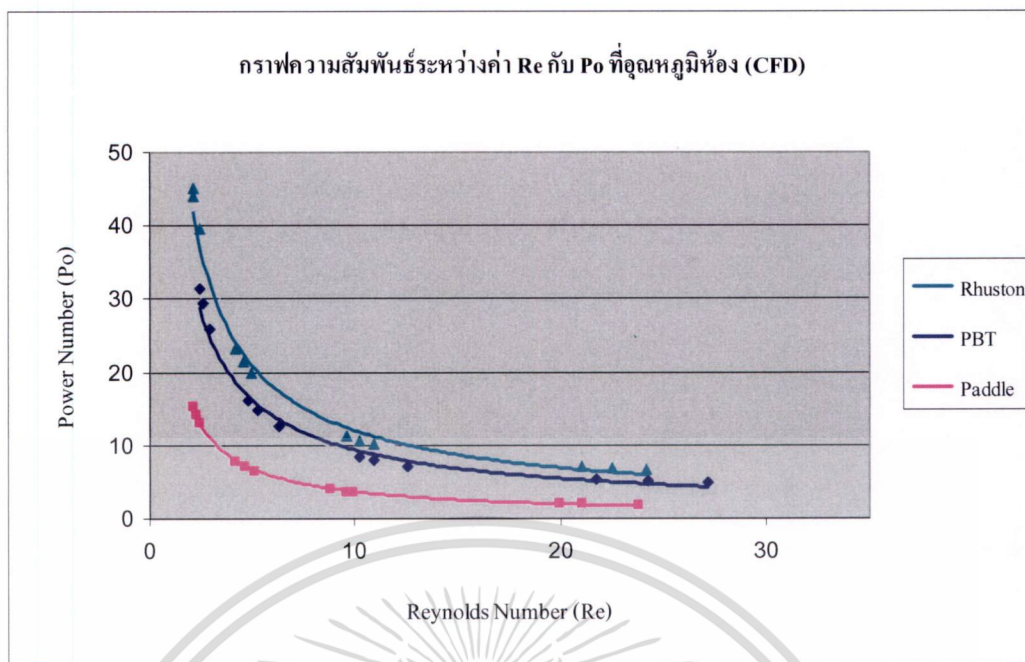
μ คือ ความหนืด (Pa.s)

τ คือ แรงบิด (N.m)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม rad/s

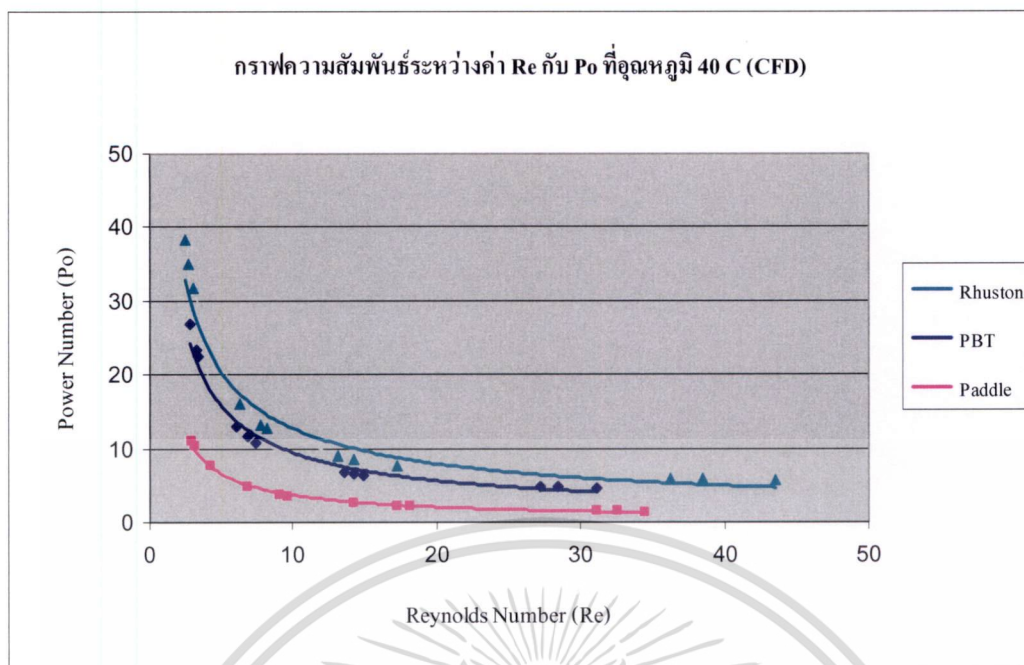
ผลที่ได้จากการจำลองนั้นตั้งแสดงอยู่ในรูปที่ 4-9, รูปที่ 4-10 และรูปที่ 4-11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power number กับค่า Reynolds พบว่า

- ที่อุณหภูมิห้อง ($28^\circ C$) ค่า Power number ของใบกวนแบบรัชตัน มีค่ามากที่สุด แต่ที่ค่า Reynolds number มากที่สุดใบกวนที่ให้ค่า Power number ได้มากที่สุดคือใบกวนแบบพิทซ์เบลด
- ที่อุณหภูมิ $40^\circ C$ ค่า Power number ของใบกวนแบบรัชตัน มีค่ามากที่สุด และที่ค่า Reynolds number มากที่สุดใบกวนแบบรัชตัน ยังคงมีค่า Power number มากที่สุด
- ที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ ค่า Power number ของใบกวนแบบรัชตัน มีค่ามากที่สุด และที่ค่า Reynolds number มากที่สุดใบกวนแบบรัชตัน มีค่า Power number มากที่สุด



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิต้อง ได้จากการจำลอง

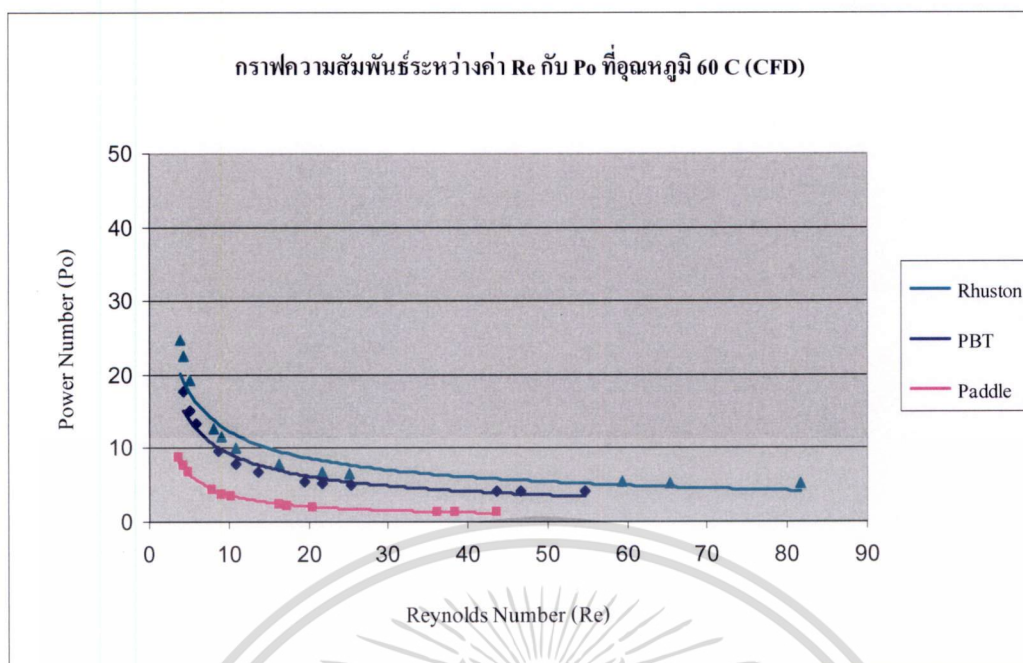
กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิต้อง ภายในกราฟได้แบ่งกลุ่มของจุดต่างๆ ออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 3 จุดในแต่ละจุดเป็นเวลาที่ใช้ในการวัดค่าความหนืดที่เวลา 10, 20 และ 30 min โดยพิจารณาที่ค่า Re เท่ากัน ได้ผลการทดลองดังนี้ ที่ความเร็ว 50 rpm ใบกวนแบบพิทซ์เบลตมีค่า Re สูงที่สุด ใบกวนแบบแพดเดิลมีค่า Re ต่ำที่สุด จากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการกวน ที่ความเร็ว 100 rpm พบว่าใบกวนแบบพิทซ์เบลตมีค่า Re มากที่สุด เมื่อเพิ่มความเร็วในการกวน ที่ความเร็ว 200 rpm ใบกวนแบบรัชตันและใบกวนแบบแพดเดิลมีค่า Re ใกล้เคียงกัน ใบกวนแบบแพดเดิลมีค่า Re ต่ำสุด และสุดท้ายใช้ความเร็ว 400 rpm พบว่าใบกวนแบบพิทซ์เบลต มีค่า Re สูงที่สุด ใบกวนแบบรัชตัน ใบกวนแบบแพดเดิลมีค่า Re ต่ำกว่าตามลำดับ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิ $40^{\circ}c$ ได้จากการจำลอง

กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิห้อง ภายในกราฟได้แบ่งกลุ่มของจุดต่างๆ ออกเป็น 4 กลุ่มๆละ 3 จุดในแต่ละจุดเป็นเวลาที่ใช้ในการวัดค่าความหนืดเป็นเวลา 10, 20 และ 30 min ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

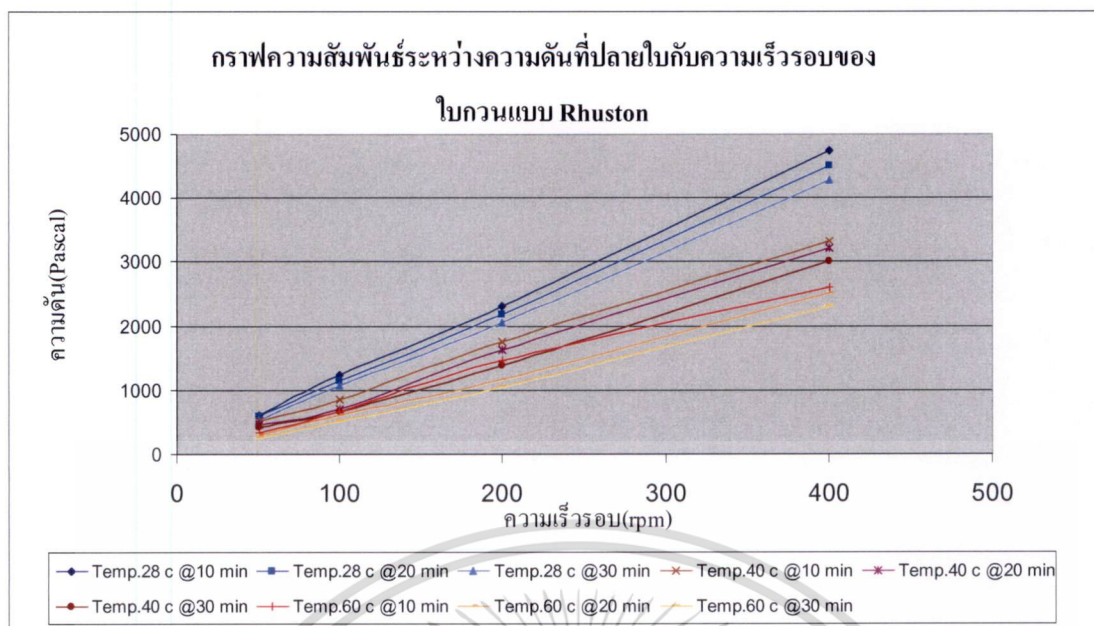
ที่ความเร็ว 50 rpm ใบกวนแบบแพดเดิลมีค่า Re มากที่สุด เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวนเป็นที่ความเร็ว 100 rpm พบว่าใบกวนแบบแพดเดิลมีค่า Re มากที่สุด แต่ใบกวนแบบรัชตันและใบกวนแบบพิทช์เบลดมีค่า Re ใกล้เคียงกัน จากนั้นที่ความเร็วในการกวน 200 rpm ใบกวนทั้งสามแบบมีค่า Re ใกล้เคียงกัน และที่ความเร็ว 400 rpm ใบกวนแบบรัชตันมีค่า Re มากที่สุด รองลงมาคือใบกวนแบบแพดเดิลและแบบพิทช์เบลด



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ ได้จากการจำลอง

กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิห้อง ภายในกราฟได้แบ่งกลุ่มของจุดต่างๆ ออกเป็น 4 กลุ่มๆละ 3 จุดในแต่ละจุดเป็นเวลาที่ใช้ในการวัดค่าความหนืดเป็นเวลา 10, 20 และ 30 min ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ที่ความเร็ว 50 rpm ใบกวนแบบพิทช์เบลด์ มีค่า Re มากที่สุด รองลงมาคือใบกวนแบบแพดเดิลและใบกวนแบบรัชตันมีค่า Re ใกล้เคียงกัน ต่อมาเมื่อเพิ่มความเร็วเป็น 100 rpm ใบกวนแบบพิทช์เบลด์มีค่า Re มากที่สุด รองลงมาคือใบกวนแบบแพดเดิลและใบกวนแบบรัชตันมีค่า Re ใกล้เคียงกัน จากนั้นที่ความเร็ว 200 rpm ใบกวนแบบรัชตันและใบกวนแบบพิทช์เบลด์ มีค่า Re ใกล้เคียง ใบกวนแบบแพดเดิลมีค่า Re น้อยที่สุด ลำดับสุดท้ายที่ความเร็ว 400 rpm ใบกวนแบบรัชตันมีค่า Re สูงที่สุดรองลงมาคือใบกวนแบบพิทช์เบลด์ และใบกวนแบบแพดเดิล

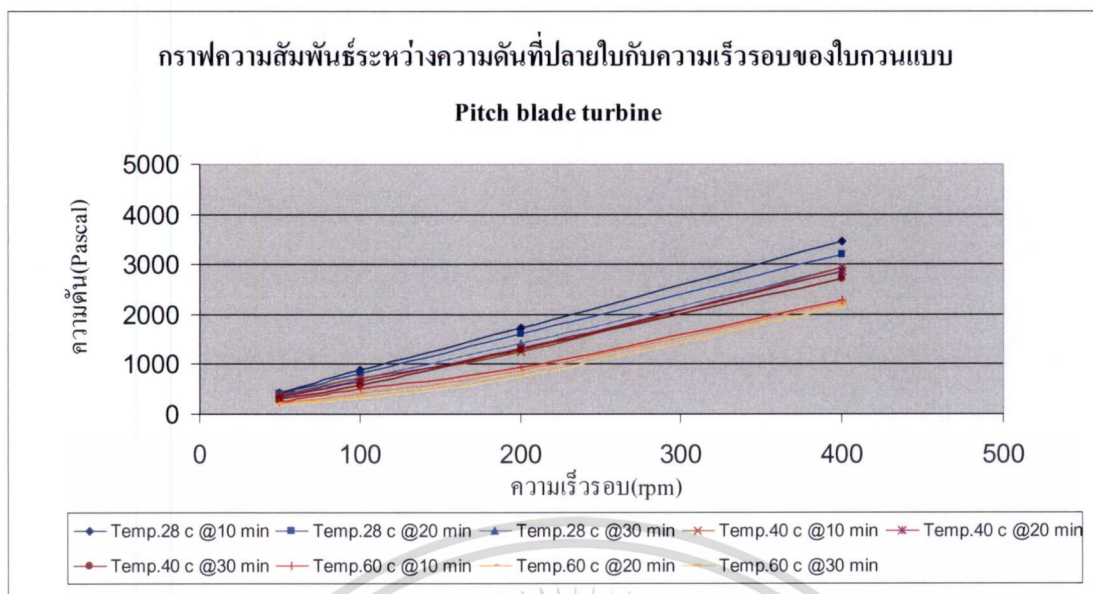


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ปลายใบกับความเร็วยรอบของใบกวนแบบรัชตัน

กราฟรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนกับความเร็วยรอบที่ใช้ในการกวน ของใบกวนแบบรัชตันพบว่า

- ที่ความเร็ว 50 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนจากมากไปน้อยคือที่อุณหภูมิห้อง มีค่าแรงดันสูงสุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 40 °c และ 60 °c
- ที่ความเร็ว 100 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนที่อุณหภูมิห้อง มีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 40 °c และ 60 °c แต่ที่อุณหภูมิ 40 °c ที่เวลา 20 และ 30 min มีค่าแรงดันที่ปลายใบกวนใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 60 °c ที่เวลา 10 min
- ที่ความเร็ว 200 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนจากมากไปน้อยคือที่อุณหภูมิห้อง มีค่าแรงดันสูงสุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 40 °c และ 60 °c แต่ที่อุณหภูมิ 40 °c ที่เวลา 30 min แรงดันที่ปลายใบมีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 60 °c ที่เวลา 10 min
- ที่ความเร็ว 400 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนที่อุณหภูมิห้อง มีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 40 °c และ 60 °c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

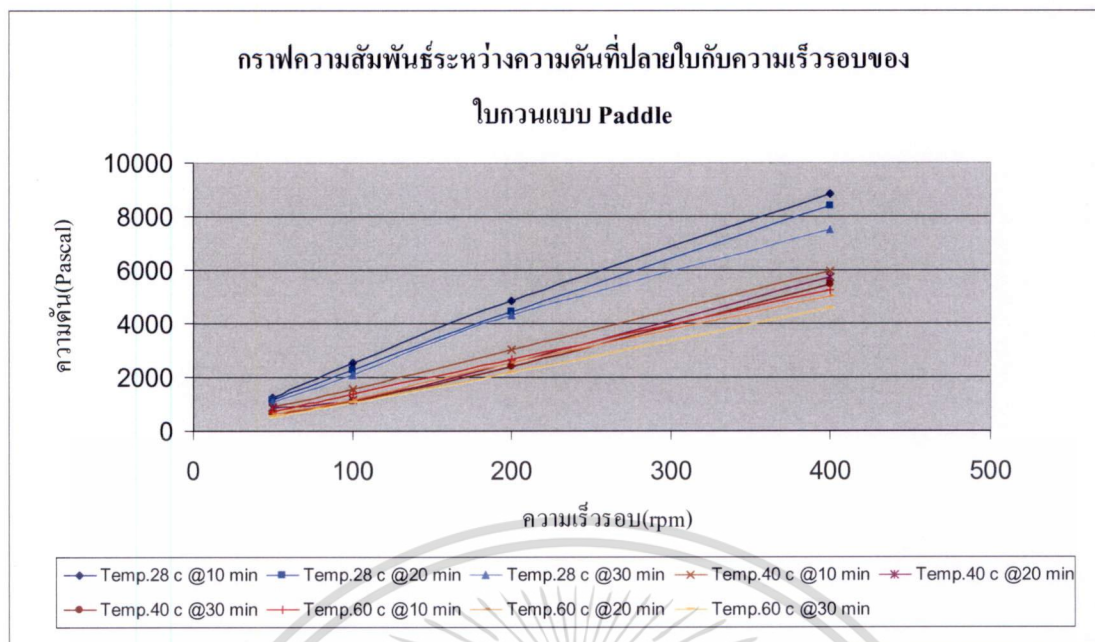


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ปลายใบกับความเร็วยรอบของใบกวนแบบพิทช์
เบลด

กราฟรูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนกับความเร็วยรอบที่ใช้ในการกวน ของใบกวนแบบพิทช์เบลดพบว่า

- ที่ความเร็ว 50 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนที่อุณหภูมิห้อง, 40 °c และ 60 °c มีค่าใกล้เคียงกัน
- ที่ความเร็ว 100 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนที่อุณหภูมิห้อง มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ, 40 °c และ 60 °c
- ที่ความเร็ว 200 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนจากมากไปน้อยคือที่อุณหภูมิห้อง มีค่าแรงดันสูงที่สุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 40 °c และ 60 °c แต่ที่อุณหภูมิ 40 °c ที่เวลา 10, 20 และ 30 min แรงดันที่ปลายใบมีค่าใกล้เคียงกัน
- ที่ความเร็ว 400 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนที่อุณหภูมิห้อง มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 40 °c และ 60 °c แต่ที่อุณหภูมิห้องที่เวลา 30 min มีค่าแรงดันใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 40 °c ที่เวลา 10 และ 20 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ปลายใบกับความเร็วรอบของใบกวนแบบแพดเดิล

กราฟรูปที่ 4.14 เป็นกราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนกับความเร็วยรอบที่ใช้ในการกวน ของใบกวนแบบแพดเดิล

- ที่ความเร็ว 50 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนที่อุณหภูมิห้อง, 40 °c และ 60 °c มีค่ามากและลดลงตามเวลาและอุณหภูมิที่สูงขึ้น
- ที่ความเร็ว 100 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนที่อุณหภูมิห้อง มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 40 °c และ 60 °c แต่ที่อุณหภูมิ 40 °c ที่เวลา 20 และ 30 min แรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 60 °c ที่เวลา 20 และ 30 min
- ที่ความเร็ว 200 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนที่อุณหภูมิห้อง มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 40 °c และ 60 °c แต่ที่อุณหภูมิ 40 °c ที่เวลา 20 และ 30 min แรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 60 °c ที่เวลา 20 min
- ที่ความเร็ว 400 *rpm* แรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนที่อุณหภูมิห้อง มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 40 °c และ 60 °c มีค่ามากและลดลงตามเวลาและอุณหภูมิที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

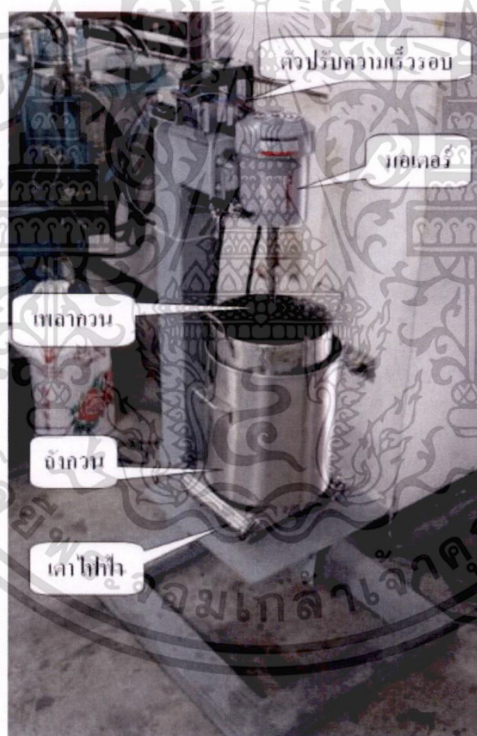
บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

การทำงานของเครื่องกวนยางรักที่ได้นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นเครื่องกวนขนาดเล็ก ลักษณะการทำงานโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดกำลังในการขับเคลื่อน ทำการส่งผ่านกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าไปยังสายพานและเกียร์ทด จากนั้นถ่ายทอดลงสู่เพลลาไปยังใบกวนแบบต่างที่ได้เลือกใช้ ในส่วนของถังกวนนั้นเป็นถังกวนที่ได้ออกแบบขึ้นให้เหมาะสมกับงานกวนยางรัก โดยในการทดลองการกวนแต่ละครั้งจะทำการเพิ่มความเร็วรอบในการกวนและเพิ่มอุณหภูมิด้วยเตาไฟฟ้าจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ

5.1.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

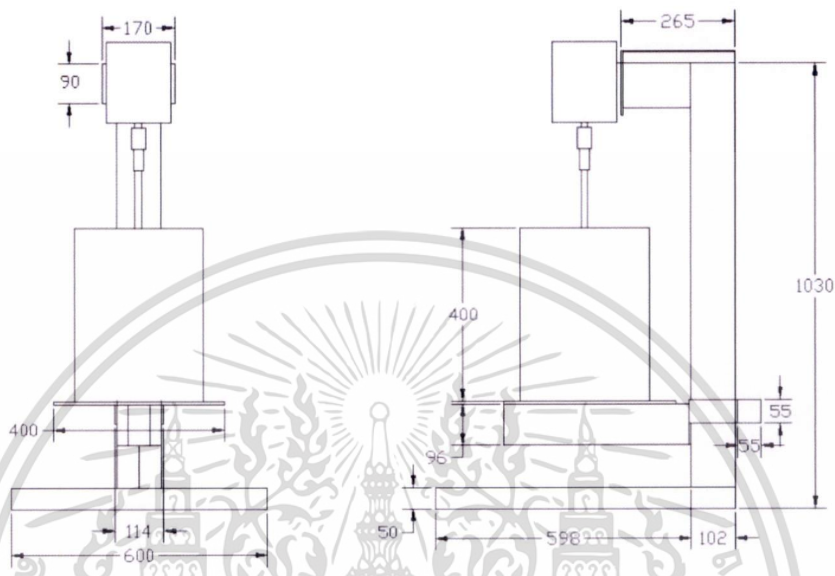


รูปที่ 5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 เครื่องกวนยางรัก

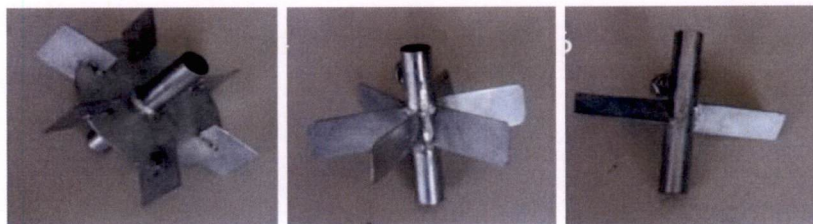
เครื่องกวนยางรักดังแสดงในรูปที่ 5.2 มีลักษณะคล้ายเครื่องเจาะรู มีความสูงไม่รวมมอเตอร์ไฟฟ้า) ขนาด 1300 mm. ความกว้างที่ฐานประมาณ 700x600 mm. มีถาดรองรับถังกวนขนาด 400x400 mm. สามารถปรับเลื่อนความสูงต่ำได้



รูปที่ 5.2 ขนาดของเครื่องกวนยางรัก

5.1.3 รูปแบบใบกวน

แบบใบกวนยางรักที่ได้เลือกใช้มีทั้งหมด 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยเรียงลำดับจากซ้ายมือไปขวามือดังนี้ 1. ใบกวนแบบริชตัน, 2. ใบกวนแบบพิทช์เบลต, 3. ใบกวนแบบแพดเดิล โดยแบบใบกวนทั้ง 3 แบบนี้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน 120 mm. ทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากสารที่นำมาทำการทดลอง



รูปที่ 5.3 แสดงใบกวนเรียงจากซ้ายไปขวาดังนี้ ใบกวนแบบริชตัน แบบพิทช์เบลต แบบแพดเดิล

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 ถังกวนหรือภาชนะกวน

ถังกวนหรือภาชนะกวนดังแสดงในรูปที่ 5.4 นี้เป็นส่วนหนึ่งในชุดทดลองของการกวนยางรัก จากทฤษฎีการออกแบบถังกวนทำให้ได้ถังกวนที่มีขนาดความสูง 350 mm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 250 mm. โดยติดแผ่นกั้นขนาดความกว้าง 25 mm. สูง 350 mm. จำนวน 4 อันที่ผิวด้านในถังกวนโดยทำมุม 90° ต่อกัน โดยเลือกใช้สแตนเลสเป็นวัสดุที่ใช้ในการสร้างถังกวน



รูปที่ 5.4 ลักษณะถังกวนที่ใช้ในการกวนยางรัก

5.1.5 เครื่องมือวัด

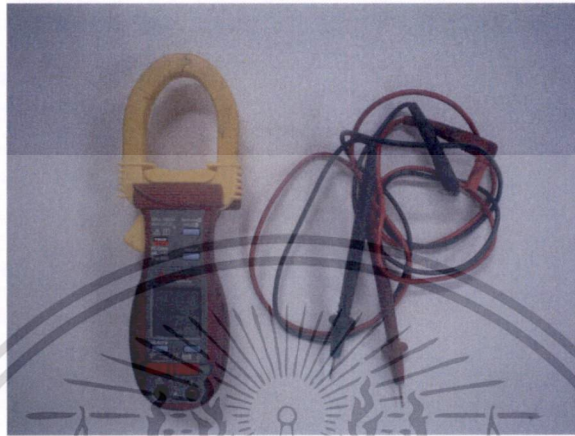
1. เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer) ยี่ห้อ PROMAX รุ่น MR-275 ใช้สำหรับวัดความเร็วรอบของใบกวนที่บริเวณแกนเพลลาของใบกวน ให้ตรงตามค่าความเร็วรอบที่ได้เลือกใช้คือ 50, 100, 200 และ 400 rpm



รูปที่ 5.5 เครื่องวัดความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงานเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องวัดการใช้กำลังไฟฟ้า เครื่องมือวัดนี้ใช้วัดการใช้กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้โดยแสดงผลออกมาคือค่าเพาเวอร์ในหน่วยวัตต์ (watt) เป็นเครื่องมือชื่อ AMPROBE รุ่น ACD-41PQ



รูปที่ 5.6 เครื่องวัดการใช้กำลังไฟฟ้า

3. เครื่องวัดความหนืดแบบเซย์โบลต์ยูนิเวอร์แซล ทำด้วยสแตนเลสทรงกระบอกมีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 1. ส่วนบนมีขอบ 2 ชั้น ขอบบนชั้นในเป็นขีดจำกัดปริมาตรบรรจุของเหลวตัวอย่างที่ต้องการวัดความหนืด ส่วนขอบบนชั้นนอกสำหรับรองรับของเหลวตัวอย่างที่ล้นออกมา ส่วนล่างของทรงกระบอกมีรูสำหรับสอดใส่ชิ้นส่วนกลมหที่เจาะรูตรงไว้เรียกชิ้นส่วนนี้ว่าออริฟิส ทิป (Orifice tip) ซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนใส่ได้ทั้งแบบ เซย์โบลต์ยูนิเวอร์แซล หรือแบบเซย์โบลต์ฟูรอล ส่วนล่างจะปิดไว้ด้วยไม้คอร์ค เพื่อป้องกันไม่ของเหลวตัวอย่างไหลออกมาก่อนทดสอบ

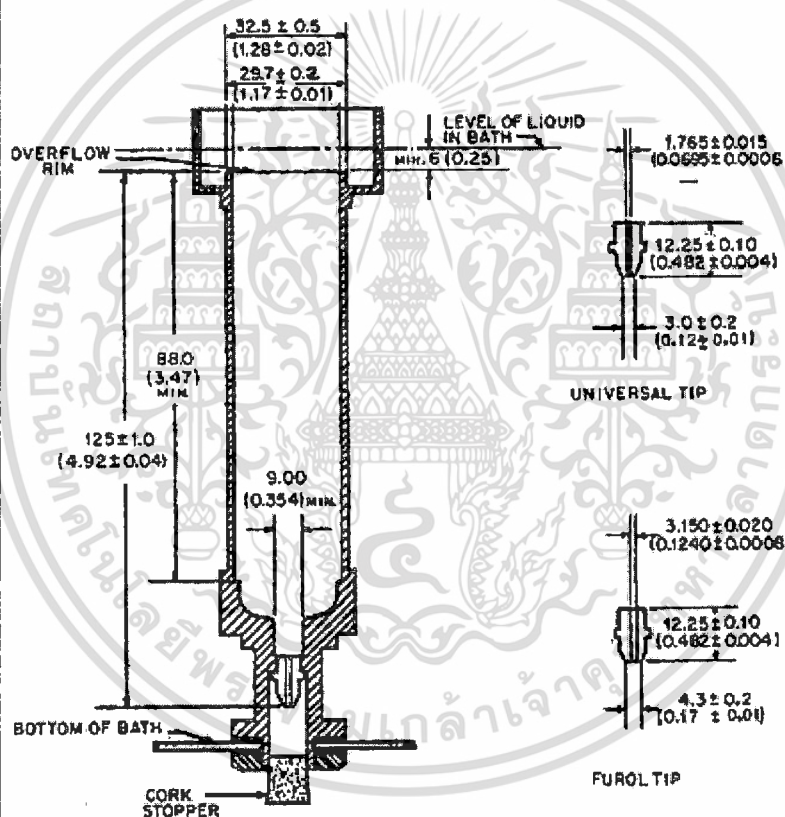
การวัดหาค่าความหนืดของยางรักด้วยวิธี เซย์โบลต์ยูนิเวอร์แซล หรือแบบเซย์โบลต์ฟูรอล จะวัดที่อุณหภูมิระหว่าง $21-98^{\circ}C$ ($70-210^{\circ}F$) มีวิธีการวัดโดยให้ยางรักปริมาตร 60 c.c. ไหลผ่านรูที่มีวัดผ่าศูนย์กลาง 1.77 mm. ความยาว 12.25 mm. แล้วจับเวลาเป็นวินาทีที่อุณหภูมิ 70,100,130,210 F ค่าความหนืดที่ได้มีหน่วยเป็นวินาทีเซย์โบลต์ (Saybolt Universal Seconds, SUS) เครื่องมือนี้ไม่เหมาะกับของเหลวที่ใช้เวลาการไหลน้อยกว่า 32 s และถ้าของเหลวที่จะวัดมีความหนืดสูงก็จะใช้วิธีวัดแบบเซย์โบลต์ฟูรอล วิธีการวัดเหมือนกัน

เพียงแต่แบบเซย์โบลต์ฟูรอล ออริฟิส ทิป รูจะมีขนาดวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1240 in. มีความ

ยาว 0.4823 in. ใช้สำหรับของเหลวที่มีความหนืดสูงกว่า 1000 sus อย่างเช่น น้ำมันเตา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความหนืดแบบยูนิเวอร์แซล

1. เครื่องมือวัดความข้นใสแบบเซย์โบลต์ยูนิเวอร์แซล ตามมาตรฐาน ASTM
2. ขวดแก้วกันโปร่ง ขนาดความจุ 60 c.c.
3. ตามชั่งละเอียด 1 เครื่อง
4. อุปกรณ์สำหรับดูดของเหลว 1 ชุด
5. นาฬิกาที่จับเวลาและวัดได้ละเอียดถึง 0.2 s
6. เทอร์โมมิเตอร์



รูปที่ 5.7 แบบแสดงรายละเอียดเครื่องวัดค่าความข้นใส

ลำดับขั้นตอนและวิธีการวัด

1. นำยางรักที่จะทำการทดสอบจำนวน 60 c.c. ใส่ในเครื่องมือทดสอบ
2. ทำความสะอาดท่อทางน้ำมันในเครื่องทดสอบ โดยล้างด้วยเบนซินแล้วปล่อยให้แห้งสนิท
3. เทยางรักที่ผ่านการกรองเรียบร้อยแล้วจะทดสอบลงไปให้ระดับของยางรักที่ทดสอบควรจะมีระดับสูงกว่าขอบในของท่อเล็กน้อย
4. ใช้ใบพัดกวาน้ำมันที่จะทดสอบอยู่เสมอมจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่และวัดอุณหภูมิในเครื่องมือทดลอง
5. นำขวดแก้วโปร่งสำหรับรองน้ำมันขนาด 60 c.c. ซึ่งทราบน้ำหนักของขวดแล้ว วางไว้ใต้จุกก๊อกโดยกะให้ยางรักไหลออกมาจากรูสัมผัสกับข้างของขวดแก้วเล็กน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้ยางรักกระเซ็นหรือเป็นฟอง
6. ดึงจุกก๊อกออกพร้อมกับเริ่มจับเวลา และเลิกจับเวลาเมื่อยางรักลงไปอยู่ในขวดจนได้ระดับ 60 c.c. บันทึกเวลาที่ได้เป็นวินาที แล้วนำขวดที่บรรจุน้ำมันทดสอบไปชั่งหาน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักถ้วยเปล่า น้ำหนักถ้วยขณะมียางรัก และอุณหภูมิของน้ำมัน

$$v = 2.45t - 100/t \quad \text{เมื่อ } t < 90 \text{ (s)} \quad (5-1)$$

$$v = 2.46t \quad \text{เมื่อ } t > 90 \text{ (s)} \quad (5-2)$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (5-3)$$

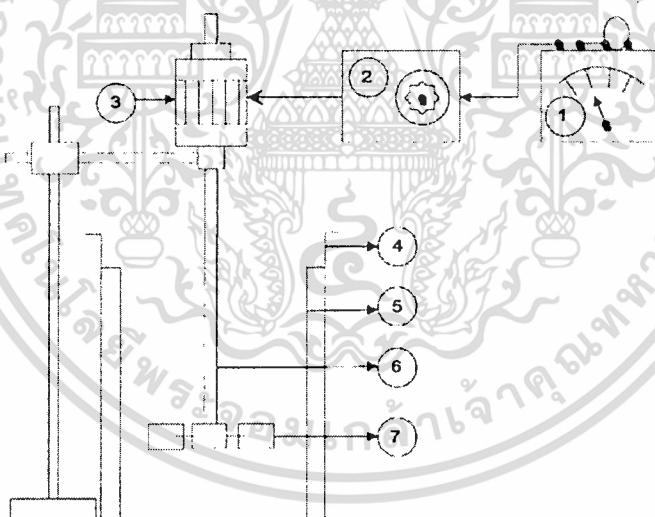


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **รูปที่ 5.8** เครื่องวัดค่าความข้นใส ณ อุณหภูมิที่กำหนดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 วิธีการทดลอง

1. ทำการกวนอย่างช้าที่อุณหภูมิห้อง ($28^{\circ}C$), $40^{\circ}C$ และ $60^{\circ}C$
2. ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของใบกวนที่ความเร็ว 50, 100, 200 และ 400 rpm
3. วัดความหนืดที่เวลา 10, 20 และ 30 min ตามลำดับ
4. ใช้วัตต์มิเตอร์วัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ของใบกวนที่เวลา 10, 20 และ 30 min
5. เปลี่ยนแบบใบกวนที่ใช้ในการทดลองจาก แบบรัชตัน แบบพิตช์เบลตและแบบแพดเดิล
6. นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Power number และ Reynolds number

การประกอบอุปกรณ์การทดลอง



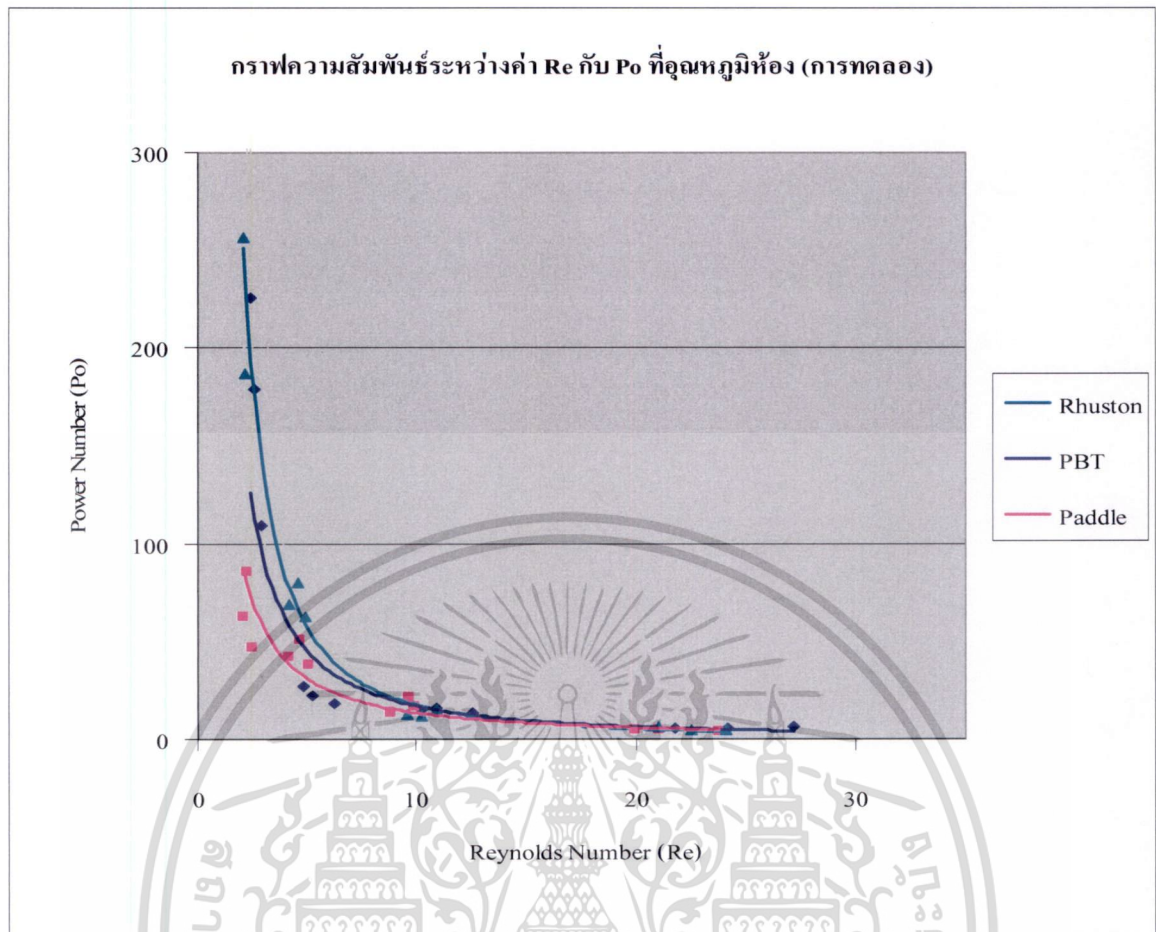
รูปที่ 5.9 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องกวนผสมที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบต่างๆ

1. วัตต์มิเตอร์ ใช้สำหรับวัดการใช้กำลังของมอเตอร์
2. ตัวปรับความเร็วรอบ ติดอยู่กับที่เครื่องเจาะ
3. มอเตอร์ส่งกำลัง ขนาด 1/2 Hp
4. ถังกวน
5. baffle
6. เพลลา
7. ใบกวน

5.3 ผลการทดลอง

ผลที่ได้จากการทดลองนั้นเราสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Power number และ Reynolds number ได้ตั้งรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.11 โดยในแกนในแนวตั้งจะแสดงถึงค่า Power number และแกนในแนวนอนจะแสดงถึงค่า Reynolds number

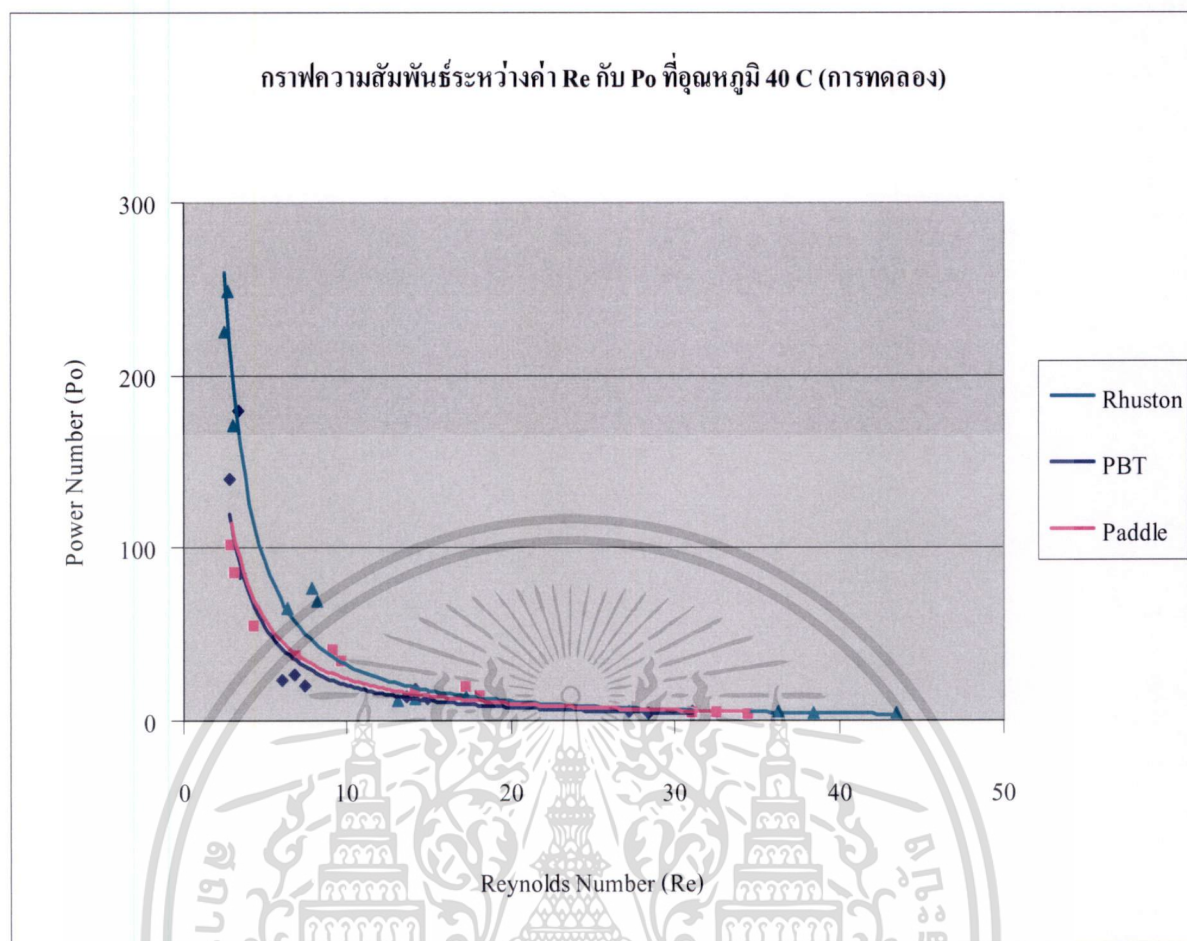


รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิต้อง ได้จากการทดลอง

กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.10 เป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิต้องที่ได้จากการทดลองภายในกราฟได้แบ่งกลุ่มของจุดต่างๆ ออกเป็น 4 กลุ่มๆละ 3 จุดในแต่ละจุดเป็นเวลาที่ใช้ในการวัดค่าความหนืดที่เวลา 10, 20 และ 30 min ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ที่ความเร็ว 50 rpm ไบควนแบบพิทช์เบลตมีค่า Re สูงที่สุด ไบควนแบบแพตเติลมีค่า Re ต่ำที่สุด เมื่อเพิ่มความเร็วเป็น 100 rpm ไบควนแบบพิทช์เบลต ไบควนแบบรัชตันและไบควนแบบแพตเติลมีค่า Re ใกล้เคียงกัน จากนั้นเพิ่มความเร็วในการกวนเป็น 200 rpm ไบควนแบบพิทช์เบลต มีค่า Re สูงที่สุด ไบควนแบบรัชตันและไบควนแบบแพตเติลมีค่า Re ใกล้เคียงกัน และที่ความเร็ว 400 rpm ไบควนแบบรัชตันและไบควนแบบพิทช์เบลต มีค่า Re สูงที่สุด ไบควนแบบรัชตันและไบควนแบบแพตเติลมีค่า Re น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

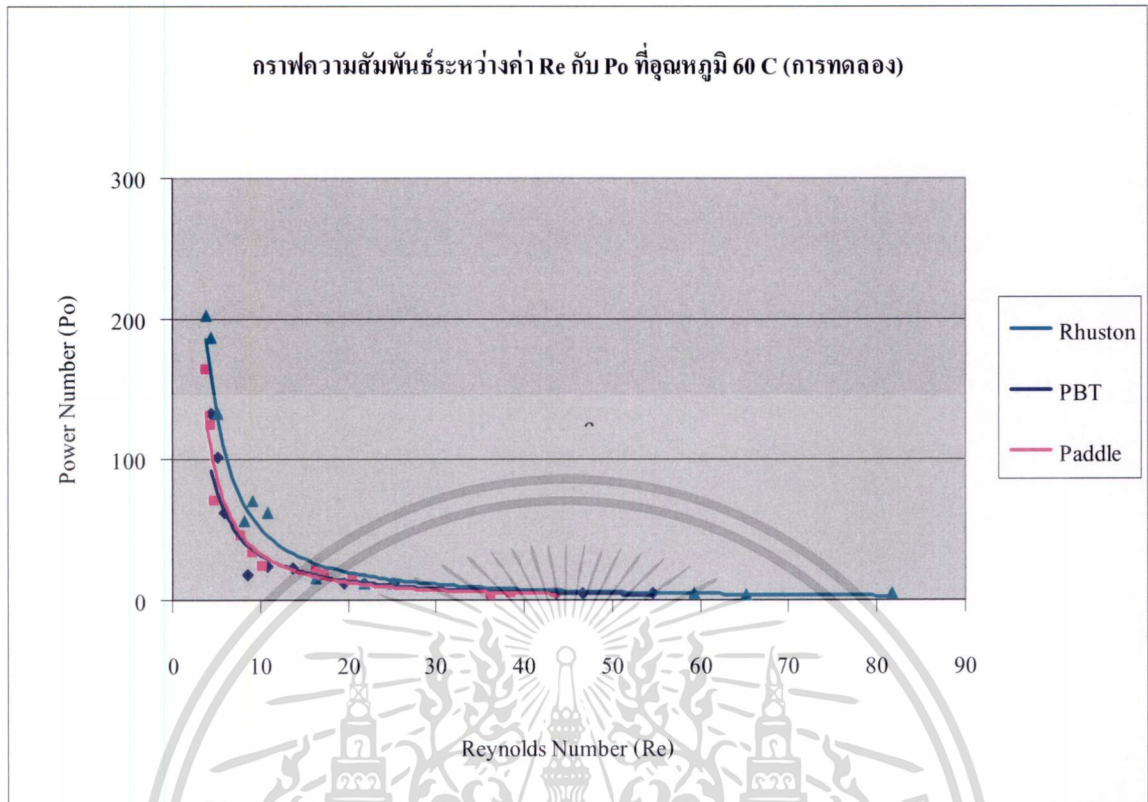


รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิ 40 °c ได้จากการทดลอง

กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.11 เป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิ 40 °c ที่ได้จากการทดลอง ภายในกราฟได้แบ่งกลุ่มของจุดต่างๆ ออกเป็น 4 กลุ่มๆละ 3 จุด ในแต่ละจุดเป็นเวลาที่ใช้ในการวัดค่าความหนืดเป็นเวลา 10, 20 และ 30 min ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ที่ความเร็ว 50 rpm ใบกวนแบบทั้ง 3 แบบมีค่า Re ใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มความเร็วเป็น 100 rpm ใบกวนแบบแพดเดิลมีค่า Re สูงกว่า ใบกวนแบบรัชตันมีและใบกวนแบบพิทช์เบลต ซึ่งมีค่า Re ใกล้เคียงกัน เมื่อใช้ความเร็วในการกวน 200 rpm ใบกวนแบบแพดเดิลมีค่า Re สูงกว่า ใบกวนแบบพิทช์เบลต และใบกวนแบบรัชตัน เมื่อเพิ่มความเร็วที่ใช้ในการกวนเป็น 400 rpm ใบกวนแบบรัชตันมีค่า Re สูงที่สุดรองลงมาคือใบกวนแบบแพดเดิลและใบแบบพิทช์เบลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



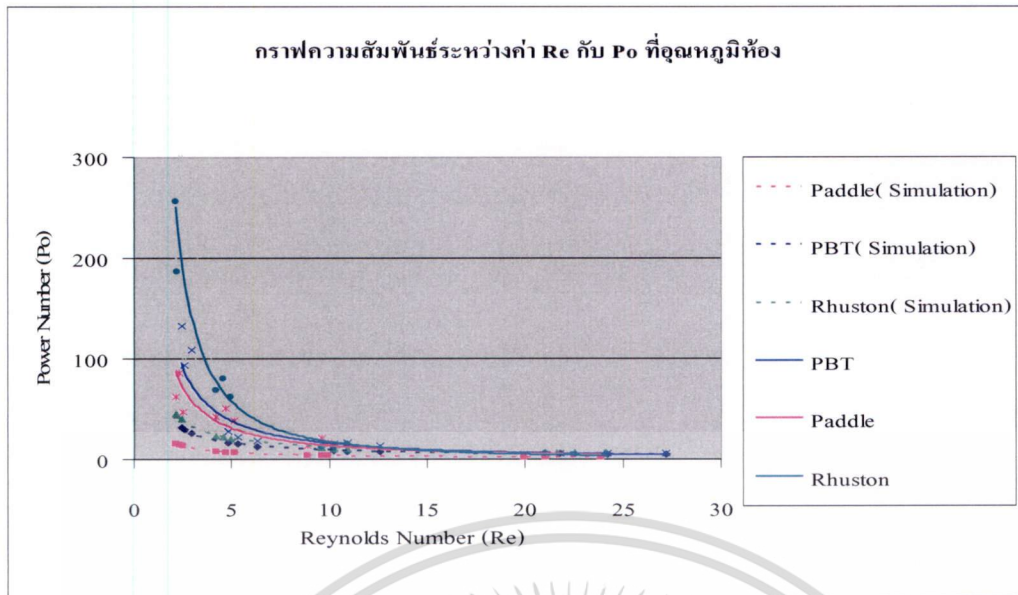
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิ 60 °c ได้จากการทดลอง

กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.12 เป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Po ที่อุณหภูมิ 60 °c ที่ได้จากการทดลองภายในกราฟได้แบ่งกลุ่มของจุดต่างๆ ออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 3 จุด ในแต่ละจุดเป็นเวลาที่ใช้ในการวัดค่าความหนืดที่เวลา 10, 20 และ 30 min ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

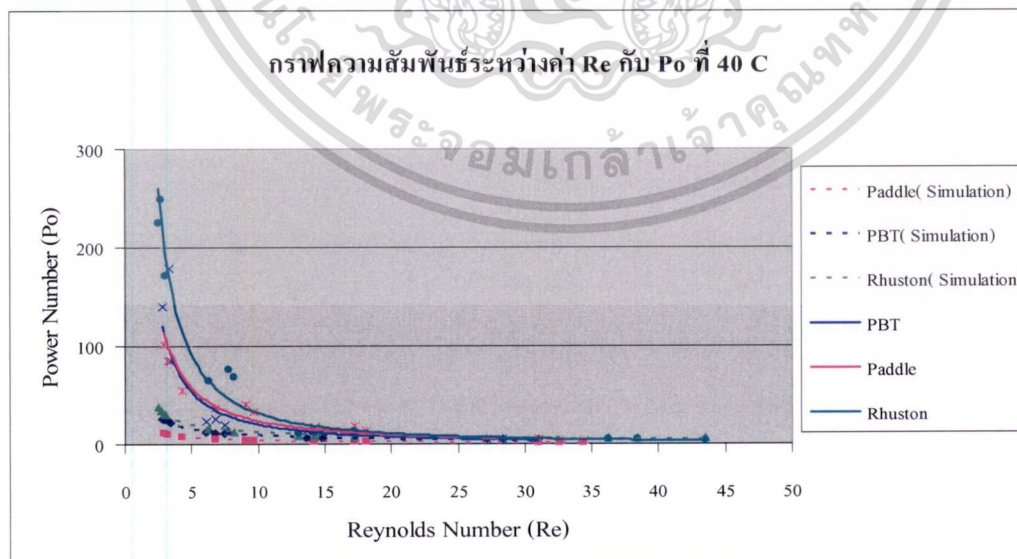
ที่ความเร็ว 50 rpm ใบกวนทั้ง 3 แบบมีค่า Re ใกล้เคียงกัน ที่ความเร็ว 100 rpm ใบกวนแบบพิทช์เบลตมีค่า Re สูงกว่าใบกวนอีก 2 แบบ จากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการกวนเป็น 200 rpm แบบพิทช์เบลตมีค่า Re สูงกว่าใบกวนอีก 2 แบบ ซึ่งมีค่า Re ใกล้เคียงกัน สุดท้ายที่ความเร็วในการกวน 400 rpm ใบกวนแบบรัศตันมีค่า Re สูงที่สุดรองลงมาก็คือใบแบบพิทช์เบลตและใบกวนแบบแพดเดิล

จากนั้นเมื่อนำกราฟที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขและกราฟที่ได้จากการทดลองมาเขียนเปรียบเทียบกันสามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 เป็นการเปรียบเทียบกราฟที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง 28 °c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

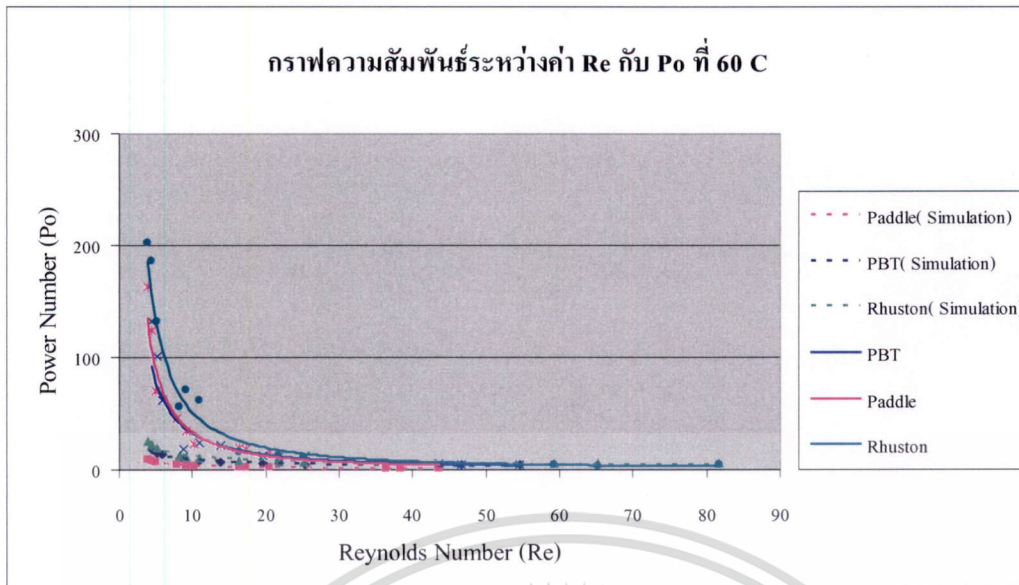


รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบค่า Re กับ Po ของการทดลองกับการจำลองเชิงตัวเลข ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าที่ค่า Re ต่ำ ในช่วงแรกที่มีความเร็วรอบ 50 rpm และ 100 rpm ความแตกต่างของค่า Po มีค่าค่อนข้างมาก แต่เมื่อค่า Re เพิ่มสูงขึ้นที่ความเร็วรอบ 200 rpm และ 400 rpm ค่า Po มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ในกราฟรูปที่ 5.14 และ รูปที่ 5.15 ลักษณะแนวโน้มของกราฟนั้น แสดงออกมาในทิศทางเดียวกันกับกราฟในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบค่า Re กับ Po ของการทดลองกับการจำลองเชิงตัวเลขที่อุณหภูมิ 40 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบค่า Re กับ Po ของการทดลองกับการจำลองเชิงตัวเลข ที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการจำลองการกวนเปรียบเทียบกับผลการทดลองนั้นทำให้สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้คือ

1. จากการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขทำให้สามารถเลือกใช้แบบใบกวนให้เหมาะสมดังนี้

- ที่อุณหภูมิห้องควรเลือกใช้ใบกวนแบบพิทช์เบลต ที่ความเร็ว

ในการกวน 400 rpm

- ที่อุณหภูมิ 40 °c ควรเลือกใช้ใบกวนแบบรัชตันที่ความเร็ว 400 rpm

- ที่อุณหภูมิ 60 °c ควรเลือกใช้ใบกวนแบบรัชตันที่ความเร็ว 400 rpm

2. ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วในถังกวนที่ใช้ใบกวนชนิดต่างๆ ที่ได้ทำการจำลองการกวนนั้นมีลักษณะการกระจายตัวของความเร็วเป็นรูปแบบของใบกวน

3. ความดันที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกวนของใบกวนแบบต่างๆ มีค่าลดลงเนื่องจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสูงขึ้น

4. จากกราฟที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขกับการทดลองการกวนนั้นค่า Po มีค่าต่างกันค่อนข้างมากเนื่องจากค่ากำลังที่ใช้ในการคำนวณเพื่อให้ได้ค่า Po ที่ได้จากการทดลองเป็นค่ากำลังไฟที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนค่ากำลังที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่า Po ของกราฟที่ได้จากการจำลองนั้นเป็นค่าทอร์คที่เกิดขึ้นจากการใช้ใบกวนในแต่ละแบบ จึงทำให้ค่า Po มีค่าต่างกันค่อนข้างมากในช่วงความเร็วในการกวนน้อย แต่แนวโน้มของกราฟที่ได้จากการจำลองการกวนนั้นมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับที่ได้จากการทดลอง

5. จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่าในการกวนที่มีความเร็วในการกวนต่ำ(ค่า Re น้อย) มีความแตกต่างจากผลการทดลองเนื่องจาก แบบจำลองความปั่นป่วนนั้นอาจไม่เหมาะสมต่อการกวนในช่วงความเร็วต่ำ แต่ในช่วงความเร็ว 400 rpm นั้นผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องมากกว่าซึ่งในช่วงความเร็วนี้ทำให้เกิดความปั่นป่วนอย่างชัดเจน

6. จากเทคนิคที่ใช้ในการจำลองคือการกำหนดของเหลวภายในถังกวนเป็น moving reference frame โดยอาศัยแนวคิดการไหลผ่านของของเหลวผ่านใบจักรในอุโมงค์น้ำ จึงนำมาประยุกต์ใช้กับการจำลองการกวนในถังกวน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rm. Muthiah, R.Manjari, V.N. Krishnamurth. Rheology of HTPB Propellant: Effect of mixing speed and Mixing Time ,Defence Science Journal,Vol 43, No 2, April 1993, pp 167-172
- [2] L.Rudolph, M. Schafer, V. Atiemo-Obeng and Kraume. Experimental and Numerical Analysis of Power Consumption for Mixing of High Viscosity Fluids with A Co-Axial Mixer. Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design, 2007, 85(A5):568-575
- [3] Wilfried F. Schierholz. The Mixing Behaviour of non-Newtonian Fluids in stirred Tank. NAFEMS Seminar: Simulation of Complex Flows (CFD) Niedernhausen/Wiesbaden, Germany, April 25-26, 2005.
- [4] D.Ankamna Rao, P.Sivasshanmugam . Experimental and CFD simulation studies on power consumption in mixing using energy saving turbine agitator, Journal of Industrial and Engineering Chemistry 16 (2010) 157–161
- [5] สาธิต พงษ์ดวง. 2553 “การศึกษาเทคนิคเบื้องต้นเทคนิคในการจำลองการไหลที่มีคาวิตีขึ้นกึ่งหันน้ำแบบบัลล์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [6] Tatterson, G. B. (1994). Scaleup and Design of Industrial Mixing Processes, McGraw Hill, New York
- [7] กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม, (2551), ศึกษาयरักเพื่ออนุรักษ์ภูมิปัญญาไทย
- [8] Edward L. Paul, Victor A.Atiemo-obeng, Suzanne M.Kresta. Handbook of Industrial Mixing Science and practice, Wiley-Interscience

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[9] Dickey, D.S., et al. (2001) Mixing Equipment (Impeller Type): AIChE Equipment Testing Procedure, 3rd ed., AIChE, New York.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
 ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองและจากจำลองของใบกวน
 แบบต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\epsilon$ ของใบกวนแบบพิทช์เบลต ที่ $28^{\circ}c$

ใบกวนแบบพิทช์เบลต อุณหภูมิห้อง.....

| ลำดับ ที่ | เวลา | ความเร็วรอบ (rpm) | rps | Diameter | Density | viscosity | torque (n-m) | rad/s | Power | Power Number | Reynold Number |
|--------------|------|-------------------|------|----------|---------|-----------|--------------|-------|-------|--------------|-------------------|
| 1 | 10 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 4.460 | 0.07694475 | 5.23 | 0.40 | 31.3143528 | 2.4026906 |
| 2 | 20 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 4.200 | 0.07256414 | 5.23 | 0.38 | 29.5315675 | 2.5514286 |
| 3 | 30 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 3.680 | 0.06382462 | 5.23 | 0.33 | 25.9748282 | 2.9119565 |
| 4 | 10 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 4.470 | 0.15866570 | 10.47 | 1.66 | 16.1431212 | 4.7946309 |
| 5 | 20 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 4.070 | 0.14540930 | 10.47 | 1.52 | 14.7943756 | 5.2658477 |
| 6 | 30 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 3.420 | 0.12403920 | 10.47 | 1.30 | 12.6201179 | 6.2666667 |
| 7 | 10 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 4.200 | 0.32798000 | 20.93 | 6.87 | 8.3424157 | 10.2057143 |
| 8 | 20 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 3.940 | 0.31223900 | 20.93 | 6.54 | 7.9420316 | 10.8791878 |
| 9 | 30 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 3.410 | 0.28104830 | 20.93 | 5.88 | 7.1486729 | 12.5700880 |
| 10 | 10 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 3.940 | 0.82700230 | 41.87 | 34.62 | 5.2588549 | 21.7583756 |
| 11 | 20 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 3.540 | 0.79255630 | 41.87 | 33.18 | 5.0398150 | 24.2169492 |
| 12 | 30 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 3.154 | 0.76083250 | 41.87 | 31.85 | 4.8380854 | 27.1807229 |

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\epsilon$ ของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ $28^{\circ}c$

ใบกวนแบบแพดเดิล

อุณหภูมิห้อง

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ (rpm) | rps | Diameter | Density | Viscosity | Torque (n- m) | rad/s | Power (W) | Power Number | Reynold Number |
|----------|------|----------------------|------|----------|---------|-----------|------------------|-------|--------------|--------------|-------------------|
| 13 | 10 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 5.125 | 0.03764930 | 5.23 | 0.20 | 15.3222080 | 2.0909268 |
| 14 | 20 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 4.700 | 0.03458876 | 5.23 | 0.18 | 14.0766541 | 2.2800000 |
| 15 | 30 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 4.340 | 0.03199477 | 5.23 | 0.17 | 13.0209730 | 2.4691244 |
| 16 | 10 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 5.125 | 0.07680827 | 10.47 | 0.80 | 7.8147023 | 4.1818537 |
| 17 | 20 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 4.600 | 0.06927316 | 10.47 | 0.73 | 7.0480578 | 4.6591304 |
| 18 | 30 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 4.200 | 0.06354258 | 10.47 | 0.67 | 6.4650115 | 5.1028571 |
| 19 | 10 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 4.860 | 0.15347400 | 20.93 | 3.21 | 3.9037255 | 8.8197531 |
| 20 | 20 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 4.460 | 0.14223750 | 20.93 | 2.98 | 3.6179168 | 9.6107623 |
| 21 | 30 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 4.340 | 0.13887590 | 20.93 | 2.91 | 3.5324120 | 9.8764977 |
| 22 | 10 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 4.300 | 0.31555270 | 41.87 | 13.21 | 2.0065795 | 19.9367442 |
| 23 | 20 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 4.070 | 0.30345290 | 41.87 | 12.70 | 1.9296377 | 21.0633907 |
| 24 | 30 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 3.600 | 0.27901360 | 41.87 | 11.68 | 1.7742297 | 23.8133333 |

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k - \epsilon$ ของใบกวนแบบรัชตัน ที่ $28^\circ c$

ใบกวนแบบรัชตัน

อุณหภูมิห้อง

| ลำดับ ที่ | เวลา | ความเร็วรอบ (rpm) | rps | Diameter | Density | viscosity | torque (n-m) | rad/s | Power | Power Number | Reynold Number |
|--------------|------|-------------------|------|----------|---------|-----------|--------------|-------|-------|--------------|-------------------|
| 25 | 10 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 5.125 | 0.11102440 | 5.23 | 0.58 | 45.1838134 | 2.0909268 |
| 26 | 20 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 4.990 | 0.10816380 | 5.23 | 0.57 | 44.0196295 | 2.1474950 |
| 27 | 30 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 4.470 | 0.09715902 | 5.23 | 0.51 | 39.5409931 | 2.3973154 |
| 28 | 10 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 5.125 | 0.22792400 | 10.47 | 2.39 | 23.1896671 | 4.1818537 |
| 29 | 20 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 4.730 | 0.21144040 | 10.47 | 2.21 | 21.5125765 | 4.5310782 |
| 30 | 30 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 4.340 | 0.19522800 | 10.47 | 2.04 | 19.8630786 | 4.9382488 |
| 31 | 10 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 4.470 | 0.44059040 | 20.93 | 9.22 | 11.2067451 | 9.5892617 |
| 32 | 20 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 4.205 | 0.42040080 | 20.93 | 8.80 | 10.6932076 | 10.1935791 |
| 33 | 30 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 3.940 | 0.40052660 | 20.93 | 8.38 | 10.1876925 | 10.8791878 |
| 34 | 10 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 4.074 | 1.09918200 | 41.87 | 46.02 | 6.9896283 | 21.0427099 |
| 35 | 20 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 3.810 | 1.07119200 | 41.87 | 44.85 | 6.8116417 | 22.5007874 |
| 36 | 30 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 3.550 | 1.04464600 | 41.87 | 43.74 | 6.6428373 | 24.1487324 |

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\varepsilon$ ของใบกวนแบบพิทช์เบลต ที่ $40^{\circ}c$

ใบกวนแบบพิทช์เบลต

อุณหภูมิ $40^{\circ}c$

| ลำดับ ที่ | เวลา | ความเร็วรอบ (rpm) | rps | Diameter | Density | viscosity | torque (n-m) | rad/s | Power | Power Number | Reynolds Number |
|--------------|------|-------------------|------|----------|---------|-----------|--------------|-------|-------|--------------|--------------------|
| 37 | 10 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 3.810 | 0.06600840 | 5.23 | 0.35 | 26.8635654 | 2.8125984 |
| 38 | 20 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 3.280 | 0.05711139 | 5.23 | 0.30 | 23.2427321 | 3.2670732 |
| 39 | 30 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 3.154 | 0.05499992 | 5.23 | 0.29 | 22.3834231 | 3.3975904 |
| 40 | 10 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 3.550 | 0.12830240 | 10.47 | 1.34 | 13.0538686 | 6.0371831 |
| 41 | 20 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 3.154 | 0.11537620 | 10.47 | 1.21 | 11.7387185 | 6.7951807 |
| 42 | 30 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 2.890 | 0.10684590 | 10.47 | 1.12 | 10.8708203 | 7.4159170 |
| 43 | 10 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 3.023 | 0.25928440 | 20.93 | 5.43 | 6.5950919 | 14.1792921 |
| 44 | 20 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 3.154 | 0.26653770 | 20.93 | 5.58 | 6.7795850 | 13.5903614 |
| 45 | 30 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 2.890 | 0.25205500 | 20.93 | 5.28 | 6.4112067 | 14.8318339 |
| 46 | 10 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 3.154 | 0.76083240 | 41.87 | 31.85 | 4.8380847 | 27.1807229 |
| 47 | 20 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 3.023 | 0.75034870 | 41.87 | 31.41 | 4.7714196 | 28.3585842 |
| 48 | 30 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 2.760 | 0.72963760 | 41.87 | 30.55 | 4.6397190 | 31.0608696 |

ตารางที่ ก.5 ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\varepsilon$ ของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ $40^{\circ}C$

ใบกวนแบบแพดเดิล

อุณหภูมิ $40^{\circ}C$

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ (rpm) | rps | Diameter | Density | viscosity | torque (n-m) | rad/s | Power | Power Number | Reynolds Number |
|----------|------|----------------------|------|----------|---------|-----------|--------------|-------|-------|--------------|--------------------|
| 49 | 10 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 3.680 | 0.02723819 | 5.23 | 0.14 | 11.0851785 | 2.9119565 |
| 50 | 20 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 3.400 | 0.02522345 | 5.23 | 0.13 | 10.2652359 | 3.1517647 |
| 51 | 30 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 2.490 | 0.01868257 | 5.23 | 0.10 | 7.6032814 | 4.3036145 |
| 52 | 10 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 3.150 | 0.04855989 | 10.47 | 0.51 | 4.9406279 | 6.8038095 |
| 53 | 20 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 2.360 | 0.03738633 | 10.47 | 0.39 | 3.8037966 | 9.0813559 |
| 54 | 30 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 2.230 | 0.03556110 | 10.47 | 0.37 | 3.6180923 | 9.6107623 |
| 55 | 10 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 3.023 | 0.10238760 | 20.93 | 2.14 | 2.6043049 | 14.1792921 |
| 56 | 20 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 2.490 | 0.08794171 | 20.93 | 1.84 | 2.2368629 | 17.2144578 |
| 57 | 30 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 2.365 | 0.08459596 | 20.93 | 1.77 | 2.1517613 | 18.1243129 |
| 58 | 10 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 2.760 | 0.23651330 | 41.87 | 9.90 | 1.5039730 | 31.0608696 |
| 59 | 20 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 2.630 | 0.23009090 | 41.87 | 9.63 | 1.4631334 | 32.5961977 |
| 60 | 30 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 2.490 | 0.22321980 | 41.87 | 9.35 | 1.4194405 | 34.4289157 |

ตารางที่ ก.6 ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k - \varepsilon$ ของใบกวนแบบรัชตัน ที่ $40^{\circ}c$

ใบกวนแบบรัชตัน

อุณหภูมิ $40^{\circ}c$

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ (rpm) | rps | Diameter | Density | viscosity | torque (n-m) | rad/s | Power | Power Number | Reynolds Number |
|----------|------|-------------------|------|----------|---------|-----------|--------------|-------|-------|--------------|-----------------|
| 61 | 10 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 4.340 | 0.09441055 | 5.23 | 0.49 | 38.4224429 | 2.4691244 |
| 62 | 20 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 3.940 | 0.08595493 | 5.23 | 0.45 | 34.9812430 | 2.7197970 |
| 63 | 30 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 3.550 | 0.07772458 | 5.23 | 0.41 | 31.6317217 | 3.0185915 |
| 64 | 10 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 3.416 | 0.15718210 | 10.47 | 1.65 | 15.9921753 | 6.2740047 |
| 65 | 20 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 2.760 | 0.13070650 | 10.47 | 1.37 | 13.2984689 | 7.7652174 |
| 66 | 30 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 2.630 | 0.12554810 | 10.47 | 1.31 | 12.7736379 | 8.1490494 |
| 67 | 10 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 3.285 | 0.35318160 | 20.93 | 7.39 | 8.9834372 | 13.0484018 |
| 68 | 20 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 3.022 | 0.33511250 | 20.93 | 7.02 | 8.5238361 | 14.1839841 |
| 69 | 30 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 2.490 | 0.30086720 | 20.93 | 6.30 | 7.6527814 | 17.2144578 |
| 70 | 10 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 2.365 | 0.93258950 | 41.87 | 39.04 | 5.9302772 | 36.2486258 |
| 71 | 20 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 2.230 | 0.92022560 | 41.87 | 38.53 | 5.8516559 | 38.4430493 |
| 72 | 30 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 1.970 | 0.89645420 | 41.87 | 37.53 | 5.7004951 | 43.5167513 |

ตารางที่ ก.7 ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\epsilon$ ของใบกวนแบบพิทช์เบลต ที่ $60^{\circ}c$

ใบกวนแบบพิทช์เบลต อุณหภูมิ $60^{\circ}c$

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ (rpm) | rps | Diameter | Density | viscosity | torque (n-m) | rad/s | Power | Power Number | Reynolds Number |
|----------|------|-------------------|------|----------|---------|-----------|--------------|-------|-------|--------------|-----------------|
| 73 | 10 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 2.490 | 0.04390116 | 5.23 | 0.23 | 17.8665394 | 4.3036145 |
| 74 | 20 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 2.100 | 0.03742420 | 5.23 | 0.20 | 15.2305986 | 5.1028571 |
| 75 | 30 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 1.840 | 0.03313696 | 5.23 | 0.17 | 13.4858123 | 5.8239130 |
| 76 | 10 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 2.490 | 0.09410725 | 10.47 | 0.98 | 9.5747521 | 8.6072289 |
| 77 | 20 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 1.970 | 0.07805779 | 10.47 | 0.82 | 7.9418322 | 10.8791878 |
| 78 | 30 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 1.570 | 0.06643843 | 10.47 | 0.70 | 6.7596439 | 13.6509554 |
| 79 | 10 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 2.200 | 0.21721080 | 20.93 | 4.55 | 5.5249185 | 19.4836364 |
| 80 | 20 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 1.970 | 0.20675060 | 20.93 | 4.33 | 5.2588556 | 21.7583756 |
| 81 | 30 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 1.700 | 0.19522300 | 20.93 | 4.09 | 4.9656425 | 25.2141176 |
| 82 | 10 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 1.970 | 0.66913800 | 41.87 | 28.01 | 4.2550059 | 43.5167513 |
| 83 | 20 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 1.840 | 0.65935990 | 41.87 | 27.61 | 4.1928276 | 46.5913043 |
| 84 | 30 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 1.570 | 0.63928820 | 41.87 | 26.76 | 4.0651929 | 54.6038217 |

ตารางที่ ก.8 ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\epsilon$ ของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ $60^\circ c$

ใบกวนแบบแพดเดิล

อุณหภูมิ $60^\circ c$

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ (rpm) | rps | Diameter | Density | viscosity | torque (n-m) | rad/s | Power | Power Number | Reynolds Number |
|----------|------|----------------------|------|----------|---------|-----------|--------------|-------|-------|--------------|-----------------|
| 85 | 10 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 2.890 | 0.02155553 | 5.23 | 0.11 | 8.772495464 | 3.707958478 |
| 86 | 20 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 2.490 | 0.01868198 | 5.23 | 0.10 | 7.603041299 | 4.303614458 |
| 87 | 30 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 2.234 | 0.01684592 | 5.23 | 0.09 | 6.855816432 | 4.796777081 |
| 88 | 10 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 2.760 | 0.04302852 | 10.47 | 0.45 | 4.377849866 | 7.765217391 |
| 89 | 20 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 2.365 | 0.03745649 | 10.47 | 0.39 | 3.810934927 | 9.062156448 |
| 90 | 30 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 2.102 | 0.03376962 | 10.47 | 0.35 | 3.435821785 | 10.196003806 |
| 91 | 10 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 2.628 | 0.09165613 | 20.93 | 1.92 | 2.331341959 | 16.310502283 |
| 92 | 20 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 2.490 | 0.08794171 | 20.93 | 1.84 | 2.236862919 | 17.214457831 |
| 93 | 30 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 2.102 | 0.07623020 | 20.93 | 1.60 | 1.938971936 | 20.392007612 |
| 94 | 10 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 2.365 | 0.21712220 | 41.87 | 9.09 | 1.380666233 | 36.248625793 |
| 95 | 20 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 2.234 | 0.21076500 | 41.87 | 8.82 | 1.340241204 | 38.374216652 |
| 96 | 30 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 1.970 | 0.19802360 | 41.87 | 8.29 | 1.259219453 | 43.516751269 |

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบ $k-\epsilon$ ของใบกวนแบบรัชตัน ที่ $60^{\circ}c$

ใบกวนแบบรัชตัน

อุณหภูมิ $60^{\circ}c$

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ (rpm) | rps | Diameter | Density | viscosity | torque (n-m) | rad/s | Power | Power Number | Reynolds Number |
|----------|------|-------------------|------|----------|---------|-----------|--------------|-------|-------|--------------|-----------------|
| 97 | 10 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 2.760 | 0.06111065 | 5.23 | 0.32 | 24.8703187 | 3.8826087 |
| 98 | 20 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 2.490 | 0.05546534 | 5.23 | 0.29 | 22.5728360 | 4.3036145 |
| 99 | 30 | 50 | 0.83 | 0.12 | 893 | 2.102 | 0.04739641 | 5.23 | 0.25 | 19.2890081 | 5.0980019 |
| 100 | 10 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 2.641 | 0.12598480 | 10.47 | 1.32 | 12.8180690 | 8.1151079 |
| 101 | 20 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 2.365 | 0.11516330 | 10.47 | 1.21 | 11.7170574 | 9.0621564 |
| 102 | 30 | 100 | 1.67 | 0.12 | 893 | 1.970 | 0.10013120 | 10.47 | 1.05 | 10.1876467 | 10.8791878 |
| 103 | 10 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 2.630 | 0.30953590 | 20.93 | 6.48 | 7.8732763 | 16.2980989 |
| 104 | 20 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 1.970 | 0.27121020 | 20.93 | 5.68 | 6.8984335 | 21.7583756 |
| 105 | 30 | 200 | 3.33 | 0.12 | 893 | 1.708 | 0.25783280 | 20.93 | 5.40 | 6.5581694 | 25.0960187 |
| 106 | 10 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 1.445 | 0.84975000 | 41.87 | 35.58 | 5.4035061 | 59.3273356 |
| 107 | 20 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 1.314 | 0.83890400 | 41.87 | 35.12 | 5.3345371 | 65.2420091 |
| 108 | 30 | 400 | 6.67 | 0.12 | 893 | 1.050 | 0.81927230 | 41.87 | 34.30 | 5.2097003 | 81.6457143 |

ตารางที่ ก: 10 ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบพิทซ์เบลต ที่ 28°C

ใบกวนแบบพิทซ์เบลต

อุณหภูมิห้อง

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ | viscosity | Power | Reynolds number | Power number |
|----------|------|-------------|-----------|-------|-----------------|--------------|
| 1 | 10 | 50 | 4.460 | 1.7 | 2.403 | 132.201 |
| 2 | 20 | 50 | 4.200 | 1.2 | 2.551 | 93.318 |
| 3 | 30 | 50 | 3.680 | 1.4 | 2.912 | 108.874 |
| 4 | 10 | 100 | 4.468 | 2.8 | 4.795 | 27.218 |
| 5 | 20 | 100 | 4.074 | 2.3 | 5.266 | 22.358 |
| 6 | 30 | 100 | 3.416 | 1.9 | 6.267 | 18.469 |
| 7 | 10 | 200 | 4.200 | 12.7 | 10.206 | 15.432 |
| 8 | 20 | 200 | 3.940 | 13.2 | 10.879 | 16.039 |
| 9 | 30 | 200 | 3.410 | 11.3 | 12.570 | 13.730 |
| 10 | 10 | 400 | 3.940 | 35.9 | 21.758 | 5.453 |
| 11 | 20 | 400 | 3.940 | 37.2 | 24.217 | 5.650 |
| 12 | 30 | 400 | 3.154 | 39.4 | 27.181 | 5.984 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ $28^{\circ}c$

ใบกวนแพดเดิล

อุณหภูมิห้อง

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ | viscosity | Power | Reynolds number | Power number |
|----------|------|-------------|-----------|-------|-----------------|--------------|
| 13 | 10 | 50 | 5.120 | 0.8 | 2.091 | 62.212 |
| 14 | 20 | 50 | 4.700 | 1.1 | 2.280 | 85.542 |
| 15 | 30 | 50 | 4.340 | 0.6 | 2.469 | 46.659 |
| 16 | 10 | 100 | 5.125 | 4.3 | 4.182 | 41.799 |
| 17 | 20 | 100 | 4.600 | 5.2 | 4.659 | 50.547 |
| 18 | 30 | 100 | 4.200 | 3.9 | 5.103 | 37.911 |
| 19 | 10 | 200 | 4.860 | 11.3 | 8.820 | 13.730 |
| 20 | 20 | 200 | 4.460 | 17.6 | 9.611 | 21.385 |
| 21 | 30 | 200 | 4.340 | 13.7 | 9.876 | 16.647 |
| 22 | 10 | 400 | 4.300 | 32.2 | 19.937 | 4.891 |
| 23 | 20 | 400 | 4.070 | 29.7 | 21.063 | 4.511 |
| 24 | 30 | 400 | 3.600 | 25.8 | 23.813 | 3.919 |

ตารางที่ ก.12 ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบรัชตัน ที่ 28 °c

ใบกวนรัชตัน

อุณหภูมิห้อง

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ | viscosity | Power | Reynolds number | Power number |
|----------|------|-------------|-----------|-------|-----------------|--------------|
| 25 | 10 | 50 | 5.125 | 3.8 | 2.091 | 295.508 |
| 26 | 20 | 50 | 4.990 | 2.4 | 2.147 | 186.637 |
| 27 | 30 | 50 | 4.470 | 5.6 | 2.397 | 435.486 |
| 28 | 10 | 100 | 5.125 | 7.1 | 4.182 | 69.017 |
| 29 | 20 | 100 | 4.730 | 8.2 | 4.531 | 79.709 |
| 30 | 30 | 100 | 4.340 | 6.4 | 4.938 | 62.212 |
| 31 | 10 | 200 | 4.470 | 10.5 | 9.589 | 12.758 |
| 32 | 20 | 200 | 4.205 | 9.7 | 10.194 | 11.786 |
| 33 | 30 | 200 | 3.940 | 12.4 | 10.879 | 15.067 |
| 34 | 10 | 400 | 4.074 | 39.6 | 21.043 | 6.015 |
| 35 | 20 | 400 | 3.810 | 28.9 | 22.501 | 4.389 |
| 36 | 30 | 400 | 3.550 | 31.2 | 24.149 | 4.739 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.13 ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบพิทซ์เบลต ที่ $40^{\circ}c$

ใบกวนแบบพิทซ์เบลต

อุณหภูมิ $40^{\circ}c$

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ | viscosity | Power | Reynolds number | Power number |
|----------|------|-------------|-----------|-------|-----------------|--------------|
| 37 | 10 | 50 | 3.810 | 1.8 | 2.813 | 139.978 |
| 38 | 20 | 50 | 3.280 | 2.3 | 3.267 | 178.860 |
| 39 | 30 | 50 | 3.154 | 1.1 | 3.398 | 85.542 |
| 40 | 10 | 100 | 3.550 | 2.4 | 6.037 | 23.330 |
| 41 | 20 | 100 | 3.154 | 2.7 | 6.795 | 26.246 |
| 42 | 30 | 100 | 2.890 | 2.1 | 7.416 | 20.413 |
| 43 | 10 | 200 | 3.023 | 14.8 | 14.179 | 17.983 |
| 44 | 20 | 200 | 3.154 | 11.6 | 13.590 | 14.095 |
| 45 | 30 | 200 | 2.890 | 10.5 | 14.832 | 12.758 |
| 46 | 10 | 400 | 3.154 | 32.9 | 27.181 | 4.997 |
| 47 | 20 | 400 | 3.023 | 30.4 | 28.359 | 4.617 |
| 48 | 30 | 400 | 2.760 | 31.7 | 31.061 | 4.815 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.14 ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ $40^{\circ}C$

ใบกวนแบบแพดเดิล

อุณหภูมิ $40^{\circ}C$

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ | viscosity | Power | Reynolds number | Power number |
|----------|------|-------------|-----------|-------|-----------------|--------------|
| 49 | 10 | 50 | 3.680 | 1.3 | 2.912 | 101.095 |
| 50 | 20 | 50 | 3.400 | 1.1 | 3.152 | 85.542 |
| 51 | 30 | 50 | 2.490 | 0.7 | 4.304 | 54.436 |
| 52 | 10 | 100 | 3.150 | 3.8 | 6.804 | 36.939 |
| 53 | 20 | 100 | 2.360 | 4.2 | 9.081 | 40.827 |
| 54 | 30 | 100 | 2.230 | 3.5 | 9.611 | 34.022 |
| 55 | 10 | 200 | 3.023 | 13.1 | 14.179 | 15.918 |
| 56 | 20 | 200 | 2.490 | 15.7 | 17.214 | 19.077 |
| 57 | 30 | 200 | 2.365 | 11.8 | 18.124 | 14.338 |
| 58 | 10 | 400 | 2.760 | 30.4 | 31.061 | 4.617 |
| 59 | 20 | 400 | 2.630 | 27.2 | 32.596 | 4.131 |
| 60 | 30 | 400 | 2.490 | 24.4 | 34.429 | 3.706 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.15 ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบรัชตัน ที่ $40^{\circ}C$

ใบกวนแบบรัชตัน

อุณหภูมิ $40^{\circ}C$

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ | viscosity | Power | Reynolds number | Power number |
|----------|------|-------------|-----------|-------|-----------------|--------------|
| 61 | 10 | 50 | 4.340 | 2.9 | 2.469 | 225.519 |
| 62 | 20 | 50 | 3.940 | 3.2 | 2.720 | 248.849 |
| 63 | 30 | 50 | 3.550 | 2.2 | 3.019 | 171.084 |
| 64 | 10 | 100 | 3.416 | 6.7 | 6.274 | 65.128 |
| 65 | 20 | 100 | 2.760 | 7.9 | 7.765 | 76.793 |
| 66 | 30 | 100 | 2.630 | 7.1 | 8.149 | 69.017 |
| 67 | 10 | 200 | 3.285 | 9.3 | 13.048 | 11.300 |
| 68 | 20 | 200 | 3.022 | 10.4 | 14.184 | 12.637 |
| 69 | 30 | 200 | 2.490 | 11.8 | 17.214 | 14.338 |
| 70 | 10 | 400 | 2.365 | 31.8 | 36.249 | 4.830 |
| 71 | 20 | 400 | 2.230 | 29.6 | 38.443 | 4.496 |
| 72 | 30 | 400 | 1.970 | 27.5 | 43.517 | 4.177 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.16 ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบพิทซ์เบลต ที่ $60^{\circ}c$

ใบกวนแบบพิทซ์เบลต

อุณหภูมิ $60^{\circ}c$

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ | viscosity | Power | Reynolds number | Power number |
|----------|------|-------------|-----------|-------|-----------------|--------------|
| 73 | 10 | 50 | 2.490 | 1.7 | 4.304 | 132.201 |
| 74 | 20 | 50 | 2.100 | 1.3 | 5.103 | 101.095 |
| 75 | 30 | 50 | 1.840 | 0.8 | 5.824 | 62.212 |
| 76 | 10 | 100 | 2.490 | 1.9 | 8.607 | 18.469 |
| 77 | 20 | 100 | 1.970 | 2.5 | 10.879 | 24.302 |
| 78 | 30 | 100 | 1.570 | 2.3 | 13.651 | 22.358 |
| 79 | 10 | 200 | 2.200 | 10.3 | 19.484 | 12.515 |
| 80 | 20 | 200 | 1.970 | 9.8 | 21.758 | 11.908 |
| 81 | 30 | 200 | 1.700 | 10.1 | 25.214 | 12.272 |
| 82 | 10 | 400 | 1.970 | 34.1 | 43.517 | 5.179 |
| 83 | 20 | 400 | 1.840 | 29.7 | 46.591 | 4.511 |
| 84 | 30 | 400 | 1.570 | 30.6 | 54.604 | 4.648 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.17 ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบแพดเดิล ที่ 60°C

ใบกวนแบบแพดเดิล

อุณหภูมิ 60°C

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ | viscosity | Power | Reynolds number | Power number |
|----------|------|-------------|-----------|-------|-----------------|--------------|
| 85 | 10 | 50 | 2.890 | 2.1 | 3.708 | 163.307 |
| 86 | 20 | 50 | 2.490 | 1.6 | 4.304 | 124.425 |
| 87 | 30 | 50 | 2.234 | 0.9 | 4.797 | 69.989 |
| 88 | 10 | 100 | 2.760 | 4.7 | 7.765 | 45.687 |
| 89 | 20 | 100 | 2.365 | 3.5 | 9.062 | 34.022 |
| 90 | 30 | 100 | 2.102 | 2.4 | 10.196 | 23.330 |
| 91 | 10 | 200 | 2.628 | 16.3 | 16.311 | 19.806 |
| 92 | 20 | 200 | 2.490 | 14.8 | 17.214 | 17.983 |
| 93 | 30 | 200 | 2.102 | 13.2 | 20.392 | 16.039 |
| 94 | 10 | 400 | 2.365 | 25.4 | 36.249 | 3.858 |
| 95 | 20 | 400 | 2.234 | 31.1 | 38.374 | 4.724 |
| 96 | 30 | 400 | 1.970 | 29.3 | 43.517 | 4.450 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.18 ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองของใบกวนแบบรัชตัน ที่ $60^{\circ}C$

ใบกวนแบบรัชตัน

อุณหภูมิ $60^{\circ}C$

| ลำดับที่ | เวลา | ความเร็วรอบ | viscosity | Power | Reynolds number | Power number |
|----------|------|-------------|-----------|-------|-----------------|--------------|
| 97 | 10 | 50 | 2.760 | 4.2 | 3.883 | 326.614 |
| 98 | 20 | 50 | 2.490 | 2.6 | 4.304 | 202.190 |
| 99 | 30 | 50 | 2.102 | 2.1 | 5.098 | 163.307 |
| 100 | 10 | 100 | 2.641 | 5.8 | 8.115 | 56.380 |
| 101 | 20 | 100 | 2.365 | 7.3 | 9.062 | 70.961 |
| 102 | 30 | 100 | 1.970 | 6.4 | 10.879 | 62.212 |
| 103 | 10 | 200 | 2.630 | 12.9 | 16.298 | 15.675 |
| 104 | 20 | 200 | 1.970 | 10.2 | 21.758 | 12.394 |
| 105 | 30 | 200 | 1.708 | 9.7 | 25.096 | 11.786 |
| 106 | 10 | 400 | 1.445 | 30.1 | 59.327 | 4.572 |
| 107 | 20 | 400 | 1.314 | 26.4 | 65.242 | 4.010 |
| 108 | 30 | 400 | 1.050 | 27.8 | 81.646 | 4.222 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.19 ตารางแสดงค่าความดันที่ปลายใบกวนแบบพิทซ์เบลค

| ลำดับ ที่ | เวลา | ความเร็ว (rpm) | ความดันที่ปลายใบกวน 28 °c (pascal) | ความดันที่ปลายใบกวน 40 °c (pascal) | ความดันที่ปลายใบกวน 60 °c (pascal) |
|--------------|------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 10 | 50 | 441.0024 | 377.8345 | 249.2036 |
| 2 | 20 | 50 | 415.7482 | 326.2626 | 211.0712 |
| 3 | 30 | 50 | 365.1909 | 313.9886 | 185.6128 |
| 4 | 10 | 100 | 897.127 | 716.9808 | 507.9566 |
| 5 | 20 | 100 | 818.8374 | 639.1522 | 405.1662 |
| 6 | 30 | 100 | 691.4351 | 587.083 | 326.5796 |
| 7 | 10 | 200 | 1723.327 | 1260.779 | 947.9578 |
| 8 | 20 | 200 | 1620.695 | 1311.795 | 864.6073 |
| 9 | 30 | 200 | 1411.991 | 1290.214 | 773.7895 |
| 10 | 10 | 400 | 3458.428 | 2940.56 | 2277.058 |
| 11 | 20 | 400 | 3185.758 | 2860.631 | 2230.953 |
| 12 | 30 | 400 | 2940.559 | 2705.134 | 2161.767 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.20 ตารางแสดงค่าแรงดันที่ปลายใบกวนแบบแพดเดิล

| ลำดับ ที่ | เวลา | ความเร็ว (rpm) | แรงดันที่ปลายใบกวน 28 °c (pascal) | แรงดันที่ปลายใบกวน 40 °c (pascal) | แรงดันที่ปลายใบกวน 60 °c (pascal) |
|--------------|------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 13 | 10 | 50 | 1256.680 | 904.952 | 712.300 |
| 14 | 20 | 50 | 1153.394 | 836.764 | 614.509 |
| 15 | 30 | 50 | 1065.777 | 614.518 | 551.851 |
| 16 | 10 | 100 | 2528.865 | 1560.534 | 1368.596 |
| 17 | 20 | 100 | 2271.900 | 1171.238 | 1173.703 |
| 18 | 30 | 100 | 2076.020 | 1107.044 | 1044.447 |
| 19 | 10 | 200 | 4822.914 | 3044.140 | 2665.100 |
| 20 | 20 | 200 | 4427.978 | 2532.851 | 2532.852 |
| 21 | 30 | 200 | 4309.499 | 2413.198 | 2162.276 |
| 22 | 10 | 400 | 8831.925 | 5949.146 | 5240.886 |
| 23 | 20 | 400 | 8394.354 | 5714.174 | 5011.058 |
| 24 | 30 | 400 | 7505.147 | 5462.862 | 4558.625 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

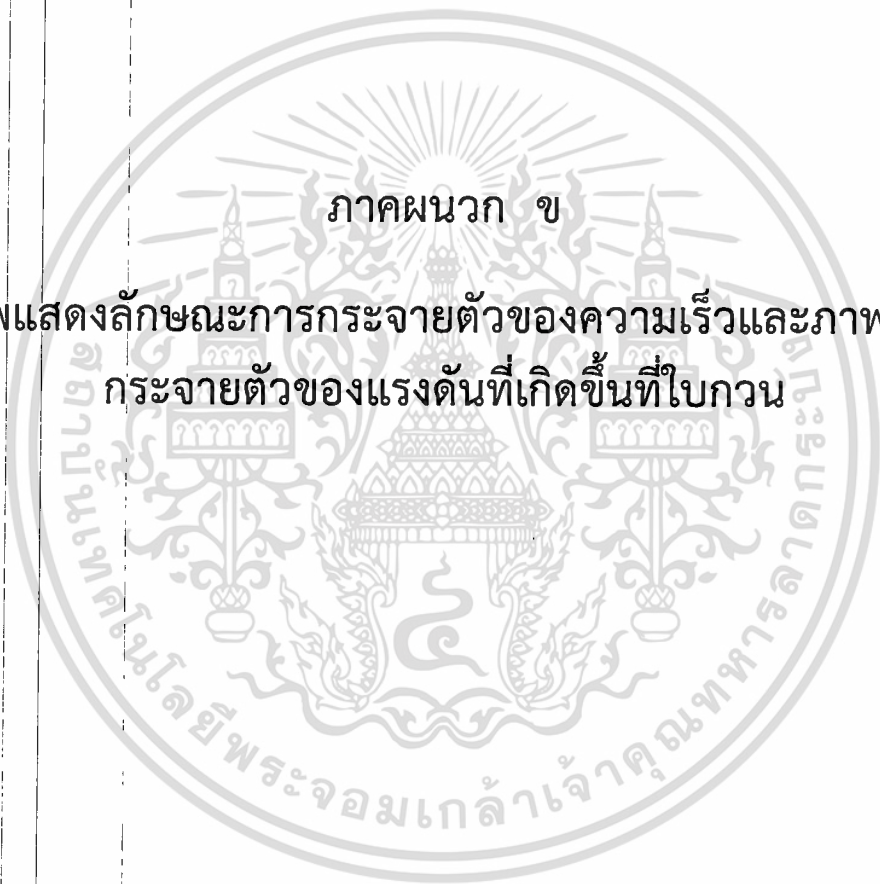
ตารางที่ ก.21 ตารางแสดงค่าแรงดันที่ปลายใบกวนแบบรัชตัน

| ลำดับ ที่ | เวลา | ความเร็ว (rpm) | แรงดันที่ปลายใบกวน 28 °c (pascal) | แรงดันที่ปลายใบกวน 40 °c (pascal) | แรงดันที่ปลายใบกวน 60 °c (pascal) |
|--------------|------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 25 | 10 | 50 | 605.538 | 515.381 | 333.695 |
| 26 | 20 | 50 | 590.031 | 469.421 | 302.634 |
| 27 | 30 | 50 | 530.311 | 424.597 | 257.939 |
| 28 | 10 | 100 | 1243.886 | 849.835 | 670.369 |
| 29 | 20 | 100 | 1152.936 | 697.976 | 606.256 |
| 30 | 30 | 100 | 1063.089 | 667.811 | 514.287 |
| 31 | 10 | 200 | 2304.037 | 1752.628 | 1450.224 |
| 32 | 20 | 200 | 2180.518 | 1630.717 | 1154.669 |
| 33 | 30 | 200 | 2057.154 | 1386.405 | 1042.746 |
| 34 | 10 | 400 | 4735.461 | 3316.594 | 2606.611 |
| 35 | 20 | 400 | 4506.257 | 3210.700 | 2507.578 |
| 36 | 30 | 400 | 4284.108 | 3008.244 | 2309.327 |

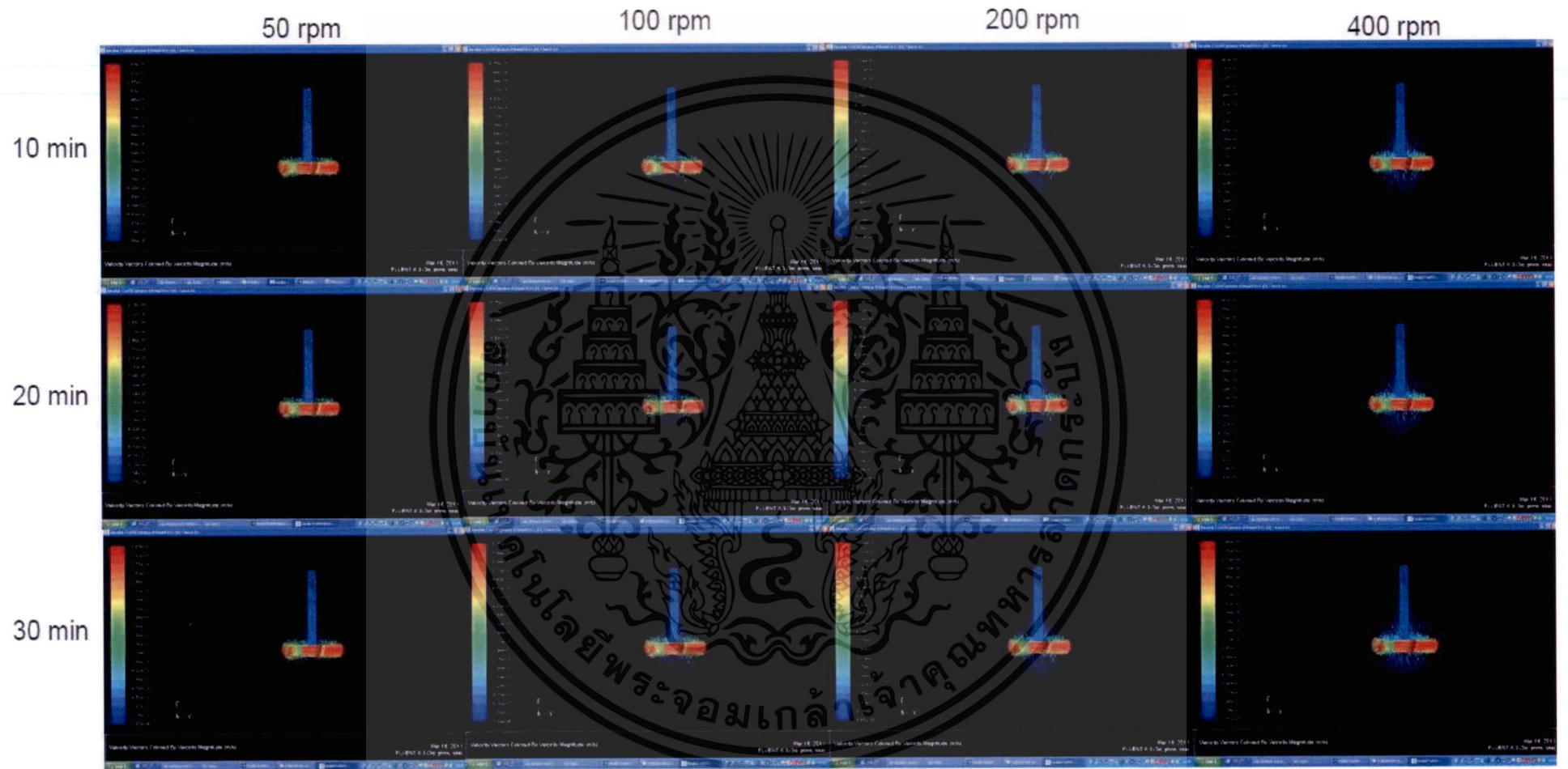
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

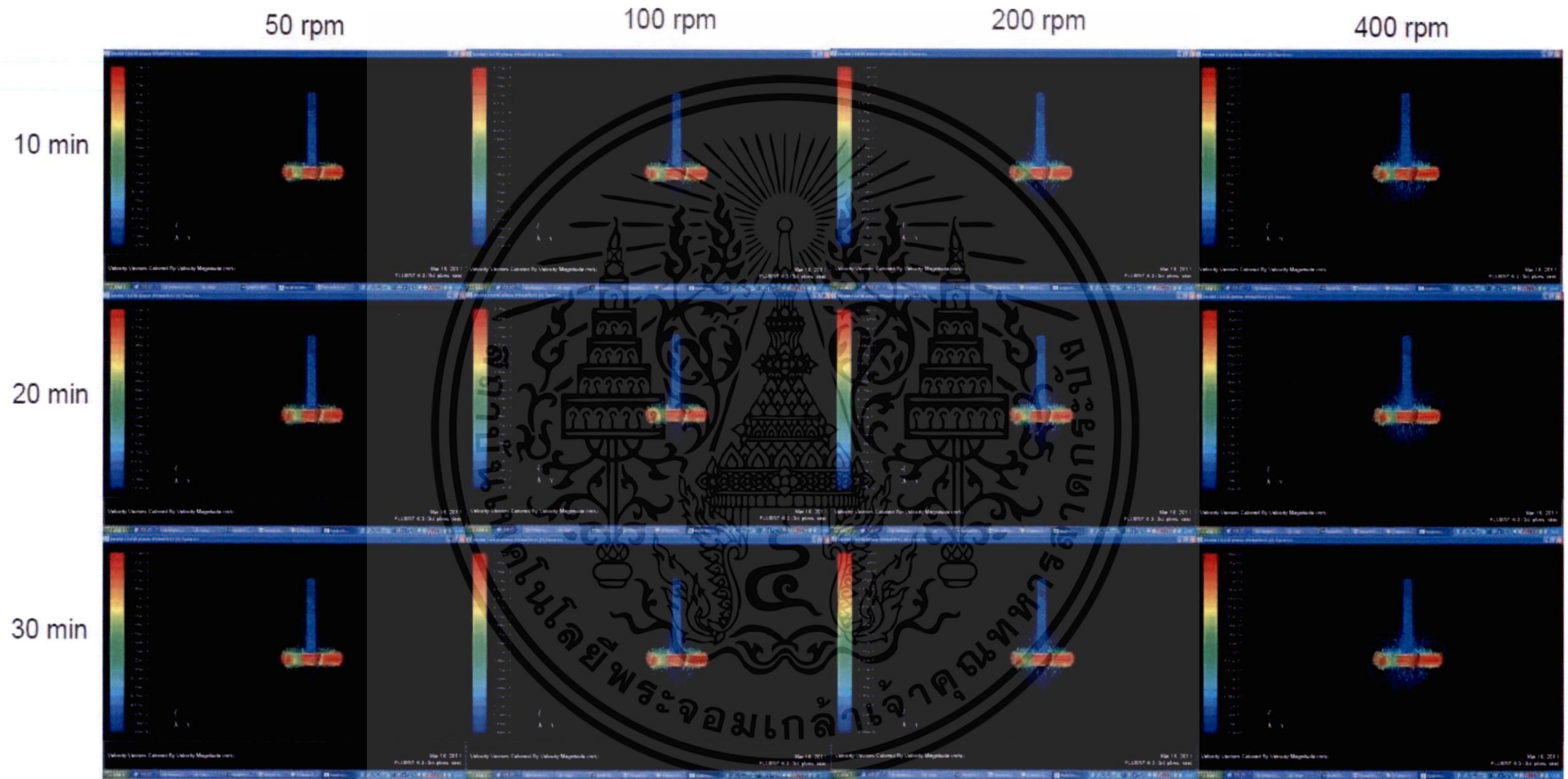
ภาพแสดงลักษณะการกระจายตัวของความเร็วและภาพการ
กระจายตัวของแรงดันที่เกิดขึ้นที่ไบกวน



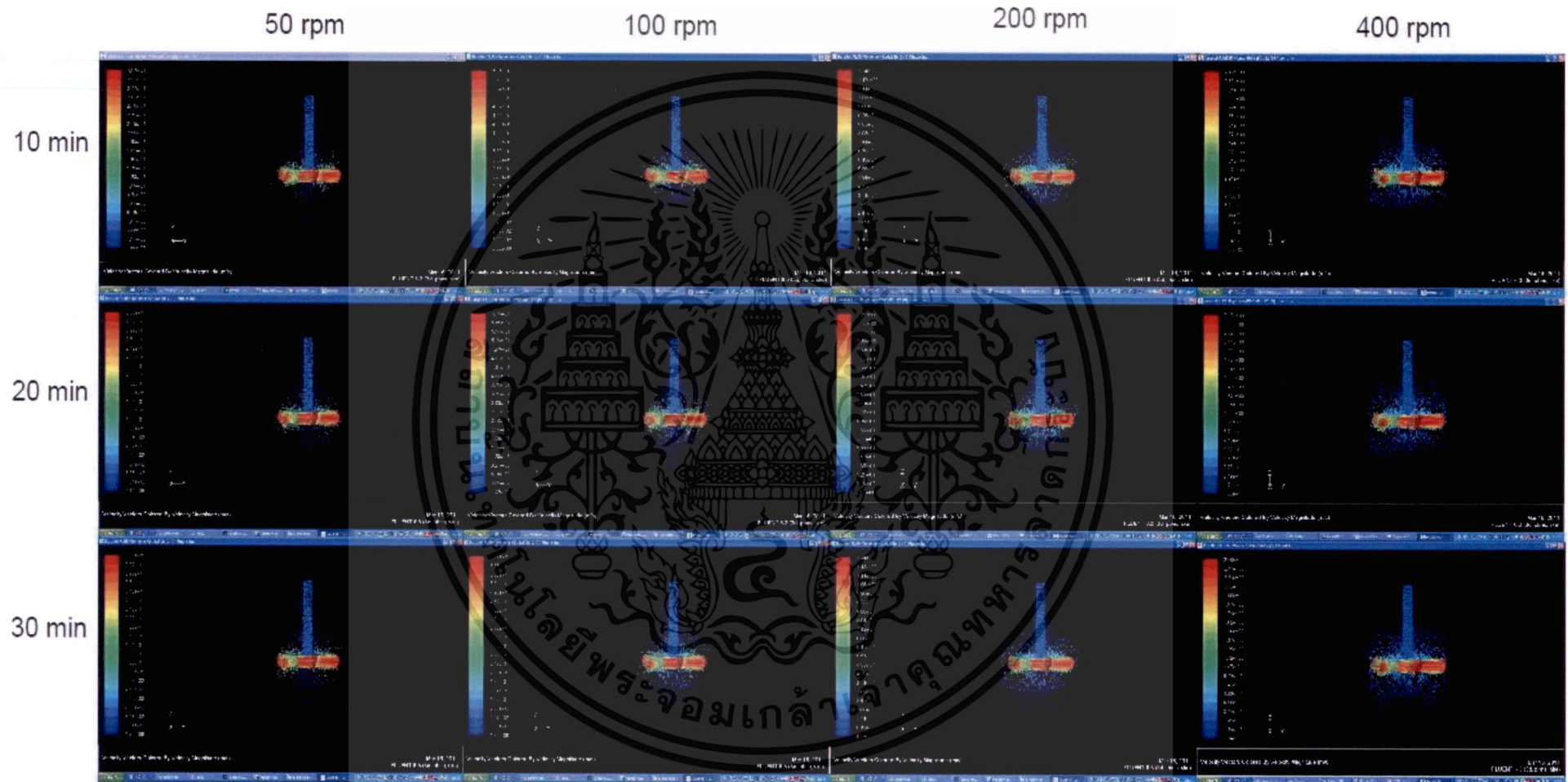
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



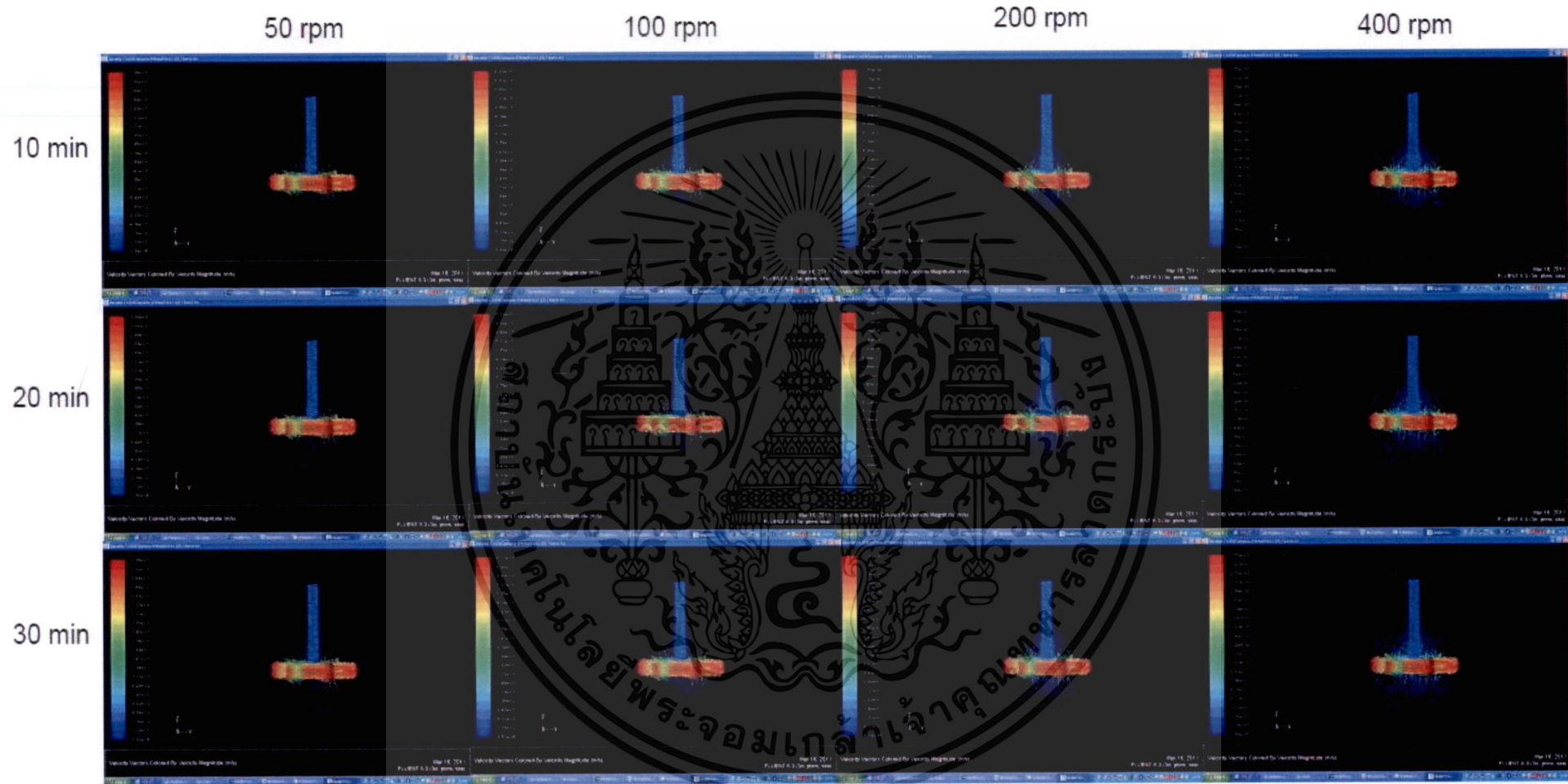
รูปที่ ข.1 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของโบริกวนแบบพิทซ์เบลต ที่อุณหภูมิห้อง



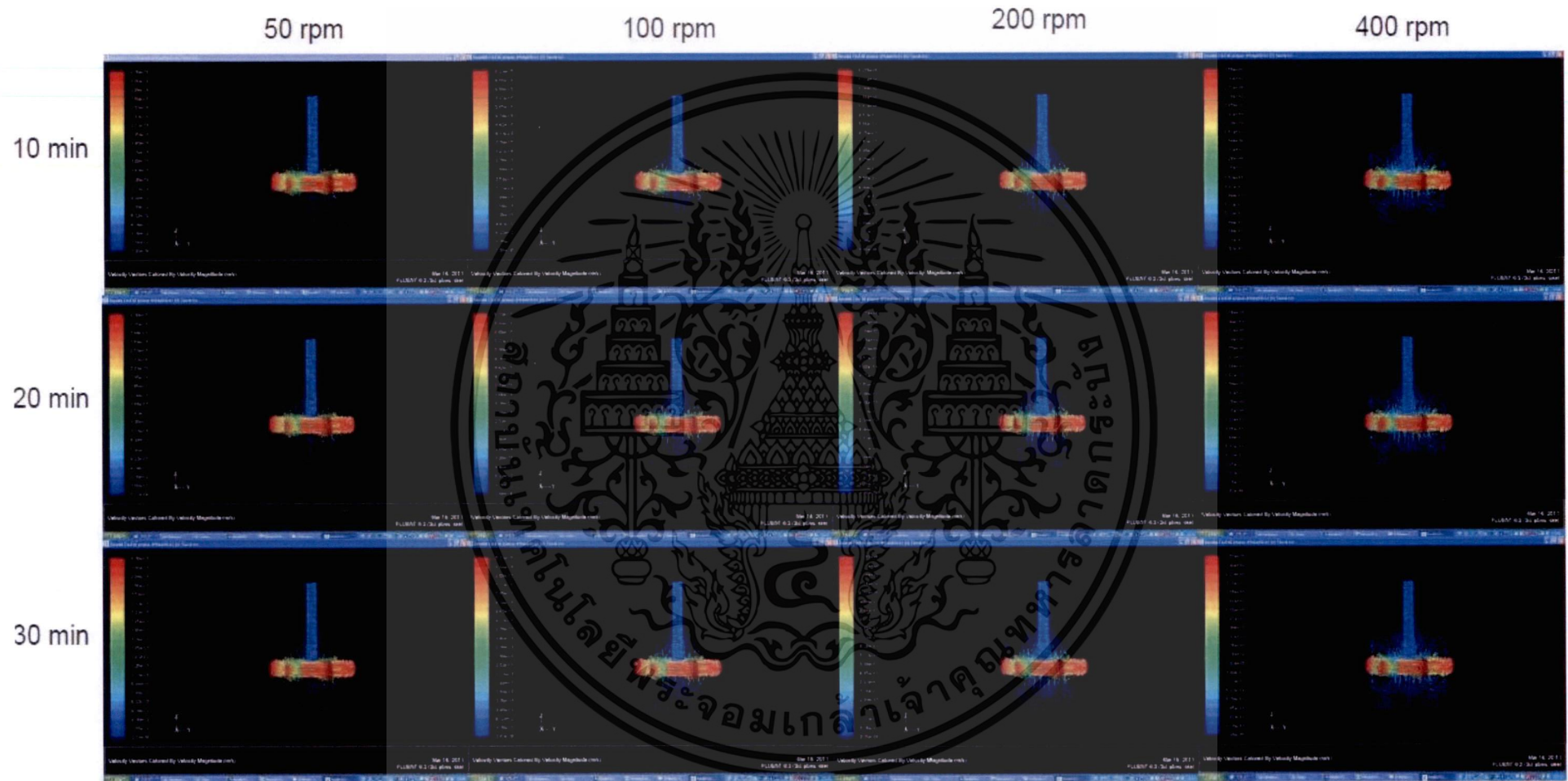
รูปที่ ข.2 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของ ไบอวอร์เตอร์แบบพิทช์เบลต ที่อุณหภูมิ 40 °C



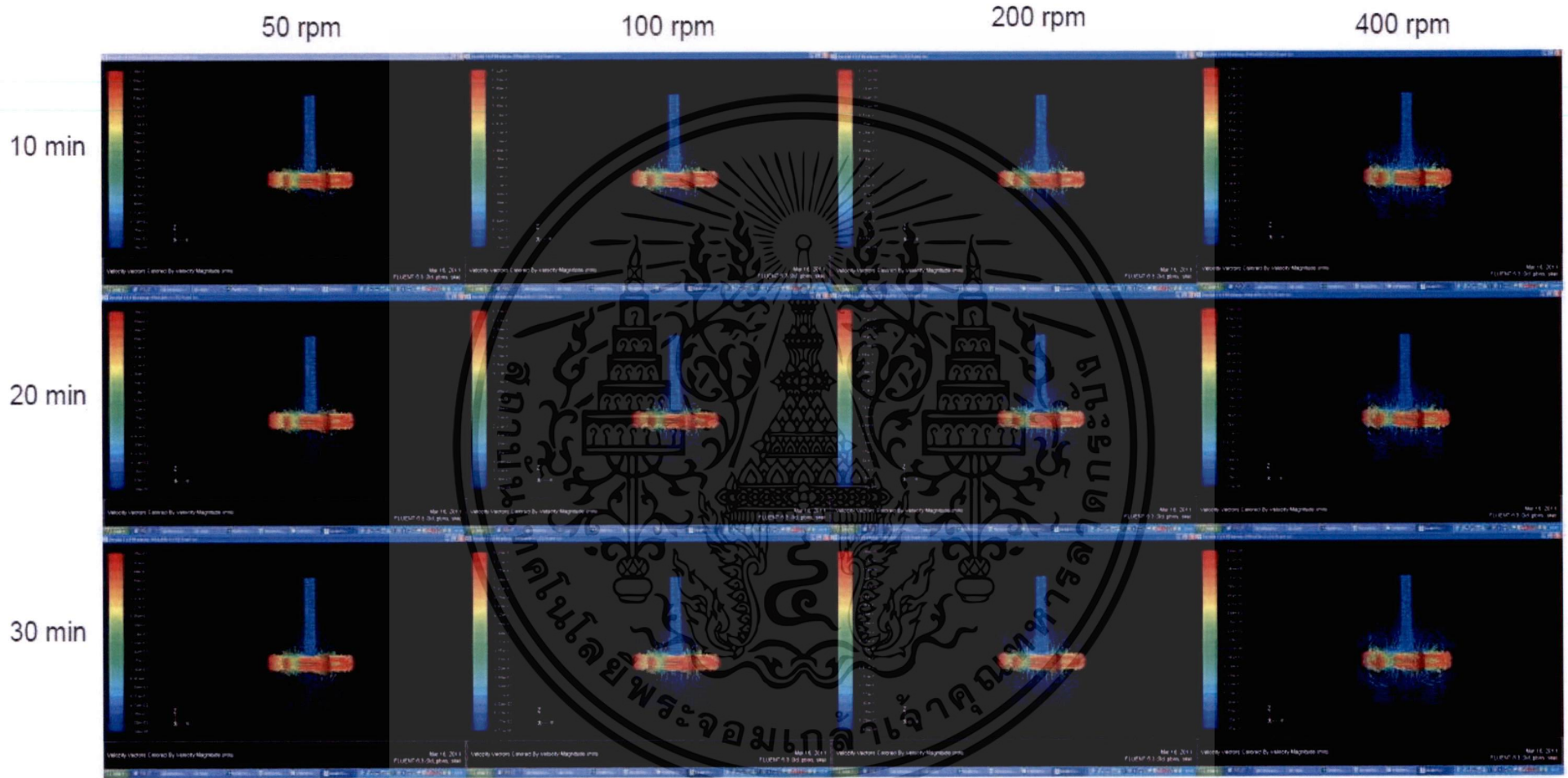
รูปที่ ข.3 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของ ไบอวอร์แบบพิทช์เบลต ที่อุณหภูมิ 60 c



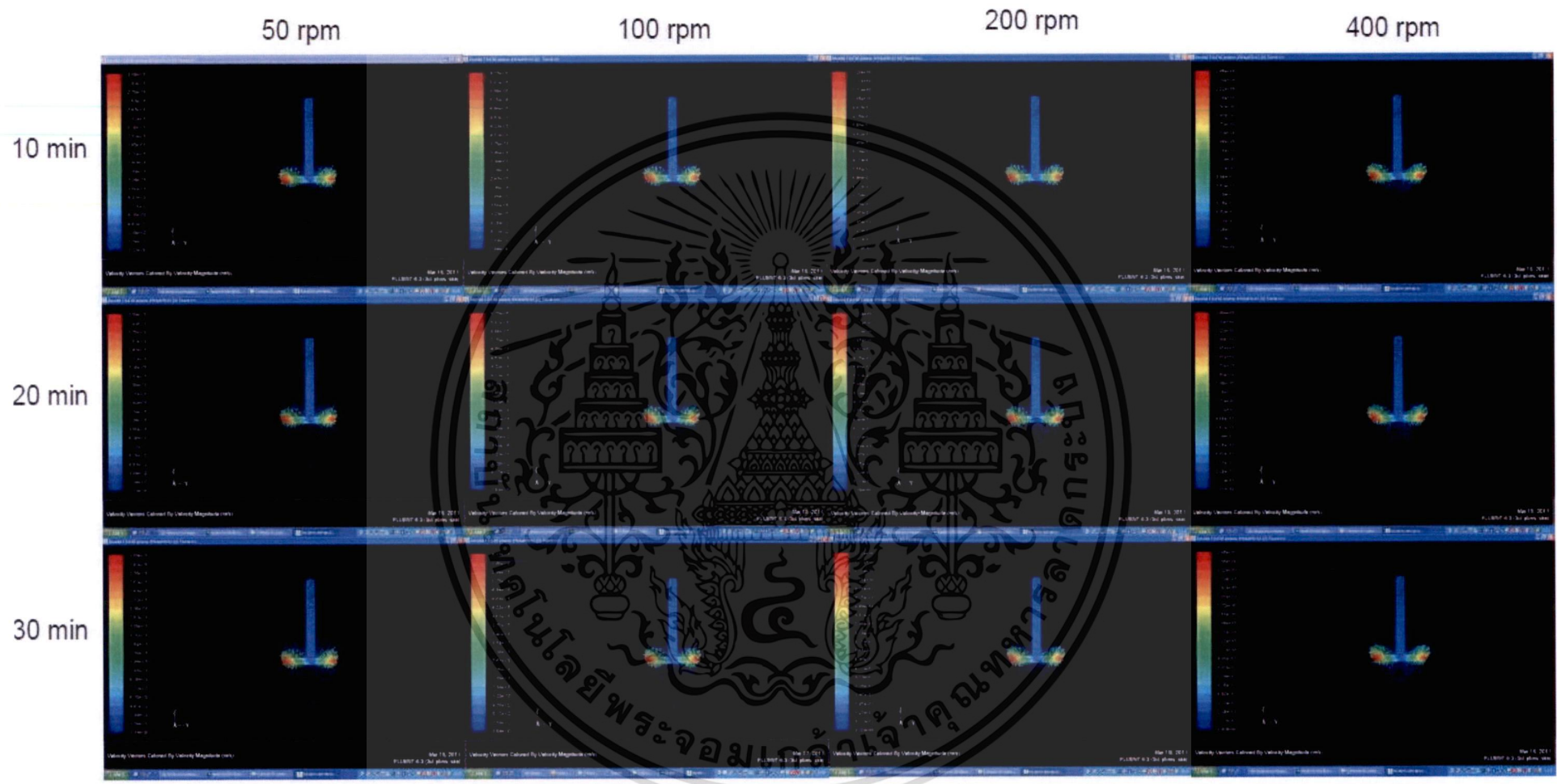
รูปที่ ข.4 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของ ใบกวนแบบรัชตัน ที่อุณหภูมิตั้ง



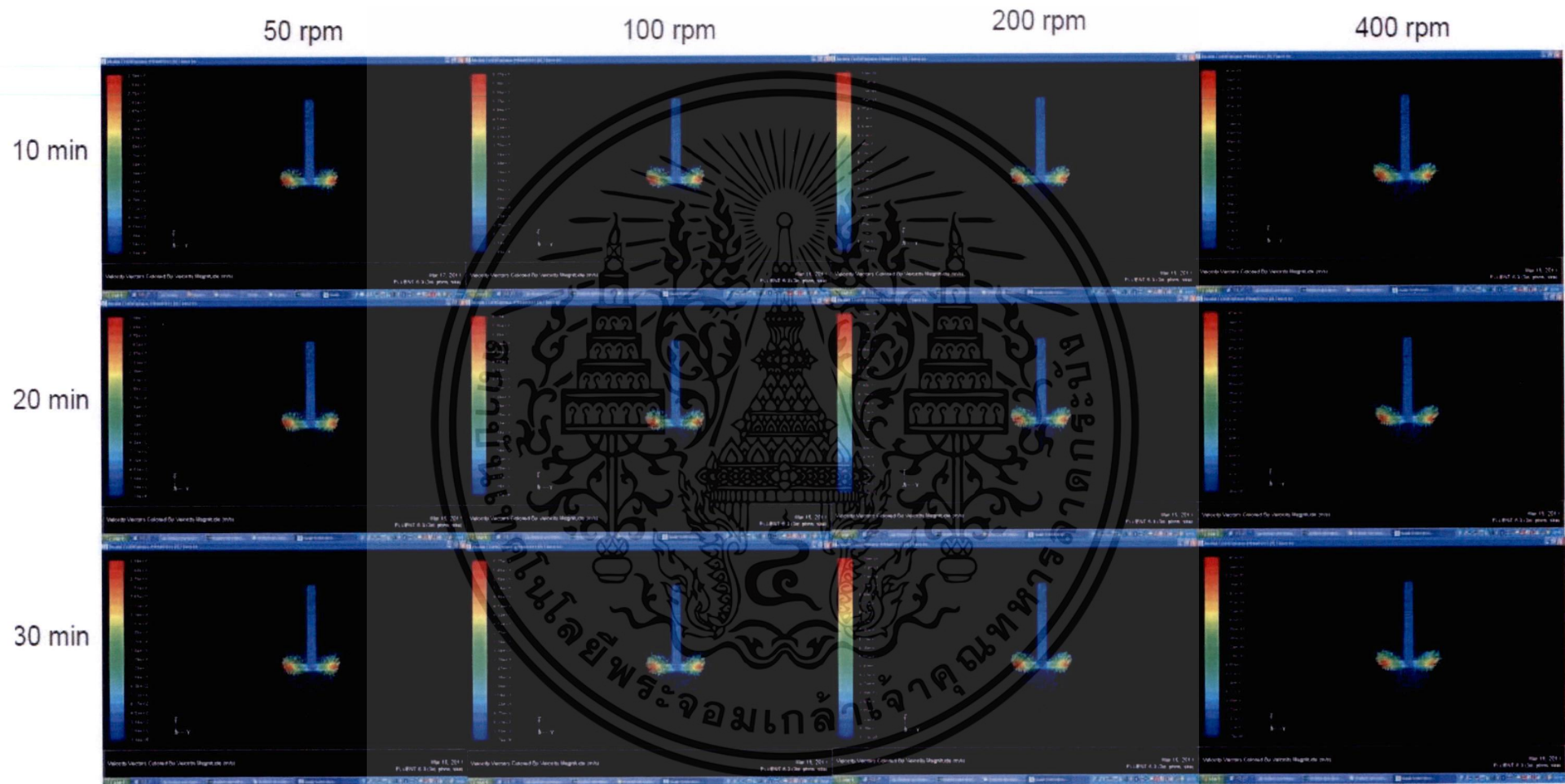
รูปที่ ข.5 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของ ไบโกลบแบบรatchet ที่อุณหภูมิ 40 c



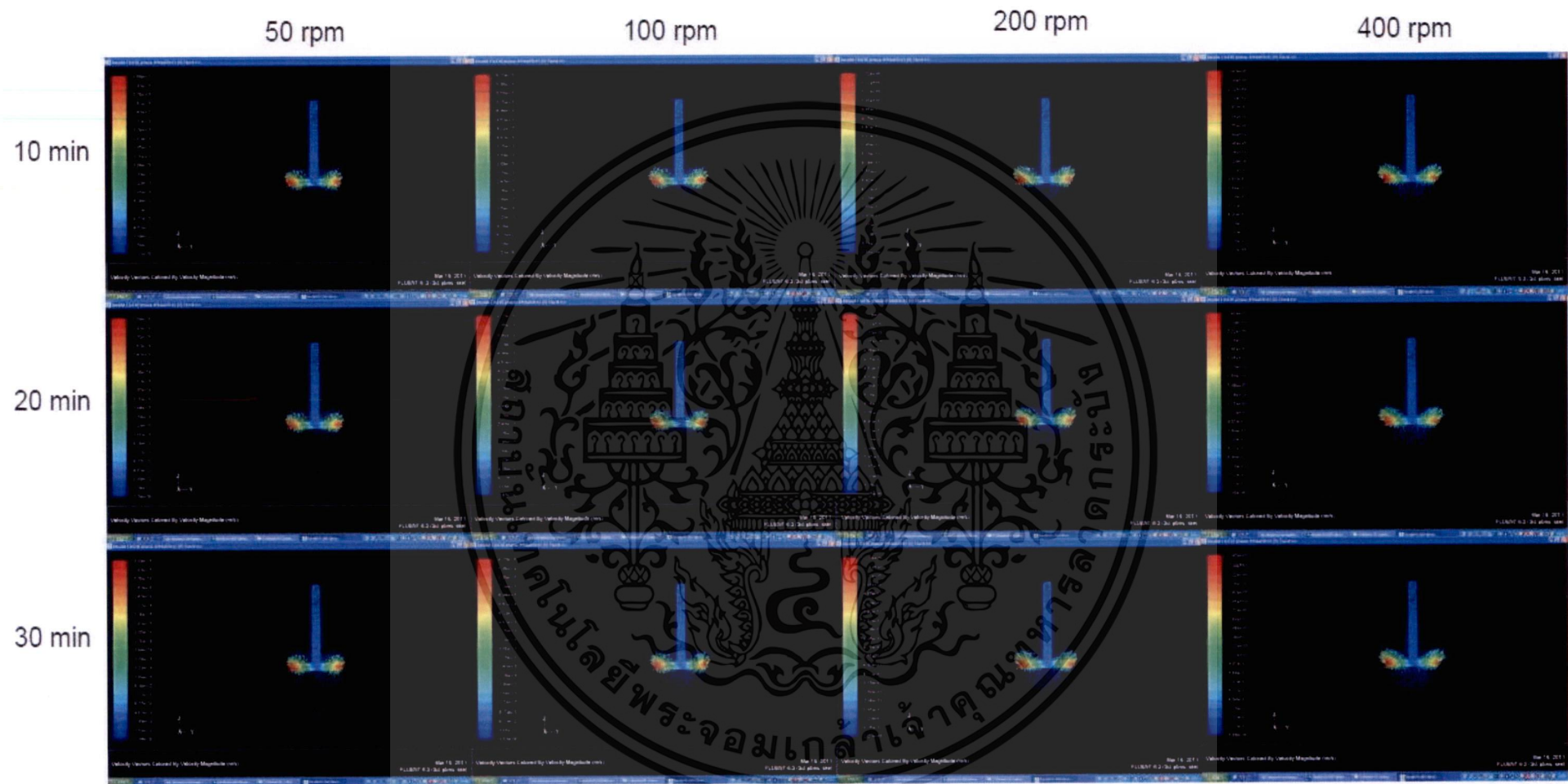
รูปที่ ข.6 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของ ไบโกลบแบบรัชตัน ที่อุณหภูมิ 60 c



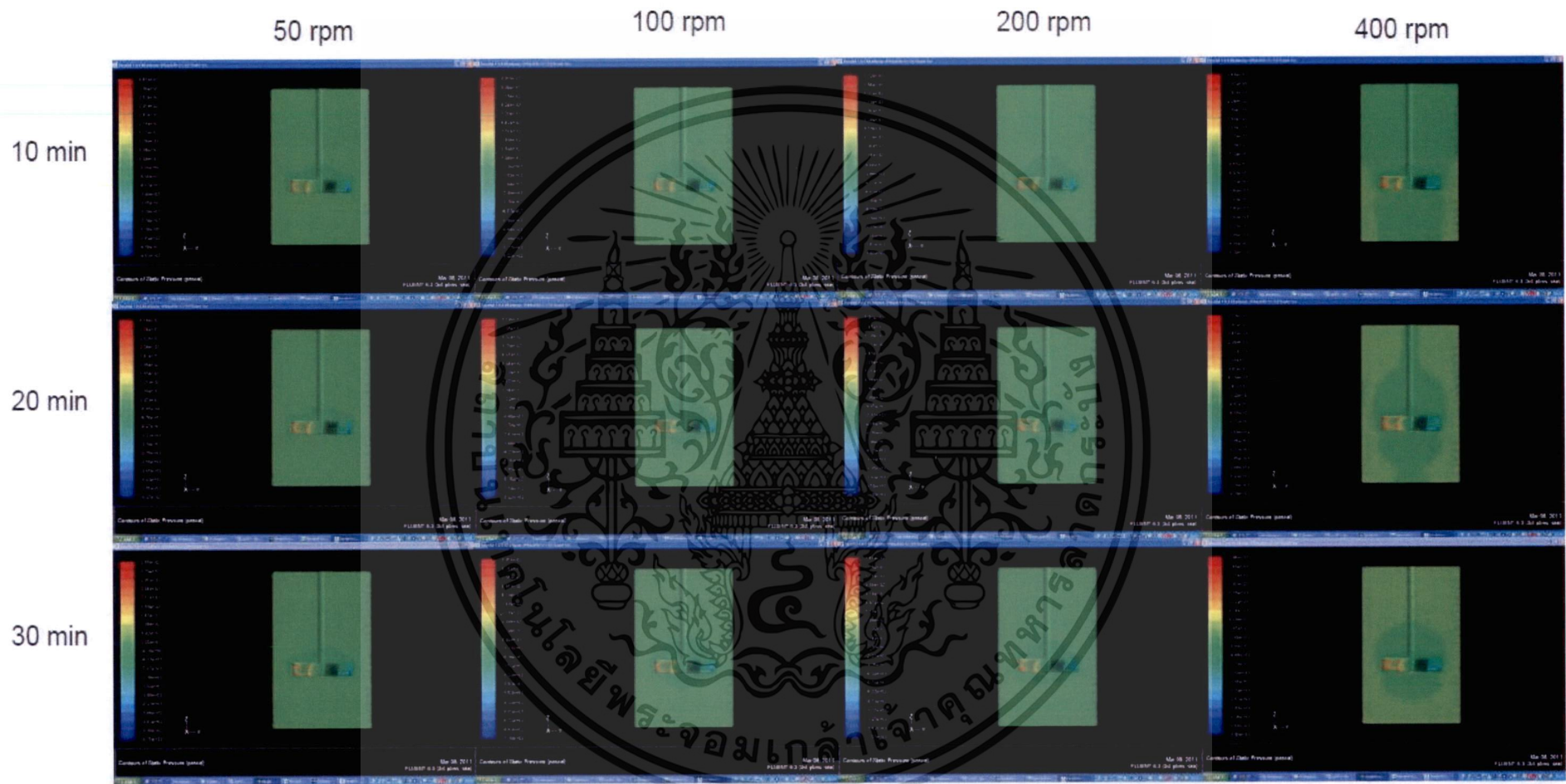
รูปที่ ข.7 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของ ใบกวนแบบแพดเดิล ที่อุณหภูมิต้อง



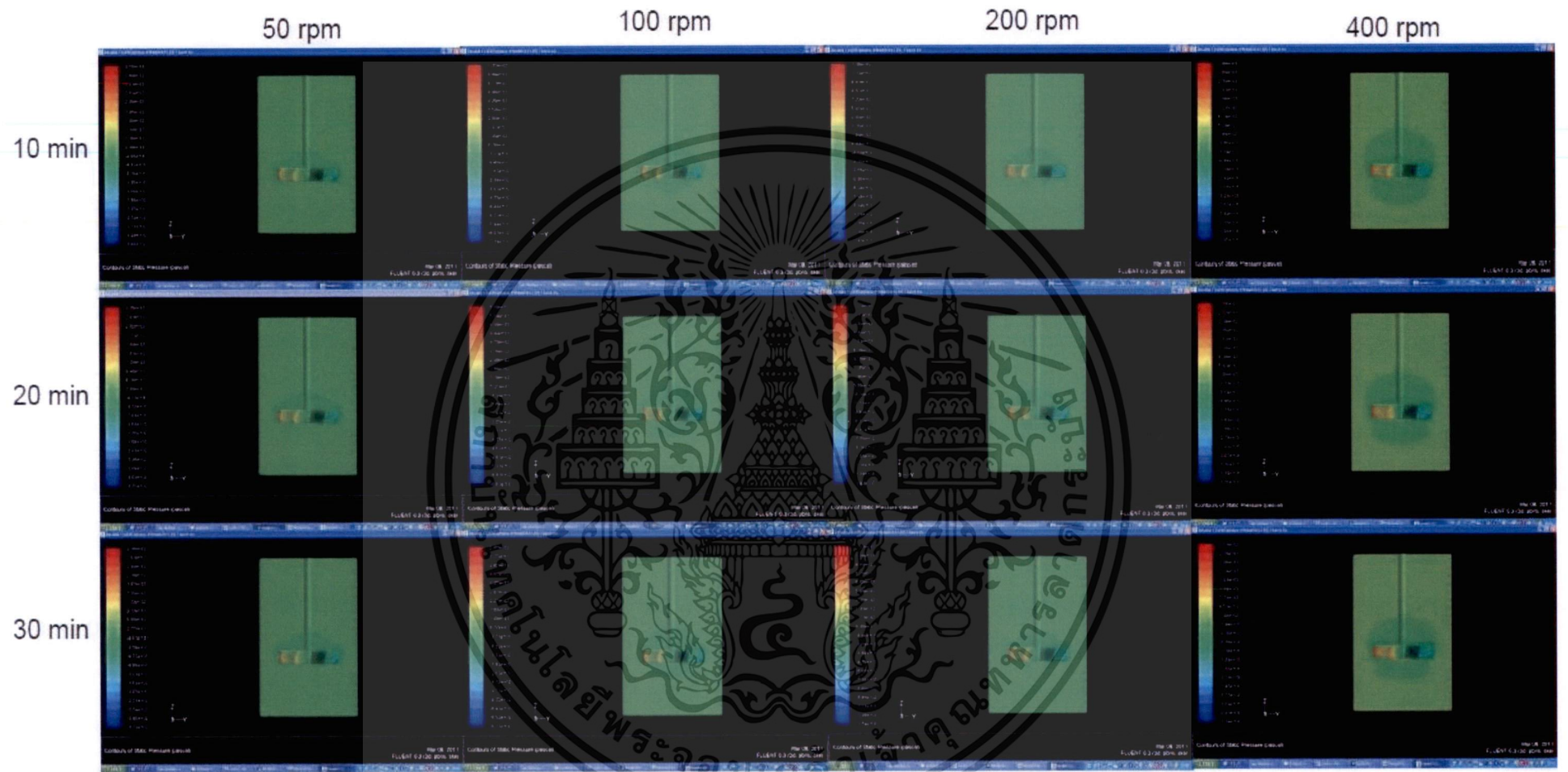
รูปที่ ข.8 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของ ใบกวนแบบแพดเดิล ที่อุณหภูมิ 40 c



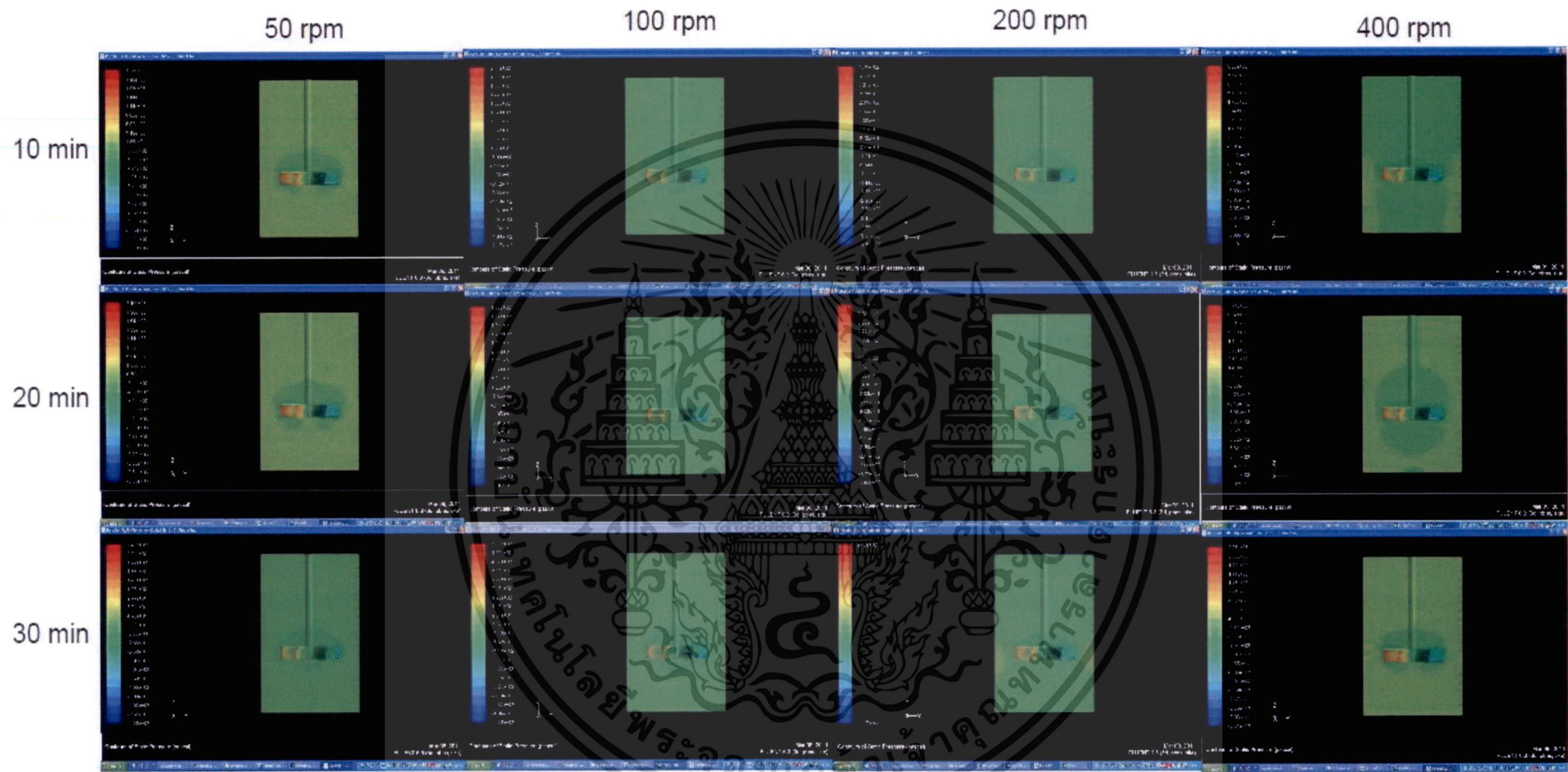
รูปที่ ข.9 แสดงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนของ ใบกวนแบบแพดเดิล ที่อุณหภูมิ 60 c



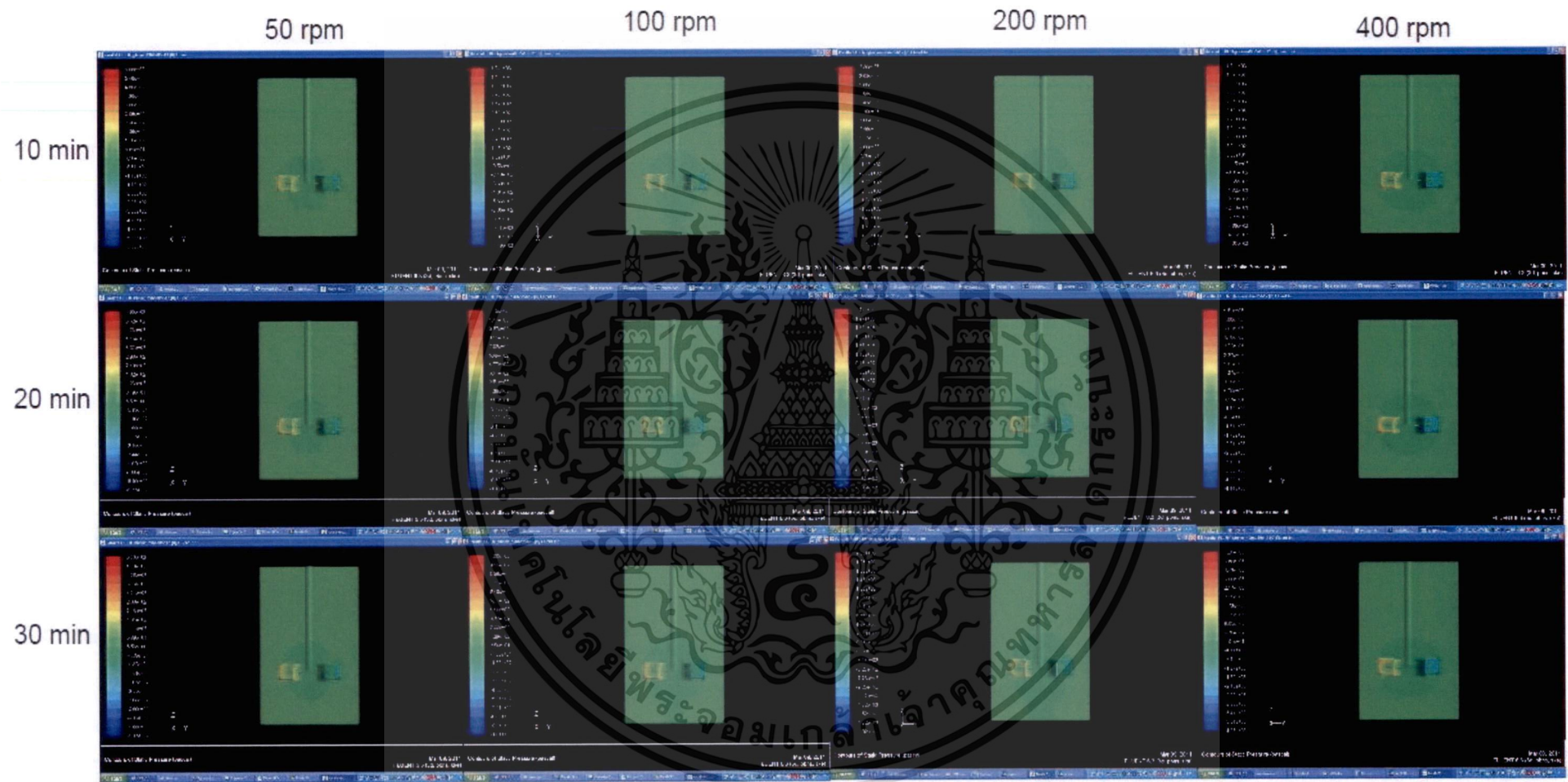
รูปที่ ข.10 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบพิทซ์เบลต ที่อุณหภูมิห้อง



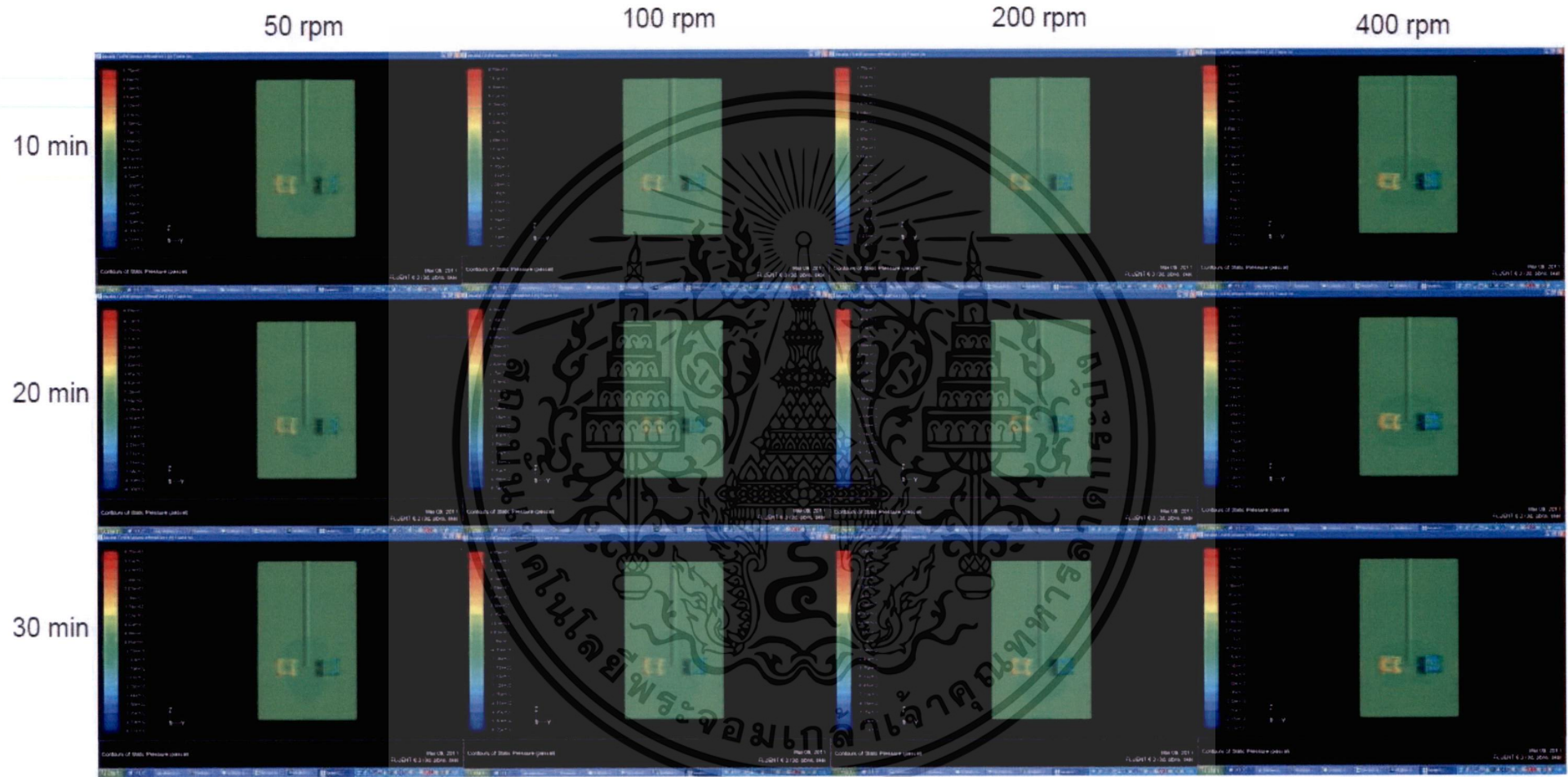
รูปที่ ข.11 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบพิทช์เบลต ที่อุณหภูมิ 40 c



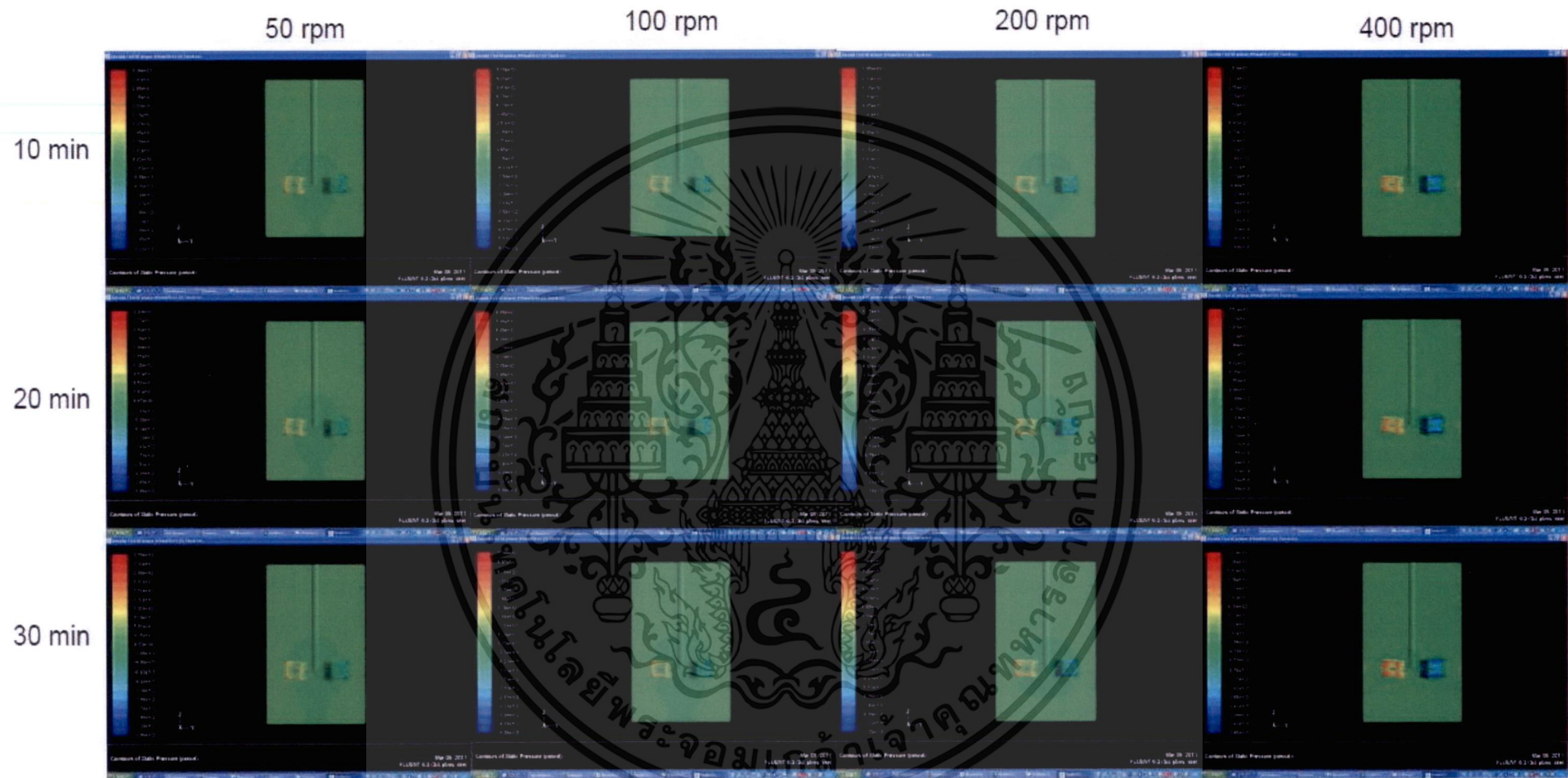
รูปที่ ข.12 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบพิทซ์เบลด ที่อุณหภูมิ 60 c



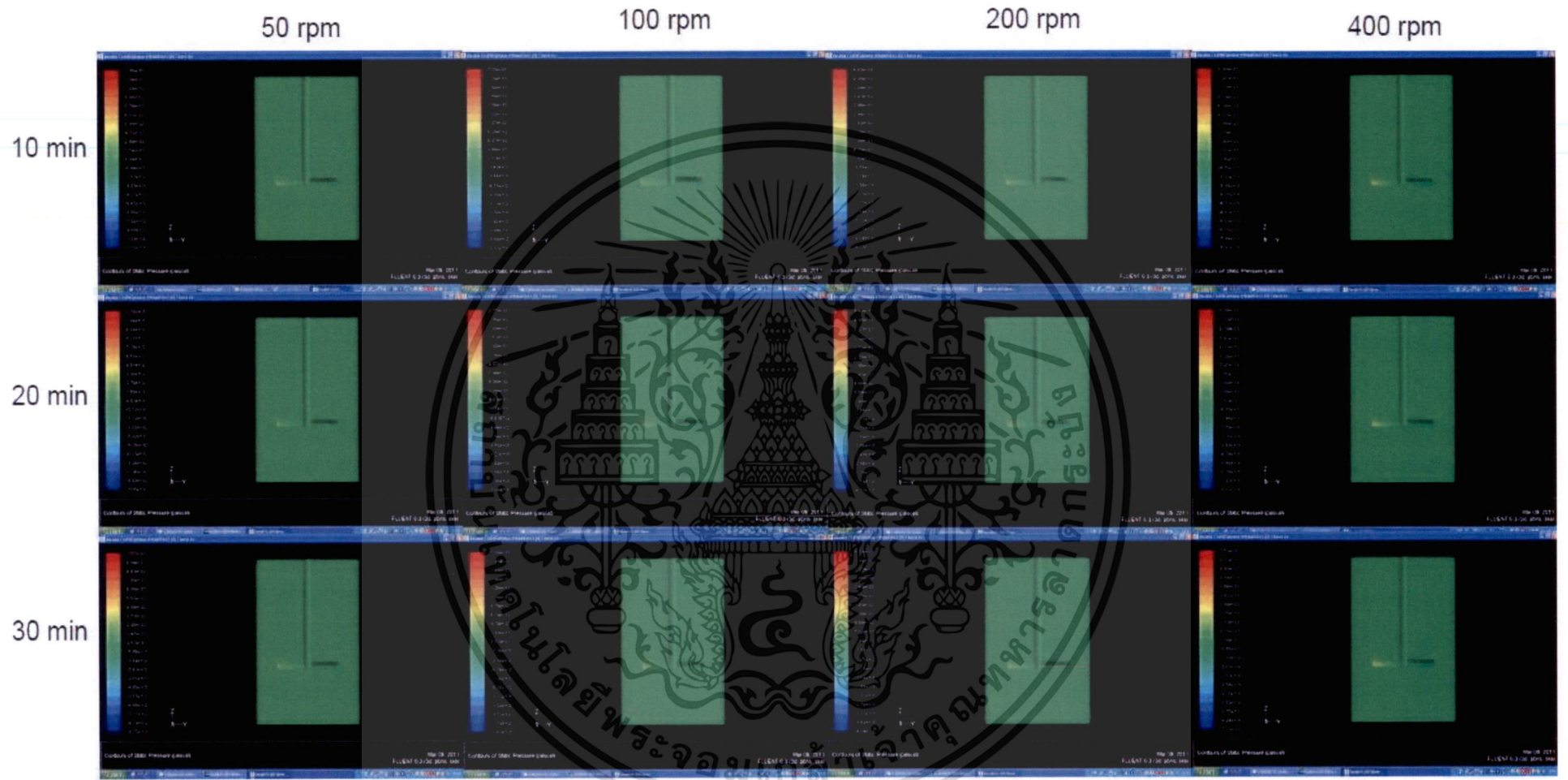
รูปที่ ข.13 แสดงการเกิดความดันบนไมกวานที่ด้านหน้าและด้านหลังของไมกวานแบบรีซตัน ที่อุณหภูมิห้อง



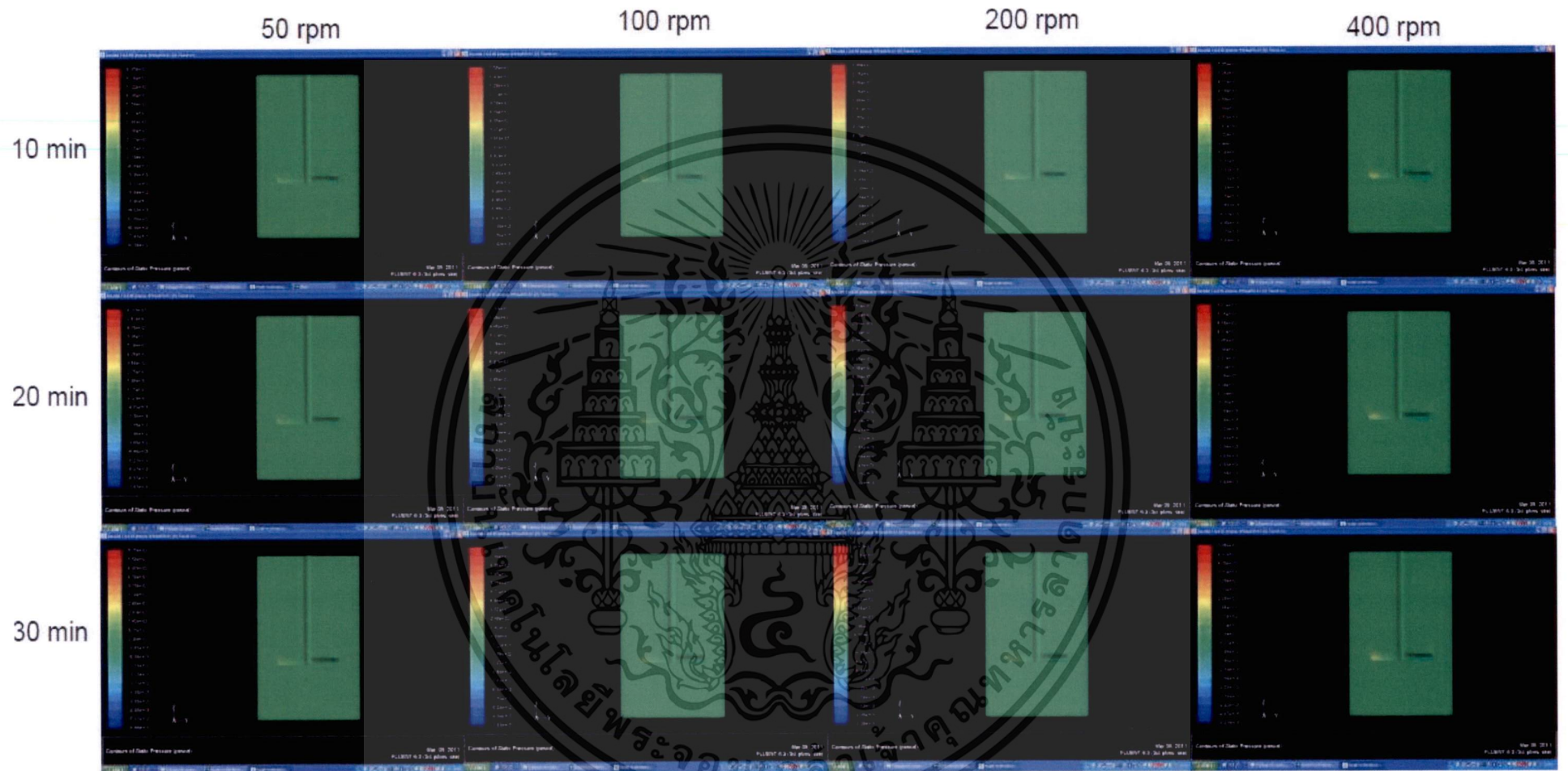
รูปที่ ข.14 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบรัศตัน ที่อุณหภูมิ 40 c



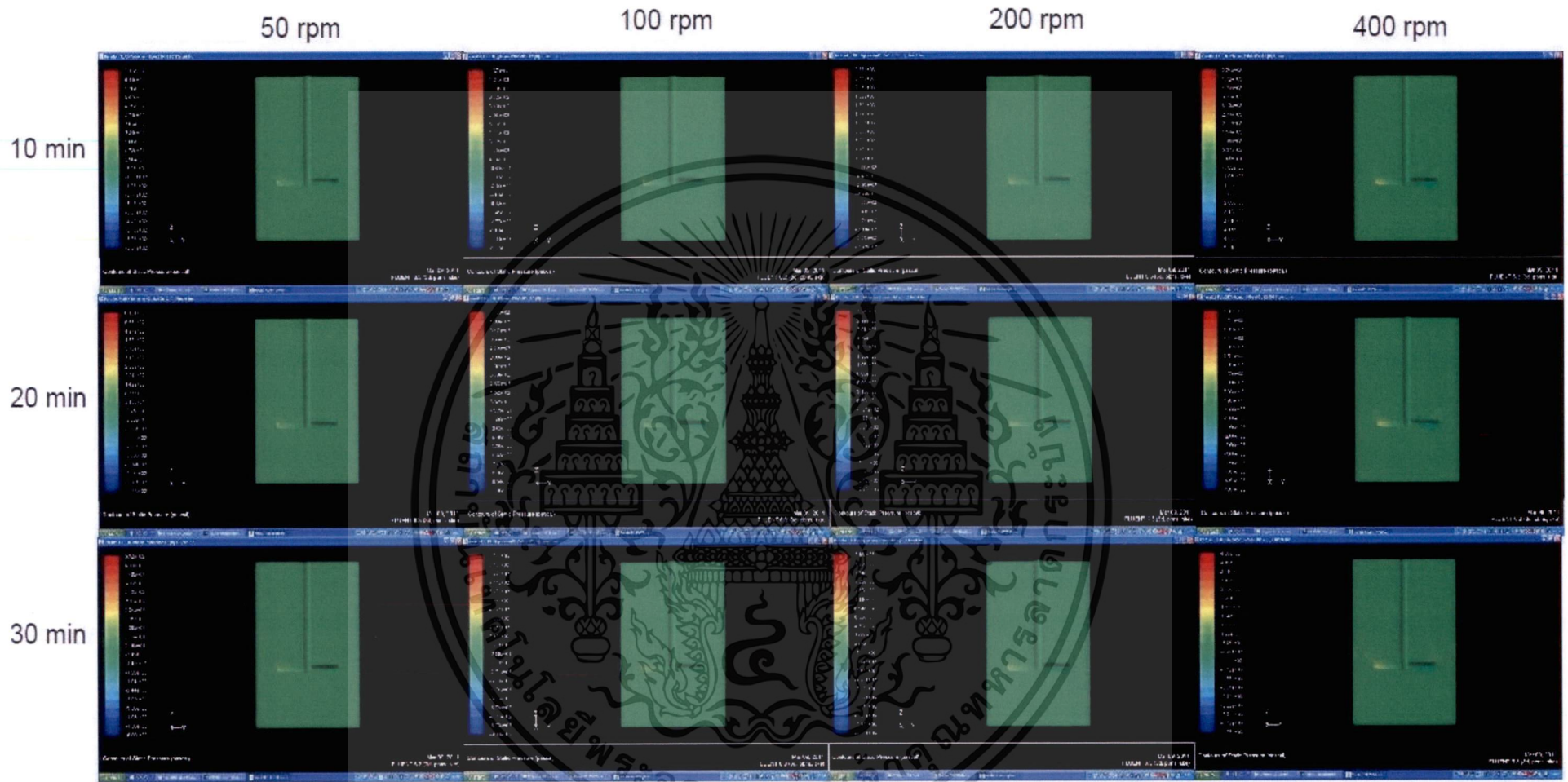
รูปที่ ข.15 แสดงการเกิดความดันบนใบกังหันที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกังหันแบบรัชตัน ที่อุณหภูมิ 60 c



รูปที่ ข.16 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบแพดเดิล ที่อุณหภูมิต้อง



รูปที่ ข.17 แสดงการเกิดความดันบนใบกังหันที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกังหันแบบแพดเดิล ที่อุณหภูมิ 40 c



รูปที่ ข.18 แสดงการเกิดความดันบนใบกวนที่ด้านหน้าและด้านหลังของใบกวนแบบแพดเดิล ที่อุณหภูมิ 60 c



ภาคผนวก ค
คำพิกัดของใบกวนที่ใช้ในการทดลองและการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ตารางแสดงค่าพิกัดของโบริกวนแบบแพดเดิล

| No. | X | Y | Z |
|-----|--------|--------|--------|
| 1 | -0.687 | 6.016 | 1.535 |
| 2 | -0.793 | 6.015 | 1.429 |
| 3 | 0.798 | 6.002 | 0.05 |
| 4 | 0.692 | 6.001 | -0.056 |
| 5 | -0.687 | 0.716 | 1.586 |
| 6 | -0.793 | 0.715 | 1.48 |
| 7 | 0.798 | 0.702 | 0.101 |
| 8 | 0.692 | 0.701 | -0.005 |
| 9 | 0.692 | -0.686 | 1.6 |
| 10 | 0.798 | -0.687 | 1.494 |
| 11 | -0.687 | -0.701 | 0.009 |
| 12 | -0.793 | -0.7 | 0.115 |
| 13 | 0.798 | -5.986 | 1.544 |
| 14 | -0.793 | -6 | 0.166 |
| 15 | -0.687 | -6.001 | 0.06 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ตารางแสดงค่าพิกัดของโหนดแบบพิทช์เบลต

| No. | X | Y | Z | No. | X | Y | Z |
|-----|--------|-------|-------|-----|-------|--------|-------|
| 1 | 0.451 | 2.410 | 0.555 | 21 | 0.549 | 2.390 | 0.550 |
| 2 | -0.049 | 0.010 | 0.555 | 22 | 0.049 | -0.010 | 0.550 |
| 3 | -0.049 | 0.010 | 5.800 | 23 | 0.049 | -0.010 | 5.800 |
| 4 | -0.049 | 0.012 | 5.827 | 24 | 0.049 | -0.009 | 5.822 |
| 5 | -0.046 | 0.022 | 5.868 | 25 | 0.051 | -0.003 | 5.855 |
| 6 | -0.042 | 0.043 | 5.910 | 26 | 0.053 | 0.008 | 5.884 |
| 7 | -0.034 | 0.084 | 5.957 | 27 | 0.057 | 0.031 | 5.922 |
| 8 | -0.027 | 0.117 | 5.978 | 28 | 0.065 | 0.065 | 5.958 |
| 9 | -0.021 | 0.145 | 5.990 | 29 | 0.070 | 0.091 | 5.975 |
| 10 | -0.015 | 0.172 | 5.997 | 30 | 0.077 | 0.123 | 5.989 |
| 11 | -0.008 | 0.206 | 6.000 | 31 | 0.083 | 0.154 | 5.997 |
| 12 | 0.410 | 2.214 | 6.000 | 32 | 0.090 | 0.186 | 6.000 |
| 13 | 0.417 | 2.249 | 5.997 | 33 | 0.508 | 2.194 | 6.000 |
| 14 | 0.427 | 2.294 | 5.983 | 34 | 0.514 | 2.220 | 5.998 |
| 15 | 0.435 | 2.333 | 5.959 | 35 | 0.522 | 2.263 | 5.987 |
| 16 | 0.440 | 2.359 | 5.935 | 36 | 0.531 | 2.302 | 5.967 |
| 17 | 0.446 | 2.386 | 5.896 | 37 | 0.537 | 2.334 | 5.939 |
| 18 | 0.449 | 2.402 | 5.859 | 38 | 0.054 | 2.359 | 5.907 |
| 19 | 0.451 | 2.408 | 5.829 | 39 | 0.548 | 2.387 | 5.833 |
| 20 | 0.451 | 2.410 | 5.800 | 40 | 0.549 | 2.390 | 5.800 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงค่าพิกัดของโบริกวนแบบรัศตัน

| No. | X | Y | Z |
|------|---------|--------|---------|
| 1 | 0.0175 | 6.0000 | 1.6000 |
| 2 | -0.0175 | 6.0000 | 1.6000 |
| 3 | 0.0175 | 6.0000 | -1.6000 |
| 4 | -0.0175 | 6.0000 | -1.6000 |
| 5 | 0.0175 | 2.8000 | 1.6000 |
| 6 | -0.0175 | 2.8000 | 1.6000 |
| 7 | 0.0175 | 2.8000 | -1.6000 |
| 8 | -0.0175 | 2.8000 | -1.6000 |
| DISC | X | Y | Z |
| 1 | 4.2500 | 0.0000 | 0.0350 |
| 2 | 4.2500 | 0.0000 | 0.0000 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน 250 mm เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าดังต่อไปนี้
ระยะห่างจากก้นถังกวน เมื่อใบกวนมีจำนวน 1 ชุด

จากสูตรการคำนวณ $H/T = 1$ to 1.4

ดังนั้น $H = 250-350$ mm

กำหนดให้ ความสูงของยางรั้งสูงสุด(H) = 300 mm (เท่ากับปริมาตร15L)

Recommended Impeller Clearance and Spacing เมื่อนำมาแก้สมการจะได้ค่าดังนี้

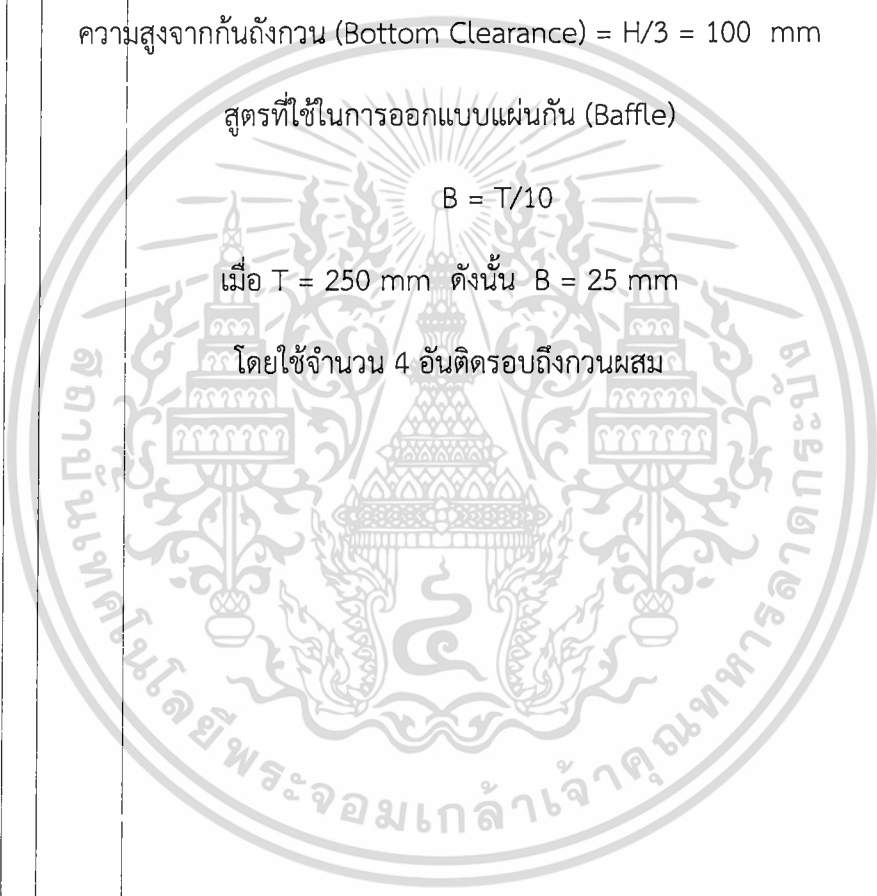
ความสูงจากก้นถังกวน (Bottom Clearance) = $H/3 = 100$ mm

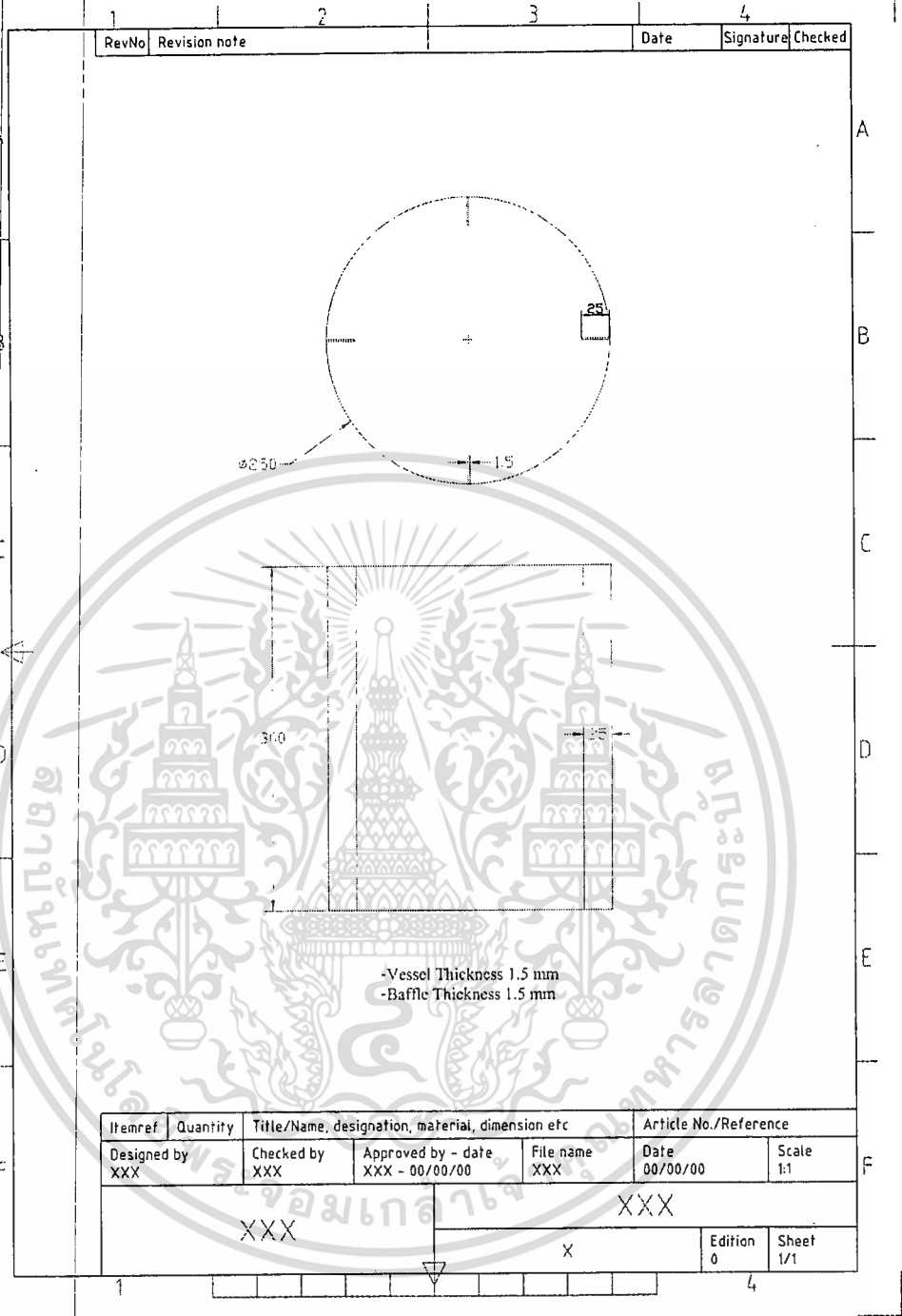
สูตรที่ใช้ในการออกแบบแผ่นกั้น (Baffle)

$$B = T/10$$

เมื่อ $T = 250$ mm ดังนั้น $B = 25$ mm

โดยใช้จำนวน 4 อันติกรอบถังกวนผสม





รูปที่ ง.1 แบบถังกวนที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การออกแบบเครื่องกวนผสมยางรัก

A Design of Mixing Machine for Melanorrhoea Usitata

สถาพร อดุลเศรษฐพงศ์^{1*}, จำลอง ปรวบแก้ว² และ ชินรักษ์ เขียรพงษ์³

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
* ติดต่อ: โทรศัพท์: 02 326 4197, โทรสาร: 02 326 4198
E-mail: ninewoo@hotmail.com

บทคัดย่อ

รักเป็นไม้ยืนต้นชนิดหนึ่ง เมื่อใช้มีดกรีดแล้วจะได้อย่างรักออกมา เมื่อนำยางรักไปกรองและกวนเพื่อให้อย่างรักผสมเข้ากันอย่างดี ในกระบวนการกวนอาจใช้สารเติมแต่งจำพวกขาดหรือผงอิฐแดง เพื่อให้ได้คุณสมบัติของยางรักตามต้องการ จากนั้นจึงจะนำยางรักไปใช้ในงานศิลปะหรือทาเคลือบภาชนะจำพวกเครื่องเซรามิกต่าง ๆ บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องกวนยางรัก การออกแบบจะประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนแรกจะเป็นการออกแบบถังกวนโดยหลักทฤษฎีการออกแบบถังกวนทั่วไป ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในถึง 250 มม. สูง 350 มม. และภายในติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) ขนาดความกว้าง 25 มม. ตลอดความสูงของถังกวน จำนวน 4 อัน กวนยางรักได้ครั้งละ 10 -15 ลิตร ส่วนที่สองเป็นการออกแบบใบกวนจำนวนสามแบบคือแบบพิตช์เบลด์เทอร์ไบน์ (Pitched blade turbine) แบบรัสตัน (Rushton) และแบบแพดเดิล (Paddle) แต่ละแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 120 มม. ตรงกลางใบกวนมีดุมสำหรับต่อเพลลาที่สามารถจับเข้ากับเพลลาของเครื่องกวน จากนั้นก็ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบค่าตัวเลขกำลัง (Power Number) กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ของใบกวนแต่ละแบบ ผลการศึกษาพบว่าใบกวนทั้งสามแบบเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) มากขึ้นค่าตัวเลขกำลังจะน้อยลงและใบพิตช์เบลด์ (Pitched blade turbine) จะมีค่าตัวเลขกำลังน้อยกว่าแบบอื่นที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) เท่ากัน

คำหลัก: ยางรัก ถังกวน ใบกวน

Abstract

Melanorrhoea Usitata is a kind of perennial plant. When it is scratched, Melanorrhoea Usitata will come out. Normally, it is used in art work fluid or for stirring process for mixing together. For property required, cinnabar or red brick powder will be used in stirring process. This report present a design consists of two main parts. First is design for 250 mm inside diameter and 350 mm height mixing tank with baffle installation inside surface. The four pieces of baffle with 25 mm. width installed throughout mixing tank height can mix 10-15 liters for each time. Second is mixing impeller design Pitched blade turbine type, Rushton type and Paddle type were considered. Outside diameter of each type is 120 mm. there is hub for assembly with shaft that can connect with the shaft of mixing machine at the center of

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

impeller. Experiment for three type of impeller from power number & Reynolds number comparison the result is when Reynolds number increase, power number will decrease for Rushton type at the same Reynolds number with other types, the power number is least.

Keywords: Melanorrhoea Usitata, Mixing tank, Impeller

1. บทนำ

ต้นรักเป็นไม้ยืนต้นชนิดหนึ่งเมื่อกรีดที่บริเวณลำต้นจะทำให้ยางรักไหลออกมา ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญที่นำไปใช้สร้างสรรคงานศิลปะการลงรักปิดทอง และงานเคลือบภาชนะจำพวกเครื่องเงิน ซึ่งนิยมทำกันมากในจังหวัดทางภาคเหนือของประเทศไทย ก่อนนำยางรักมาใช้จะต้องผ่านกระบวนการกรองและกวนผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ได้ตามต้องการ^[6] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาถึงลักษณะของใบพัดที่เหมาะสมต่อการใช้กวนยางรักเป็นหลัก มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องในการกวนของเหลวที่มีคุณลักษณะคล้ายกับยางรัก ดังนี้ Rm. Muthiah, R.Manjari, V.N. Krishnamurth ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบระหว่างเวลาและความเร็วในการกวนผสม ของเชื้อเพลิงในจรวด (HTPB) พบว่าเวลาและความเร็วของใบกวนแปรผันตรงกับความหนืดและความเค้นเฉือน อีกทั้งเวลาและความเร็วของใบกวนยังแปรผกผันกับความเป็น Pseudoplastic จากผลการทดลองทำให้พบว่าที่ความเร็ว 25 รอบต่อนาที เป็นความเร็วที่เหมาะสม^[1] L.Rudolph, M. Schafer, V. Atiemo-Obeng and Kraume ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขของค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการกวนของเหลวที่มีความหนืดสูง ระหว่างการกวนร่วมในแนวแกนกับการกวนแบบเปิด พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในการกวนด้วยการกวนแบบเปิดนั้นไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนการกวนร่วมในแนวแกนดังนั้นมีมีการเปลี่ยนแปลง จึงใช้เส้นโค้งมาตรฐานการใช้กำลังไฟในการออกแบบการกวนแบบเปิดและกำลังที่ใช้ในการกวนแบบเปิดมีผลเกี่ยวข้องกับอัตราความเร็วในการหมุน กล่าวคือ การใช้กำลังไฟในการกวนที่ความเร็วสูงของการกวนร่วมมีค่าน้อยกว่าการกวนแบบเชิงเดี่ยว(stand-alone) อย่างไรก็ตามการกวนร่วมในแนวแกนนั้นใช้เวลาอยู่ในการแตกตัวของ

สาร ลดความหนืด^[2] Wilfried F. Schierholz ได้ศึกษาพฤติกรรมการกวนของเหลวแบบ non-newtonian ในถังกวนโดยจำลองลักษณะการกวนทำให้พบว่าหากใช้ความเร็วในการกวนที่ความเร็วเท่ากัน แต่ใช้ของเหลวต่างชนิดกันลักษณะความเค้นเฉือนและความหนืดจะเป็นไปตามรูปแบบของของไหลโดยแบ่งเป็น Shear thinning, Newtonian, Shear thickening อีกทั้งยังแนะนำว่าในการวิเคราะห์ค่าความเค้นเฉือนนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนไม่ควรพิจารณาที่บริเวณใบกวนแต่อย่างใด ควรพิจารณาบริเวณโดยรอบใบกวนร่วมด้วย^[3]

เนื่องจากในปัจจุบันนี้การกวนยางรักชาวบ้านและช่างฝีมือด้านนี้จะกวนด้วยไม้พายในกะละมังทำให้เสียเวลามากและคุณภาพของรักที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควรและมีโอกาสที่เกิดอันตรายจากการสัมผัสยางรักอีกด้วย การพัฒนาเครื่องกวนยางรักเพื่อให้มีความสะดวกต่อการใช้งานและได้ยางรักที่มีคุณภาพในปริมาณมากขึ้นด้วยเวลาที่น้อยลง จึงต้องมีการวิจัยออกแบบเครื่องกวนยางรัก โดยได้ออกแบบถังกวนตามหลักการออกแบบทั่วไป และได้เลือกใบกวนเพื่อใช้ในการทดสอบสามแบบคือแบบ Rushton (RT) แบบ Pitched blade turbine (PBT) และแบบ Paddle (PD)^[4] เพื่อหารูปแบบใบกวนที่เหมาะสมกับการกวนผสมยางรัก

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

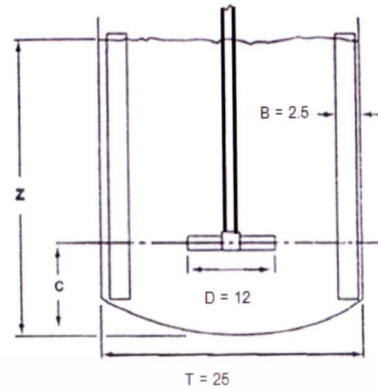
2.1 การออกแบบถังกวน

การออกแบบถังกวนโดยหลักทฤษฎีการออกแบบถังกวนทั่วไปเพื่อให้สามารถกวนยางรักได้ครั้งละ 10-15 ลิตร จึงได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในถัง 250 มม. สูง 350 มม. และภายในติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) ขนาดความกว้าง 25 มม. ตลอดความสูงของถังกวน จำนวน 4 อัน ดังแสดงในรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



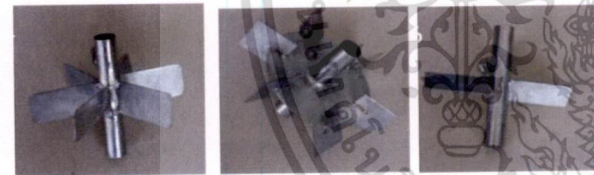
รูปที่ 1 แสดงลักษณะของถังกวนยางรัก



รูปที่ 3 แสดงระยะการติดตั้งใบกวนในถังกวน

2.2 การออกแบบใบกวน

ได้เลือกใบกวน 3 รูปแบบ เพื่อใช้ในการทดสอบคือ แบบ Rhuston (RT), แบบ Pitched blade turbine (PBT) และแบบ Paddle (PD) ซึ่งจะทำให้เกิดรูปแบบการไหล Radials flow, Tangential flow และ Axial flow^[5] ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบค่า Power Number และค่า Reynolds Number โดยใบกวนแต่ละแบบนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 ซม.



รูปที่ 2 ใบกวนแบบ Pitch Blade Turbine (PBT), แบบ Rhuston (RT), แบบ Paddle (PD)

2.3 การติดตั้งใบกวนกับถังกวน

จากหลักการออกแบบถังกวน กำหนดให้ระยะห่าง Clearance (C) จากด้านล่างของถัง เพราะใบกวนมีเพียงหนึ่งชั้น โดยหาแค่ระยะห่าง Clearance (C) จากด้านล่างเท่านั้น

| Mixing System | Maximum Liquid Height Z/T | Number of Impellers | Impeller Elevation from Tank Bottom | |
|------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------------------|-------|
| | | | Bottom | Top |
| Liquid blending | 1.4 | 1 | Z/3 | - |
| | 2.1 | 2 | T/3 | 2 Z/3 |
| Solid suspension | 1.2 | 1 | Z/4 | - |
| | 1.8 | 2 | T/4 | 2 Z/3 |
| Gas dispersion | 1.0 | 1 | T/6 | - |
| | 1.8 | 2 | T/6 | 2 Z/3 |

ตารางที่ 1 Recommended Impeller Clearance and Spacing

จากรูปที่ 3 และตารางที่ 1 จะได้สูตรการคำนวณหา Clearance (C) เมื่อใบกวนมีจำนวน 1 ชุด ได้ค่า T = 25 ซม. Z = 35 ซม. โดยกำหนดให้ ความสูงของยางรักสูงสุด(Z) = 30 ซม. หรือเท่ากับปริมาตร 15 ลิตร จากตารางที่ 1 เมื่อต้องการกวนของเหลว จะได้ค่า

$$\text{Bottom Clearance} = Z/3 \quad (1)$$

เมื่อ Z = 30 ซม. ดังนั้น C = 10 ซม.

และหาขนาดของบัพเฟอไรต์จากสมการ

$$B = T/10 \quad (2)$$

เมื่อ T = 25 ซม. ดังนั้น B = 2.5 ซม. โดยใช้จำนวน 4 อันติรอปถังกวนผสม

2.4 การคำนวณค่า Power และ Reynolds number

ค่า Power number และ Reynolds number สามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{Power number } P_o = \frac{P}{N^3 D^5 \rho} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reynolds number $R_e = \frac{ND^2\rho}{\mu}$ (4)

เมื่อ P คือ กำลังที่ใช้ของมอเตอร์ (Watts)

N คือ ความเร็วรอบในการหมุน (s)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน (m)

μ คือ คีอความหนืด (Pa.s)

3. เครื่องกวนยางรัก

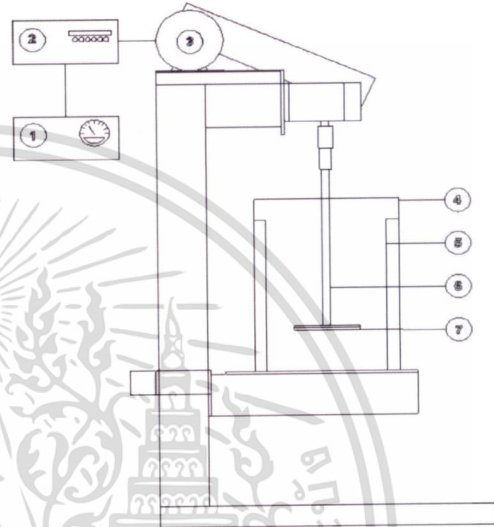
เครื่องกวนยางรักที่ได้ออกแบบขึ้นนี้เป็นเครื่องกวนขนาดเล็กมีน้ำหนักไม่มากนักสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก โดยสามารถทำการกวนยางรักได้ในอัตรา 10-15 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4 แสดงเครื่องกวนยางรัก

2. วัดความหนืดที่เวลา 15, 30, 45, และ 60 นาทีตามลำดับ เพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมกับความหนืดที่ต้องการ

3. วัดอุณหภูมิยางรักที่อุณหภูมิห้อง (28°C) และที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 °C ตามลำดับเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม



รูปที่ 5 การประกอบอุปกรณ์การทดลอง

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| 1. วัดดีมิเตอร์ | 2. ตัวปรับความเร็วรอบ |
| 3. มอเตอร์ส่งกำลัง | 4. ถังกวน |
| 5. บัฟเฟอร์ | 6. เพลลา |
| 7. ใบกวน | |

4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การประกอบอุปกรณ์การทดลอง

ได้ประกอบอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 5 โดยวัดกำลังด้วยวัตต์มิเตอร์ และวัดความเร็วรอบด้วย Digital Tachometer วัดความหนืดยางรักด้วย เครื่อง Saybolt Universal Viscometer

4.2 วิธีการทดลอง

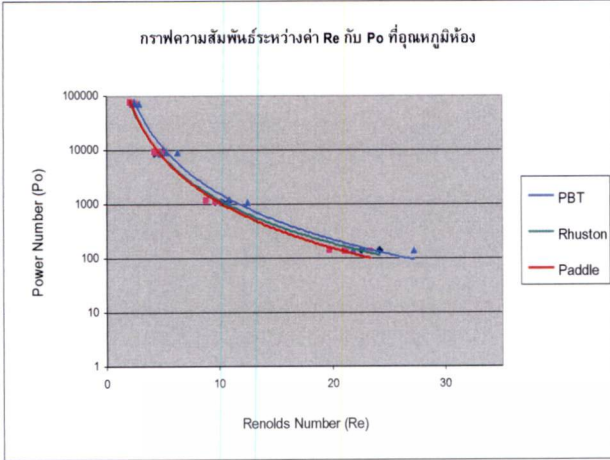
1. ทดลองโดยการกวนยางรักด้วยใบกวน 3 แบบ

มีการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของใบกวนที่ความเร็ว 50, 100, 200 และ 400 รอบต่อนาที

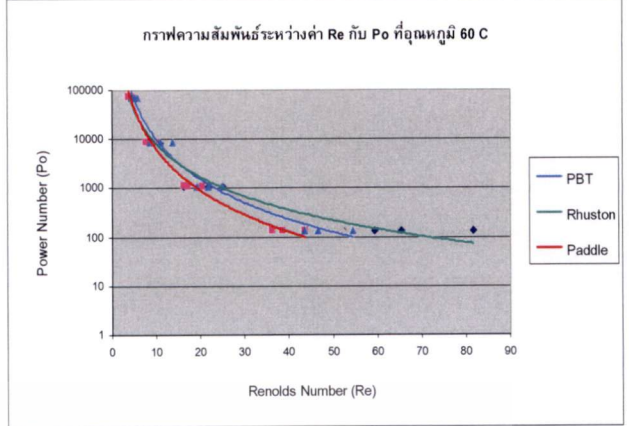
5 ผลการทดลอง

นำผลการทดลองมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Number กับค่า Reynolds Number ที่อุณหภูมิต่างๆ จะได้ดังแสดงในรูปที่ 6-9 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ใช้กับเวลา กวน ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 °C ดังแสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11

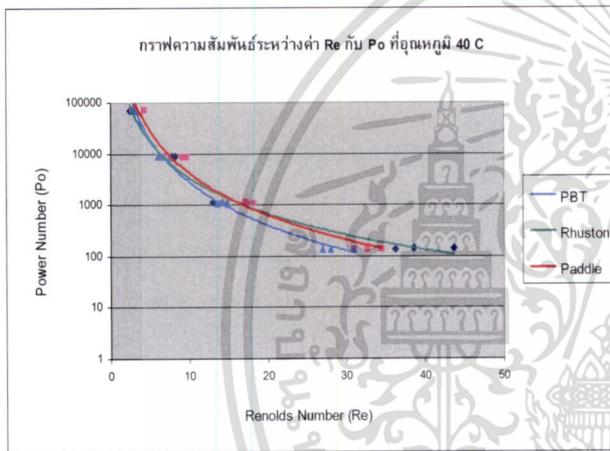
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



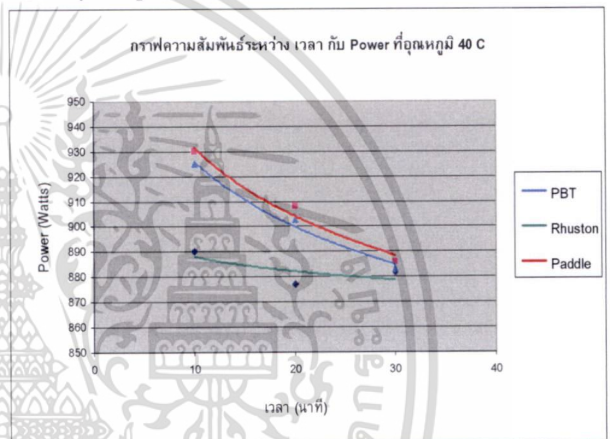
รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_e กับ P_o ที่อุณหภูมิห้อง



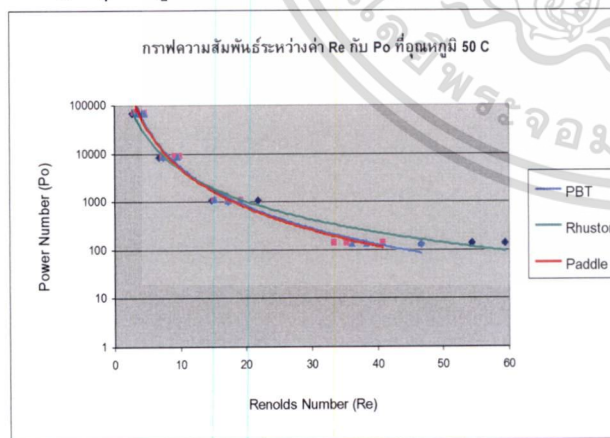
รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_e กับ P_o ที่อุณหภูมิ 60 °C



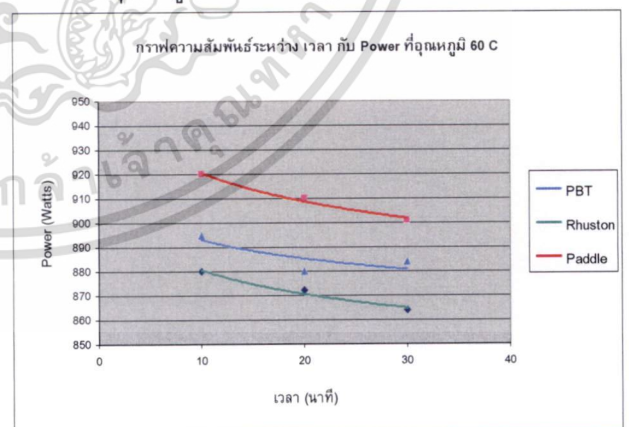
รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_e กับ P_o ที่อุณหภูมิ 40 °C



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ Power ที่อุณหภูมิ 40 °C



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_e กับ P_o ที่อุณหภูมิ 50 °C



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ Power ที่อุณหภูมิ 60 °C

จากรูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_e และ P_o ที่อุณหภูมิห้องจะสามารถทราบได้ว่าใบ กวนประเภท Pitched blade turbine มีประสิทธิภาพ การเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงที่สุดเนื่องจากเส้นกราฟ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของใบกวนประเภทนี้ให้ค่า R_c สูงกว่าใบกวนชนิดอื่น ดังนั้นใบกวนประเภท Pitch blade turbine จึงเหมาะสมกับการกวนยางรักที่อุณหภูมิห้องมากกว่าใบกวนชนิดอื่น

จากรูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_c และ P_o ที่อุณหภูมิ 40 °C ใบกวนประเภท Paddle มีค่า R_c สูงกว่าใบกวนชนิดอื่นในค่า P_o สูง หรือความเร็วรอบต่ำ แต่ที่ค่า P_o ต่ำลงมาหรือความเร็วรอบสูงขึ้นใบกวนชนิดนี้จะให้ค่า R_c ต่ำกว่า ใบกวนแบบ Rhuston ดังนั้นใบกวนประเภท Paddle จึงเหมาะสมกับการกวนที่ความเร็วรอบต่ำ และมีอุณหภูมิมาเกี่ยวข้อง

จากรูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_c และ P_o ที่อุณหภูมิ 50 °C ใบกวนประเภท Pitch blade turbine และ Paddle จะให้ค่า R_c ในความเร็วรอบต่ำใกล้เคียงกันและเมื่อเพิ่มความเร็วรอบใบกวนประเภท Pitch blade turbine จะให้ค่า R_c สูงกว่าประเภท Paddle ใบกวนประเภท Paddle จะมีค่า R_c ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิเสถียรมากกว่าใบกวนชนิดอื่นๆ

จากรูปที่ 7, 8 และ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_c และ P_o ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C ตามลำดับจะแสดงให้เห็นว่าที่ค่า P_o ต่ำหรือความเร็วรอบ (N) สูง ใบกวนประเภท Rhuston ให้ค่า R_c ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับใบกวนชนิดอื่นและจะเพิ่มสูงขึ้นอีกหากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นดังนั้นใบกวนประเภท Rhuston จึงเหมาะสมสำหรับการกวนยางรักที่มีสิ่งเจือปนอยู่ ซึ่งใบกวนประเภทนี้ใช้สำหรับเงื่อนไขที่ผสมอยู่ในเนื้อยางรักให้แตกออกและผสมเข้ากัน ที่อุณหภูมิสูงและความเร็วรอบสูงได้ดีที่สุด

5. จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิมากขึ้นค่า R_c ของยางรักจะสูงขึ้นเรื่อยๆ หมายความว่าเมื่ออุณหภูมิของยางรักสูงขึ้นจะทำให้ความหนืดของยางรักลดลงและเมื่อ P_o ลดลงซึ่งเปรียบเสมือนว่าความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีผลกับค่า R_c เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ความหนืดของยางรักลดลง

จากรูปที่ 10 และ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลัง ได้ข้อสรุปว่าใบกวนประเภท Rhuston ใช้กำลังในการขับใบกวนที่น้อยที่สุด และใบกวนประเภท Paddle จะใช้กำลังในการขับมากที่สุด

6.สรุปผลการทดลอง

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. ใบกวนประเภท Rhuston ให้ค่า R_c สูงที่สุดในการกวนในช่วงที่มีอุณหภูมิและความเร็วรอบสูง ดังนั้นใบกวนประเภท Rhuston จึงเหมาะสมสำหรับการกวนยางรักที่ความเร็วรอบสูงร่วมกับการเพิ่มอุณหภูมิในการกวน
2. ที่อุณหภูมิห้องใบกวนประเภท Pitched blade turbine ให้ค่า R_c สูงกว่าใบกวนประเภทอื่น ดังนั้นจะเหมาะสมที่จะใช้กวนที่อุณหภูมิห้อง

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] Rm. Muthiah, R.Manjari, V.N. Krishnamurth. Rheology of HTPB Propellant: Effect of mixing speed and Mixing Time ,Defence Science Journal, Vol 43, No 2, April 1993, pp 167-172
- [2] L.Rudolph, M. Schafer, V. Atiemo-Obeng and Kraume. Experimental and Numerical Analysis of Power Consumption for Mixing of High Viscosity Fluids with A Co-Axial Mixer. Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design, 2007, 85(A5):568-575
- [3] Wilfried F. Schierholz. The Mixing Behaviour of non-Newtonian Fluids in stirred Tank. NAFEMS Seminar: Simulation of Complex Flows (CFD) Niedernhausen/Wiesbaden, Germany, April 25-26, 2005.
- [4] R.P. Chhabra and J.F. Richardson 1999 Non-newtonian flow in the process industries , Fundamentals and Engineering Applications

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[5] Tatterson, G. B. (1994). Scaleup and Design of Industrial Mixing Processes, McGraw-Hill, New York

[6] กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม, (2551), ศึกษา
ยารักเพื่ออนุรักษ์ภูมิปัญญาไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล : นายสถาพร อุดลเศรษฐพงษ์
- ชื่อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบเครื่องกวนผสมยางรัก
- สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
- ประวัติส่วนตัว : เกิดเมื่อวันที่ 21 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527
- ที่อยู่ : อยู่บ้านเลขที่ 51 ม.5 ต.ห้วยกะปิ อ.เมือง จ.ชลบุรี
- การศึกษา : พ.ศ. 2545 มัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนชลราษฎรอำรุง จ.ชลบุรี
 พ.ศ. 2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมต่อเรือและเครื่องกลเรือจาก
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา จ.ชลบุรี
 พ.ศ. 2550 เข้าศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล