สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเชิงทดลองผลกระทบของของไหลผสมต่อสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง

EXPERIMENTAL STUDY OF SLURRY EFFECT ON CENTRIFUGAL PUMP PERFORMANCE CHARACTERISTICS

T139886

อายุส สันถวะโกมล
ARYUT SANTAWAGOMON

เลขหมู่......
เลขทะเบียน...... 139886
วัน.เดือน.ปี...... 19 พ.ย. 2558
.b......
.i......

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558
KMITL-2015-EN-M-030-125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL STUDY OF SLURRY EFFECT ON CENTRIFUGAL PUMP PERFORMANCE CHARACTERISTICS

ARYUT SANTAWAGOMON

A THESIS SUBMITED 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
2015

KMITL-2015-EN-M-030-125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2015
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเชิงทดลองผลกระทบของของไหลผสมต่อสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง
Thesis Title Experimental Study of Slurry Effect on Centrifugal Pump Performance Characteristics
นักศึกษา นายอายุส สันถวะโกมล
รหัสประจำตัว 53610617
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จำลอง ปรานแก้ว
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-030-125

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	
ผศ.ดร.พรชัย	นิเวศน์รังสรรค์	
ดร.มธุรส	สุชาตะวัฒน์	
รศ.ดร.จำลอง	ปรานแก้ว	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-303

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน ความต้องการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรมนั้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อันเนื่องมาจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศ ความมั่นคงทางพลังงานสำหรับปัจจุบัน และอนาคตจะสร้างความมั่นใจต่อผู้ประกอบการและนักลงทุนทั้งในและนอกประเทศ อย่างไรก็ตาม ในส่วนของผู้ประกอบการ ได้มีความตระหนักถึงการประหยัดพลังงาน และการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่ามากที่สุด จะเห็นได้จากผู้ประกอบการหลายราย ได้พยายามปรับปรุง เครื่องจักรและการผลิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางพลังงานซึ่งส่งผลให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ เป็นต้น

อุปกรณ์หลักอย่างหนึ่งที่มีการใช้งานอย่างกว้างในเกือบทุกภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ได้แก่ เครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงหรือเครื่องสูบแบบหอยโข่ง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สูบของเหลวที่นิยมใช้กันมาก เช่น การสูบของเหลวในอุตสาหกรรมอาหาร การสูบน้ำมันในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน และปิโตรเคมี เนื่องจากเป็นเครื่องสูบที่ให้อัตราการไหลและเฮดที่เหมาะสมกับงาน ง่ายต่อการติดตั้ง จึงสามารถกล่าวได้ว่า เครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเป็นอุปกรณ์ที่ หากมีการปรับปรุง หรือเพิ่มประสิทธิภาพทางพลังงานในระบบสูบของไหล จะสามารถก่อให้เกิดการลดการใช้พลังงานในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมอย่างเห็นได้ชัด

ลักษณะการใช้งานเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง นอกจากจะใช้สูบน้ำปกติ ยังมีการใช้เครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงสูบของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย หรือของไหลผสมระหว่างน้ำกับโคลน เช่น การใช้เครื่องสูบน้ำผสมทรายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง หรือ การสูบน้ำผสมโคลนจากแม่น้ำลำคลองที่ตื้นเขิน เป็นต้น ซึ่งคุณลักษณะของของไหลผสมจะส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องสูบ โดยตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องสูบ เช่น ขนาด และการกระจายตัวของอนุถาค ความเข้มข้นของอนุภาคที่ผสมในของไหล เป็นต้น

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างการใช้งานเครื่องสูบสูบของไหลผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส [illegible] ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูบของไหลผสมจะส่งผลให้จุดทำงานที่เครื่องสูบเปลี่ยนไปจากจุดทำงานของเครื่องสูบที่ใช้สูบน้ำปกติ กล่าวคือ เฮด และประสิทธิภาพของเครื่องสูบจะลดลงในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่ใช้จะสูงขึ้น การเลือกใช้เครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงสำหรับของไหลผสมที่ผ่านมาจะเลือกใช้จากประสบการณ์ หรือจากการใช้ข้อมูลจากกราฟแสดงสมรรถนะของผู้ผลิตซึ่งทดสอบกับน้ำธรรมดา ในความเป็นจริงสมรรถนะของเครื่องสูบแรงเหวี่ยงจะแตกต่างกันตามคุณลักษณะการใช้งานและชนิดของของเหลวที่สูบ ในการสูบของไหลผสม การเลือกใช้เครื่องสูบที่ไม่ตรงกับลักษณะความต้องการที่ได้ออกแบบไว้อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการใช้งานระบบสูบน้ำที่ไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลเสียต่อการใช้งานทั้งระยะสั้นและระยะยาว การศึกษาสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงที่สูบของไหลผสมจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับกระบวนการออกแบบระบบสูบของไหลให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องสูบสำหรับสูบของไหลผสม โดยส่วนใหญ่จะเป็นการเทียบสมรรถนะ ระหว่างของไหลผสม กับน้ำธรรมดา ตามอัตราส่วนเฮด (Head Ratio) และอัตราส่วนประสิทธิภาพ (Efficiency Ratio) โดย อัตราส่วนเฮด คือค่าเฮดของเครื่องสูบเมื่อสูบของไหลผสมที่อัตราการไหลใดๆก็ตามเทียบกับเฮดเครื่องสูบเมื่อสูบน้ำปกติที่อัตราการไหลเดียวกัน ส่วนอัตราส่วนประสิทธิภาพ เป็นการเทียบประสิทธิภาพในลักษณะเดียวกันกับอัตราส่วนเฮด ความสัมพันธ์ของค่าเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ ขนาดของเครื่องสูบ ระบบท่อ และคุณลักษณะทางกายภาพของของไหลผสม เป็นต้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อใช้สูบของไหลผสม 2 ชนิดได้แก่ ทรายและโซเดียมเบนโทไนท์ที่มีความแตกต่างทางลักษณะทางกายภาพ โดยใช้ความเข้มข้นโดยปริมาตรที่ 5% 9% และ 13% ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะกับการสูบแบบน้ำปกติ นำค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งาน สามารถเลือกเครื่องสูบได้ตรงตามความต้องการได้สะดวกยิ่งขึ้น ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อใช้สูบของไหลผสมเทียบกับการสูบน้ำปกติ

1.2.2 ศึกษาผลของขนาดและความเข้มข้นของอนุภาคในของไหลผสมที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องสูบ

1.2.3 ศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของเครื่องสูบ ที่ลักษณะของไหลผสม ความเข้มข้นโดยปริมาตรและอัตราการไหลมีความแตกต่างกัน สำหรับการพัฒนาสร้างสมการหรือกราฟทำนายสมรรถนะเครื่องสูบที่เปลี่ยนไปจากการสูบน้ำปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของของไหลผสมที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง โดย ได้ใช้สวนผสมของไหลระหว่าง น้ำกับทราย และ น้ำกับโซเดียมเบนโทไนท์ ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ขนาดของอนุภาค และความถ่วงจำเพาะ เป็นต้น โดยของไหลผสมทั้งสองจะถูกทดสอบที่ความเข้มข้นโดยปริมาตรสามระดับคือ 5% 9% และ 13% ตามลำดับ จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบ กับสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อสูบน้ำปกติ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง เฮดกับอัตราการไหล กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับอัตราการไหล และประสิทธิภาพกับอัตราการไหล การเปรียบเทียบผลการทดลองจะอยู่ในรูปของ อัตราส่วนเฮด (H_R) อัตราส่วนกำลังไฟฟ้า (P_R) และอัตราส่วนประสิทธิภาพ (E_R) ตามลำดับ จากนั้นจะนำผลการทดลองของอัตราส่วนเฮดมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ เช่น ความเข้มข้น เพื่อหาสมการสำหรับทำนายสมรรถนะเครื่องสูบเมื่อใช้สูบของไหลผสมต่อไป

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของของไหลผสมที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง โดย ได้ใช้ส่วนผสมของไหลระหว่าง น้ำกับทราย และ น้ำกับโซเดียมเบนโทไนท์ ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ขนาดของอนุภาค และความถ่วงจำเพาะ เป็นต้น โดยของไหลผสมทั้งสองจะถูกทดสอบที่ความเข้มข้นโดยปริมาตรสามระดับคือ 5% 9% และ 13% ตามลำดับ จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบสำหรับนำมาพัฒนาเป็นข้อมูลสำหรับผู้ใช้งานในการเลือกเครื่องสูบแรงเหวี่ยงให้เหมาะสมกับระบบที่ต้องการต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่ผ่านมาได้มีผู้วิจัยทำการทดสอบการทำงานของระบบสูบน้ำเมื่อทำการสูบของไหลแบบผสม งานวิจัยที่น่าสนใจ ได้แก่ งานศึกษาสมรรรถนะของเครื่องสูบเมื่อสูบของไหลสามชนิดโดย Gandhi Singh และ Seshadri [1] ซึ่งได้ศึกษาสำหรับบทความนี้ได้ทำการทดลองเครื่องสูบของของไหลผสม โดยเปรียบเทียบกับวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ ขี้เถ้าจากโรงไฟฟ้า (Fly Ash) แร่สังกะสี (Zinc Tailings) และถ่านหิน ที่มีความแตกต่างในเรื่องของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาค เพื่อหาสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เฮดและประสิทธิภาพของเครื่องสูบลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้น ขนาดอนุภาค และค่าความหนืด ของ ของไหลผสม และ ความสูญเสียของเฮดสำหรับของไหลผสมจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขนาดของเครื่องสูบ

ทีมวิจัยชุดเดียว Gandhi Singh และ Seshadri [2] ได้ทำการทดลองเพิ่มเติม คือ ทำการทดสอบเครื่องสูบของไหลผสมขนาด 4.97 kW เฮด 14.5 เมตร อัตราการไหล 16 ลิตรต่อวินาที เทียบกับ ความเร็วรอบของเครื่องสูบที่สามระดับ 1150 1450 และ 1750 รอบต่อนาที โดยใช้วัสดุของไหลผสมสองชนิดคือ แร่สังกะสี กับขี้เถ้า ความเข้มข้นโดยน้ำหนักประมาณ 10% ถึง 60% ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเทียบกับเครื่องสูบที่ทำงานกับน้ำปกติ จะได้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 44.5% ที่ความเร็วรอบ 1450 รอบต่อนาที ซึ่งตรงกับข้อมูลจากผู้ผลิต และจากการทดสอบพบได้ว่า ค่าเฮดจำเพาะ (Specific Head) ลดลงที่ ความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นใดๆ ส่วนค่าของ กำลังงานจำเพาะ (Specific Power) ลดลงพร้อมกับการเพิ่มความเร็วรอบ ส่วนกำลังงานจำเพาะ จะลดลงประมาณ 15% สำหรับการเพิ่มความเร็วรอบจาก 1150 ถึง 1750 รอบต่อนาที ซึ่งสรุปได้ว่า ของไหลผสมขี้เถ้า อัตราการลดลงของอัตราส่วนเฮด จะมากขึ้นสำหรับความเร็วรอบเครื่องสูบที่สูงขึ้น สำหรับของผสมแร่สังกะสี เป็นลักษณะคล้ายๆกันคือ อัตราส่วนเฮด มีค่าลดลงที่การเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องสูบ แต่การเปลี่ยนแปลงจะมีเพียงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นน้อยกว่า 37% โดยน้ำหนักซึ่งอาจสรุปได้ว่า สำหรับ ของผสมที่มีอนุภาคที่หยาบ ที่ความเข้มข้นต่ำๆ ความเร็วรอบไม่มีผลกระทบใดๆต่ออัตราส่วนเฮด โดยผู้เขียนสรุปจากการทดลองคือ สำหรับเครื่องสูบ แบบแรงเหวี่ยง ทั่วไป สามารถนำมาใช้กับของไหลผสม ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 20% ที่ความเร็วรอบใดๆก็ได้ ส่วนที่ควมเข้มข้นสูงๆ จะต้องพิจารณาคุณสมบัติและผลกระทบของอนุภาคของผสม

Chandal et al. [3] ได้ทำงานวิจัยการเปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องสูบของไหลผสมสองชนิดได้แก่ แบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal) และ แบบสกรู (Progressive Cavity) โดยใช้ของไหลผสม คือ Fly Ash ที่ค่าความเข้มข้นโดยน้ำหนัก 50% ถึง 70% โดยงานวิจัยนี้ ผู้เขียนสามารถสรุปได้ว่า 1) เฮด และ ประสิทธิภาพ ของเครื่องสูบชนิดแรงเหวียงลดลงเมื่อ ความเข้มข้นของของผสมและค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนืดของของไหลผสม (Slurry Viscosity) เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม สำหรับเครื่องสูบแบบสกรู การเพิ่มขึ้นของ ความเข้มข้นและความหนืดทำให้ เฮด และ ประสิทธิภาพ เพิ่มขึ้น 2) สำหรับเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง อัตราส่วนเฮด มีค่าคงที่ และ อัตราส่วนประสิทธิภาพ ลดลง เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลที่ความเข้มข้นใดๆ ส่วนเครื่องสูบแบบสกรู อัตราส่วนเฮด และ อัตราส่วนประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นใดๆ 3) สำหรับเครื่องสูบชนิดแรงเหวี่ยง ค่าอัตราส่วนเฮด และอัตราส่วนประสิทธิภาพลดลงเมื่อ ค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่จุด BEP ในขณะเครื่องสูบแบบสกรู ค่าทั้งสองนี่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่อัตราการไหลใดๆ และ 4) สำหรับการวัดของไหลผสมประเภทอื่นๆ ซึ่งมีค่าคุณลักษณะที่แตกต่างกันสามารถที่จะพัฒนาค่าสำหรับการทำนายสมรรถนะของเครื่องสูบโดยจะต้องมีการทดสอบเพิ่มเติม

งานวิจัยของ Gahlo et al. [11] ทำการทดลองหา สมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบของไหลผสม ซึ่งได้แก่ ถ่านหิน จากเหมืองถลุงเหล็ก มีค่าความหนาแน่น 1480 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และแร่สังกะสี ที่ได้จากโรงถลุงแร่สังกะสี ความหนาแน่น 2850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดประมาณ 3 มิลลิเมตร การทดสอบได้ใช้เครื่องสูบสองชนิดคือ ชนิดใบพัด Rubber Line และ Metal จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่า เฮดและประสิทธิภาพ ของเครื่องสูบลดลง ขณะที่กำลังไฟฟ้า (Input Power) ของเครื่องสูบเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของไหลผสมเพิ่มขึ้น การเปลียนแปลงจะเป็นไปอย่างคงที่ที่ความเข้มข้นโดยน้ำหนักประมาณ 25% ที่ความเข้มข้นสูงๆ สมรรถนะจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในบทสรุปผู้เขียนได้สรุปสมการความสัมพันธ์ของผลกระทบของความเข้มข้น (Solid Concentration) ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค รวมถึงความถ่วงจำเพาะที่มีต่อเครื่องสูบเมื่อสูบของไหลผสม

ทีมวิจัยประกอบด้วย Walker et al. [4] ทำการศึกษาผลกระทบของใบพัดของเครื่องสูบต่อสมรรถณะของเครื่องสูบเมื่อสูบของไหลผสม ในการทดลองนี้ผู้เขียนได้ใช้ทรายที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.5 เป็นตัวผสมน้ำสำหรับทดลอง เช่นเดียวกับการทดลองลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยอื่นๆ เครื่องสูบถูกทดสอบประสิทธิภาพเมื่อเครื่องสูบน้ำปกติ จากตารางจะเห็นได้ว่า ใบพัดชนิด E มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือ type C และ O ความเข้มข้นของของไหลผสมถูกทดสอบที่สามระดับได้แก่ 20 40 และ 60% รายละเอียดของใบพัดสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2. Impeller water performance
(Best Efficiency Point, N = 1000 r/min)

Impeller Code	Flow (L/s)	Head (m)	Efficiency (%)
C1	75	19.2	72
C2	50	16.6	65
C3	70	22.5	76
O1	60	21.4	64
O2	60	18	63
E1	50	19.3	72
E2	60	18.7	74
E3	60	20	78
E4	60	23.5	79

ตารางที่ 2.1 รูปแบบใบพัดที่ใช้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบ [4]

จากการทดลองที่ผู้เขียนสรุปได้แก่ 1) ลักษณะของใบพัด (Vane) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะ อย่างเห็นได้ชัด 2) การเพิ่มขึ้นของตัวเลขฟรุด (Froude Number) ซึ่งเป็นค่าแสดงผลของแรงเฉื่อยเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ส่งผลให้ค่า อัตราส่วนเฮดกับค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพสูงขึ้น 3) จำนวนใบพัด ความกว้างทางออก และความเร็วจำเพาะ ไม่มีผลใดๆต่อสมรรถนะของเครื่องสูบในการทดลองนี้ 4) ผลของขนาดต่างๆของอนุภาคที่ผสม มีความแตกต่างกันสำหรับค่า อัตราส่วนเฮดกับค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพ

งานวิจัย Kazim et al. [5] เป็นการศึกษาหาผลกระทบของของไหลผสมต่อสมรรถนะของเครื่องสูบ ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นการหาความสัมพันธ์ของการทำนายค่าตัวประกอบการลดลงของเฮด (head reduction factor) สำหรับเครื่องสูบของไหลผสม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของขนาดของอนุภาคการกระจายตัว ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) และค่าความเข้มข้นของของผสม เครื่องสูบในการทดลองนี้ใช้ระบบควบคุมแบบความเร็วเปลี่ยนแปลงได้ (variable speed drive) ซึ่งควบคุมความเร็วรอบไว้ที่ 100 รอบต่อนาที วัสดุที่ใช้ผสมน้ำในการทดลองประกอบด้วย ทราย เหล็กกล้าละมุน ถ่านหิน สังกะสี และ แร่เหล็ก

จากผลการทดลอง สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงกับความเข้มข้นของของผสมที่ต่างชนิดกัน คือ1) การลดลงของเฮด เป็นไปตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของ ความเข้มข้นของวัสดุที่ผสมในของไหล 2) สำหรับของผสมที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ ประมาณ (1.48-6.238) ค่า ตัวประกอบการลดลงของเฮด เป็นสัดส่วนกัน ค่าขนาดของอนุภาคที่มีค่าระหว่าง 105-26700 um ค่าตัวประกอบการลดลงของเฮด เป็นสัดส่วนกับสมการที่ได้จากการทดลอง 4) ผลการทดลองเทียบกับการหาจากสมการมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 10%

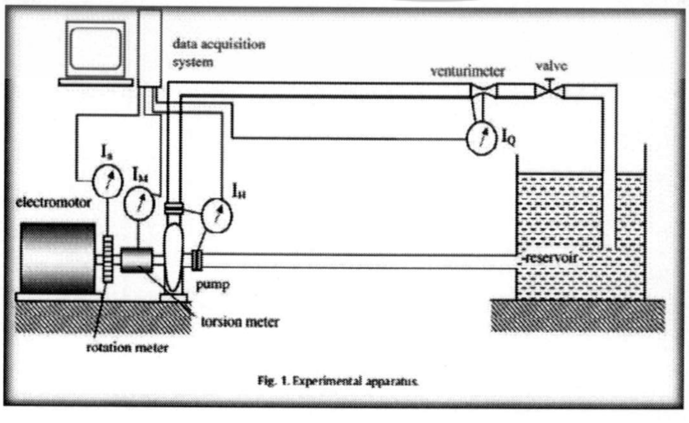
นอกจากการทดสอบสรรถนะที่กล่าวมา ยังมีการศึกษาการกัดกร่อนของเครื่องสูบในส่วนใบพัดและ เรือนเครื่องสูบ เนื่องมาจาก ของไหลผสม โดยวิธีการใช้ Numerical simulation ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมทาง CFD (Computational Fluid Dynamics) [6] มีการจำลองค่าของทรายที่เป็นส่วนผสมน้ำ โดยมีขนาดตั้งแต่ 50 ไมครอน ถึง 600 ไมครอน และเปอร์เซ็นการกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ดิจิทัลเพื่อใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวที่ 0.02 ถึง 0.2 ตามลำดับ ใบพัดของเครื่องสูบที่กำหนด ได้แก่ ความเร็วจำเพาะ 24.6, กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 5,689.8 watt, เส้นผ่านศูนย์กลางของ Eye, Inlet blade และ Hub อยู่ที่ 0.101 0.963 และ 0.0236 เมตร ตามลำดับ ผลการทดลองสรุปได้ว่า 1) ความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับอัตราการไหล โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลมากขึ้น 2) ผลความเสียหายจากการกัดกร่อนจะเกิดตรงใบพัดมากกว่าส่วนอื่นๆ 3) ผลของขนาดของอนุภาคที่มีต่ออัตราการกัดกร่อน จะมีผลถึงขนาดอนุภาค 600-800 ไมครอน หลังจากนั้น อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นช้าลง 4) การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลทำให้แรงดันของเครื่องสูบลดลงและสามารถทำให้เกิด Cavitation ที่ผิวของใบพัดได้

ส่วนท้ายของบทความ ผู้เขียนยังได้เสนอแนะการเลือกวัสดุและการเสริมความแข็งแรงของใบพัดเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน ลดอัตราการกัดกร่อน เช่น วิธีการทางความร้อน (Heat Treatment) หรือ ฉนวนป้องกันความร้อน (Ceramic coating) และการเคลือบเสริมความแข็งแรงสามารถทำได้ตรงเฉพาะใบพัด โดยไม่จำเป็นจะต้องเคลือบทั้งชุดใบพัดทั้งหมด เพื่อลดค่าใช้จ่ายลงได้

งานวิจัยโดย Savar et al. [7] ได้ทำการศึกษาผลของการตัดแต่งใบพัดของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง โดยการทดลองนี้ได้มีการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดครั้งละ 10 มิลลิเมตร จาก 190 มิลลิเมตร ถึง 130 มิลลิเมตร โดยไม่มีการเปลี่ยนตัวเรือนของเครื่องสูบ สมรรถนะของเครื่องสูบสามารถหาจากค่าของเฮด และสัมประสิทธิ์การไหล ผลจากการทดลอง ผู้เขียนสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของ กราฟอัตราการไหลและเฮด จะใกล้เคียงกับ กฎของเครื่องสูบ กล่าวคือที่ เฮดของเครื่องสูบใดๆ อัตราการไหลจะลดลงตามขนาดที่ลดลงของใบพัด และที่อัตราการไหลใดๆ เฮดเครื่องสูบก็จะลดลงเช่นเดียวกัน ส่วนประสิทธิภาพของเครื่องสูบ พบว่า ประสิทธิภาพของใบพัด เส้นผ่านศูนย์กลาง 190 ถึง 170 มิลลิเมตร มีค่าที่สูง และใกล้เคียงกัน เมื่อใบพัดถูกลดขนาดมากกว่านั้น ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด อันเนื่องมาจากช่องว่างระหว่าง ใบพัด กับ ตัวเรือนเครื่องสูบ ผู้เขียนได้อ้างถึงงานวิจัยที่มีมาก่อนว่า การลดขนาดใบพัดไม่ควรมากกว่า 75% ของขนาดใบพัดเดิม เนื่องจากช่องว่างที่มากขึ้นจะก่อให้เกิดกระแสน้ำวนในเรือนเครื่องสูบ ที่ทำให้เกิด เฮดสูญเสียมากขึ้น ชุดทดสอบของการทดลองดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.1 ชุดทำสอบการตัดแต่งใบพัดของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง [7]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

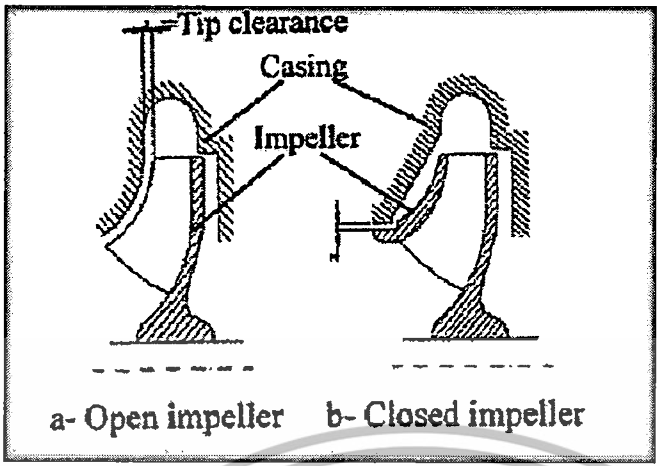
นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้หาสมรรถนะโดย Hua and Yi. [19] ได้ศึกษาการไหลของของไหลผสมระหว่าง ของแข็งและของเหลว โดยใช้โปรแกรม FLUENT จำลองการคำนวณ โดยพิจารณาถึง ขนาดของอนุภาค (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 0.10 และ 0.25 มิลลิเมตร) การกระจายตัวและความหนาแน่น (1100 1500 และ 1900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ผลการใช้โปรแกรมทำนายผล จำแนกได้ คือ 1) ส่วนของอนุภาคที่มีผลต่อสมรรถนะโดยรวมของเครื่องสูบ เมื่อขนาดอนุภาคโดยรวมเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพและเฮดเครื่องสูบลดลงโดยกำลังไฟฟ้าที่ใช้นั้นคงที่ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาค ประสิทธิภาพของเครื่องสูบลดลง เนื่องจากเฮดสูญเสียเพิ่มสูงขึ้น เครื่องสูบสร้างเฮดได้น้อยลง ส่วนการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นก็เป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือลดประสิทธิภาพและเฮดของเครื่องสูบ เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่วนการศึกษาผลของขนาดอนุภาคต่อการกระจายตัว พบว่า อนุภาคจะกระจุกตัวหนาแน่นที่ด้าน ทางเข้าของเครื่องสูบและค่อยๆ กระจายตัวออกตามด้านทางออก ในการทดลองนี้พบว่า อนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร จะมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอมากที่สุด การสรุปการทดลองนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่กล่าวไว้ก่อนหน้าคือ ขนาดอนุภาค ความเข้มข้น ความหนาแน่น มีผลกระทบโดยตรงกับสมรถถนะของเครื่องสูบ และอนุภาคจะมีการกระจุกตัวอยู่แน่น ที่ทางด้านเข้าของ ใบพัดซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการศึกหรอของตัวเครื่องสูบ

ความเสียหายจากใบพัดเนื่องจากการกัดกร่อนของเครื่องสูบเนื่องจากสูบของไหลผสม ได้มีตัวอย่างการศึกษาโดย Li et al. [8] ซึ่งได้ทดสอบการกัดกร่อนในกระบวนการ zinc hydrometallurgy process โดยงานวิจัยได้มุ่งการศึกษาที่ตัวใบพัด โดยใช้อุปกรณ์ microscopes และการพิจารณาทางการสังเกตุ (visual inspection) วิเคราะห์วัสดุของใบพัดโดย spectrum analyzer และ electron microscope ผลการทดสอบสามารถเห็นได้ว่า ใบพัดหลังจากการใช้งานสูบของไหล มีความเสียหายอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ด้านใบพัดด้านหน้าที่ใช้สูบของไหลการกัดกร่อนก็จะมากกว่าด้านหลังของใบพัดอย่างเห็นได้ชัด โดยรอบนอกของใบพัดจะมีความเสียหายมากกว่าส่วนอื่นๆ

ผู้เขียนได้สรุปไว้ว่า 1) ความเสียหายของใบพัดเมื่อทำการสูบในของไหลผสมในกระบวนการ zinc hydrometallurgy process เกิดขึ้นจากการกัดกร่อน (erosion) ที่เกิดจากการไหลของของไหลผสมเป็นหลัก ส่วนรองลงมาคือการกัดเซาะจากสารเคมี (corrosion) 2) การเพิ่มส่วนของไนโตรเจนเข้าไปใน เหล็กสแตนเลส มีผลทำให้อายุการใช้งานใบพัดสั้นลง ผู้เขียนแนะนำให้มีส่วนผสมของไนโตรเจนประมาณ 0.1-0.3%

งานวิจัย ของ Engin et al. [9] ศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของของไหล เช่น ขนาดอนุภาค ค่าความถ่วงจำเพาะ และความเข้มข้นโดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับค่า tip clearance หรือช่องหว่างระหว่างใบพัดและตัวเรือนเครื่องสูบที่มีผลต่อคุณลักษณะของเครื่องสูบที่มีใบพัดชนิดเปิด ดังแสดงในรูป 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดง Tip Clearance ของเครื่องสูบ [9]

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้คือ 1) วัสดุผสมในของไหลมีผลอย่างชัดเจนต่อสมรรถนะของเครื่องสูบ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา 2) ค่าอัตราส่วนของเฮดและประสิทธิภาพของเครื่องสูบ (Head and Efficiency Ratio) มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของของไหลผสม 3) การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนของเฮดและประสิทธิภาพของเครื่องสูบกับความแตกต่างของความเข้มข้นของของไหลผสมแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่แบบเชิงเส้น 4) ค่าอัตราส่วนของเฮดและประสิทธิภาพของเครื่องสูบที่ความเข้มข้นของของไหลผสมใดๆ ลดลงเมื่อค่าความถ่วงจำเพาะของของไหลมากขึ้น และ 5) ค่า tip clearance มีผลอย่างมากต่อเครื่องสูบที่ใช้สูบของไหลผสม กล่าวคือค่า tip clearance ที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดค่าความสูญเสียพลังงานในระบบเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเป็นระบบใบพัดชนิดเปิด อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อมูลจากการทำลองไม่เพียงพอจึงไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมรรถนะของเครื่องสูบและค่า tip clearance ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.1 ของไหลผสม

ของไหลผสม หรือ ของผสมระหว่าง ผงของแข็งและของเหลว(slurry) ซึ่งจะมีคุณลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ขนาด การกระจายตัวของอนุภาค ความเข้มข้นของของแข็งที่ผสม ระดับความปรวนแปรในระบบ อุณหภูมิ และค่าความหนืด เป็นต้น อย่างไรก็ตามสำหรับของไหลผสม จำเป็นจะต้องใช้พลังงานในการเอาชนะความหนืดของของไหลหรือค่าความเร็ววิกฤติ (Critical Velocity) ของของแข็งที่ผสม กรณีที่ความเร็วในการไหลไม่เพียงพอ อนุภาคหรือของแข็งอาจอยู่ในสภาพตกตะกอนหรือแยกตัวจากของไหล ในอีกกรณีที่ของไหลผสมมีค่าความหนืดที่สูง ถ้าแรงที่มากระทำมีค่าต่ำเกินไป อาจจะทำให้ของไหลผสมมีค่าความหนืดสูงและเป็นอุปสรรคต่อการไหลในที่สุด [10]

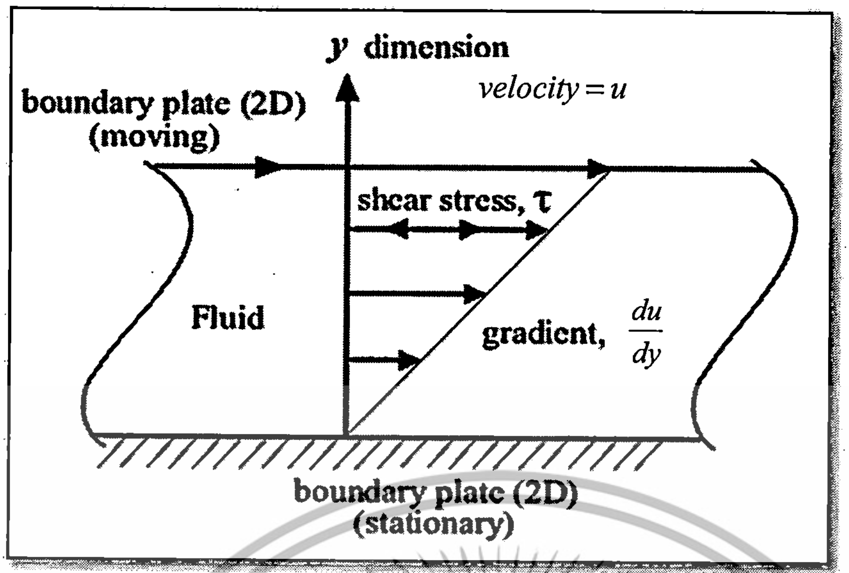
ลักษณะของของไหลผสมนั้นสามารถแยกลักษณะการไหลได้สองชนิดคือ 1. แบบผสมเนื้อเดียวกัน (Homogenous)คือการไหลที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันกับของไหล เช่น ของไหลผสมทองแดงหลังจากผ่านกระบวนการ grinding และ thickening ตะกอนจากน้ำเสีย โคลนจากหลุมขุดเจาะ เป็นต้น 2. แบบไม่ผสมเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) การไหลที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันตลอด กล่าวคือ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และหนักจะตกตะกอนอยู่ด้านล่าง ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะลอยตัวอยู่ขึ้นมา ลักษณะการไหลชนิดนี้สามารถพบได้ตามเหมืองต่างๆ การไหลชนิดนี้จะต้องการความเร็วเบื่องต้นระดับหนึ่งเพื่อนำพาอนุภาคของผสม

3.2 คุณลักษณะของของไหล

ความเค้นเฉือนของของไหล

เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลภายใต้แผ่นระนาบ 2 แผ่น เมื่อกำหนดให้แผ่นระนาบด้านบนถูกดึงให้เคลื่อนที่ขนานกับแผ่นล่างโดยมีแรง F และมีความเร็ว u ซึ่งของไหลส่วนบนจะพยายามให้ตัวเองยึดติดกับแผ่นระนาบกรณีที่ระยะห่างระหว่างแผ่นบนและล่างไม่มากเกินไปและความเร็วจะค่อยๆลดลงเป็นลำดับตามการไหลในแต่ละชั้น ดังนั้นของไหลจึงจึงเคลื่อนที่ไปในลักษณะสมการความเร็วเชิงเส้น (v) ตามความแตกต่างของความเร็ว du กับระยะทางที่เปลี่ยนไป dy โดยที่ y เป็นระยะตั้งฉากระหว่างแผ่นระนาบด้านบนกับด้านล่าง จากรูป 3.1ของไหลที่ติดแผ่นระนาบด้านบนจะมีความเร็วเท่ากับ u และลดลงมาจนของไหลที่แผ่นระนาบด้านล่างจะมีค่าเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการเคลื่อนที่บนแผ่นระนาบซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของของไหล [10]

ผลของแรงกระทำ F ต่อพื้นที่ ที่ก่อให้เกิดแรงเฉือน (shear stress) τ ($\tau = F/A$) ทำให้ของไหลมีการเปลี่ยนแปลงเชิงมุม และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือน คือ

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \tag{3.1}$$

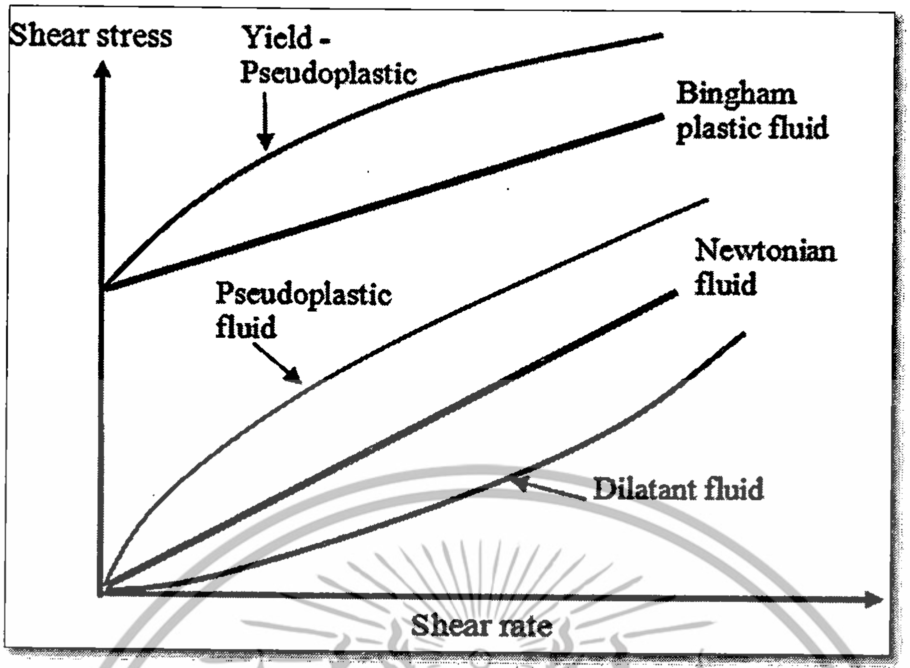
โดยที่ $\frac{du}{dy}$ คือ อัตราการเฉือน (Shear rate)

μ คือค่าคงตัวของความเป็นสัดส่วน โดยทั่วไปเรียกว่า ความหนืดสมบูรณ์ หรือความหนืดพลวัต โดยมีหน่วยเป็น นิวตัน วินาทีต่อตารางเมตร สมการนี้เรียกว่า กฎความหนืดของนิวตัน (Newton's law of viscosity) โดยทั่วไปของเหลวที่มาวิเคราะห์การไหลมีด้วยกันสองแบบคือ Newtonian และ Non-Newtonian fluids

ของไหลแบบ Newtonian ความหนืดของของไหลที่อุณหภูมิเดียวกันจะคงที่ตลอดแม้ว่า shear stress จะเปลี่ยนไป หรือเป็นของไหลที่ความสัมพันธ์ระหว่าง shear rate และ shear stress $\frac{du}{dy}$ เป็นไปในลักษณะเส้นตรง โดยทั่วไปของไหลชนิดนี้เป็นได้ทั้งของเหลวและแก๊ส เช่น อากาศ น้ำ และน้ำมัน ความหนืดพลวัตหรือความหนืดสมบูรณ์จะแสดงมาเป็นค่าความชันของกราฟระหว่าง μ กับ $\frac{du}{dy}$

ส่วนของไหลแบบ Non-Newtonian ค่า shear rate และ shear stress ไม่ได้แปรผันในสัดส่วนเดียวกัน รวมถึงค่าความหนืดไม่ได้คงที่เมื่อ shear stress เปลี่ยนไป ค่าความหนืด (Viscosity) ที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของไหล Newtonian และ Non-Newtonian [11]

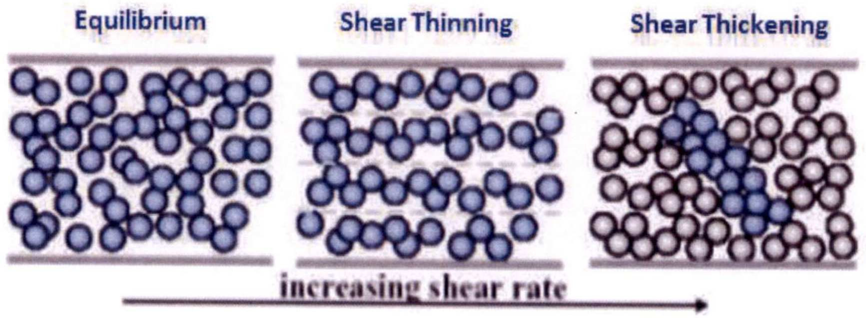
สำหรับของไหลแบบ Non-Newtonian ค่าความสัมพันธ์ของ μ กับ $\frac{du}{dy}$ จะใช้สมการ ดังนี้

$$\tau = M\left(\frac{du}{dy}\right)^{n} \quad (3.2)$$

โดยที่ M คือค่าดรรชนีค่าคงตัว ($N.s^n/m^2$) และ n คือดรรชนีบ่งชี้พฤติกรรมการไหล

ถ้าค่าของ n มีค่ามากกว่า 1 จะพบว่าของไหลเป็นชนิด Non-Newtonian แบบไดลาแทนต์ (dilatant fluid) กล่าวคือ ของไหลมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามความเค้นเฉือน ถ้าออกแรงทำให้ของไหลเคลื่อนไหวเร็วขึ้น จะทำให้ความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ตัวอย่างของไหลชนิดนี้ได้แก่ น้ำ กับ ทราย โดยของไหลชนิดนี้ยังสามารถเรียกอีกอย่างได้ว่า Shear Thickening สำหรับของไหลผสมระหว่าง น้ำกับทราย หรืออนุภาคของแข็งอื่นๆ มีรูปแบบการไหลในลักษณ์ Non-Newtonian ประเภท Shear Thickening ลักษณะเป็นไปตามรูปภาพประกอบ 3.3 ซึ่งมีความหนืดสูง เนื่องจากอนุภาคมีการเรียงตัวติดตลอดเวลา ส่งผลให้ในเวลาที่ของไหลเคลื่อนตัว อนุภาคจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางทั้งแนวนอนและแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 คุณลักษณะอนุภาคของไหล Non-Newtonian, Shear Thickening [12]

คุณลักษณะหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาของไหลผสมคือ ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$Sm = Sw + C(Sz - Sw) \quad (3.3)$$

โดยที่ Sm คือ ความถ่วงจำเพาะของส่วนผสม

Sw คือ ความถ่วงจำเพาะของของเหลว (=1 เมื่อใช้น้ำ)

Sz คือ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ผสม

C คือ อัตราส่วนความเข้มข้นโดยปริมาตรของวัสดุผสม

ตัวอย่าง หากน้ำปกติมีวัสดุที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.6 ผสม 5% โดยปริมาตรจะมีค่าความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ $1+1.05(1.6-1) = 1.03$

สมรรถนะของเครื่องสูบแรงเหวี่ยงสำหรับสูบของไหลผสมขึ้นอยู่กับการกระจายตัว ขนาดและอนุภาคของของผสม ซึ่งค่าเหล่านี้มีผลโดยตรงกับการสูญเสียกำลังงานของเครื่องสูบที่ใช้ขับของไหล ซึ่งลดสมรรถนะและอายุการใช้งานของเครื่องสูบ ส่วนกรณีที่ของไหลมีค่า n น้อยกว่า 1 สามารถเรียกของไหลชนิดนี้ได้ว่า ของไหล pseudoplastic คือ ของไหลที่เมื่อมีความเค้นเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ค่าความหนืดจะลดลง ตัวอย่างของไหลชนิดนี้ เช่น น้ำกาวใส นม มายองเนส อาจเรียกของไหลชนิดนี้อีกแบบได้ว่า Shear-thinning นอกจากนี้ ยังมีของไหลที่มีลักษณะจะไม่เคลื่อนที่ ที่แรงเฉือนต่ำๆ กล่าวคือมีลักษณะคล้ายของแข็ง แต่เมื่อมีความเค้นเฉือนมีค่ามากกว่าค่า τ_0 ซึ่งมีผลให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่และมีลักษณะเป็นของไหลนิวทอเนียน Newtonian เรียกของไหลนี้ว่า Bingham plastic fluid ของไหลลักษณะนี้ได้แก่ ยาสีฟัน จารบี ลิปติก เป็นต้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง τ กับ $\frac{du}{dy}$ โดยใช้สมการ ดังนี้

$$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{du}{dy}\right) \quad (3.4)$$

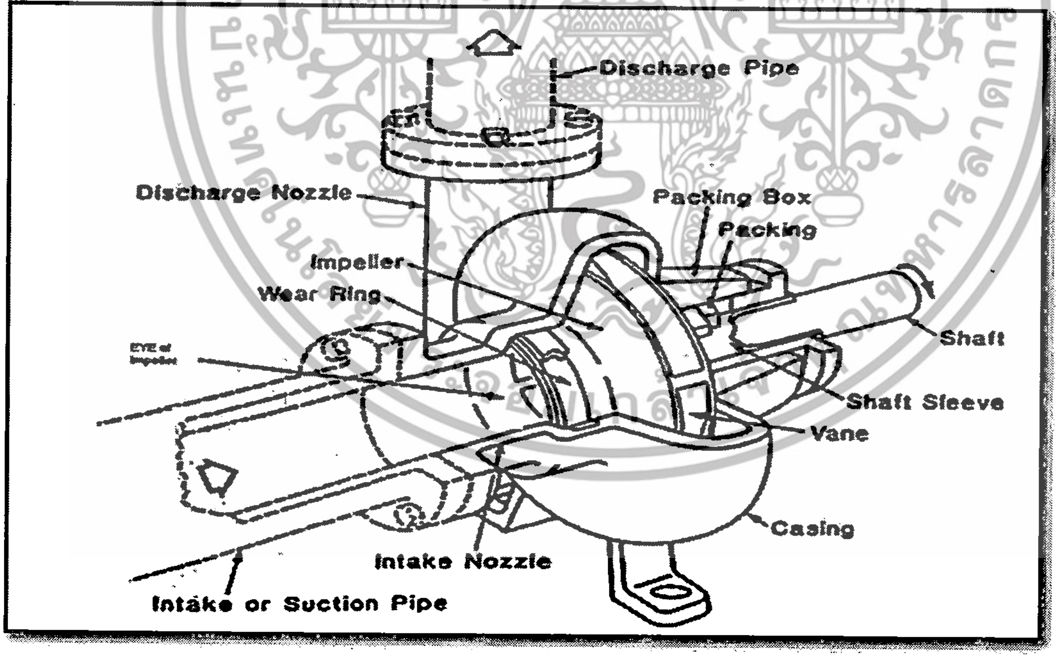
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง

เครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง คือ เครื่องมือทางกลที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนพลังงานกลที่ต้นเครื่องกำลังขับให้แก่ของเหลว เพื่อให้ของเหลวสามารถไหลผ่านระบบจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งตามที่ต้องการ นิยมใช้ในการลำเลียงของเหลวผ่านท่อจากระดับต่ำกว่าไประดับสูงกว่า จากความดันต่ำกว่าไปยังที่ ความดันสูงกว่า ปัจจุบันพบการใช้งานเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงทั้งใน ภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม และในอาคารทั่วไป

3.4 หลักการทำงานและส่วนประกอบเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง

เครื่องสูบแรงเหวี่ยงทำงานโดยอาศัยการหมุนของใบพัดที่ได้รับการถ่ายเทกำลังมาจากมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อของเหลวถูกหมุนให้เกิดแรงหนีจุดศูนย์กลางความกดดันที่จุดศูนย์กลางก็จะต่ำกว่าความกดดันบรรยากาศ ของเหลวจะถูกดูดเข้าทางศูนย์กลางของใบพัด ของเหลวจะได้รับพลังงานกลจากใบพัดแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ เมื่อของเหลวไหลออกจากใบพัดแล้วพลังงานจลน์บางส่วนก็จะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ในรูปของความดันแทน เนื่องจากช่องทางการไหลภายในเครื่องสูบขยายใหญ่ขึ้น ทำให้ความเร็วของของเหลวลดลง ซึ่งก็จะทำให้ของเหลวสามารถไหลไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ ส่วนประกอบโดยทั่วไปของเครื่องสูบแสดงตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปหน้าตัดของเครื่องสูบและทิศทางการไหลของของไหล [13]

โดยหลักทางชลศาสตร์ เมื่อของเหลวถูกหมุนให้เกิดแรงหนีจุดศูนย์กลาง ความกดดันของของเหลวจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของใบพัดมากขึ้น เมื่อความเร็วของใบพัดซึ่งหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในภาชนะปิดมากพอ ความดันที่จุดศุนย์กลางก็จะต่ำกว่าความดันของบรรยากาศ ดังนั้นเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงจึงมีทางให้ของเหลวเข้า (suction) อยู่ที่กลางใบพัด [13]

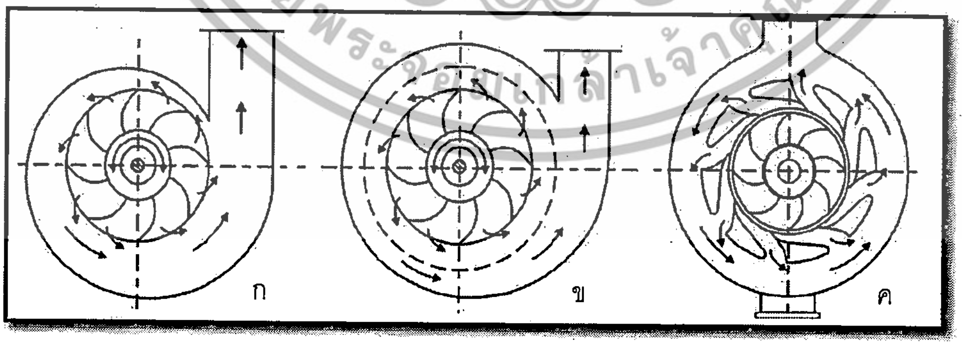
ส่วนประกอบหลักของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงประกอบด้วย

1. ใบพัด (Impeller)

ใบพัดเป็นชิ้นส่วนของเครื่องสูบที่มีการหมุนรอบตัวเอง โดยจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อยได้แก่ ชุดใบ vanes ใบพัดของเครื่องสูบจะถูกติดอยู่กับก้านเพลา ซึ่งจะถูกติดตั้งติดกับมอเตอร์ไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้ว ใบพัดเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงจะทำมาจาก เหล็ก เหล็กกล้า อะลูมินัม หรือพลาสติก ซึ่ง จะส่งผ่านพลังงานจากมอเตอร์ไฟฟ้า ไปยังของไหลที่ถูกสูบเข้ามาจากศูนย์กลางของการหมุน ลักษณะชุดใบ vanes ของใบพัดเครื่องสูบมีทั้งชนิดโค้งแบบ backward และ forward

2. ตัวเรือน (Casing)

ตัวเรือนของเครื่องสูบจะเป็นลักษณะป้องกันอากาศเข้า (Airtight) ซึ่งล้อมรอบใบพัดเอาไว้ โดยถูกออกแบบให้พลังงานจลน์ของของไหลออกที่ทางออกของเครื่องสูบ ถูกปรับเปลี่ยนมาเป็นพลังงานแรงดัน (pressure energy) ก่อนที่ของไหลจะออกจากตัวเรือนและไหลเข้าไปสู่ท่อด้านส่งต่อไปชนิดของตัวเรือนเครื่องสูบแบ่งได้สามชนิด คือ 1. ชนิด Volute เป็นลักษณะแบบหอยโข่ง ดังแสดงในรูป 4.2 (ก) ซึ่งการเพิ่มขึ้นพื้นที่การไหลจะลดความเร็วของการไหล การลดลงของความเร็วจะเพิ่มแรงดันของของไหลที่ผ่านเรือนเครื่องสูบ 2. ชนิด Guide Vane ดังแสดงในรูป 4.2 (ค) โดยเรือนเครื่องสูบชนิดนี้ ใบพัดจะมีชุดครีบ หรือ diffuser โดยออกแบบมาเพื่อให้น้ำของไหลไหลผ่านตัวเรือนเครื่องสูบได้ดียิ่งขึ้น ทำให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยลงและมีประสิทธิภาพดีขึ้น และ 3. ชนิด Vortex ดังแสดงในรูป 4.2 (ข) ใบพัดของตัวเรือนชนิดนี้จะมีแผ่นแบนกลมระหว่างใบพัดและตัวเรือน ใบพัดลักษณะนี้ทำให้การสูญเสียพลังงานเนื่องจากน้ำวนอย่างมาก มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าตัวเรือนแบบ Volute



รูปที่ 3.5 แสดงชนิดของตัวเรือนเครื่องสูบ (ก. ชนิด volute ข. ชนิด Vortex ค. ชนิด Diffuser) [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ด้านท่อเข้าของเครื่องสูบ

ท่อที่ต่อเข้ากับด้านดูดของเครื่องสูบ โดยปลายอีกด้านต่อเข้ากับที่เก็บของไหล ในลักษณะระบบแบบเปิด จะมีฟุตวาล์ว ซึ่งเป็นวาล์วกันกลับไปในตัว อยู่ที่ด้านท้ายสุดของท่อดูด

4. ด้านท่อส่งของเครื่องสูบ

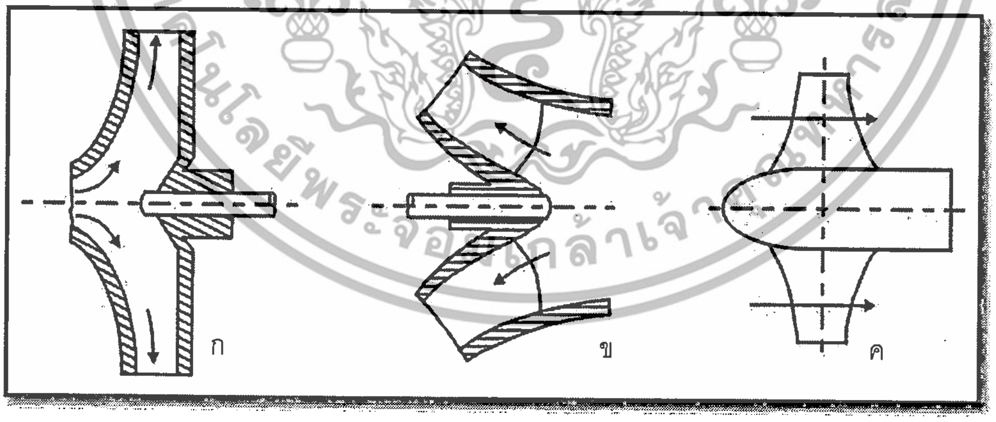
มีท่อที่ต่อเข้ากับด้านส่งของตัวเครื่องสูบทำหน้าที่ส่งถ่ายของไหลไปสู่จุดหมายที่ต้องการ

นอกจากนี้ชนิดของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงยังสามารถแบ่งตามลักษณะของใบพัดได้สามแบบ ดังนี้

1.ใบพัดชนิด Radial Flowเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงส่วนใหญ่จะใช้ใบพัดชนิดนี้ ใบพัดชนิด Radial Flow ส่งพลังงานในของไหลจากแรงเหวี่ยง ของไหลที่ไหลผ่านใบพัดชนิดนี้จะไหลเข้าและออกในลักษณะ 90 องศา ลักษณะใบพัดชนิดนี้แสดงในรูปภาพที่ 4.3 (ก)

2.ใบพัดชนิด Mixed flow เป็นลักษณะใบพัดที่สร้างพลังงานจากแรงเหวี่ยงและแรงตามแนวแกน เครื่องสูบลักษณะนี้จะเหมาะสมกับการใช้งานในงานบำบัดน้ำเสีย ซึ่งจะทำงานที่ความเร็วนอบสูงกว่าใบพัดชนิด Axial Flow เครื่องสูบลักษณะนี้มีทั้งชนิดใบพัดปิดและเปิด แต่จะนิยมชนิดใบพัดปิดมากกว่า ลักษณะใบพัดชนิดนี้แสดงในรูปภาพที่ 4.3 (ข)

3.ใบพัดชนิด Axial Flowเป็นใบพัดชนิดส่งผ่านพลังงานสู่ของไหลตามการอัดแบบตามแนวแกน ซึ่งใบพัดชนิดนี้จะมีทางเข้าและทางออกตามแนวแกนเดียวกัน เครื่องสูบชนิดนี้จะใช้สำหรับงานที่ต้องการเฮดไม่สูง แต่อัตราการไหลสูง เช่นระบบชลประทาน ลักษณะใบพัดชนิดนี้แสดงในรูปภาพที่ 4.3 (ค)



รูปที่ 3.6 ชนิดของใบพัดเครื่องสูบ (ก. ชนิด Radial ข. ชนิด Mixed Flow ค. ชนิด Axial) [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

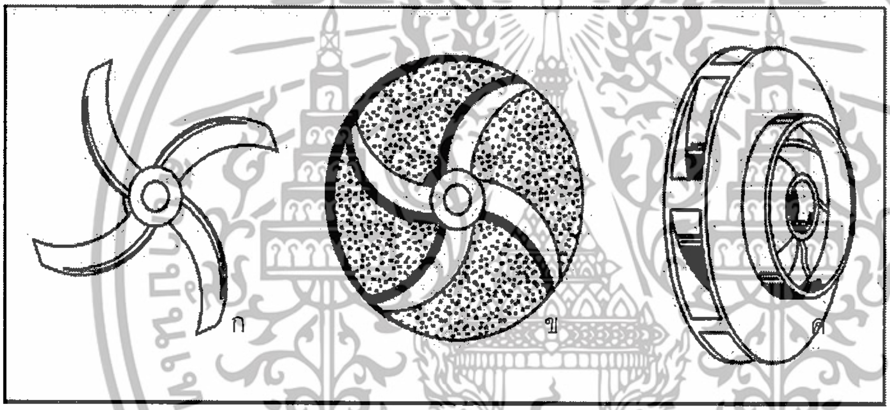
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

นอกจากนี้ใบพัดของเครื่องสูบยังสามารถแบ่งได้สามแบบตามส่วนประกอบใบพัดคือ

1. ใบพัดชนิดเปิด ใบพัดชนิดนี้มักจะพบในเครื่องสูบชนิด axial flow ซึ่งเป็นลักษณะที่จะให้อัตราการไหลสูงแต่ให้เฮดน้อย ประสิทธิภาพของเครื่องสูบชนิดนี้จะน้อยเมื่อเทียบกับชนิดอื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก)

2. ใบพัดชนิดกึ่งเปิด มีลักษณะคล้ายกับใบพัดชนิดเปิดแต่จะมีแผ่นซัพพอร์ทหนึ่งด้าน ใบพัดชนิดนี้จะใช้ในเครื่องสูบที่สูบของไหลที่มีส่วนผสมของอนุภาคของแข็งในระดับน้อย ประสิทธิภาพของใบพัดจะถูกกำหนดจากช่องว่างระหว่างขอบใบพัดด้านหน้าถึงขอบตัวเรือนเครื่องสูบ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข)

3. ใบพัดชนิดปิด ใบพัดชนิดนี้ ใบพัดจะถูกออกแบบให้มีแผ่นปิดกั้นทั้งสองด้าน มักจะใช้ในงานที่เป็นของไหลสะอาดเนื่องจากช่องว่างระหว่างใบพัดกับตัวเรือนนั้นแคบ และตัวเรือนเครื่องสูบก็ไม่มีช่องว่างสำหรับของผสมเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ค)



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของใบพัด (ก. ชนิดเปิด ข. ชนิดกึ่งเปิด ค. ชนิดปิด) [15]

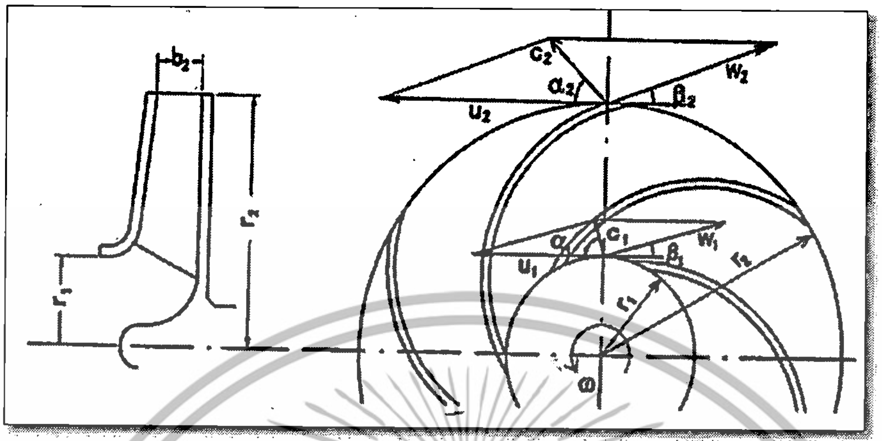
3.5 สมการของออยเลอร์ Euler's equation

การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องกลแบบใบพัด หรือ ลักษณะเดียวกันกับเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงนั้นสามารถทำได้ โดยอาศัย สมการเครื่องจักรกลแบบใบพัดของออยเลอร์ (Euler's equation) เป็นสมการที่ได้มาจากรูปแบบของ ปริมาตรเชิงมุม โมเมนตัมเชิงมุมและกฎการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งสมการนี้สามารถใช้ในการหาสมรรถนะต่างๆของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง เช่น สามารถทำนายผลของการเปลี่ยนแปลงใบพัดต่อค่าเฮดของเครื่องสูบ เป็นต้น

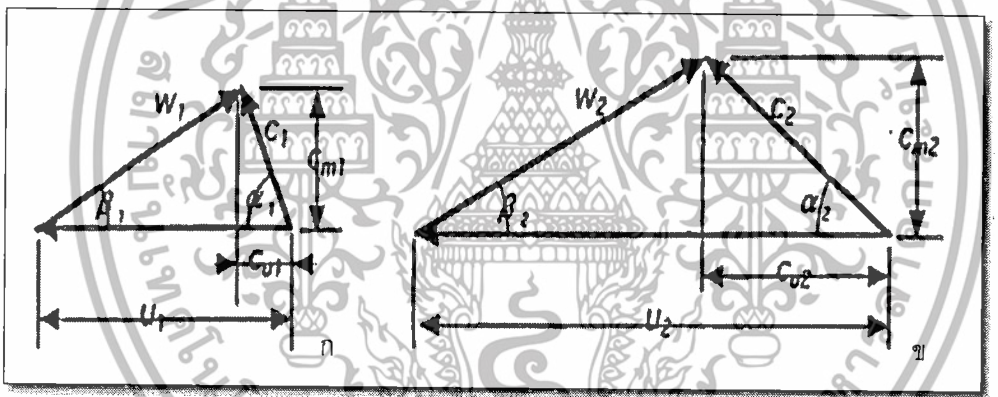
สภาวะความเร็วของใบพัดนั้นสามารถแสดงได้จากคุณลักษณะใบพัดแบบ backwards ดังรูปที่ 4.5 ความเร็วซึ่งประกอบกันตามรูปแบบสามเหลี่ยมเรียกว่า สามเหลี่ยมความเร็ว (velocity triangles) โดยประกอบด้วย ความเร็วใบพัดในแนวเส้นรอบวง (w_1), ความเร็วในแนวสัมผัส (peripheral velocity; u_1) และ ความเร็วสัมบูรณ์ (absolute velocity; c_1) ซึ่งเป็นผลความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
139886

จาก u_1 และ w_1 ที่ทางออกของเครื่องสูบ ความเร็วของของไหลที่ออกจากเครื่องสูบได้แก่ w_2 ซึ่ง absolute velocity ที่ทางออก c_2 เป็นผลความเร็วที่ได้จากค่า w_2 และ u_2 เช่นกัน



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของความเร็วที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องสูบ [15]



รูปที่ 3.9 ความเร็วสามเหลี่ยมของใบพัด Impeller Velocity Triangles (ก.ทางเข้า ข.ทางออก) [15]

แรงบิดที่ได้จากใบพัดเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงสามารถหาได้จาก กฎโมเมนตัมเชิงมุม (law of angular momentum) ตามสมการดังนี้ [15]

$$T = m(r_2 c_2 \cos_{\alpha 2} - r_1 c_1 \cos_{\alpha 1}) \quad (3.5)$$

โดยที่

T = แรงบิด (N-m)

m = อัตราการไหลมวล (kg/s)

กำลังที่ได้จากแรงบิดคูณกับความเร็วเชิงมุม (ω) ดังนั้น

$$T\omega = m(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการของกำลังงานของ fluid machinery ($L = mgHi$) สามารถแสดงสมการหากำลังงานได้คือ

$$mgHi = m(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) \tag{3.7}$$

โดยที่ Hi คือ เฮดที่ใส่ให้ของไหลโดยใบพัด ดังนั้น เฮด Hi สามารถหาได้จากสมการ

$$Hi = (u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) / g \tag{3.8}$$

เรียกสมการนี้ว่า สมการออยเลอร์ (Euler's Equation) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้สำหรับเครื่องจักรแบบใบพัดหรือ turbo machinery

สำหรับเครื่องสูบ และ พัดลม การไหลที่เข้าในส่วนใบพัดนั้นจะมีค่า c_{u1} ดังนั้น

$$Hi = u_2 c_{u2} / g \tag{3.9}$$

จากความสัมพันธ์ของ velocity triangles สมการของออยเลอร์ (รูปที่ 4.6) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วได้ดังนี้

$$w_2^2 = u_2^2 - 2u_2 c_{u2} + c_2^2 \text{ และ } w_1^2 = u_1^2 - 2u_1 c_{u1} + c_1^2$$

สามารถจะสามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$Hi = c_2^2 - c_1^2 / 2g + u_2^2 - u_1^2 / 2g + w_2^2 - w_1^2 / 2g \tag{3.10}$$

จากสมการที่ 4.6 เทอมแรกแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์ ผ่านทางใบพัด เทอมที่สองแสดงถึงความดันของแรงเหวี่ยงที่ได้จากความเร็วในแนวสัมผัส และเทอมสุดท้ายแสดงให้เห็นแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากการลดลงของความเร็วสัมพัทธ์ รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงสามเหลี่ยมความเร็วหรือ velocity triangle ของสมการออยเลอร์ ในกรณีที่ $c_{u1} = 0$ และอัตราส่วนระหว่าง $c_{u2'}$ กับ c_{u2} นั้นเท่ากันกับอัตราส่วนของเฮดของสมการออยเลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 อัตราส่วนนี้เรียกว่าประสิทธิภาพเวน (vane efficiency) ดังสมการ

$$e_{va} = \frac{Hi}{He} = \frac{c_{u2'}}{c_{u2}} \tag{3.11}$$

คุณลักษณะของ เฮดและอัตราการไหล

เฮดของออยเลอร์ (Euler's Head) สามารถเขียนได้ คือ

$$H_e = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2 c_{m2}}{g \tan \beta_2} \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะของ Euler's Head-Capacity โดยส่วนมาก ค่าของ β_2 จะมีค่าน้อยกว่า 90 องศา ตามลักษณะใบพัดแบบ backward ค่าสัมประสิทธิ์เฮด head coefficient ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติสามารถเขียนได้คือ

$$\varphi_e = 1 - \phi \tan \beta_2 \tag{3.13}$$

ประสิทธิภาพ

โดยปกติ เฮดรวมที่ได้จากเครื่องสูบ (H) จะน้อยกว่าเฮดจากใบพัดที่ต้องใส่งานเข้าไป (H_i) เนื่องจากความสูญเสียทางชลศาสตร์ (h_1) ดังนั้นประสิทธิภาพเฮดเครื่องสูบสามารถแสดงได้จากสมการ

$$e_h = (H_i - h_1)/H_i \tag{3.14}$$

ส่วนค่า ประสิทธิภาพทางปริมาตร (volumetric efficiency) คืออัตราส่วนระหว่างความสามารถลำเลียงของไหลของเครื่องสูบจริง ซึ่งสามารถเขียนสมการได้คือ

$$e_v = Q/(Q+q) \tag{3.15}$$

โดยที่ q คือ การสูญเสียจากช่องว่างภายในเรือนเครื่องสูบ

ประสิทธิภาพทางเครื่องจักรกล e_m สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$e_m = \frac{L - L_m}{L} = \frac{\rho g (Q+q) H_i}{L} \tag{3.16}$$

โดยที่ L คือ input power และ L_m คือ การสูญเสียทางกลของเครื่องสูบ

ดังนั้น ประสิทธิภาพของเครื่องจักรทางชลศาสตร์ (fluid machine) สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$e = \frac{\rho g Q H}{L} \tag{3.17}$$

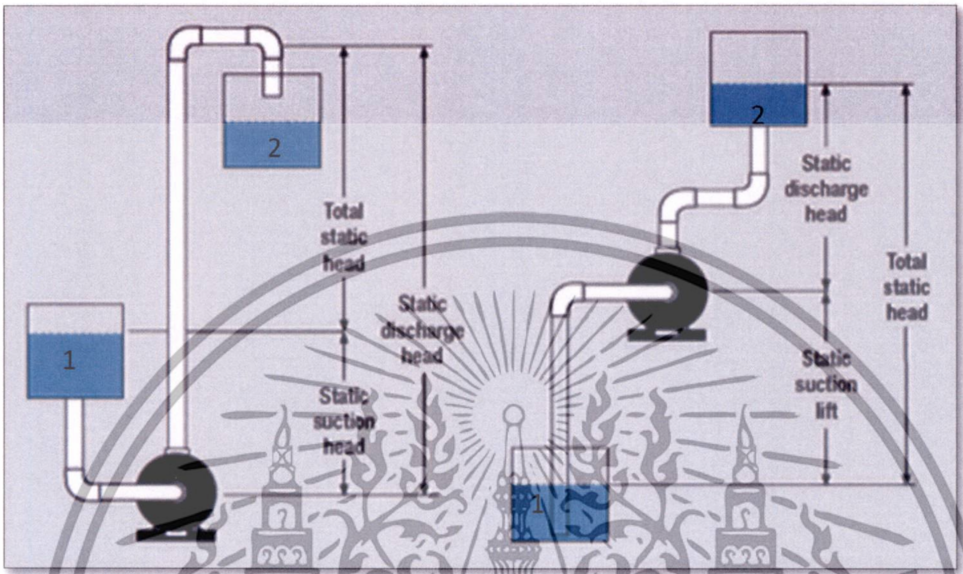
และ

$$e = e_m e_h e_v \tag{3.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฮดเครื่องสูบ

เฮดเครื่องสูบหมายถึงพลังงานที่เครื่องสูบให้กับของเหลวเพื่อให้เกิดการไหลจากด้านดูด (จุด 1) ไปยังด้านส่งของเครื่องสูบ (จุด 2) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ค่าเฮดเครื่องสูบคำนวณจากสมการพลังงานของเบอร์นูลี่ [16]



รูปที่ 3.10 การหาค่าเฮดของเครื่องสูบ [16]

จากรูปเขียนสมการพลังงานระหว่างจุด 1 และ 2 จะได้

$$Hp = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}\right) + (Z_2 - Z_1) \quad (3.19)$$

เมื่อ Hp คือเฮดเครื่องสูบ (เมตร),

V_1 และ V_2 คือความเร็วการไหลที่จุด 1 และจุด 2 (เมตร/วินาที)

P_1 และ P_2 ความดันด้านดูด (1) และด้านจ่าย (2) ของเครื่องสูบ (กิโลปาสคาล)

Z_1 และ Z_2 ระยะห่างระหว่างด้านดูดและด้านส่งของเครื่องสูบ (เมตร)

ประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องสูบ

ประสิทธิภาพของเครื่องสูบ (η_P) หมายถึง ร้อยละของกำลังงานที่เครื่องสูบผลิตได้ (Power output) เมื่อเทียบกับกำลังงานที่ให้เครื่องสูบ (Power input) โดยผ่านเพลาจากต้นกำลังและใบพัด ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.16 [17]

$$\eta_P = \frac{P_{out}}{P_{in}} x100 \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังที่เครื่องสูบผลิตได้ (Pump output power) คำนวณได้จากสมการที่ 4.17 [17]

$$P_{out} = \gamma H_P Q \tag{3.21}$$

เมื่อ H_P คือเฮดเครื่องสูบ (เมตร)

γ คือน้ำหนักจำเพาะของของไหล (นิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)

Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของเครื่องสูบ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

กำลังที่ให้แก่เครื่องสูบ (Pump input power) หาได้โดยการวัดกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์แล้วคูณกับประสิทธิภาพของมอเตอร์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.18 [17]

$$P_{input} = \frac{VI\cos\theta\eta_{motor}}{1000} \tag{3.22}$$

สมรรถนะของเครื่องสูบแรงเหวี่ยงที่ได้จากผู้ผลิตทั่วไป จะแสดงให้เห็นถึงกำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนเครื่องสูบ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดขนาด เฮด และ อัตราการไหลต่างๆ กราฟเหล่านี้มีประโยชน์สำหรับการหาขนาดของเครื่องสูบที่เหมาะสมกับการใช้งาน

คุณลักษณะกราฟระบบและจุดทำงานของเครื่องสูบ

การทำงานของเครื่องสูบคือการสูบของไหลจากทางด้านดูดไปที่ระดับของด้านจ่ายโดยจะต้องเอาชนะแรงสูญเสียต่างๆที่เกิดภายในระบบ ดังนั้นในการหาจุดทำงานของเครื่องสูบสำหรับการใช้งานจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาคุณลักษณะของระบบที่จะใช้งานหรือเรียกว่า system head curve ซึ่งคุณลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับระดับความแตกต่างระหว่างด้านดูดและด้านส่งของของไหล ร่วมกับเฮดสูญเสียต่างๆภายในท่อ System head curve สามารถแสดงคุณลักษณะในรูปแบบของอัตราการไหล ตามสมการ 4.19 [15]

$$H_R = H_a + \frac{(P_d - P_s)}{\rho g} + KQ^n \tag{3.23}$$

โดยที่ H_P = เฮดของระบบ (เมตร)

H_a = เฮดที่เกิดขึ้นจริงจากการสูบของไหล (เมตร)

P_d = ความดันที่ด้านทางออกของเครื่องสูบ (ปาสคาล)

P_s = ความดันที่ด้านทางเข้าของเครื่องสูบ (ปาสคาล)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง)

K = ค่าคงที่

Q = อัตราการไหล (m^3/min)

n = Exponent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

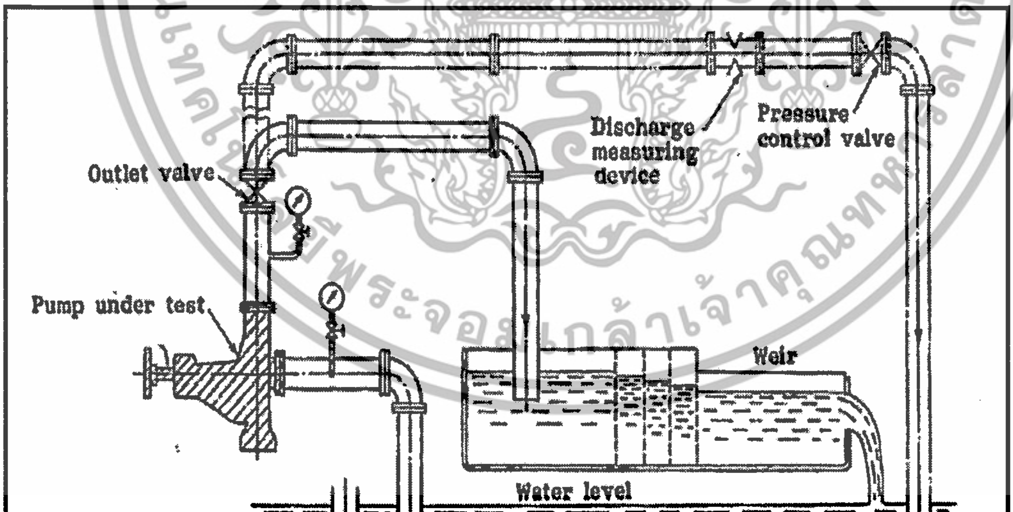
บทที่ 4
การทดลอง

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อใช้กับของไหลผสมนั้น ได้ใช้ชุดทดสอบที่มีส่วนประกอบเช่นเดียวกับการทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง โดยอ้างอิงมาตรฐาน JIS B 8301 “Testing Methods for Centrifugal Pumps, Mixed Flow Pumps and Axial Flow Pumps”[18] โดยรายละเอียดของชุดทดลอง วิธีการทดสอบและการเปรียบเทียบสมรรถนะ สามารถ อธิบายได้ดังนี้

1. รายการที่จะทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบจะประกอบไปด้วย เฮดของเครื่องสูบ ความเร็วรอบ กำลังเพลา สภาวะทางด้านดูดของเครื่องสูบ และสภาวะที่ใช้ทดสอบ

2. สภาวะการทดสอบ การทดสอบเครื่องสูบจะทำการทดสอบกับน้ำสะอาด โดยอุณหภูมิห้องโดยรอบอยู่ที่ระหว่าง 0 ถึง 40 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของน้ำที่ใช้ทดสอบ คือ 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยในกรณีที่ของไหลที่ใช้ทดสอบนั้นมีค่าความหนืดสูงกว่าที่กำหนด หรือของไหลมีส่วนผสมของอนุภาคของแข็งอื่นๆ จะต้องมีการพิจารณาผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องสูบเป็นกรณีโดยผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทดสอบ

3. ชุดทดสอบ จะต้องมีเครื่องมือที่พร้อมสำหรับใช้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบ ตัวอย่างของชุดทดสอบ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.1

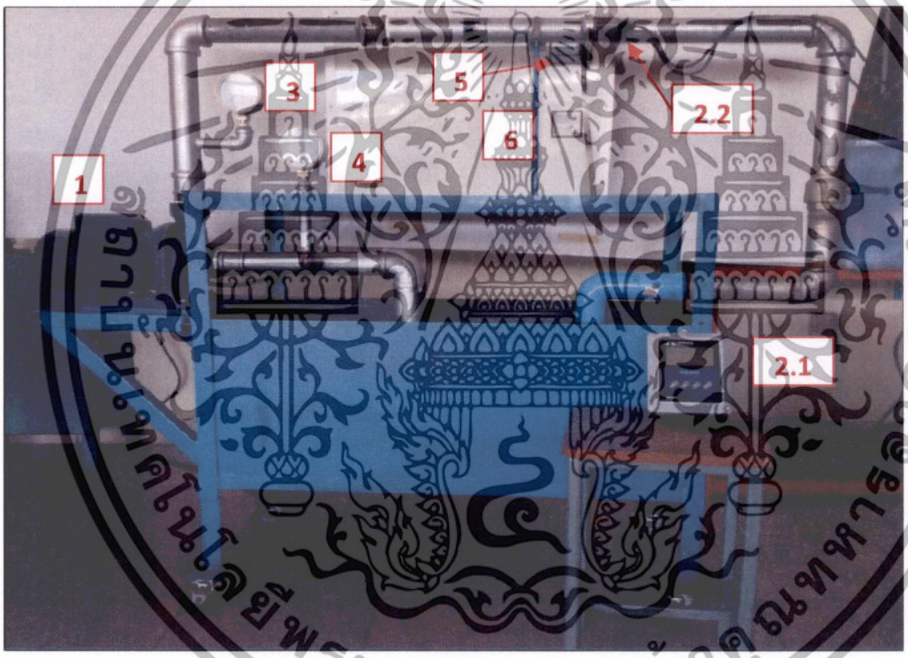


รูปที่ 4.1 ตัวอย่างชุดทดสอบสำหรับทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบตามมาตรฐาน JIS [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ชุดทดลองและอุปกรณ์ทดลอง

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อใช้กับของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายและโซเดียมเบนโทไนท์ ได้ทำการออกแบบชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งน้ำหรือของไหลผสมนั้นจะถูกบรรจุที่ถังตำแหน่งด้านล่างของชุดทดลอง โดยน้ำ หรือของไหลผสมถูกสูบผ่านท่อดูด โดยมีบอลวาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลก่อนที่ของไหลจะเข้าไปที่เครื่องสูบ ซึ่งได้มีการติดตั้งเกจวัดแรงดันทั้งสองด้านของเครื่องสูบเพื่อหาค่าเฮดของเครื่องสูบ และมีการติดตั้งเครื่องวัดแรงดันทางไฟฟ้าและ เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า สำหรับวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการหากำลังไฟฟ้าที่เครื่องสูบได้ใช้ไป หลังจากนั้นของไหลจะผ่านไปสู่ท่อตรงที่ได้ติดตั้ง เครื่องวัดอัตราการไหลชนิด ultrasonic เอาไว้ เพื่อวัดอัตราการไหลที่เกิดขึ้นในระบบ ก่อนที่จะไหลหลับมาที่ถังบรรจุอีกครั้ง

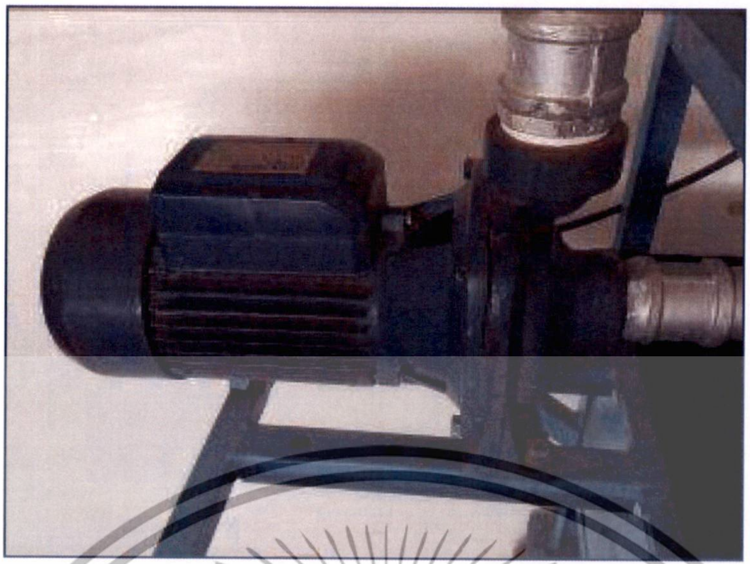


รูปที่ 4.2 ชุดทดลองที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบ

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ติดตั้งในชุดทดสอบ มีดังนี้

1. เครื่องสูบแรงเหวี่ยงขนาด 2HP (1.5 กิโลวัตต์) ชนิดไหลตามแนวรัศมีที่ใช้ใบพัดแบบกึ่งเปิดความสามารถในการสร้าง Head สูงสุด 22.5 เมตร อัตราการไหลสูงสุด 600 ลิตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ท่อด้านดูดและด้านส่ง 2 นิ้ว เครื่องสูบจากผู้ผลิตเป็นไปตามรูปที่ 4.3

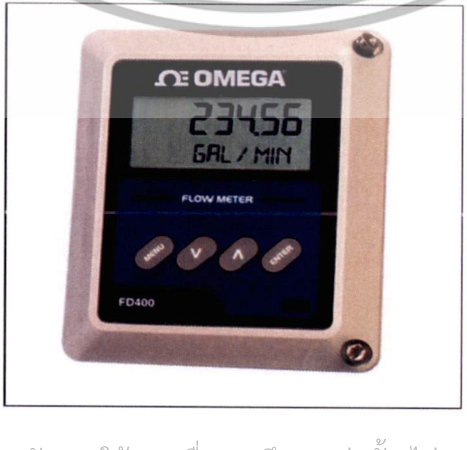
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 เครื่องสูบที่ใช้ในการทดสอบ

2. อุปกรณ์สำหรับวัดอัตราการไหลแบบ ultrasonic doppler flowmeters (OMEGA Model FD-400) เครื่องวัดอัตราการไหลแบบ Ultrasonic เป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลสำหรับของไหลที่มีอนุภาคของแข็ง วัตถุสะท้อนเสียง หรือฟองแก๊สที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอนได้ โดยหลักการทำงานเบื้องต้นนั้น เครื่องจะทำการส่งคลื่น Ultrasonic ผ่านผนังของท่อมีของไหลไหลอยู่ ซึ่งจะก่อให้เกิดคลื่นเสียงที่สะท้อนจากอนุภาคของผสมในของไหล และถูกบันทึกจากตัวรับสัญญาณคลื่นเสียงที่เกิดจากการสะท้อนของอนุภาคที่มีการเคลื่อนที่ จะสามารถนำมาแปลงเป็นอัตราการไหลภายในท่อที่ทำการวัดได้ โดยส่วนประกอบหลักของเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบ ultrasonic ประกอบด้วย

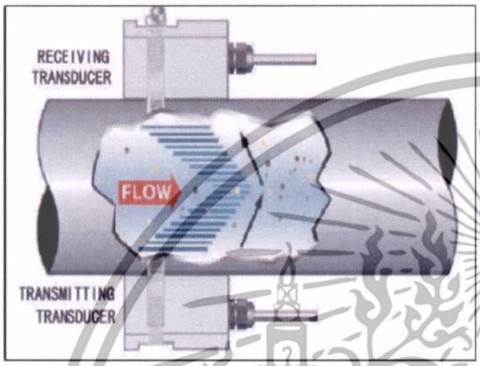
2.1ชุดหน้าจอสำหรับควบคุม เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมการทำงานทั้งหมด เชื่อมต่อกับชุดทรานสดิวเซอร์ โดยผู้ใช้งานสามารถป้อนค่าใช้งานเบื้องต้น เช่น ขนาดท่อที่ทำการวัด และเลือกผลของอัตราการไหล เป็นหน่วยต่างๆที่ต้องการได้ รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นชุดหน้าจอสำหรับควบคุม



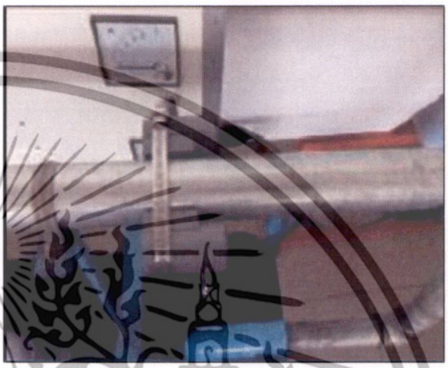
รูปที่ 4.4 ชุดหน้าจอสำหรับควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ชุดทรานสดิวเซอร์ (Transducers) หรือชุดส่งสัญญาณ ultrasonic ไปยังของไหลภายในท่อและส่งสัญญาณกลับไปที่เครื่องวัดอัตราการไหลสำหรับแสดงผล โดยเป็นลักษณะตัวประกบสองชิ้น ใช้สายรัดเพื่อยึดติดกับท่อที่จะทำการวัดอัตราการไหล สามารถใช้กับท่อที่เป็นโลหะหรือพลาสติกได้ การติดตั้งจะต้องวาง ทรานดิวเซอร์ทั้งสองตัวอยู่ในระนาบที่ขนานกัน รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นลักษณะการติดตั้งชุดทรานดิวเซอร์ตามคำแนะนำของผู้ผลิตและการติดตั้งสำหรับการทดลองจริงตามลำดับ

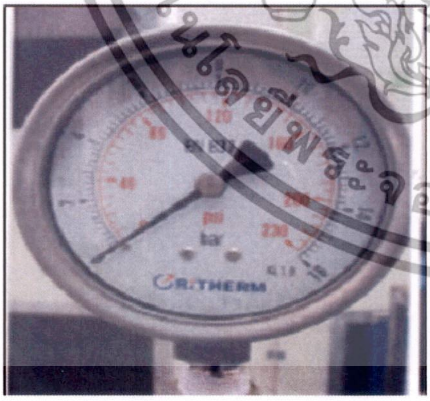


รูปที่ 4.5 การติดตั้งชุดทรานดิวเซอร์จากผู้ผลิต

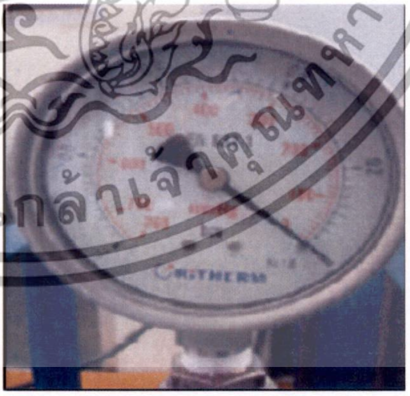


รูปที่ 4.6 การติดตั้งที่ชุดการทดลอง

3. เกจวัดแรงดัน มีย่านวัด 0-16 bar ดังแสดงในรูปที่ 4.7
4. เกจวัดสูญญากาศ มีย่านวัด 0.0-0.1 bar ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 เกจวัดแรงดัน

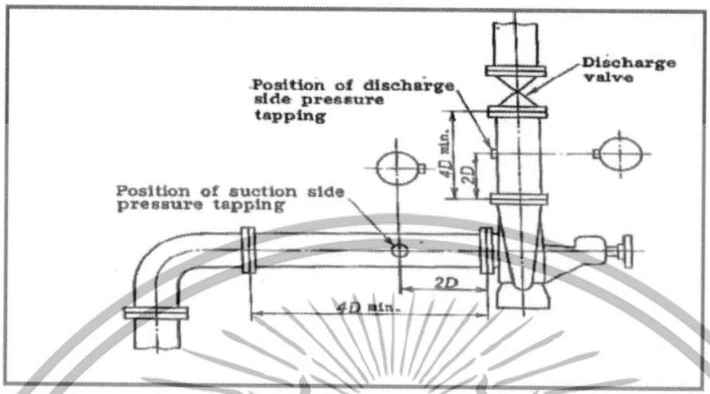


รูปที่ 4.8 เกจวัดสูญญากาศ

ตามมาตรฐานของ JIS B 8301 ได้มีการกำหนดการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดัน คือ 1) จะต้องติดกับส่วนท่อตรง โดยความยาวของท่อต้องไม่น้อยกว่าสี่เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนั้นๆ ทั้งทางด้านท่อดูด และท่อส่งของเครื่องสูบ จุดติดตั้งเกจวัดแรงดันทั้งสองด้านนั้น จะติดที่ระยะไม่น้อยกว่าสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อโดยวัดจากหน้าแปลนที่ต่อเข้ากับเครื่องสูบ ตัวอย่างการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตั้งเกจวัดแรงดันสามารถแสดงได้จากรูปที่ 4.9 และ 2) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อสำหรับติดตั้งเกจวัดแรงดันทั้งสอง จะต้องอยู่ระหว่าง 2 ถึง 6 มิลลิเมตร หรือ หนึ่งส่วนสิบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

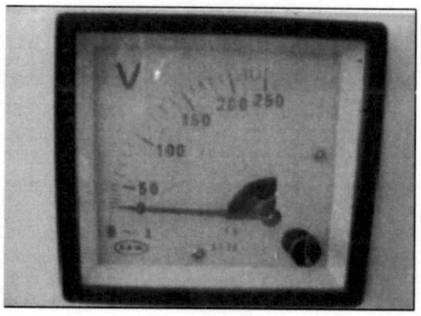


รูปที่ 4.9 ตำแหน่งติดตั้งเกจวัดแรงดัน [25]

5. อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าแบบอนาล็อค มีย่านวัด 0-20 Amp ดังแสดงในรูปที่ 4.10

รูปที่ 4.10 แสดงอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า

6. อุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแบบอนาล็อค มีย่านวัด 0-250 Volts. ดังแสดงในรูปที่ 4.11



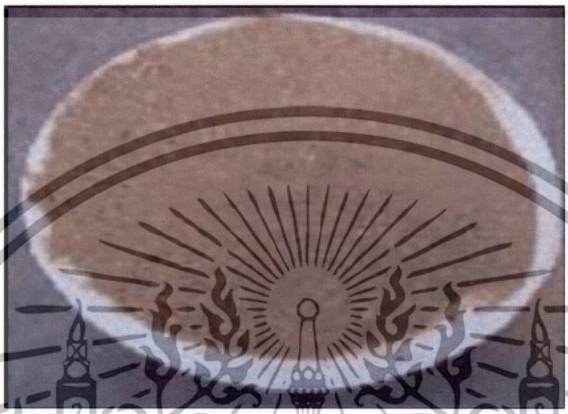
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.11อุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดกำลังขับของเครื่องสูบโดยการวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแล้วคูณด้วยประสิทธิภาพของมอเตอร์ ส่วนกำลังที่ได้จากเครื่องสูบหาได้จากการวัดอัตราการไหลด้วยเครื่องวัดการไหลและค่าความดันที่วัดด้วยเกจวัดความดันที่ด้านดูดและด้านส่งของเครื่องสูบ

7. ทรายสำหรับการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกินกว่า 0.40 มิลลิเมตร มีค่าความโน้มถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 1.6 ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ทรายแม่น้ำที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมทรายสำหรับทดสอบ จะนำทรายมาร่อนผ่านเครื่องร่อนทรายเบอร์ 40 จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 0.40 มิลลิเมตร ขนาดเม็ดทรายที่ใหญ่กว่าจะถูกแยกออก รูปที่ 4.13 แสดงเครื่องร่อนทรายที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4.13 เครื่องร่อนทรายที่ใช้ในการทดลอง

8. โซเดียมเบนโทไนท์ แสดงในรูปที่ 4.14 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ 0.074mm (Fineness pass 200 mesh screen 95%) ค่าความโน้มถ่วงจำเพาะ 0.59 [19] โซเดียมเบนโทไนท์นำมาจากผู้จัดจำหน่ายโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 โซเดียมเบนโทไนท์ที่ใช้ในการทดลอง

การเลือกใช้วัสดุทั้งสองชนิดนั้น เนื่องจากทรายและโซเดียมเบนโทไนท์มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ทำให้วัสดุทั้งสองเมื่อนำมาผสมกับน้ำ จะได้ของไหลผสมที่มีลักษณะแตกต่างกัน โดยของไหลน้ำผสมทรายจะเป็นของไหล ที่มีลักษณะการไหลแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทรายจะตกตะกอนเมื่อไม่มีการไหลในระบบ ส่วนของไหลน้ำผสมโซเดียมเบนโทไนท์ จะได้ของไหลที่มีการไหลเป็นเนื้อเดียวกัน และมีผลทำให้ความหนืดของของไหลมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้ของไหลผสมทั้งสองชนิด จะทำให้สามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะของไหลที่มีผลต่อเครื่องสูบได้

4.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

การทดลองการหาสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบของไหลผสมสองชนิดคือโซเดียมเบนโทไนท์และทราย โดยการเปรียบเทียบสามารถทำได้โดย 1) การเขียนกราฟเปรียบเทียบจากความสัมพันธ์ระหว่าง เฮด กำลัง และประสิทธิภาพเทียบกับอัตราการไหลระดับต่างๆ 2) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างของไหลผสมกับน้ำปกติจากค่า อัตรส่วนเฮด (H_R) อัตราส่วนกำลังไฟฟ้า (P_R) และอัตราส่วนประสิทธิภาพ (E_R) โดยเขียนสมการได้ดังนี้

$$H_R = \frac{H_S}{H_W} \tag{4.1}$$

$$P_R = \frac{P_S}{P_W} \tag{4.2}$$

$$E_R = \frac{E_S}{E_W} \tag{4.3}$$

โดยที่ H_S = ค่าเฮดของเครื่องสูบของไหลผสม ที่อัตราการไหลใดๆ

H_W = ค่าเฮดของเครื่องสูบน้ำ ที่อัตราการไหลเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_S = ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องสูบของไหลผสม ที่อัตราการไหลใดๆ

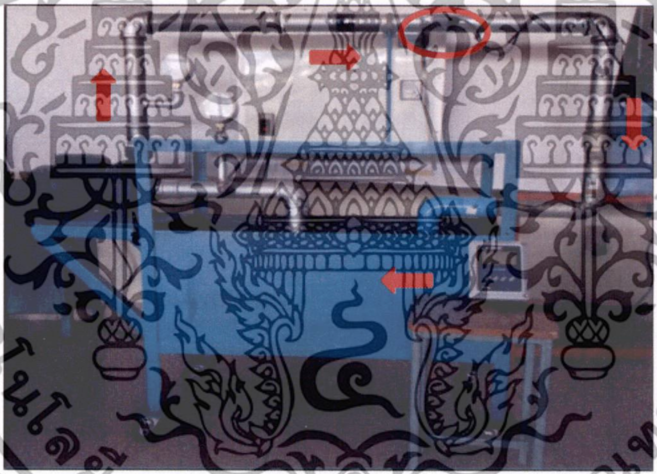
P_W = ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องสูบน้ำ ที่อัตราการไหลเดียวกัน

E_S = ค่าประสิทธิภาพของเครื่องสูบของไหลผสม ที่อัตราการไหลใดๆ

E_W = ค่าประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ ที่อัตราการไหลเดียวกัน

ขั้นตอนการทดลองและการคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง สามารถอธิบายได้ดังนี้

เตรียมชุดทดลอง ตามที่อธิบายในหัวข้อ 4.1 ติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหล ชนิด Ultrasonic โดยเริ่มจากการติดตั้ง ชุดทรานสดิวเซอร์ที่ส่วนของท่อตรง ซึ่งเป็นไปตามคำแนะนำของผู้ผลิต และตำแหน่งที่ตั้ง แสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นส่วนท่อตรงส่วนบนสุดของระบบวางตำแหน่งชุดหน้าจอสำหรับควบคุมที่หน้าชุดทดลองเพื่อสะดวกกับการควบคุม



รูปที่ 4.15 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

1. ทำการเดินเครื่องสูบ โดยทดสอบการสูบน้ำปกติ เริ่มจากทดสอบในตำแหน่งที่วาล์วปิดสนิทด้านจ่ายสุดก่อน จดบันทึกค่าที่ต้องการทราบได้แก่ ความดันด้านท่อดูด ท่อส่ง ระดับความแตกต่างจากมานอมิเตอร์ กระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์ และรงเคลื่อนไฟฟ้าจากโวลท์มิเตอร์

2. ทำการหรี่บอลวาล์วเพื่อปรับอัตราการไหลทั้งหมด 4 ตำแหน่ง (25% 50% 75% และ 100%) แล้วบันทึกข้อมูลต่อการหรี่วาล์วในแต่ละครั้ง

3. ทำการผสมทรายที่ได้เตรียมไว้ มาผสมกับน้ำโดยเทียบปริมาตรของน้ำในถัง โดยเริ่มจากอัตราส่วนความเข้มข้นโดยปริมาตร 5% 9% และ 13% ตามลำดับ

4. ทำการเดินเครื่องสูบอีกครั้ง โดยเริ่มการทำงานจากวาล์วด้านปิดสุดก่อน เช่นเดียวกับการทดสอบกับน้ำปกติ แล้วจึงหรี่บอลวาล์วเพื่อปรับอัตราการไหลในตำแหน่งเดียวกัน

...ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำค่าที่ได้จากผลการทดลองมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง เฮดเครื่องสูบเทียบกับอัตราการไหล กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเครื่องสูบ เทียบกับอัตราการไหล และประสิทธิภาพของเครื่องสูบเทียบกับอัตราการไหล โดยแกนในแนวนอน (X) จะเป็นแกนแสดงอัตราการไหล ในขณะที่แกนในแนวตั้ง (Y) จะแสดงค่าของ เฮด กำลังไฟฟ้า และ ประสิทธิภาพ ของเครื่องสูบ

6. สำหรับการทดสอบกับโซเดียมเบนโทไนท์ จะมีวิธีเดียวกับการทดสอบระหว่างน้ำกับทราย โดยนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ เพื่อหาสมรรถนะของเครื่องสูบที่เปลี่ยนไปเช่นกัน

7. สร้างกราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อสูบของไหลผสม โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เฮดกับอัตราการไหล กำลังไฟฟ้ากับอัตราการไหล และ ประสิทธิภาพกับอัตราการไหล จะแสดงกราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อสูบน้ำปกติเทียบกับของไหลผสมที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 5% 9% และ 13% ตามลำดับ

8. เปรียบเทียบด้วยการใช้ค่า อัตราส่วนเฮด (HR) อัตราส่วนกำลังไฟฟ้า (PR) และอัตราส่วนประสิทธิภาพ (ER) และสร้างกราฟเปรียบเทียบเช่นเดียวกัน

9. เปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อสูบของไหลผสมระหว่างทราย เทียบกับของไหลผสมโซเดียมเบนโทไนท์ โดยใช้กราฟเปรียบเทียบระหว่างเฮดกับอัตราการไหล กำลังไฟฟ้ากับอัตราการไหล และ ประสิทธิภาพกับอัตราการไหล

รูปที่ 4.16 การทำงานของเครื่องสูบขณะสูบของไหลผสมระหว่างน้ำกับโซเดียมเบนโทไนท์

4.3 ขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง

การหาค่าเฮดของเครื่องสูบ

ค่าเฮดของเครื่องสูบสามารถคำนวณได้จากการนำค่าความดันที่ได้จากเกจวัดความดันทางด้านดูดและด้านจ่ายของเครื่องสูบ มาคำนวณโดยใช้สมการของเบอร์นูลี แสดงดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_P = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 \quad (4.4)$$

โดยที่

H_P = เฮดของเครื่องสูบ (เมตร)

P_1 = ความด้านด้านดูดของเครื่องสูบ (กิโลปาสคาล)

P_2 = ความด้านด้านจ่ายของเครื่องสูบ (กิโลปาสคาล)

γ = Specific weight ของของไหล = ρg = 9810 (นิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)

V_1 = ความเร็วการไหลในท่อด้านดูดของเครื่องสูบ (เมตรต่อวินาที)

V_2 = ความเร็วการไหลในท่อด้านดูดของเครื่องสูบ (เมตรต่อวินาที)

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

g = 9.81 เมตรต่อวินาที^{2}

$Z_2 - Z_1$ = ระยะห่างระหว่างท่อ (เมตร) = 0.2 เมตร สำหรับชุดการทดลองนี้

เฮดทางด้านดูด (Suction Pressure Head) เกจวัดความดันทางเข้าเป็นสเกล $cmHg$ สามารถแปลงให้อยู่ในหน่วยกิโลปาสคาล ได้ ดังนี้

$$P_1 = \frac{1.333 P_{cmHg} kPa}{cmHg} \quad (4.5)$$

เฮดทางด้านจ่าย (Discharge Pressure Head) เกจวัดความดันทางเข้าเป็นสเกล kg/cm^2 สามารถแปลงให้อยู่ในน่วยกิโลปาสคาล ได้ ดังนี้

$$P_2 = \frac{98.066 P_{kg/cm^2} kPa}{kg/cm^2} \quad (4.6)$$

การหากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ขับเครื่องสูบ

การหากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ 1เฟส ที่ขับเครื่องสูบ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์หาได้จากการวัด วัดแรงบิด (Torque) และความเร็วรอบของมอเตอร์ นอกจากนี้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องสูบ สามารถอ่านได้โดยตรงจากอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้า และอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า แต่ต้องนำค่าที่ได้ไป แทนค่าร่วมกับค่า power factor ส่วนประสิทธิภาพของมอเตอร์สามารถหาได้จากข้อมูลจากผู้ผลิต โดยที่

P_{in} = $T\omega$

T = แรงบิด (นิวตันเมตร)

ω = ความเร็วเชิงมุม = $\frac{2N\pi}{60}$ (เรเดียนต่อวินาที)

$$P_{in} = VI \frac{\cos\phi \eta_{motor}}{1000}; kW \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\cos\phi$ = Power factor

η_{motor} = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

$\cos\phi\eta_{motor}$ = 0.6087 (จากข้อมูลผู้ผลิต)

V = โวลต์หรือแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากมอเตอร์ (โวลต์)

I = กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์ (แอมป์)

การหากำลังงานที่ได้จากเครื่องสูบ

กำลังที่ได้จากเครื่องสูบ (Pump Output Power) หาได้จากสมการ

$$P_{output} = \lambda Q H_P \tag{4.8}$$

เมื่อ λ = น้ำหนักจำเพาะของของไหล = ρg = 9810 (นิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)

g = 9.81 เมตรต่อวินาที^{2}

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

H_P = เฮดของเครื่องสูบ (เมตร)

การหาประสิทธิภาพของเครื่องสูบ

ประสิทธิภาพของเครื่องสูบ คือร้อยละของกำลังงานเครื่องสูบที่ทำได้ เมื่อเทียบกับกำลังงานที่จ่ายให้ของเหลวโดยผ่านต้นกำลังและใบพัดตาม สมการ

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} 100 \tag{4.9}$$

ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง สามารถแสดงได้ใน ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง

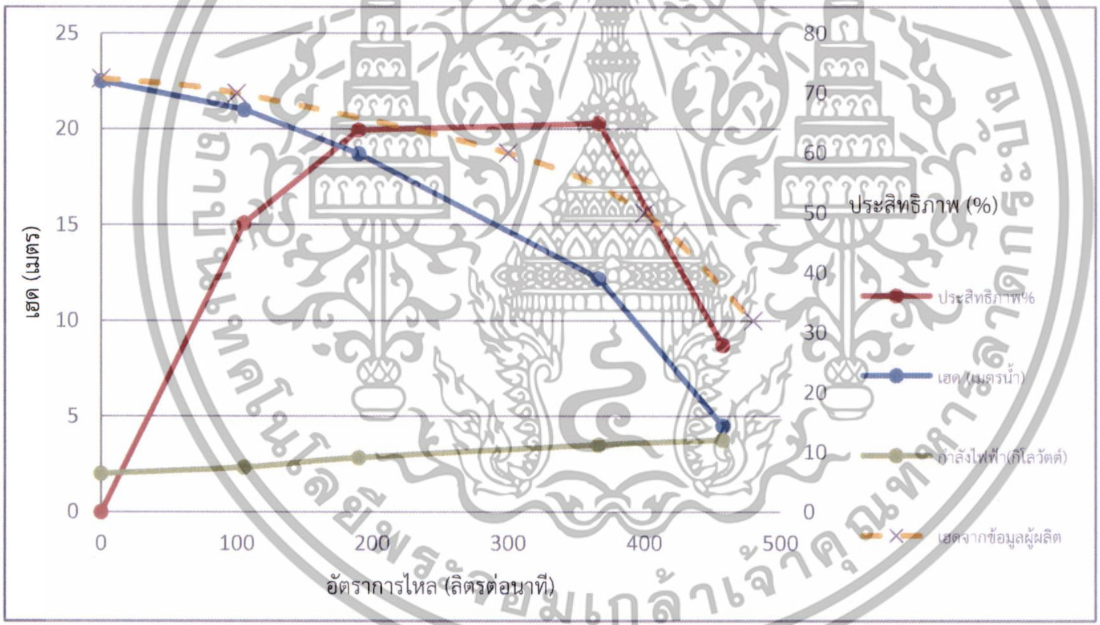
P_1 (บาร์)	P_2 (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	เฮดเครื่องสูบ (เมตร)	Power input (Kw)	Power output (Kw)	ประสิทธิภาพ %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

5.1 ผลการทดลอง

ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบสามารถแสดงได้จากรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นผลการทดสอบเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบกับน้ำปกติ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องสูบอยู่ที่ประมาณ 68.3% โดยที่อัตราการไหลอยู่ที่ 300 ลิตรต่อนาที เฮด 15.2 เมตร ผลที่ได้มีค่าโดยรวมต่ำกว่าข้อมูลสมรรถนะของเครื่องสูบที่ได้จากผู้ผลิต [20] ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากอายุการใช้งานของเครื่องสูบ ซึ่งถูกใช้งานมาก่อนทำการทดลอง การสึกหรอจากชิ้นส่วนต่างๆ อาจส่งผลให้สมรรถนะโดยรวมลดลง ส่วนกราฟ เฮด-อัตราการไหลของเครื่องสูบนั้น เป็นไปตามเส้นโค้งของกราฟของเครื่องสูบทั่วไป คือ เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น เฮดของเครื่องสูบจะมีค่าลดลง



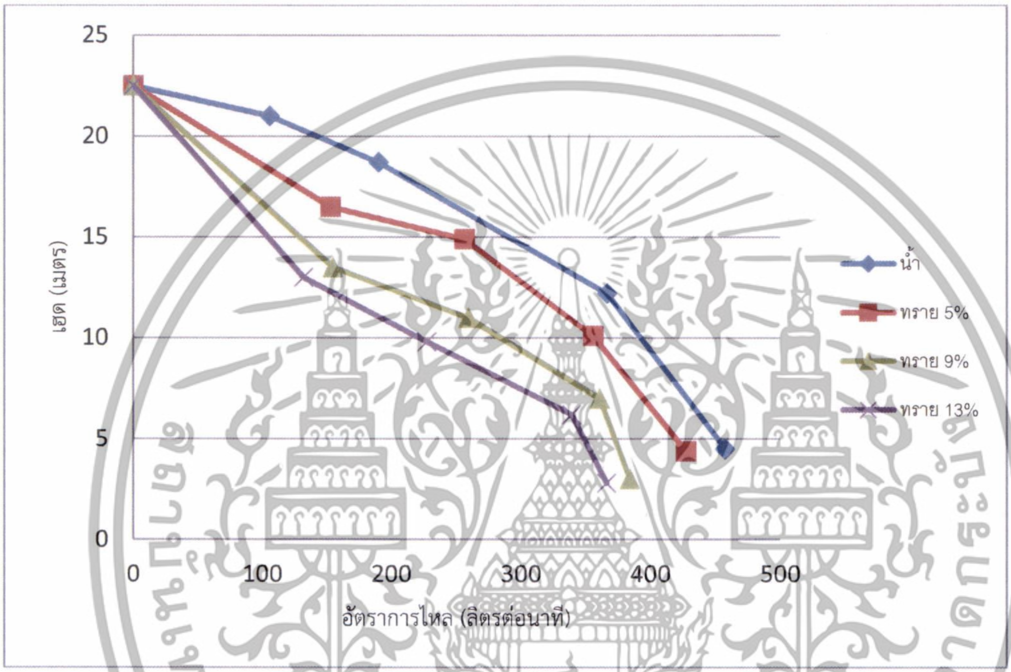
รูปที่ 5.1 กราฟสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อสูบกับน้ำปกติ

รูปที่ 5.2 แสดงสมรรถนะเครื่องสูบเมื่อใช้สูบของไหลระหว่างน้ำกับทรายที่ส่วนผสมโดยปริมาตร 5% 9% และ 13% จะเห็นได้ว่า เมื่อส่วนผสมของทรายมีค่าเพิ่มขึ้น สมรรถนะของเครื่องสูบจะมีค่าลดลงตามลำดับ โดยเฉพาะที่ 13% ที่อัตราการไหลเดียวกัน ค่าเฮดของเครื่องสูบลดลงจากทำงานสูบน้ำปกติโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40% และเมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้น การลดลงของเฮดเครื่องสูบจะลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่น้อยกว่า ส่วนในรูปที่ 5.3แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้าของเครื่องสูบ (กิโลวัตต์) ที่ความเข้มข้นส่วนผสมเช่นเดียวกับกราฟของสมรรถนะ จะเห็นได้ว่า ที่ส่วนผสมโดยปริมาตร 5% 9% มีการใช้

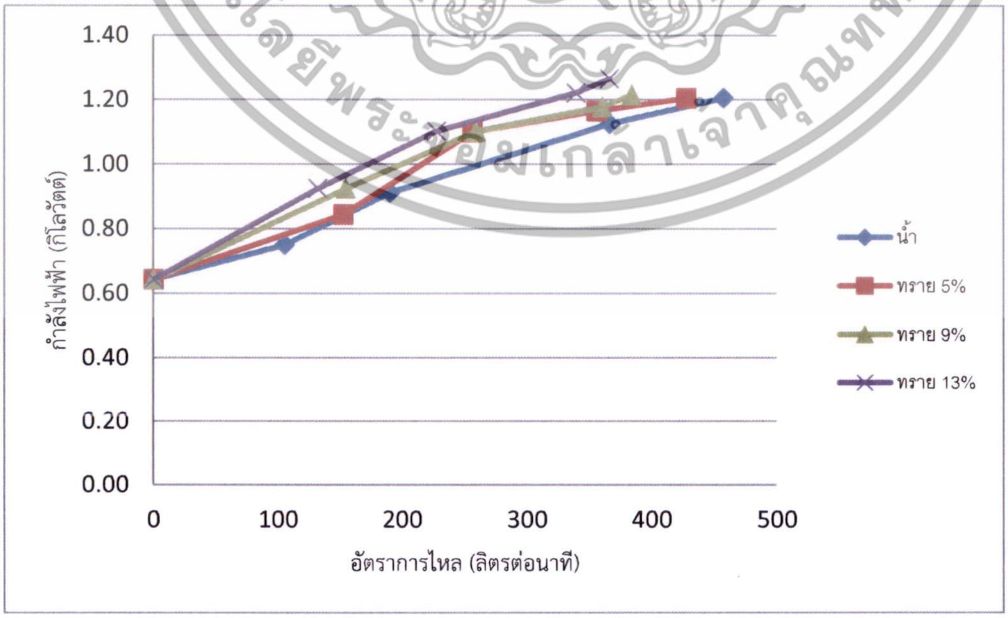
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกัน โดยที่ 13% จะแสดงการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยมีการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากการสูบน้ำปกติโดยเฉลี่ยประมาณ 15-17 %

ส่วนประสิทธิภาพของเครื่องสูบที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องสูบจะลดลงเมื่อความเข้มข้นหรือส่วนผสมของทรายเพิ่มขึ้นเช่นกันเนื่องจากกราฟที่ 5.2 และ 5.3 แสดงให้เห็นถึงการลดลงของสมรรถนะ ในขณะที่ต้องการกำลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ที่ความเข้มข้นที่ 13% โดยปริมาตรมีค่าประสิทธิภาพต่ำที่สุดเมื่อเทียบส่วนผสมอื่นๆ

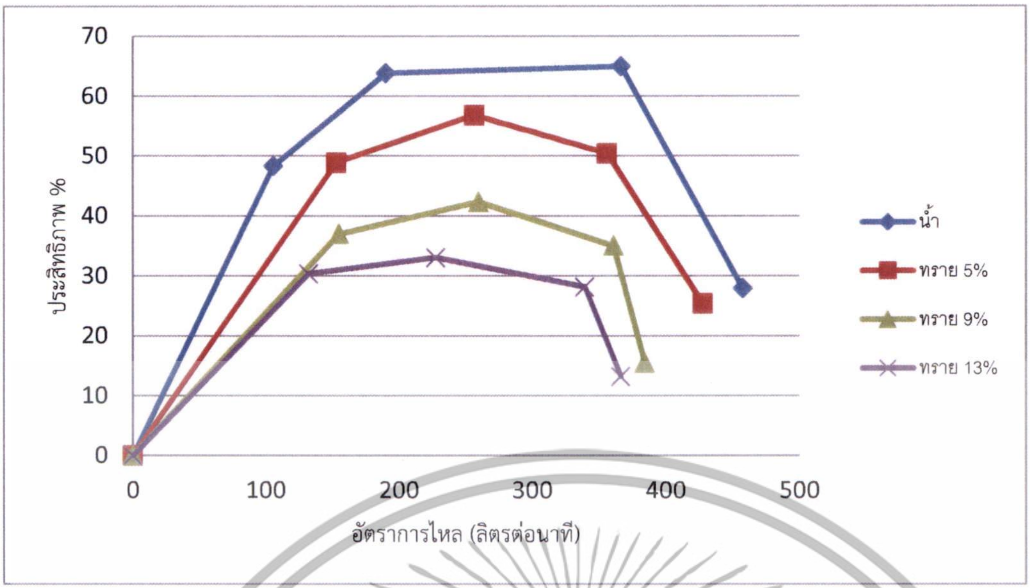


รูปที่ 5.2 กราฟสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อสูบกับน้ำกับทรายที่ส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 5.3 กราฟกำลังงานไฟฟ้าของเครื่องสูบเมื่อสูบกับน้ำกับทรายที่ส่วนผสมต่างๆ

เอกสารนี้ … ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



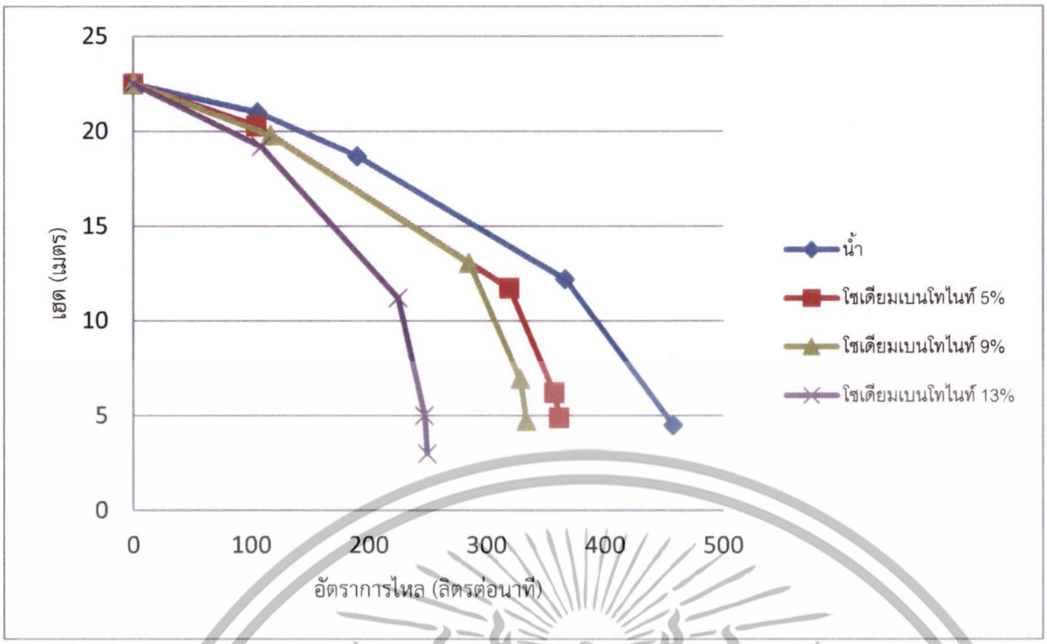
รูปที่ 5.4 กราฟประสิทธิภาพของเครื่องสูบเมื่อสูบกับน้ำกับทรายที่ส่วนผสมต่างๆ

รูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อใช้สูบน้ำผสมโซเดียมเบนโทไนท์ จะเห็นได้ว่า เฮดของเครื่องสูบมีค่าลดลงที่อัตราการไหลต่างๆ เมื่ออัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์เพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกันกับการสูบน้ำผสมทราย อย่างไรก็ตามที่อัตราการไหลต่ำๆ อัตราการลดลงของเฮดเครื่องสูบจะเป็นลักษณะค่อยๆลดลงเมื่อเทียบของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย ส่วนที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 13% อัตราการไหลจะมีค่าลดลงอย่างมาก โดยกราฟเกือบมีความชันเป็นแนวดิ่ง และที่อัตราการไหลประมาณ 240 ลิตรต่อนาที เฮดของเครื่องสูบลดลงเกือบ 70 % เมื่อเทียบกัลการสูบน้ำธรรมดา ส่วนความเข้มข้นที่ 5% และ 9% นั้นที่อัตราการไหลต่ำๆถึงปานกลาง ลักษณะของกราฟจะคล้ายกัน ก่อนที่ช่วงอัตราการไหลสูงๆ เฮดของความเข้มข้น 9% โดยปริมาตรจะลดลงต่ำกว่าความเข้มข้น 5%

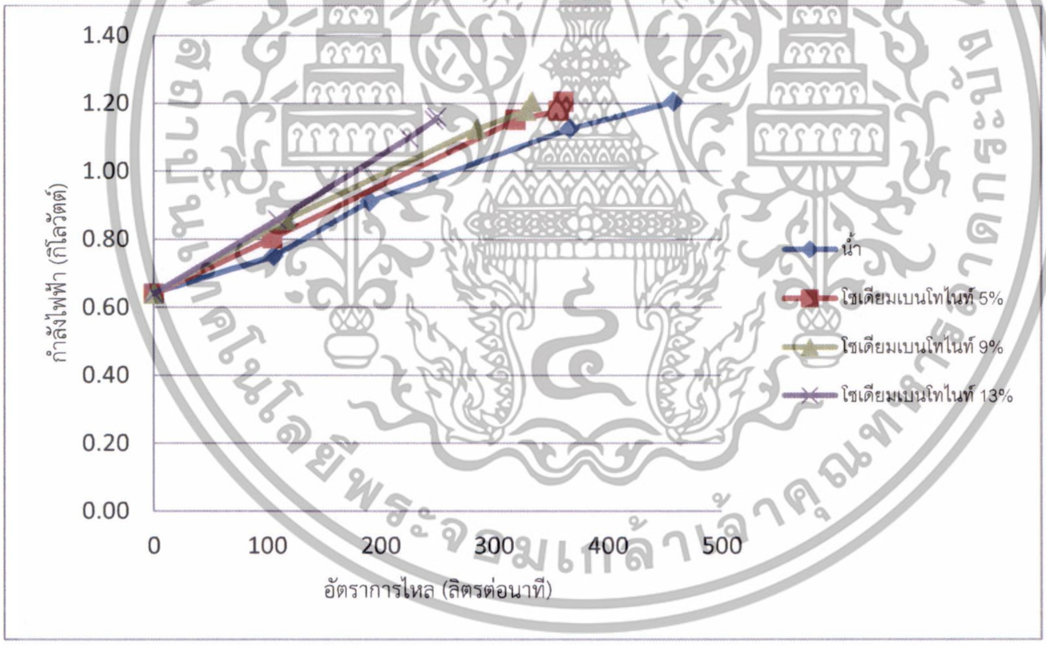
ส่วนกำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ได้แสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับของไหลระหว่างน้ำกับทราย ซึ่งจะต้องให้กำลังไฟฟ้ามากขึ้นเมื่อส่วนผสมของเบนโทไนท์เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้นที่ 5% และ 9% โดยปริมาตร จะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนที่ความเข้มข้น 13 % จะมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นนี้ ไม่ได้เป็นการเพิ่มขึ้นแบบเป็นสัดส่วนกัน

รูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเครื่องสูบ ซึ่งเห็นได้ชัดว่า ที่ความเข้มข้น 13% อัตราการลดลงของประสิทธิภาพจะสูงมากเมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นค่าอื่นๆ ที่อัตราการไหลต่ำๆ (ไม่เกิน 300 ลิตรต่อนาที) ประสิทธิภาพของความเข้มข้น 9% มีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้น 5% แต่หลังจากอัตราการไหลเพิ่มสูงมากกว่า 300 ลิตรต่อนาที ประสิทธิภาพจะลดลงจนน้อยกว่าในที่สุด เช่นเดียวกับของไลหผสมน้ำกับทราย ที่ความเข้มข้น 13% จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างมาก ในขณะที่สมรรถนะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

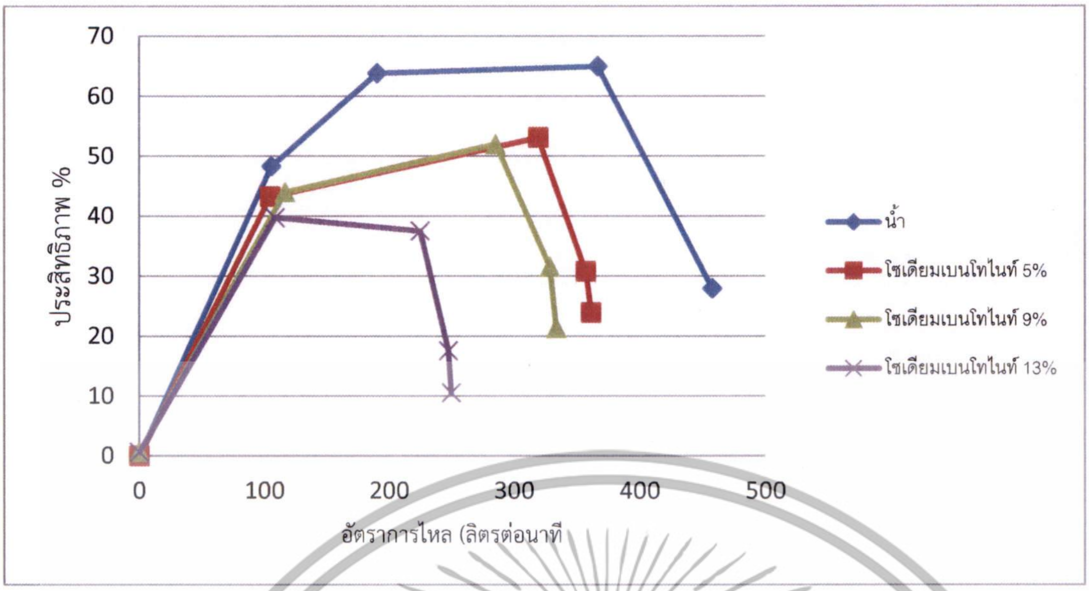


รูปที่ 5.5 กราฟสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อสูบกับน้ำกับโซเดียมเบนโทไนท์ที่ส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 5.6 กราฟกำลังไฟฟ้าของเครื่องสูบเมื่อสูบกับน้ำกับโซเดียมเบนโทไนท์ที่ส่วนผสมต่างๆ

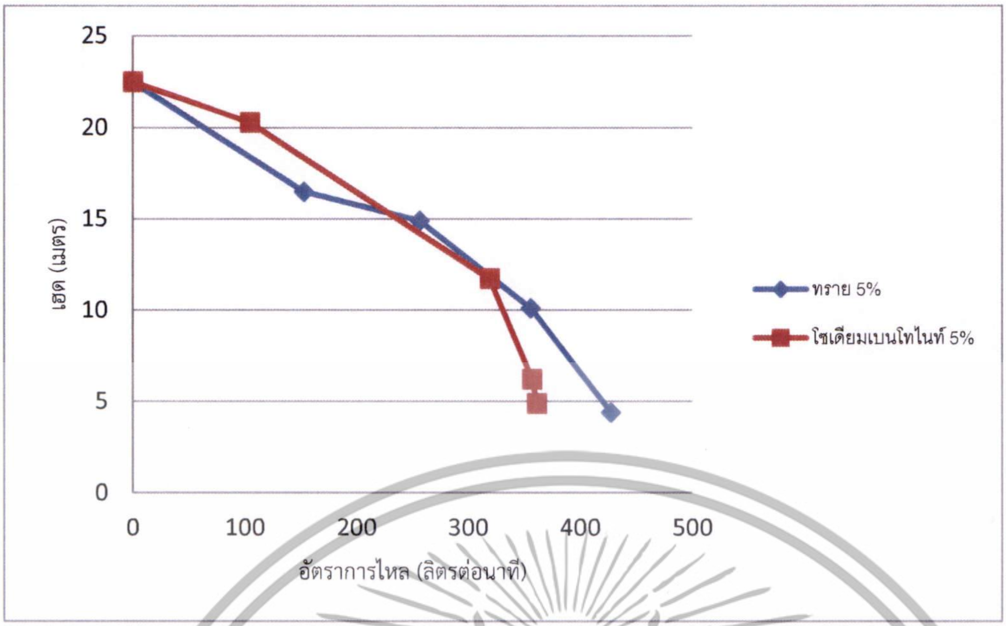
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



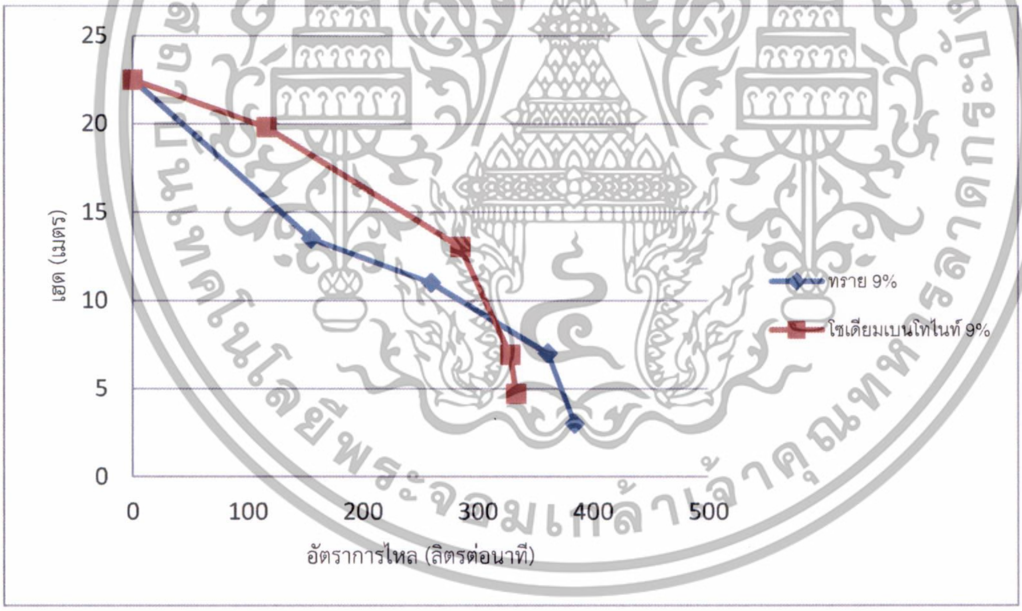
รูปที่ 5.7 กราฟประสิทธิภาพของเครื่องสูบเมื่อสูบกับน้ำกับโซเดียมเบนโทไนท์ที่ส่วนผสมต่างๆ

รูปที่ 5.8, 5.9 และ 5.10 เป็นกราฟเปรียบเทียบเฮดเครื่องสูบสำหรับวัสดุผสมของไหลทั้งสองชนิด ที่อัตราความเข้มข้นโดยปริมาตรต่างๆ (5% 9% และ13%) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทั้งสามกราฟมีลักษณะคล้ายกันคือ เบนโทไนท์ จะมีค่าเฮดของเครื่องสูบสูงกว่าของไหลผสมทรายที่อัตราการไหลต่ำๆ ประมาณ 200-250 ลิตรต่อนาที จากนั้น ที่อัตราการไหลสูงๆ (มากกว่า 250 ลิตรต่อนาที) ที่อัตราการไหลเดียวกันเฮดจะค่อยๆลดลงจนมีค่าต่ำกว่าของไหลผสมทรายในที่สุด ตัวอย่างเช่น ที่อัตราการไหล 250 ลิตรต่อนาทีที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 13 % เฮดของเครื่องสูบที่สูบของไหลผสมเบนโทไนท์ มีค่าประมาณ 35% ของเฮดของของไหลของน้ำผสมทราย นอกจากนี้อัตราการไหลสูงสุดของของไหลผสมทรายจะอยู่ที่ประมาณ 364 ลิตรต่อนาที ในขณะที่ของไหลผสมเบนโทไนท์จะอยู่ที่ประมาณ 250 ลิตรต่อนาที หรือประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของของไหลผสมทราย อย่างไรก็ตามที่อัตราการไหลประมาณ 300 ลิตรต่อนาที เฮดเครื่องสูบของของไหลผสมทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับความเข้มข้นที่ 5 และ 9 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

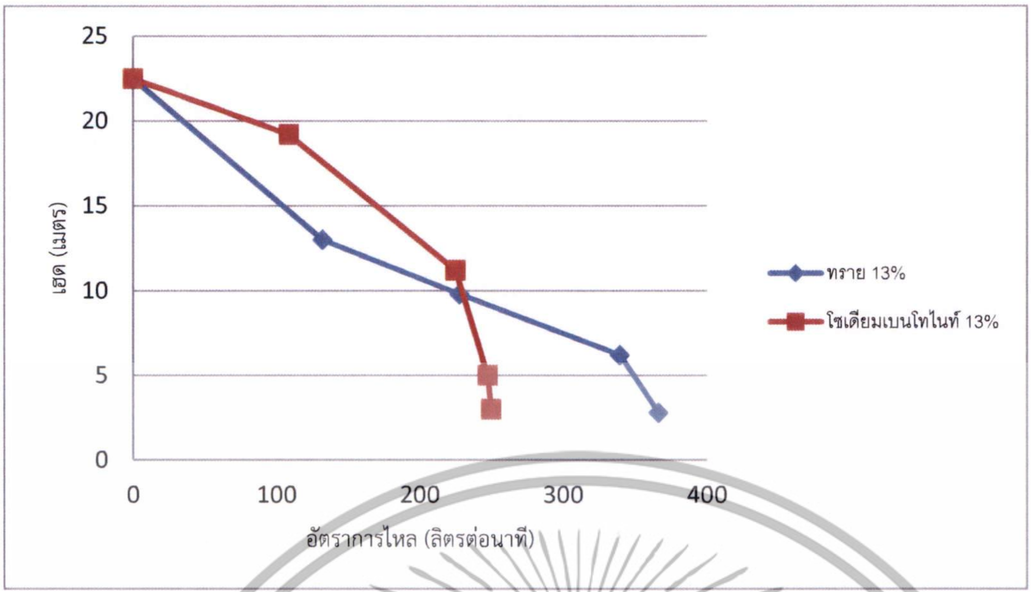


รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องสูบที่ใช้สูบของไหลผสมทรายและโซเดียมเบนโทไนท์ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 5%



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องสูบที่ใช้สูบของไหลผสมทรายและโซเดียมเบนโทไนท์ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 9%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



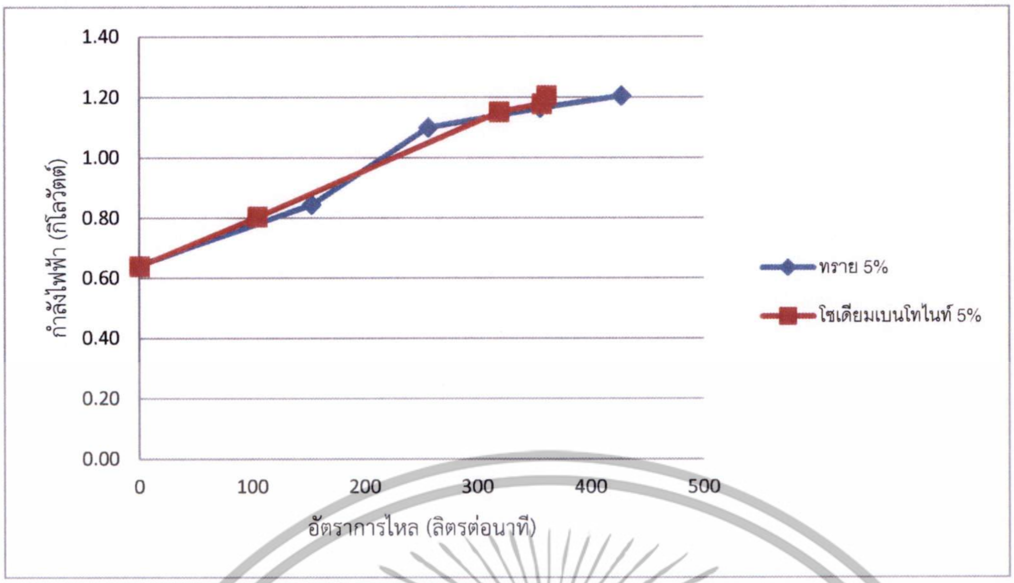
รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องสูบที่ใช้สูบของไหลผสมทรายและโซเดียมเบนโท-ไนท์ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 13%

รูปที่ 5.11 5.12 และ 5.13 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับของไหลผสมกับทรายและโซเดียมเบนโทไนท์ทั้งความเข้มข้นสามระดับ สำหรับอัตราการไหลที่ 10 และ 13%ในช่วงเริ่มต้น การทำงานของเครื่องสูบที่สูบของไหลผสมทรายจะใช้กำลังไฟฟ้ามากกว่าของไหลผสมโซเดียมเบนโทไนท์ หลังงานนั้นกำลังของเครื่องสูบที่สูบน้ำกับเบนโทไนท์จะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้น จนใช้กำลังไฟฟ้ามากกว่าของไหลผสมทราย

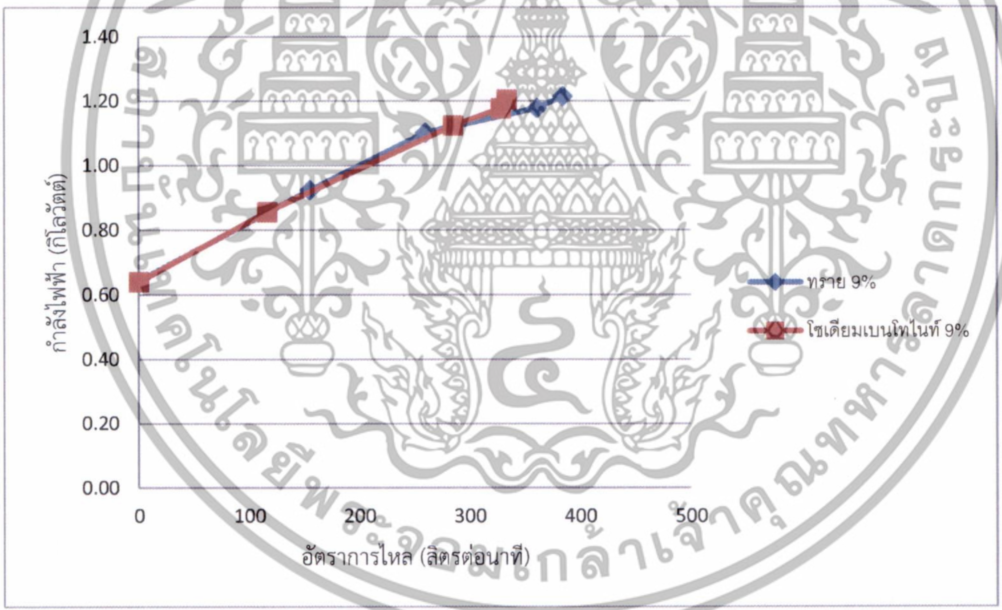
ที่อัตราความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร ที่อัตราการไหลต่ำๆ อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของของไหลผสมทรายจะมีค่าสูงกว่าของไหลผสมเบนโทไนท์ และค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นในช่วงกลางๆของการทดสอบก่อนที่ของไหลผสมเบนโทไนท์จะกลับมาเพิ่มสูงกว่าในช่วงอัตราการไหลที่สูง โดยที่ปลายสุดของกราฟของของไหลทั้งสองชนิด มีการใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน คือ 1.2 kW ในขณะที่ของไหลผสมเบนโทไนท์ให้อัตราการไหลสูดสุงเพียง 360 ลิตรต่อนาที ของไหลผสมทรายให้อัตราการไหลสูงสุดถึง 420 ลิตรต่อนาที

ส่วนที่อัตราความเข้มข้นโดยปริมาตร 9% อัตราการใช้กำลังไฟฟ้าของของไหลผสมทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันจนถึงที่อัตราการไหลประมาณ 320 ลิตรต่อนาที อัตราการใช้ไฟฟ้าของของไหลผสมเบนโทไนท์จึงเพิ่มสูงกว่าของไหลผสมทราย โดยที่ อัตราการไหลโดยประมาณ 330 ลิตรต่อนาทีของไหลผสมเบนโทไนท์ใช้กำลังไฟฟ้า 1.21 kW ซึ่งสูงกว่าของไหลผสมทรายที่อัตราการไหลเดียวกันประมาณ 9%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

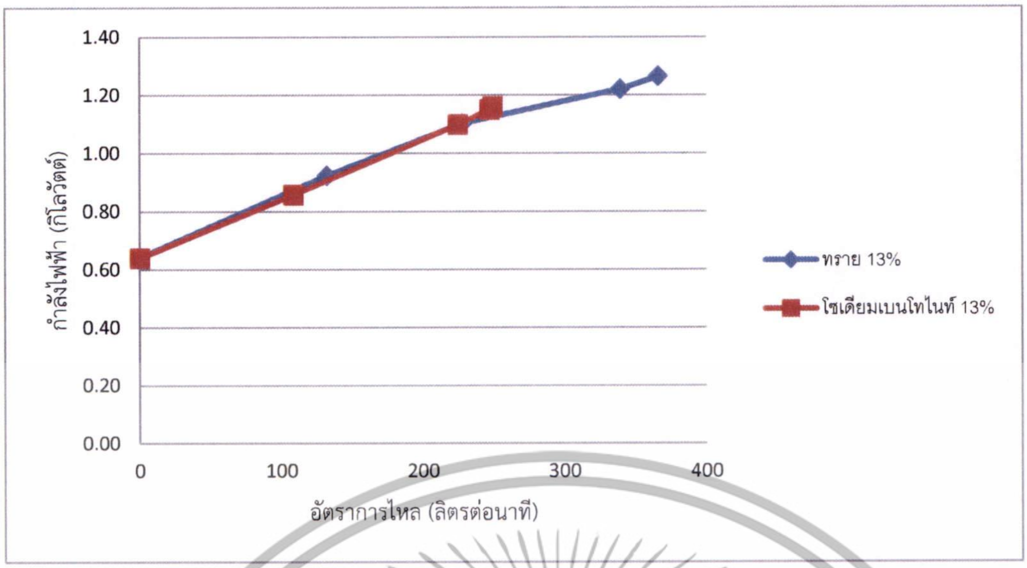


รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานไฟฟ้าของเครื่องสูบที่ใช้สูบของไหลผสมทรายและโซเดียมเบน-โทไนท์ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 5%



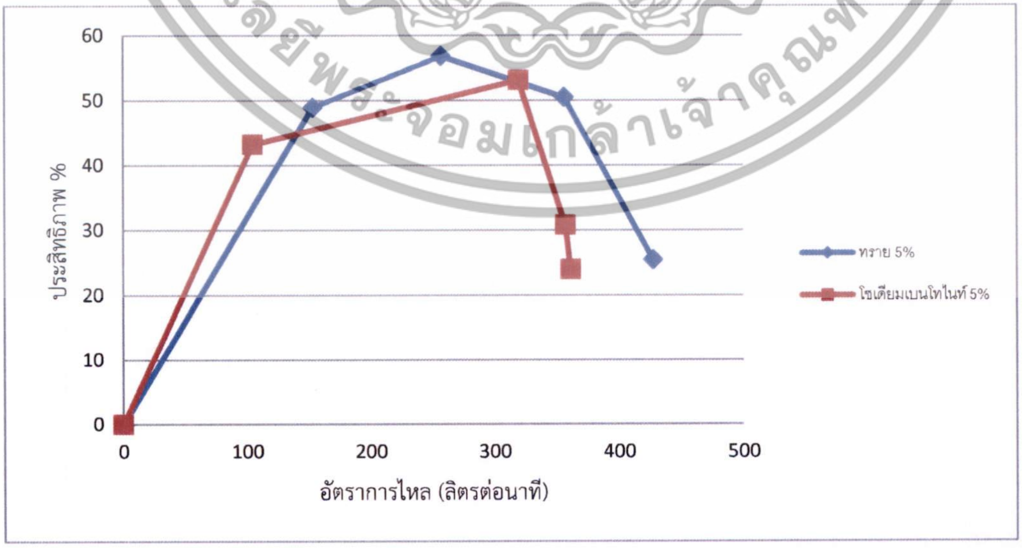
รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานไฟฟ้าของเครื่องสูบที่ใช้สูบของไหลผสมทรายและโซเดียมเบน-โทไนท์ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 9%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



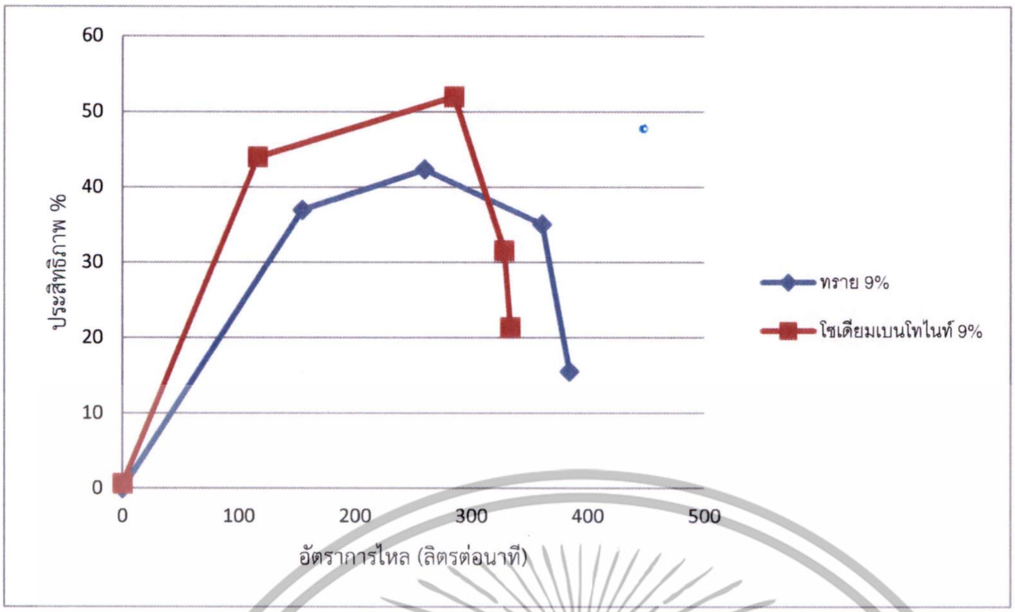
รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานไฟฟ้าของเครื่องสูบที่ใช้สูบของไหลผสมทรายและโซเดียมเบน-โทไนท์ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 13%

รูปที่ 5.14 5.15 และ 5.16 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องสูบที่สูบของไหลผสมทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้นทั้งสามระดับ เห็นได้ชัดว่าการสูบของไหลผสมโซเดียมเบนโทไนท์ มีประสิทธิภาพสูงกว่าในที่อัตราการไหลต่ำๆก่อนที่จะลดลงเรื่อยๆ เมื่ออัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราความเข้มข้นโดยปริมาตร 9% และ 13% ประสิทธิภาพของของไหลผสมน้ำกับโซเดียมเบนโทไนท์ลดลงอย่างมากและน้อยกว่าประสิทธิภาพของเครื่องสูบที่สูบของผสมระหว่างน้ำกับทรายในที่สุด อย่างไรก็ตามที่อัตราความเข้มข้นประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าประสิทธิภาพของเครื่องสูบที่สูบของไหลผสมระหว่างน้ำกับเบนโทไนท์ มีค่าน้อยกว่าของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายตลอดช่วงกราฟ

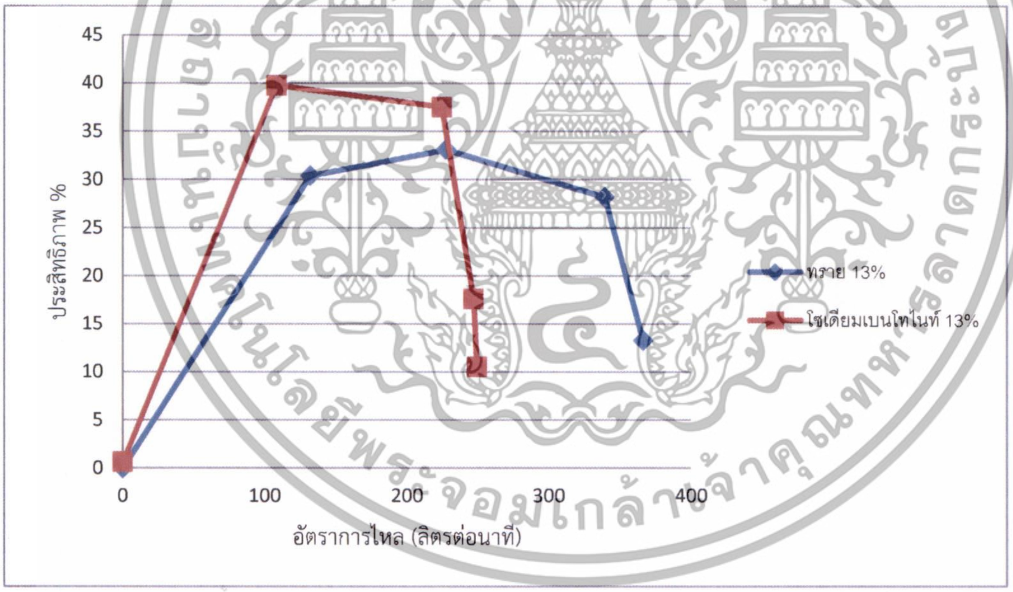


รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องสูบที่ใช้สูบของไหลผสมทรายและโซเดียมเบน-โทไนท์ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องสูบที่ใช้สูบของไหลผสมทรายและโซเดียมเบน-โทไนท์ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 9%



รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องสูบที่ใช้สูบของไหลผสมทรายและโซเดียมเบน-โทไนท์ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 13%

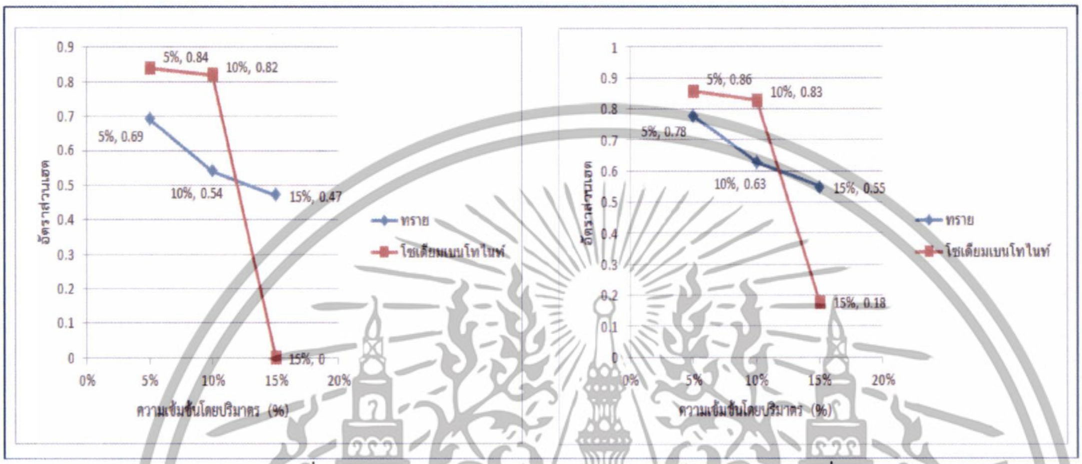
5.2 ผลของอัตราส่วนเฮด (H_R) อัตราส่วนกำลังไฟฟ้า (P_R) และอัตราส่วนประสิทธิภาพ (E_R)

การหาอัตราส่วนของค่า เฮด กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพ แสดงให้เห็นถึง การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องสูบสำหรับของไหลผสมชนิดต่างๆ โดยปกติเพื่อให้ผลคำนวณมีค่าความแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

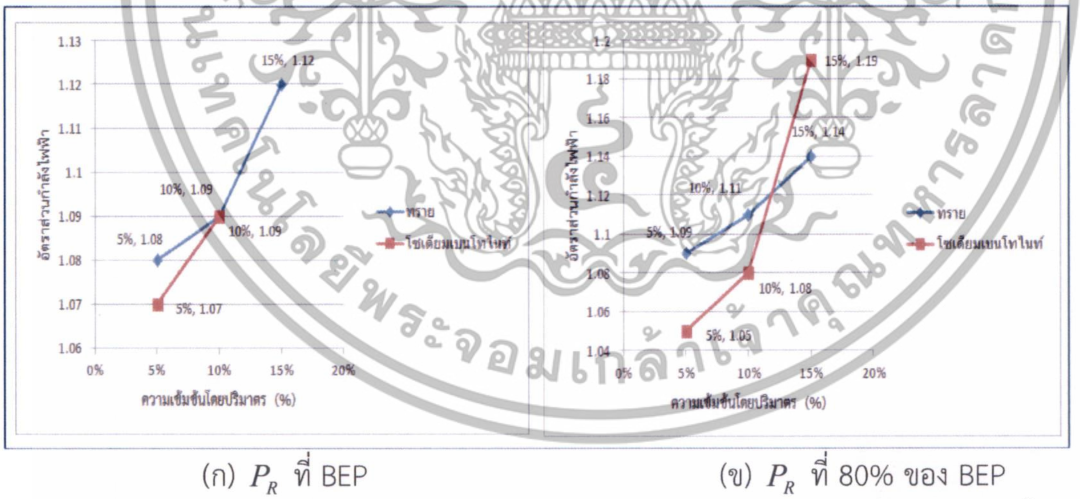
มากขึ้นในการเปรียบเทียบอัตราการไหลค่าเดียวกัน สมการพหุนามอันดับสอง (second-order polynomials) จึงถูกนำมาใช้ [1] โดยเปรียบเทียบความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง มีค่าความแม่นยำที่ ± 5%

การเปรียบเทียบค่า H_R P_R และ E_R สำหรับของไหลทั้งสองชนิดจะเปรียบเทียบที่สองจุด คือ ที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด BEP (Best Efficiency Point) คือที่อัตราการไหล 300 ลิตรต่อนาที และที่อัตราการไหล 250 ลิตรต่อนาที หรือที่ประมาณ 80% ของค่า BEP



(ก) H_R ที่ BEP (ข) H_R ที่ 80% ของ BEP

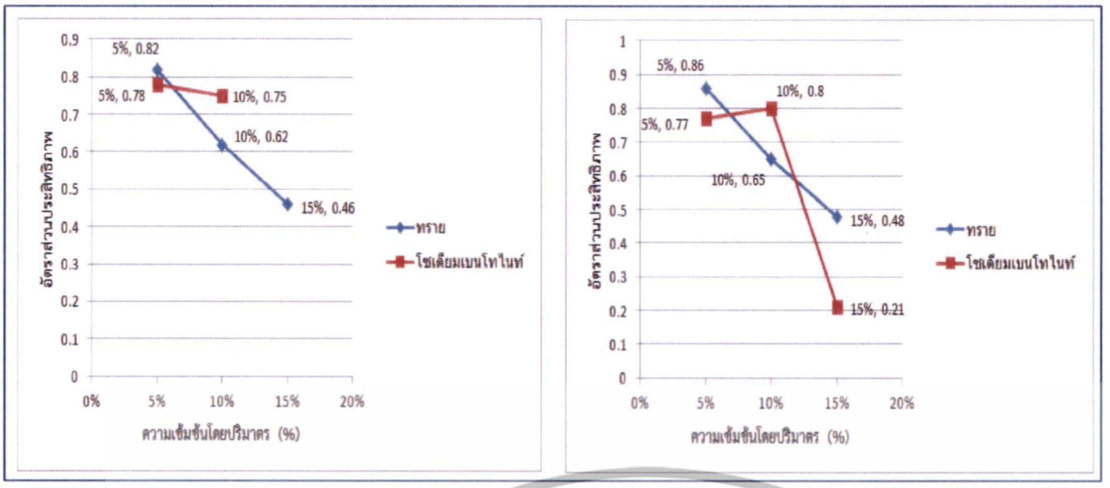
รูปที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนเฮด (H_R) ที่ความเข้มข้นต่างๆของของไหลผสมทั้งสองชนิด



(ก) P_R ที่ BEP (ข) P_R ที่ 80% ของ BEP

รูปที่ 5.18 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังไฟฟ้า (P_R) ที่ความเข้มข้นต่างๆของของไหลผสมทั้งสองชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) E_R ที่ BEP (ข) E_R ที่ 80% ของ BEP

รูปที่ 5 .19 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนประสิทธิภาพ (E_R) ที่ความเข้มข้นต่างๆของของไหลผสมทั้งสองชนิด

รูปที่ 5.17 5.18 และ 5.19 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของค่า เฮด กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพของของไหลผสม โซเดียมเบนโทไนท์และทราย ที่จุด BEP และ ที่ 80% ของ BEP จะเห็นได้ว่าที่จุด BEP ที่มีอัตราการไหล 300 ลิตรต่อนาที ของไหลผสมโวเดียวเบนโทไนท์ไม่สามารถแสดงค่าที่ความเข็นข้น 13% โดยปริมาตรได้ เนื่องจากการลดลงของสมรรถนะอย่างรวดเร็ว ส่วนที่จุด 80% ของ BEP หรืออัตราการไหล 250 ลิตรต่อนาที สามารถแสดงได้ทั้งสามค่าความเข้มข้น

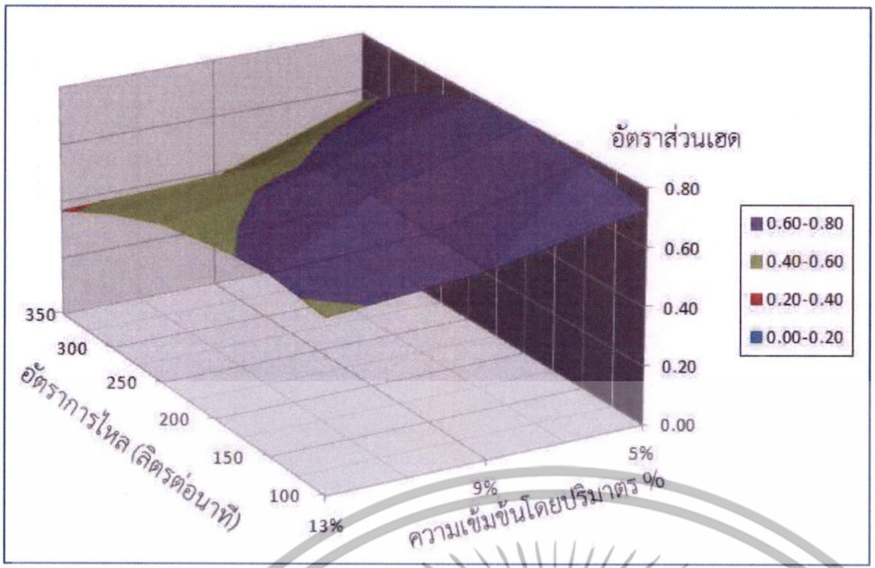
รูปที่ 5.17 แสดงค่าของอัตราส่วนเฮด จะเห็นได้ว่าที่จุด BEP และ 80% ของ BEP มีแนวโน้มลักษณะเดียวกัน คือค่าอัตราส่วนเฮด ของโซเดียมเบนโทไนท์มีค่าสูงกว่าของไหลผสมกับทรายสำหรับความเข้มข้นที่ 5% และ 9% ก่อนจะลงมาที่จุดต่ำกว่าที่ความเข้มข้น 13%

รูปที่ 5.18 แสดงค่าของอัตราส่วนกำลังไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าที่จุด BEP ของค่าอัตราส่วนกำลังไฟฟ้า ของโซเดียมเบนโทไนท์ มีค่าต่ำกว่าค่าอัตราส่วนกำลังไฟฟ้า ของของไหลผสมทรายที่ความเข้มข้น 5% ก่อนจะเพิ่มมาเกือบเท่ากันที่ความเข้มข้นเดียวกัน 9% ส่วนค่าอัตราส่วนกำลังไฟฟ้า ที่ 80% ของ BEP ของไหลผสมเบนโทไนท์ มีค่าน้อยกว่าของไหลผสมทราย ที่ความเข้มข้น 5% และ 9% ก่อนจะมีค่าสูงกว่าที่ความเข้มข้น 13%

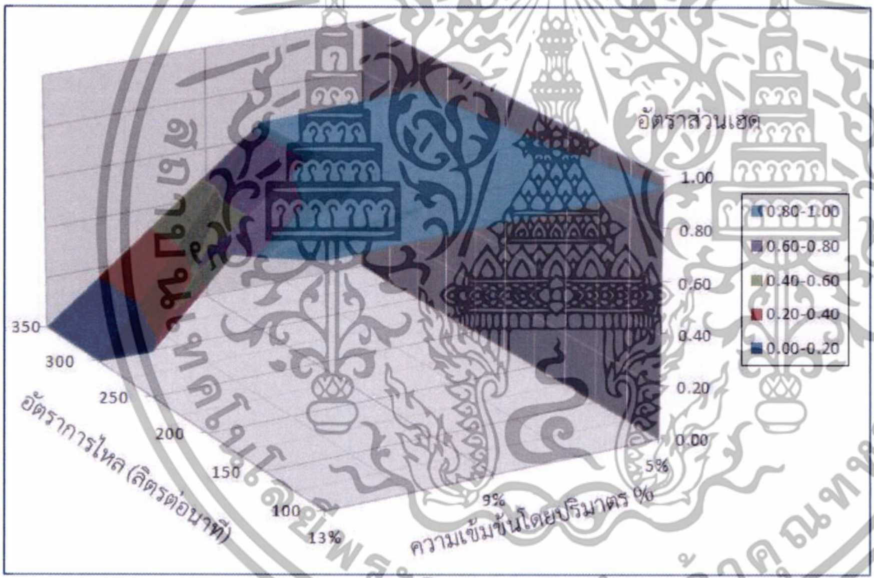
อัตราส่วนประสิทธิภาพแสดงในรูปที่ 5.19 แนวโน้มเช่นเดียวกับค่าอัตราส่วนเฮด และอัตราส่วนกำลังไฟฟ้า ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพของของไหลผสมทรายมีค่ามากกว่าของไหลผสมโซเดียมเบนโทไนท์ที่ความเข้มข้น 5% ก่อนจะมีค่าน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 9% หลังจากนั้น ดังแสดงที่จุด80% ของ BEP ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพ ของโซเดียมเบนโทไนท์จะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าต่ำกว่าที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 13%

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบของไหลผสมสามารถพิจารณาในเทอมเฉพาะของค่า อัตราส่วนเฮด ซึ่งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะเดียวกับค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพ [5] ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนเฮดของเครื่องสูบเมื่อสูบของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายและน้ำผสมโซเดียมเบนโทไนท์ที่อัตราการไหลและความเข้มข้นต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.20 และ 5.21 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



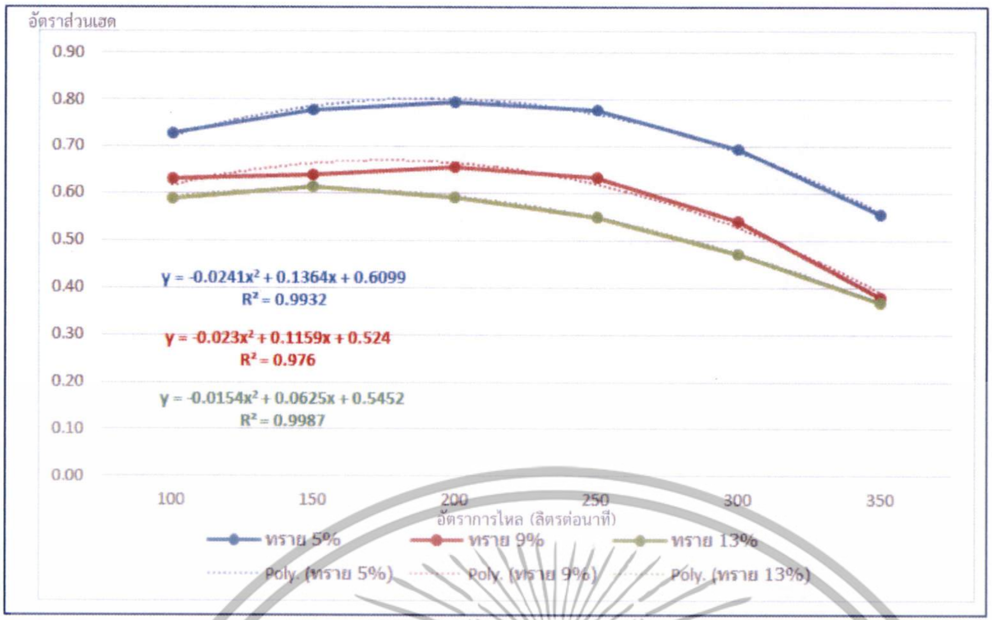
รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนเฮดที่ความเข้มข้นต่างๆของของไหลน้ำผสมทราย



รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนเฮดที่ความเข้มข้นต่างๆของของไหลน้ำโซเดียมเบนโทไนท์

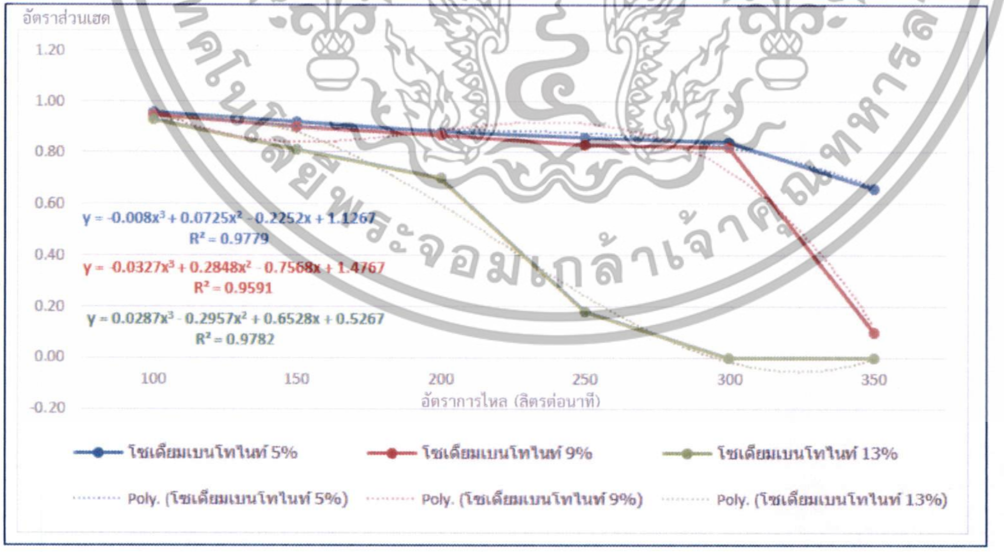
จากการกราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนเฮดของของไหลผสมทั้งสองชนิด สามารถพิจารณาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง อัตรราการไหลเทียบกับอัตราส่วนเฮดที่ความเข้มข้นโดยปริมาตรทั้งสามค่า โดยรูปที่ 5.22 แสดงค่าสมการแนวโน้มที่ไม่เป็นเส้นตรงในรูปแบบสมการ การถดถอยแบบพหุนามอันดับสอง (Second Degree polynomial regression) สำหรับของไหลผสมทรายที่ความเข้มข้นโดยปริมาตรต่างๆ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่ประมาณ 0.97 ถึง 0.96 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองจริงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 กราฟอัตราส่วนเฮดและสมการค่าแนวโน้มของของไหลผสมทราย

รูปที่ 5.23 แสดงค่าสมการแนวโน้มที่ไม่เป็นเส้นตรงในรูปแบบสมการของของไหลผสมโซเดียมเบนโทไนท์ ลักษณะกราฟของของไหลผสมโซเดียมเบนโทไนท์ มีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนเฮดตามอัตราการไหลอย่างมาก โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นโดยปริมาตร 13% ซึ่งต้องใช้สมการการถดถอยแบบพหุนามอันดับสาม (Third Degree polynomial regression) จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่ประมาณ 0.95 ถึง 0.98 เช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.23 กราฟอัตราส่วนเฮดและสมการค่าแนวโน้มของของไหลผสมโซเดียมเบนโทไนท์

ลักษณะกราฟและสมการแนวโน้มทั้งสองที่ได้ ทำให้สามารถคาดการลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อให้สูบของไหลผสมที่มีลักษณะต่างต่างกันทั้งสองชนิดได้ โดยของไหลผสมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จะการลดลงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมรรถนะตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ในลักษณะสมการทดถอยเชิงเส้น หรือเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้น (สมการการถดถอยแบบพหุนามอันดับสอง) ส่วนลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อให้สูบของไหลผสมที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กและผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับของไหล จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ โดยเฉพาะที่อัตราการสูง จะเกิดการลดลงของสมรรถนะของเครื่องสูบอย่างรวดเร็ว จากแนวโน้มและสมการที่ได้จากข้อมูลการทดลอง ยังไม่เพียงพอที่จะใช้สร้างสมการสำหรับทำนายค่าสมรรถนะของเครื่องสูบที่เปลี่ยนไปเมื่อใช้ของไหลผสมได้ จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบเพิ่มเติม และหาค่าความสัมพันธ์ระว่างคุณลักษณะต่างๆของของไหลผสม และรูปแบบการทดสอบของระบบสูบของไหล ต่อไป

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

สมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อใช้สูบของไหลผสมระหว่างน้ำกับของแข็งสองชนิดที่มีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดอนุภาค โดยแสดงการเปรียบเทียบในรูปของกราฟสมรรถนะของเครื่องสูบ ซึ่งประกอบไปด้วย กราฟเฮด – อัตราการไหล กราฟกำลังไฟฟ้า – อัตราการไหล และกราฟประสิทธิภาพ – อัตราการไหล โดยทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงการลดลงของสมรรถนะและประสิทธิภาพอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบการทำงานกับการสูบน้ำปกติ โดยการเปลี่ยนแปลงสามารถอธิบายได้ดังนี้

เฮดและประสิทธิภาพของเครื่องสูบลดลงตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของแข็งที่ผสม ดังจะได้ได้จากตัวอย่างรูปที่ 5.2 และ 5.5 ซึ่งทั้งของไหลผสมโซเดียมเบนโทไนท์และของไหลผสมทรายมีลักษณะผลการทดสอบสมรรถนะเดียวกันคือ สมรรถนะของเครื่องสูบลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะตำแหน่งที่วาล์วควบคุมการไหลเปิดจากประมาณ 50 % จนเปิดถึง 100%เต็มนั้น อัตราการไหลมีการเพิ่มขึ้นที่น้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการเปิดวาล์วช่วงเริ่มต้น นอกจากนี้ค่าเฮดของเครื่องสูบยังลดลงมาอย่างมากเมื่อเทียบกับสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อทำงานกับน้ำปกติ ลักษณะผลการทดสอบนี้มีรายงานไว้ในงานวิจัยของ Chandel Singh และ Seshadri 2011 [1] ซึ่งสรุปได้ว่า เฮดและประสิทธิภาพของเครื่องสูบจะลดลงเป็นผลมาจากความเข้มข้นของอนุภาคที่ผสมอยู่เพิ่มสูงขึ้น และผลกระทบนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของของไหลผสมอีกด้วย นอกจากนี้ งานวิจัยของ Gahlot Seshadri และ Malhotra 1992 [11] ยังอธิบายว่า เฮดและประสิทธิภาพของเครื่องสูบยังลดลงโดยเป็นลักษณะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของของไหลผสม เมื่อความเข้มข้นของของไหลที่ผสมยังไม่สูงมากนัก อย่างได้ก็ตาม ที่ความเข้มข้นที่สูง การลดลงของเฮดและประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถแสดงได้จากกราฟเฮดและประสิทธิภาพในบทที่ 5 (รูปที่ 5.8 ถึง 5.10 และ รูปที่ 5.14 ถึง 5.16)

การเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะของเครื่องสูบเมื่อทำงานร่วมกับของไหลผสมทั้งสองชนิดแสดงให้เห็นถึงผลของคุณลักษณะของวัสดุหรือของแข็งที่ผสมต่อการทำงานของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง โซเดียมเบนโทไนท์ถึงแม้ว่าจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าทราย แต่แสดงให้เห็นถึงการลดลงที่มากกว่าของเฮดและประสิทธิภาพที่อัตราการไหลที่สูง ผลการทดสอบลักษณะนี้ได้ถูกอธิบายได้ว่าของไหลผสมทรายนั้นจะมีอนุภาคที่ใหญ่และหยาบ ซึ่งในอัตราการไหลที่ต่ำจะมีอนุภาคที่ไหลไปกับน้ำได้ยาก เครื่องสูบจึงต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้นเพื่อจะพาทราย หรืออนุภาคขนาดใหญ่ที่ผสม ไหลผ่านตามระบบสูบไปได้ อย่างไรก็ตาม ที่อัตราการไหลสูงๆ จะพบว่าโซเดียมเบนโทไนท์จะใช้พลังงานไฟฟ้ากับเครื่องสูบเยอะกว่าในขณะที่ให้กำลังงานทั้ง เฮดและอัตราการไหลต่ำ โซเดียมเบนโทไนท์ถึงแม้จะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าทรายมาก ซึ่งทำให้เครื่องสูบใช้กำลังงานน้อยกว่าในการพาอนุภาคให้เคลื่อนที่แต่ปัจจัยของแรงเสียดทานสูญเสียที่เพิ่มเข้ามาคือแรงเสียดทานเนื่องจากความหนืดที่สูง ดังแสดงได้จากรูปที่ 5.17 กราฟอัตราส่วนเฮด และรูปที่ 5.22 และ 5.23 ซึ่งแสดงสมการค่าแนวโน้มของของไหลผสม Gandhi, Singh และ Seshadri 2001 [1] สรุปไว้ว่า ขนาดอนุภาคที่เล็กสามารถเพิ่มแรงเสียดทานในระบบเนื่องจากความหนืดที่สูงกว่าของไหลผสมกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า และความสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันในระบบเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดจากความหนืดจะมีค่าสูงกว่าแรงดันสูญเสียที่เกิดจากอนุภาคของแข็งทั่วไป อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของเฮด กำลังงานไฟฟ้า และประสิทธิภาพไม่ได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแบบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ความเข้มข้นและอัตราการไหล แต่ที่ความเข้มข้นโดยน้ำหนักสูงๆจะมีผลกระทบอย่างมากต่อสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง Gandhi, Singh & Seshadri 2002 [2]

6.2 บทสรุป

จากการแสดงการทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบของไหลผสมสามารถสรุปได้ว่า

1. การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นโดยปริมาตรของของไหลผสม ทำให้เกิดการลดลงของเฮดและประสิทธิภาพของเครื่องสูบ เป็นผลมาจากแรงดันสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ความหนืด และความหยาบของอนุภาค

2. ที่อัตราการไหลใดๆ การลดลงของเฮดและประสิทธิภาพของเครื่องสูบไม่เป็นแบบสัดส่วน อย่างไรก็ตามที่อัตราความเข้มข้นโดยน้ำหนักสูงๆ เฮดและประสิทธิภาพของเครื่องสูบจะลดลงอย่างมาก

3. อัตราส่วนของเฮด กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพ แสดงให้เห็นถึงผลของแรงหนืดจากของไหลผสมอนุภาคที่มีขนาดเล็ก สามารถสร้างแรงดันสูญเสียที่มีค่ามากกว่าของไหลผสมที่มีอนุภาคใหญ่กว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราการไหลสูง

6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. การทดสอบควรเพิ่มการลงสำรวจหน้างานจริงที่มีลักษณะการใช้งานสูบของไหลผสม เพื่อวิเคราะห์ตัวอย่างของไหลผสม และนำมาออกแบบการทดสอบเพิ่มให้ใกล้เคียงกับลักษณะความต้องการจริงมากที่สุด

2. ชุดทดสอบควรมีการปรับปรุงเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ จากการทดลอง เช่น ควรมีชุดผสมและชุดกวนของไหล เพื่อให้ของผสมเกิดการกระจายตัวกับของไหลได้ทั่วถึงโดยเฉพาะของผสมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งมักจะตกตะกอนไม่ผสมกับของไหล และตำแหน่งทางท่อทางดูดและจ่ายควรแยกออกจากกันอย่างชัดเจน

3. ควรมีการทดสอบของไหลผสม โดยเพิ่มชนิดของของแข็งที่นำมาผสม ที่มีความแตกต่างกันทางลักษณะทางกายภาพ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบ และแยกแยะผลของตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดของอนุภาค การกระจายตัว ความถ่วงจำเพาะ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องสูบได้ดียิ่งขึ้น จนสามารถสร้างเป็นสมการ หรือ กราฟ สำหรับทำนายสมรรถนะของเครื่องสูบ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถนำไปใช้ประกอบการออกแบบระบบสูบของไหลผสมได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การศึกษาในอนาคตอาจจะทำการทดสอบในส่วนของเครื่องสูบ เช่น เปรียบเทียบเครื่องสูบขนาดต่างๆ ว่ามีผลต่อค่าสมรรถนะที่ลดลง แตกต่างกันอย่างไร รวมทั้งการควบคุมเครื่องสูบรูปแบบต่างๆ เช่น ปรับแต่งใบพัด ความเร็วรอบในการทำงาน การต่อเครื่องสูบสองเครื่องแบบ ขนาน หรือ อนุกรม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Gandhi,B Singh,S and Seshadri,V. **"Performace Characteristics of Centrifugal Slurry Pump."** Journal of Fluids Engineering, Vol.123, 2001 pp. 271-280.

[2] Gandhi,B Singh,S and Seshadri,V. **"Effect of speed on the performance characteristics of a centrifugal slurry pump."** Journal of Hydraulic Engineering, Vol.128, 2002 pp. 225-233.

[3] Gahlot, V, Seshadri, V & Malhotra, R. **"Effect of density, size distribution, and concentration of solid on the characteristics of centrifugal pumps."** Journal Of Fluids Engineering,Vol 3, pp. 1992 386.

[4] Walker, C, Wells, P, & Pomat, C n.d. **"The Effect of Impeller Geometry on the Performance of Centrifugal Slurry Pumps."** 4Th International Conference On Bulk Materials, Storage, Handling And Transportation: 7Th International Symposium On Freight Pipelines; Preprints Of Papers, 1992 pp. 97

[5] Kazim, K, Maiti, B, & Chand, P. **"A correlation to predict the performance characteristics of centrifugal pumps handling slurries."** Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part A-Journal Of Power And Energy, 1997 pp. 147-157

[6] Hua, T and Yi, L 2013. **"Numerical Anaysis of Centrifugal pump delivering slurry."** Journal of Applied Sciences, Vol.17, 2013 pp. 3416-3420

[7] Savar, M, Kozmar, H, & Sutlovic, I. **"Improving Centrifugal pump efficiency by impeller trimming."** Desalination, Vol.249, 2009 pp. 654-659

[8] Li,P Cai,Q & Wei,B. **"Failure analysis of the impeller of slurry pump used in zinc hydrometallurgy process."** Engineering Failure Analysis. Vol.13, 2006 pp. 876-885

[9] Engin,T Gur,M Calli,I. **"Slurry and Tip Clearance Effects on A Centrifugal Pump Perfromance Used in Hydraulic Transportation System."** The third Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, Israel, May 2000

[10] Stack exchange. **"Stack exchange inc."** [Online]. Available: http://physics.stackexchange.com. 2014.

[11] Tutorhelpdesk. "Tutorhelpdesk." [Online]. Available: http://www.tutorhelpdesk.com.2014

[12] University of Delaware. **"Non-Newtonian Shearthickening."** [Online]. Available: http://www.che.udel.edu/research_groups/wagner/stf.html 2013.

[13] UPPER HAND MAINTEANCE & Service engineering Compnany. **"Cross Section Centrifugal Pump."** [Online]. Available: http://www.umsco-eg.com/index.html. 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] UniGuide. **"Impeller Types."** [Online]. Available: http://www.educationlite.com/centrifugal-pump. 2015.

[15] EBARA Corporation. **Essentials of Turbo Type Fluid Machinery**. Tokyo: EBARA, Inc. 2008.

[16] REL Resource Equipment Ltd. **"Head of a centrifugal pump."** [Online]. Availablehttp://www.rel.com.au. 2015

[17] ASHRAE. **Heating, Ventilating, And Air-Conditioning Systems And Equipment 2008.** Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. 2008.

[18] Japanese Standards Association. **Testing Methods for Centrifugal Pumps, Mixed Flow Pumps and Axial Flow Pumps.** 1990, Tokyo: JSA, Inc. 2013.

[19] Tepkasat Insri Co., Ltd. **"Characteristics of Sodium Bentonite."** [Online]. Available: http://www.siliconclay.com/sodiumbentonite.html. 2015.

[20] Ningbo Time Machinery Industrial Co., Ltd. **"Performance Chart of MHF/5AM Centrifugal pump."** [Online]. Available: http://www.lucky-pro.com/product. 2015

[21] J.J., Koo,J.K., and Prang,A.J. **"Performance of Centrifugal Pump in Slurry Service."** Hydrotransport 3. Paper J2. 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบน้ำปกติ

	แรงดัน (บาร์)	แรงดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	เฮดเครื่องสูบ (เมตร)	กำลังงานที่ให้เครื่องสูบ (กิโลวัตต์)	กำลังงานที่เครื่องสูบผลิต (กิโลวัตต์)	ประสิทธิภาพ %
1	0.10	2.0	0	22.5	0.64	0.00	0.0
2	0.19	1.8	95.2	21	0.82	21742.30	46.4
3	0.36	1.0	274.7	18.7	1.08	34891.62	63.3
4	0.44	0.3	361.9	12.2	1.12	43853.88	60.3
5	0.46	0.0	372.1	4.5	1.19	20196.34	28.0

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบน้ำผสมทรายที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

	แรงดัน (บาร์)	แรงดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	เฮดเครื่องสูบ (เมตร)	กำลังงานที่ให้เครื่องสูบ (กิโลวัตต์)	กำลังงานที่เครื่องสูบผลิต (กิโลวัตต์)	ประสิทธิภาพ %
2	0.18	1.8	152.94	16.5	0.844	0.41	49
3	0.25	1.5	256.5	14.9	1.1	0.62	57
4	0.34	0.875	355.8	10.1	1.165	0.59	50
5	0.43	0	427.5	4.38471	1.205	0.31	25

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบน้ำผสมทรายที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

	แรงดัน (บาร์)	แรงดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	เฮดเครื่องสูบ (เมตร)	กำลังงานที่ให้เครื่องสูบ (กิโลวัตต์)	กำลังงานที่เครื่องสูบผลิต (กิโลวัตต์)	ประสิทธิภาพ %
2	0.21	1.63	154.8	13.5	0.924	0.34	37
3	0.32	1.13	259.56	11	1.102	0.47	42
4	0.39	0.63	360.72	7	1.178	0.41	35
5	0.42	0	384.12	3	1.215	0.19	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบน้ำผสมทรายที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

	แรงดัน (บาร์)	แรงดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	เฮดเครื่องสูบ (เมตร)	กำลังงานที่ให้เครื่องสูบ (กิโลวัตต์)	กำลังงานที่เครื่องสูบผลิต (กิโลวัตต์)	ประสิทธิภาพ %
2	0.175	1.725	132.06	13	0.924	0.28	30
3	0.19	1.3	227.58	9.8	1.102	0.36	33
4	0.4	0.58	339.24	6.2	1.221	0.34	28
5	0.4	0	366.12	2.8	1.265	0.17	13

ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบน้ำผสมโซเดียมเบนโทไนท์ที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

	แรงดัน (บาร์)	แรงดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	เฮดเครื่องสูบ (เมตร)	กำลังงานที่ให้เครื่องสูบ (กิโลวัตต์)	กำลังงานที่เครื่องสูบผลิต (กิโลวัตต์)	ประสิทธิภาพ %
2	0.19	1.8	104.74	20.29	0.80	0.35	43
3	0.4	0.8	332.70	11.72	1.15	0.61	53
4	0.46	0.2	336.90	6.22	1.18	0.36	31
5	0.48	0.0	345.20	4.89	1.21	0.29	24

ตารางที่ ก-6 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบน้ำผสมโซเดียมเบนโทไนท์ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

	แรงดัน (บาร์)	แรงดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	เฮดเครื่องสูบ (เมตร)	กำลังงานที่ให้เครื่องสูบ (กิโลวัตต์)	กำลังงานที่เครื่องสูบผลิต (กิโลวัตต์)	ประสิทธิภาพ %
2	0.22	1.8	116.50	19.80	0.86	0.38	44
3	0.38	0.9	291.20	13.05	1.12	0.61	54
4	0.48	0.2	328.30	6.93	1.18	0.37	32
5	0.56	0.0	333.50	4.72	1.21	0.26	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-7 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเมื่อสูบน้ำผสมโซเดียมเบนโทไนท์ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

	แรงดัน (บาร์)	แรงดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	เฮดเครื่องสูบ (เมตร)	กำลังงานที่ให้เครื่องสูบ (กิโลวัตต์)	กำลังงานที่เครื่องสูบผลิต (กิโลวัตต์)	ประสิทธิภาพ %
2	0.22	1.7	108.60	19.20	0.86	0.34	40
3	0.4	0.7	224.80	11.21	1.10	0.41	38
4	0.4	0.0	168.50	5.01	1.15	0.20	18
5	0.4	0.0	175.30	3.00	1.16	0.12	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-1 แสดงคุณลักษณะของโซเดียมเบนโทไนท์ที่ใช้ในงานทดสอง [19]

GRADE	Bentonite
COLOR	Brown
Sio2	64.7 %
AL2O3	12.1 %
FeO	2.0 %
Tio2	0.14 %
CaO	3.2 %
MgO	2.1 %
K2O	< 1 %
PH	8-10 %
Swelling Index	> 25 ml/g
Particle size pass 200 mesh min	75%-95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสมรรถนะของปั๊มแรงเหวี่ยงเมื่อใช้สูบของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย

The effect of sand particle on Centrifugal Pump Performance

อยุส สันถวโกมล, เอกพจน์ ตันตราภิวัฒน์ และ จำลอง ปราบแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร 0-2329-8350 โทรสาร 0-2329-8352 E-mail: ktakapot@kmitl.ac.th

ทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพของปั๊มแรงเหวี่ยงที่ ช้สูบน้ำซึ่งมีส่วนผสมของอนุภาคทรายในอัตราส่วนที่ต่างๆ กัน เพื่อ ป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบสูบน้ำที่มีอนุภาคทรายปะปน เช่น ลองประปา เขื่อน และบ่อบำบัดน้ำเสีย ทำให้ใช้ปั๊มได้อย่างมี ระสิทธิภาพ ช่วยให้เกิดการประหยัดพลังงานได้ ในการทดสอบทำ ดยใช้ปั๊มแรงเหวี่ยงขนาด 2 แรงม้า มีค่าเฮดสูงสุด 22.5 เมตร อัตรา ารไหลสูงสุด 600 ลิตรต่อนาที จากผลการทดลองกับน้ำที่ไม่ผสม รายได้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 63.3 % เมื่อทำการทดลองโดยมี วนผสมของเม็ดทรายที่ 5% โดยปริมาตร จะได้ประสิทธิภาพสูงสุด ียบเท่ากับน้ำที่ไม่ผสมอนุภาค เมื่อเพิ่มส่วนผสมของทรายมากขึ้นไป ป็นที่ 10 % และ 15 % ประสิทธิภาพสูงสุดลดลงเท่ากับ 58.2 % และ 2.4 % ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพ องปั๊มแรงเหวี่ยงจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อส่วนผสมของทราย ม่เกิน 5 % และประสิทธิภาพจะลดลงตามลำดับเมื่อมีส่วนผสมของ รายมากยิ่งขึ้นซึ่ง อัตราการไหลสูงสุดที่วัดได้ก็มีความสัมพันธ์ใน ักษณะเดียวกัน

าสำคัญ: ปั๊มสูบของไหลผสม, สมรรถนะของปั๊ม, พลังงานขับปั๊ม

bstract

This paper presents an experiment of efficiency reduction on centrifugal pump performed with water at different levels of and particle mixture. This study may lead to a possibility to duce energy consumption of a pumping system that carries out and mixed water such as drainage, dam, and waste water eatment systems. In the experiment a two horsepower entrifugal pump was used. It can produce maximum head essure at 22.5 meters and maximum flow rate at 600 liter/min. ithout added particles, the pump can perform at maximum of 3.3% efficiency. When sand particles were introduced at 5% by lume, it was shown that the efficiency was same as original vel. Once the amount of added sand was increased to 10% and 5 %, the pump maximum efficiency was declined to 58.2% and 2.4% respectively. The result has been shown that with a small nount of sand particles the overall efficiency was not much fected. However when more and more particles were troduced, the pump efficiency was declined increasingly. This behavior was too presented by the volumetric flow rate which was also measured during the test.

Keywords: Centrifugal pump, Participate mixture, Pump efficiency

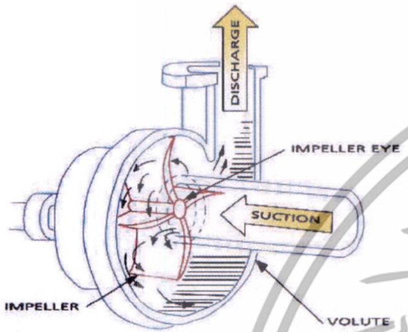
1. คำนำ

ปั๊มแบบแรงเหวี่ยงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สูบของเหลวที่นิยมใช้กันมาก ประมาณกันว่าพลังงานไฟฟ้า 20 % ของโลกต้องใช้ไปเพื่อการเดินปั๊ม สูบของเหลวในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การสูบน้ำของการประปา การสูบของเหลวในอุตสาหกรรมอาหาร การสูบน้ำมันในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน นอกจากนี้ยังมีการใช้ปั๊มแบบแรงเหวี่ยงสูบของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ในเหมืองถ่านหิน ในอุสาหกรรมการก่อสร้างหรือการสูบทรายจากแม่น้ำลำคลองที่ตื้นเขิน เป็นต้น ได้มีผลการวิจัยการใช้ปั๊มแรงเหวี่ยงกับของไหลผสมมาหลายปี Fairbank (1) ค้นพบว่า เฮดของปั๊มจะลดลงเมื่อส่วนผสมของของดินเหนียวและกากตะกอนเพิ่มขึ้น และ เมื่อค่าเฉลี่ยขนาดของอนุภาคและความเข้มข้นดินเหนียวเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เฮดของปั๊มลดลงเช่นกัน จากสาเหตุที่ความเร็วแตกต่างกันของเหลวและของอนุภาคและดินเหนียวที่ออกจากใบพัด แต่ในทางตรงกันข้าม Chand P. (2) และคณะได้รายงานว่าค่าประสิทธิภาพของปั๊มจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมของอนุภาคของแข็งลงไปในน้ำที่สูบ ส่วน Wiedenroth (3) เชื่อว่าเฮดของปั๊มลดลงเพราะความเสียดทานเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการแขวนลอยของอนุภาค และ Vocadlo (4) ได้รายงานว่าเมื่อใช้ปั๊มสูบน้ำผสมอนุภาคประสิทธิภาพของของปั๊มที่เคลือบภายในด้วยยาง จะลดลงมากกว่าปั๊มที่ภายในทำด้วยเมตทาลิก Sellgren (5) และคณะ ได้รวบรวมข้อมูลการทดลองกับปั๊มมหลายชนิดที่ใช้สูบส่วนผสมของน้ำกับอนุภาคของแข็ง เพื่อค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดวัดผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคกับสันผ่าศูนย์กลางและความกว้างของใบพัดที่เหมาะสม โดยทั่วไปแล้วผู้ผลิตปั๊มแบบแรงเหวี่ยงจะทำการทดสอบปั๊มกับน้ำบริสุทธิ์ แล้วรายงานผลการทดสอบสมรรถนะของปั๊มมาเพื่อเป็นข้อมูลให้กับผู้ที่นำปั๊มไปใช้ จะได้ใช้ให้ถูกต้องตามที่ได้ออกแบบมาเพื่อให้การใช้พลังงานในการเดินปั๊มมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากในประเทศไทยมีการนำปั๊มไปใช้ในการสูบทรายแม่น้ำกันเป็นจำนวนมาก จะส่งผลให้สมรรถนะของปั๊มจะเปลี่ยนไป การศึกษาสมรรถนะของปั๊มแรงเหวี่ยงในกรณีที่ใช้สูบของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายจึงจำเป็นจะต้องศึกษาเพื่อช่วยให้การใช้ปั๊มในกรณีดังกล่าวตรงกับจุดที่ปั๊มให้ประสิทธิภาพสูงสุด ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการเดินปั๊มสูบของไหลผสมได้ อีกทั้งยังช่วยยืออายุการใช้งานของปั๊มได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับปั๊ม

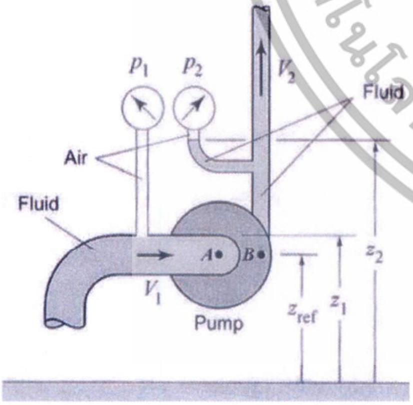
ปั๊มแรงเหวี่ยงทำงานโดยอาศัยการหมุนของใบพัดที่ได้รับการ ยเทกำลังมาจากมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อของเหลวถูกหมุนให้เกิดแรงหนี ศูนย์กลางความกดดันที่จุดศูนย์กลางก็จะต่ำกว่าความกดดัน รยากาศ ของเหลวจะถูกดูดเข้าทางศูนย์กลางของใบพัด ของเหลวจะ รับพลังงานกลจากใบพัดแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ เมื่อของเหลว ลออกจากใบพัดแล้วพลังงานจลน์บางส่วนก็จะถูกเปลี่ยนไปเป็น ลังงานศักย์ในรูปของความดันแทน เนื่องจากช่องทางการไหลภายใน อปั๊มขยายใหญ่ขึ้น ทำให้ความเร็วของของเหลวลง ซึ่งก็จะทำให้ งเหลวสามารถไหลไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้



ปที่ 1 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของปั๊ม

1 เฮดปั๊ม

เฮดปั๊มหมายถึงพลังงานที่ปั๊มให้กับของเหลวเพื่อให้เกิดการไหล กด้านดูด (จุด A) ไปยังด้านส่งของปั๊ม (จุด B) ดังแสดงในรูปที่ 2 ค่า ดปั๊มคำนวณจากสมการพลังงานของเบอร์นูลี่ (1)



รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งหาค่าเฮดปั๊ม

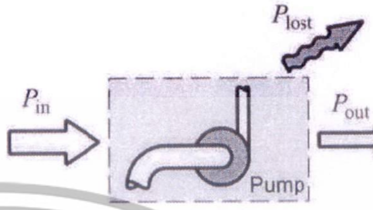
ารูปเขียนสมการพลังงานระหว่างจุด A และ B จะได้

$$Hp = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}\right) + \left(Z_2 - Z_1\right) \qquad (1)$$

เมื่อ Hp คือเฮดปั๊ม (m), V_1 และ V_2 คือความเร็วการไหลที่จุด A และ จุด B ตามลำดับ (m/s) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดท่อ

3. ประสิทธิภาพของปั๊ม

ประสิทธิภาพของปั๊ม (η_p) หมายถึง ร้อยละของกำลังงานที่ปั๊มผลิตได้ (Power output) เมื่อเทียบกับกำลังงานที่ให้ปั๊ม (Power input) โดยผ่านเพลาจากต้นกำลังและใบพัดซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2)



รูปที่ 3 แสดงค่ากำลังที่ให้และกำลังที่ได้จากปั๊ม

$$\eta_P = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \qquad (2)$$

กำลังที่ปั๊มผลิตได้ (Pump Power output) คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\eta_P = \gamma Hp\, Q \qquad (3)$$

เมื่อ Hp คือเฮดปั๊ม (m)

γ คือน้ำหนักจำเพาะของของไหล (N/m^3)

Q คืออัตราการไหลของปั๊ม (m^3/s)

กำลังที่ให้แก่ปั๊ม(Pump Power input) หาได้โดยการวัดกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์แล้วคูณกับประสิทธิภาพของมอเตอร์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$P_{input} = VI\sqrt{3}\eta_m \qquad (4)$$

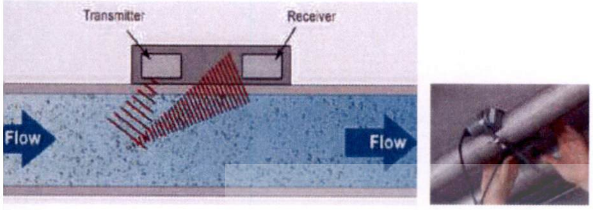
4. อุปกรณ์การทดลองและผลการทดลอง

การทดสอบสมรรถนะของปั๊มเมื่อใช้กับของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายได้ประกอบชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะประกอบด้วยปั๊มแรงเหวี่ยงขนาด 2 แรงม้า เฮดสูงสุด 22.5 เมตร อัตราการไหลสูงสุด 600 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

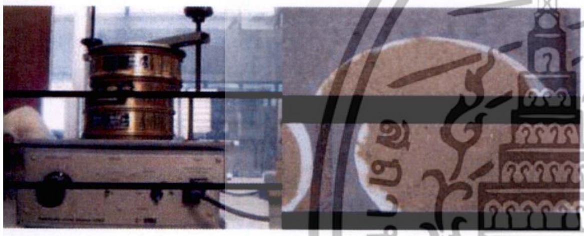
รูปที่ 4 แสดงชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊ม

กำลังขับปั๊มโดยการวัดกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนแล้วคูณด้วย ะสิทธิภาพมอเตอร์ ส่วนกำลังที่ได้จากปั๊มหาได้จากการวัดอัตราการ ลด้วยเครื่องวัดการไหลแบบอุตราโซนิคคูณด้วยความดันที่วัดด้วย จวัดความดัน



รูปที่ 5 แสดงเครื่องมือวัดการไหลแบบอุตราโซนิค

สำหรับทรายที่ใช้ทดสอบได้ใช้ทรายแม่น้ำที่มีขนาดวัดผ่า เย์กลางเฉลี่ย 0.42 มม และหาค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำผสมกับ ายที่สัดส่วนผสมต่างๆ จากสมการที่ (5)



รูปที่ 6 เครื่องร่อนทรายและทรายแม่น้ำที่ใช้ในการทดลอง

$$S_m = S_w + C(S_s - S_w) \quad (5)$$

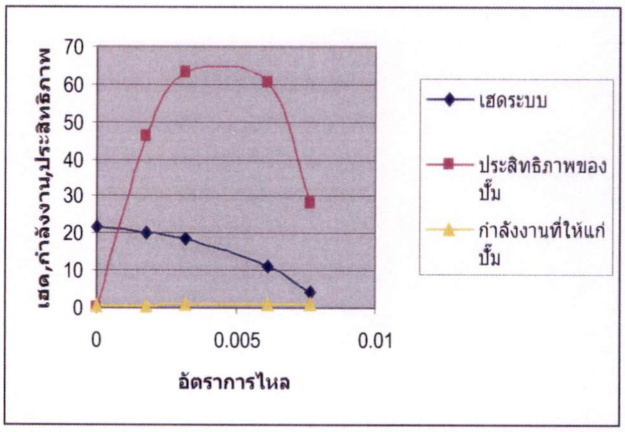
อ S_m : ความถ่วงจำเพาะของส่วนผสม

S_w : ความถ่วงจำเพาะของน้ำ, (S_w = 1)

C : ความหนาแน่นในเศษส่วนปริมาตร

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ทำการทดลองสมรรถนะของปั๊มด้วยน้ำธรรมดา โดยบันทึกค่า ามดันด้านดูด, ความดันด้านจ่าย, ค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมมิเตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากโวลย์มิเตอร์, อ่านค่าอัตราการไหลจาก รื่องวัดการไหลแบบอุตราโซนิคและจากเครื่องมือวัดแบบออริฟิส โดย บอัตราการไหลที่วาล์วด้านจ่าย จากนั้นก็เปลี่ยนสารทดลองโดยการ มน้ำกับทรายที่ส่วนผสมของทรายที่ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็น มลำดับ

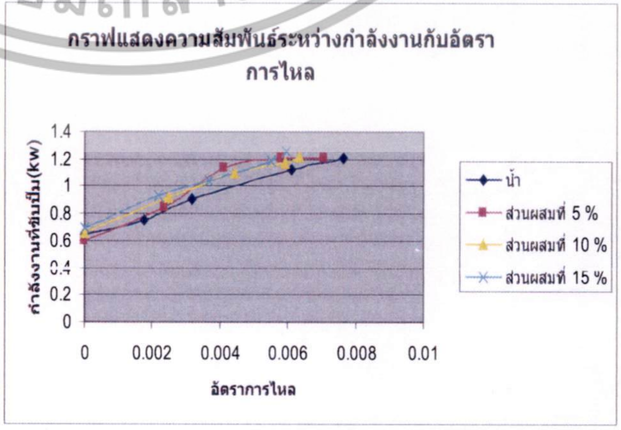


รูปที่ 7 แสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งเมื่อทดสอบด้วยน้ำ

ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 63.3 เปอร์เซ็น ที่อัตราการไหล 0.005 m^3/s ค่าเฮด 15 เมตร

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฮดกับอัตราการไหล

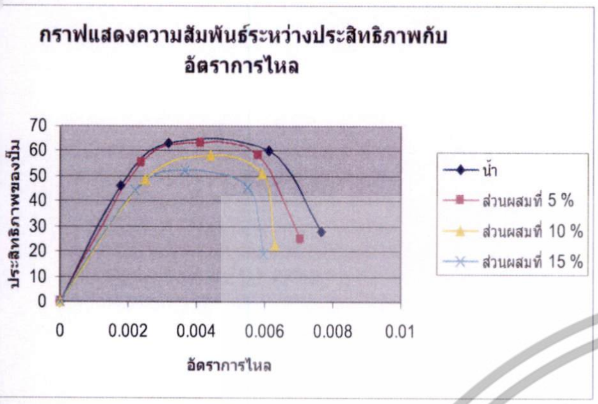
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฮดปั๊มเทียบกับอัตราการไหลที่ส่วนผสมของทราย 0, 5,10 และ15 เปอร์เซ็นตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อส่วนผสมของทรายในมากขึ้นจะทำให้ค่าเฮดและอัตราการไหลของปั๊มลดลง



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของปั๊มเทียบกับอัตราการ ลที่ ส่วนผสมของทราย 0, 5,10 และ15 เปอร์เซ็นตามลำดับ จะเห็น มื่อส่วนผสมของทรายในมากขึ้นจะทำให้กำลังขับปั๊มค่อยๆ สูงขึ้น ะที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ต้องใชกำลังขับปั๊มสูงขึ้นด้วย นกัน



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับอัตราการไหล

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของปั๊มเทียบกับ ราการไหลที่ ส่วนผสมของทราย 0, 5,10 และ15 เปอร์เซ็นตามลำดับ เห็นว่าเมื่อส่วนผสมของทรายในมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพปั๊ม ยๆ ลดลงขึ้นและที่อัตราการไหลก็จะลดลงเช่นเดียวกัน แต่ที่อัตร นผสมของทราย 5 เปอร์เซ็นประสทธิภาพสูงสุดของปั๊มใกล้เคียงกับ รทดสอบด้วยน้ำธรรมดา

สรุป

การใช้ปั๊มแบบแรงเหวี่ยงสูบน้ำผสมทรายแม่น้ำเมื่อส่วนผสมของ รายมากขึ้นค่าเฮดและอัตราการไหลของปั๊มจะลดลง แต่กำลังที่ใช้ขับ มจะสูงขึ้น และประสิทธิภาพของปั๊มก็จะลดลงเช่นเดียวกัน แต่ที่ นผสมของทรายไม่เกิน 5 เปอร์เซ็น จะไม่ค่อยมีผลต่อประสิทธิภาพ งปั๊มมากนัก หากมีความจำเป็นต้องใช้ปั๊มสูบน้ำที่มีส่วนผสมของ รายมากว่า 5 เปอร์เซ็นอาจจะทำได้โดยการเพิ่มชุดดักกรองเพื่อลด มาณของอนุภาคในน้ำ อย่างไรก็ตามชุดดักกรองโดยทั่วไปก็จะเพิ่ม งดันสูญเสียต้นทางในระบบซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง นกัน ดังนั้นการประณีประณอมระหว่างจำนวนอนุภาคที่ดักไว้กับ งดันตกคร่อมที่ตัวกรองในการออกแบบระบบสูบน้ำที่มีผงทรายปะปน รทำโดยระมัดระวัง และหากเป็นไปได้ควรให้มีจำนวนอนุภาคปะปน ยกว่า 5% ของปริมาตรเพื่อลดการสูญเสียพลังงานอันเนื่องจาก ะสิทธิภาพของปั๊มที่ลดลง

กสารอ้างอิง

Fairbank,L.C., (1940). "Effect on the Characteristics of Centrifugal in "Solids in Suspension Symposium," Tran. ASME, 107, pp. 1564-1575.

Chand.P., Adinarayana.B., and Singh,R.P.,(1985) "Effect of Drag Reducing Polymers on Slurry Pump Characteristics,"Bulk Solids Handling,5,No.4,pp.807-811

Wiedenroth,W.,(1970),"The Influension of Sand and Gravel on Characteristics of Centrifugal pump, Aspects of Water in Hydraulic Transportation Installations, Hydrotransport1. Paper E1.

[4] Vacadlo,J.J., Koo,J.K., and Prang,A.J., (1984) "Performance of Centrifugal Pump in Slurry Service" Hydrotransport3. Paper J2.

[5] Sellgren, A., and Vappling, L., (1986) "Effects of highiy Concentrated Slurries on the Performance of Centrifugal Pumps" Proc. International Symposium on slurry Flows, FED, ASME, USA, Vol.38 pp. 143 -148.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

งานวิจัยเรื่อง

การศึกษาสมรรถนะของปั๊มแรงเหวี่ยงเมื่อใช้สูบของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย

The effect of sand particle on Centrifugal Pump Performance

สถานที่ตีพิมพ์

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้ง 7

3-5 พฤษภาคม 2554

โรงแรม Phuket Orchid Resort and Spa จังหวัดภูเก็ต

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

JM038

Effect of Slurry on the Performance Characteristics of a Centrifugal Pump

Prabkaew J[1] and Santawagomon A[1,*]

[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang Bangkok 10520,

*Email: kpchamlo@kmitl.ac.th, aryuts@hotmail.com, Tel. 02-329-8350-1, Fax. 02-329-8352

Abstract

This paper presents an experiment of efficiency reduction on a centrifugal pump performed with water at different levels of sand and bentonite particle mixture. This study may lead to a possibility to reduce energy consumption of a pumping system that carries out particle mixed water such as drainage, dam, and waste water treatment systems. In the experiment a two horsepower centrifugal pump was used. It can produce maximum head pressure at 22.5 meters and maximum flow rate at 600 liter/min. Without added particles, the pump can perform at maximum of 63.3% efficiency. When sand particles were introduced at 5% by volume, it was shown that the efficiency was same as original level. Once the amount of added sand was increased to 10% and 15 %, the pump maximum efficiency was declined to 58.2% and 52.4% respectively. By comparison with bentonite, its smaller particle results in high viscosity which leads to higher power consumption while head and efficiency is relatively lower than water mixed with sand. The result has been shown that with a small amount of sand and bentonite particles, the overall efficiency was not much affected. However when more particles were added, the pump efficiency was declined increasingly. This behavior was too presented by the volumetric flow rate which was also measured during the test.

Keywords: Centrifugal Pump, bentonite, head ratio, performance, impeller, concentration.

1. Introduction

Centrifugal pumps are normally used for fluid transportation systems such as plumbing, irrigation and waste water treatment because of their performance in head and flow rate and convenient operation & maintenance Gahlot, Seshadri and Malhotra (12). Moreover, centrifugal pumps have been utilized for handling slurry or mixed fluid resulting in reduction of performance of pumps. Namely, their efficiency will drop while pumps require more energy consumption (Walker, Wells & Poma 1992).

There are many researchers studying performance characteristics of slurry pump. For example, Grandhi, Singh and Seshadri (2001) investigate that the efficiency and head of slurry pumps will be decrease when the solid concentration and particle size increase. Moreover, increasing in size of pump will result in minimize head reduction. The study by Gahlot, V, Seshadri, V, & Malhotra, R 1992 conclude that

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the change of pump head (HR) and efficiency (ER) is proportional to the concentration of solid which is not over 25% by weight. For higher 25% of solid concentration, the value of ER and HR will reduce rapidly.

Generally, the selection of centrifugal pump for mixed fluid or slurry is contingent on experiences comparing to pump's performance which obtain from water handling testing. However, actual performance of pump depends on characteristics of solid's type such as density, particle size and specific gravity. For this reason, the studying performance of centrifugal pump when using slurry transportation is very important and it also allows pump users to select proper pumps for their application.

2. Theoretical Bases

The centrifugal pump operates by the force of vertex flow which results in transfer energy from electrical power to hydraulic energy. Basically, impeller will be rotated as motor's speed leading to increase in energy to water or fluid. Fluid is normally flow to the center of impellers and forced by tip speed and rotational of centrifugal pumps before the velocity of fluid increase (ASHRAE 2008).

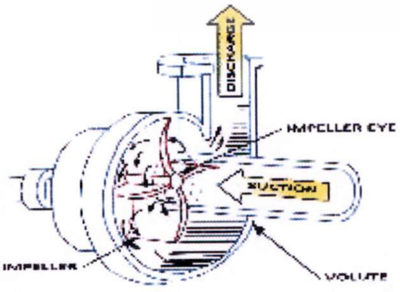


Fig. 1 Typical of Centrifugal pump

2.1 Head Pump

Head pump is the energy transferred from pump to fluid resulting in flow rate from suction to discharge as picture below.

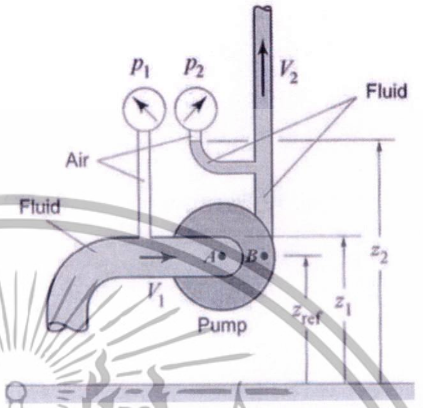


Fig.2 Positions of pressure gage for head pump determination

Head pump can be calculated from equation of Bernoulli as;

$$\therefore Hp = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}\right) + (Z_2 - Z_1)$$

2.2 Pump Efficiency

Pump efficiency is represented the comparison between input and output power

$$\eta_P = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

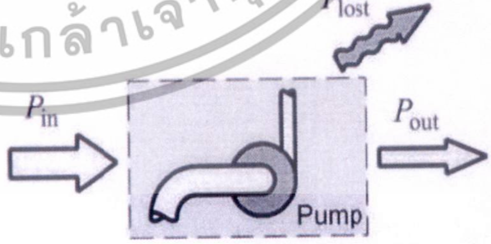


Fig.3 Power input and output of pumps

Pump power output and input can be determined as follows :

$$P_{output} = \gamma Hp\, Q$$

$$P_{input} = VI\sqrt{3}\eta_m$$

Where Hp = Head pump (m), Q = flow rate (m3/s), γ = specific weight (N/m3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Pump Performance Curve

Normally, efficiency of pump is provided by manufacturers which provide with H-Q curve to support designers or users to select pump more properly. Figure 4, for example, shows the curve of total pressure, capacity and efficiency of pumps comparing with five different diameter impellers.

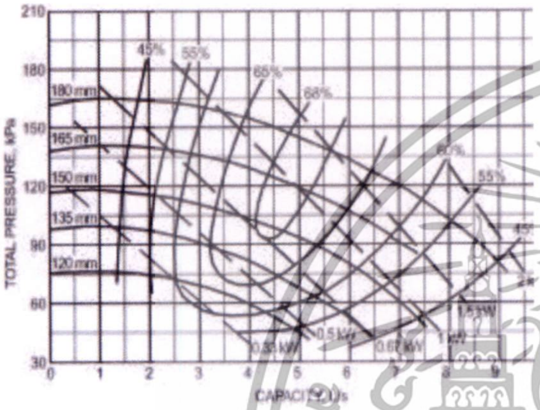


Fig.4 Pump Performance Curve

2.4 Operating point

Technically, operating point of centrifugal pumps can be determined by the cross of pump curve and system curve as shown in fig.5

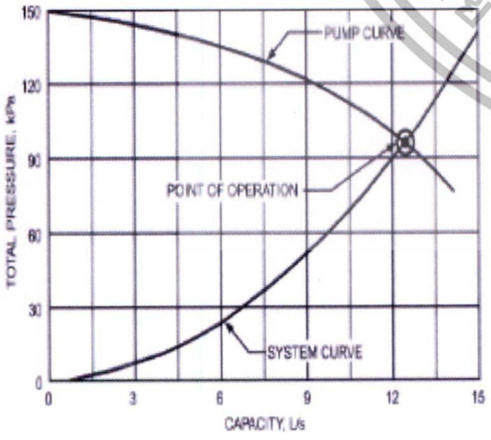


Fig.5 System and pump curve

3. Experimental Equipment and Method

The figure 5 shows the experimental setup for testing performance on centrifugal pump handling mixed fluid. The setup comprises 1) centrifugal pump (LUCKY PRO Model MHF/5AM with 500 l/min maximum flow, 2900 rpm, power 1.5kW and 22.5 m maximum head capacity), 2) ultrasonic doppler flowmeters (OMEGA Model FD-400, 3) pipe loop and mixing tank. The power consumption of pump was determined by measuring electrical current and voltage.

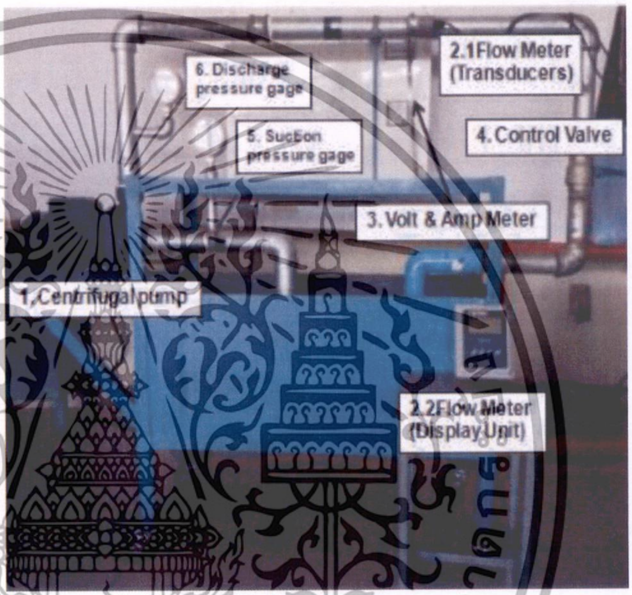


Fig.6 Experimental Setup

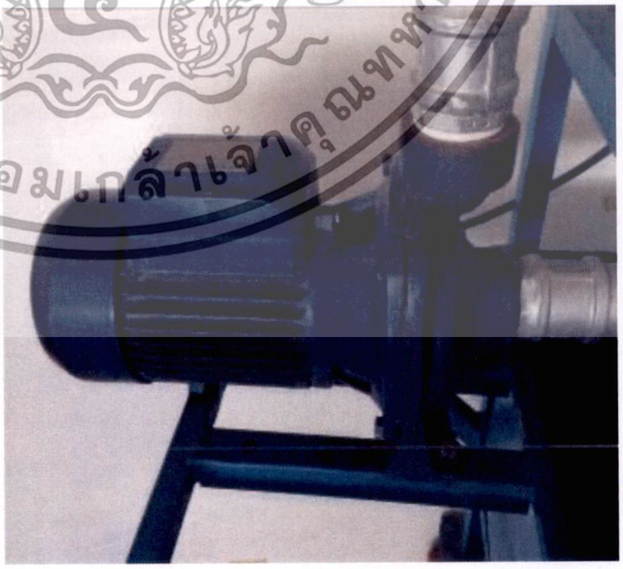
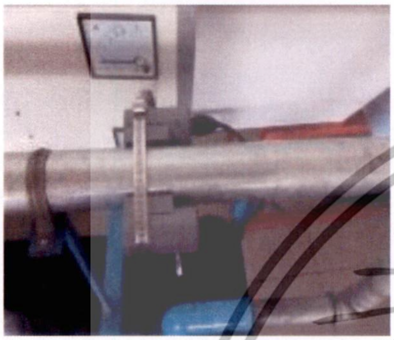


Fig.7 Centrifugal Pump

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8a Display Unit



8b. Transducer Location

Fig.8 Ultrasonic flow meter

The sand used in this experiment having an average diameter 0.42mm was selected, while sodium bentonite has a particle size of 0.074mm (Fineness pass 200 mesh screen 95%) as shown in Figure 8.

9a. Sand

9b. Sodium Bentonite

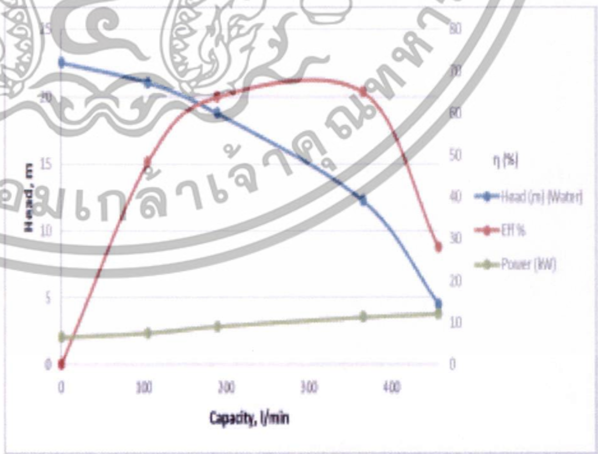
Fig. 9 Experimental Materials

The method can be described as follows:

1. The centrifugal pump was firstly operated with water. The control valve varied fluid flow rate from closed to fully opening (5 steps). For each step, suction & discharge pressure, voltage, current and flow rate were recorded. For flow rate measurement, the ultrasonic flow meter was implemented
2. Blending sand to water tank. It was added 5%, 10% and 15% by weight. Recording repeatedly as testing with water.
3. All of results were compared with water operation and plot on graphs to show the changes of performance characteristics of centrifugal pump.
4. For Bentonite, the methods were as same as testing with sand.

4. RESULT

The performance of pump when operation with water is shown in figure No.11 it can be seen that the best efficiency of pump with water is about 63.3%. Flow rate and head are about 190 l/min and 18.55 meters respectively.

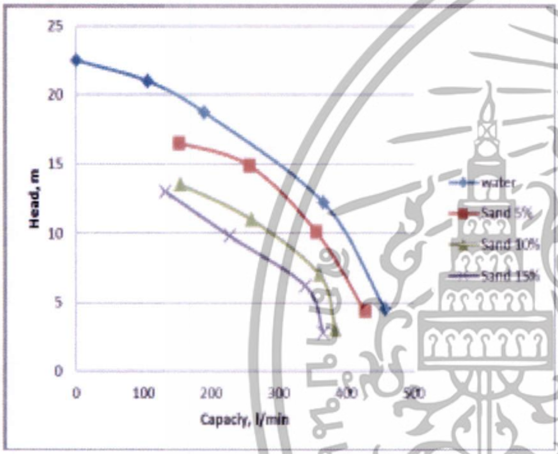


Figures 11 Performance of Centrifugal pump handling water

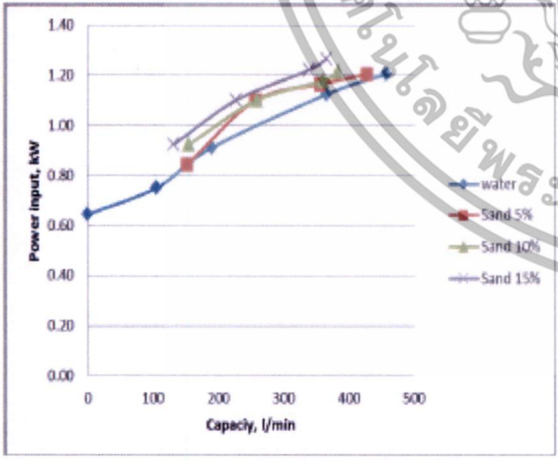
Figure 12a presents the performance of centrifugal pump when transferring water and sand at three concentrations. It can be seen that head of the centrifugal pump reduces approximately 30% when the concentration of sand increase. Figure 12b shows the changes of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

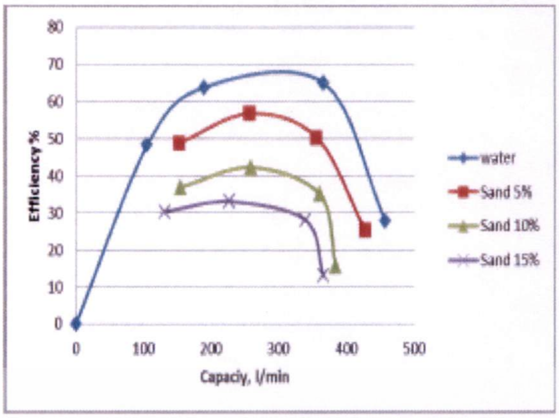
pump input power (kW) with the same concentration of sand. The input power for 5, 10 % of sand is similar, while 15 % of sand concentration shows that highest rate of power consumption. The variation of efficiency of pump can be seen in figure 12c. The efficiency of pump decreases with increase in the concentration of sand. However, at 5% concentration, its efficiency shows slightly lower than the operation with water.



Figures 12a Comparisons of Head and Capacity



Figures 12b Comparisons of Power and Capacity



Figures 12c Comparisons of Efficiency and Capacity

Figure 13a shows the performance characteristics of the centrifugal pump handling mixed fluid between water and bentonite. According to Figure a, head of centrifugal pump drop with an increase in bentonite concentration as same as water-sand mixture. At low flow rate (<0.002 m3/s), however, the pump head and flow rate slightly decrease compared to the operation with sand. At high concentration (15% by weight), the flow rate is apparently lower than other concentration including water-sand mixture.

The power input is shown in figure 13b. It also has the same behaviour as sand slurries. More input power is demanded for higher concentration of bentonite, but the additional power is not proportional to increase in concentration. Figure 13c presents the pump efficiency. Obviously, at 15% concentration shows significantly drop when compare the variation in other concentration. By comparison with transferring water and sand, the efficiency of 10% concentration of bentonite is better than 5% concentration at low capacity, and then its efficiency gradually drop to the lower points.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

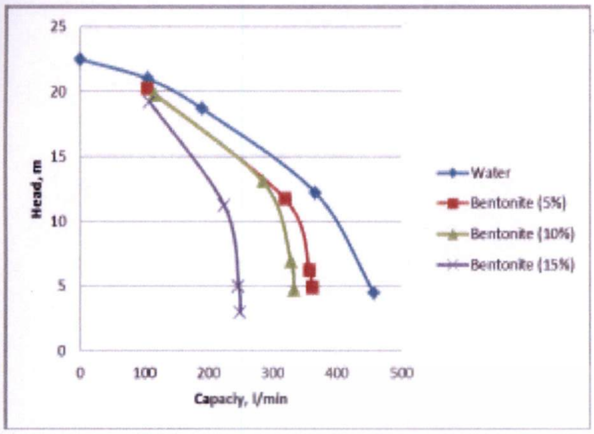
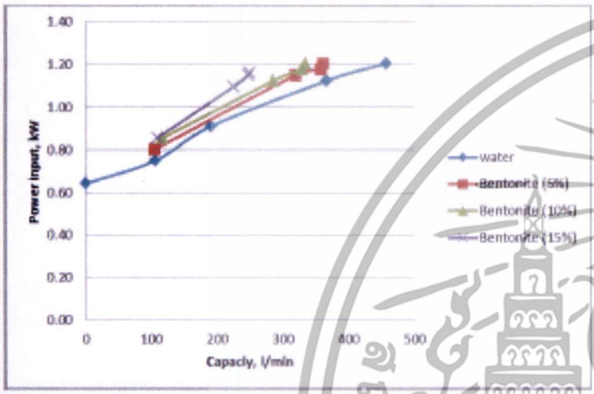
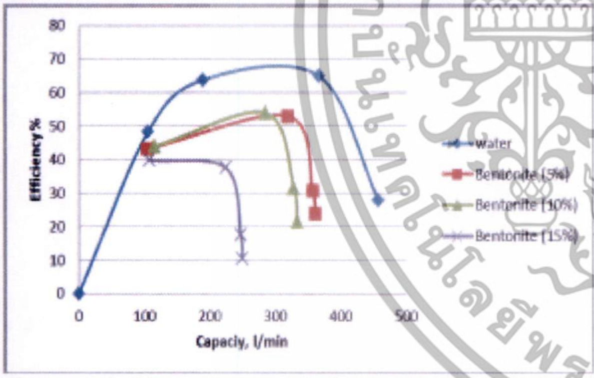


Figure 13a Comparisons of Head and Capacity



Figures 13b Comparisons of Power and Capacity



Figures 13c Comparisons of Efficiency and Capacity

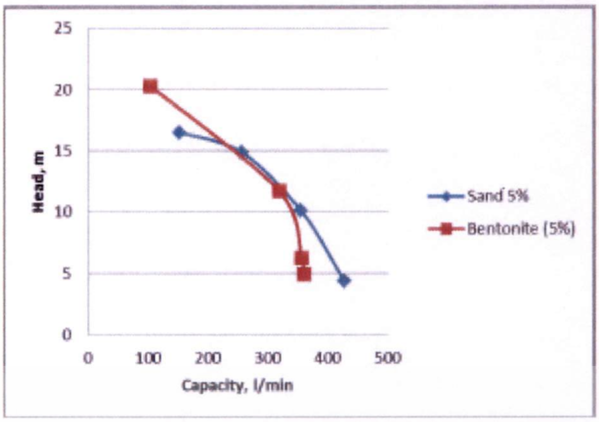


Figure 14a Variation of H-Q curve with 5%concentration of sand and Bentonite

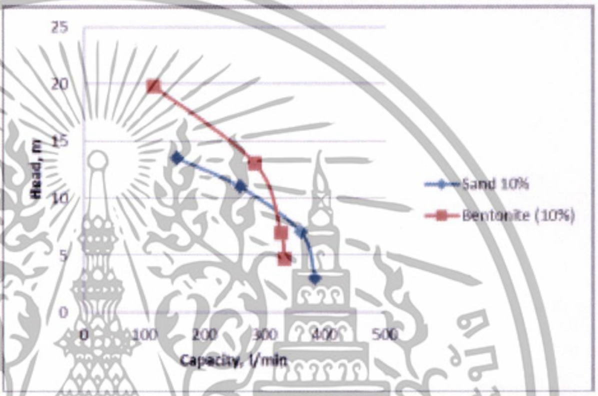


Figure 14b Variation of H-Q curve with 10%concentration of sand and Bentonite

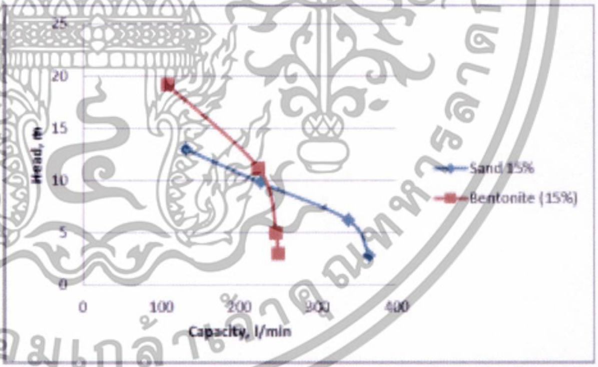


Figure 14c Variation of H-Q curve with 15%concentration of sand and Bentonite

Figure 14a, 14b and 14c show the comparison of head pump for two materials (sand and bentonite). The variations of three concentrations are similar. Namely, bentonite has a higer head than sand slurries, considering at low flow rate and then sharply decreasing to lower points.

Figure 15a, 15b and 15c also present the comparison of power input for three concentrations of two materials. Pump operation with sand requires slightly higher power consumption than bentonite slurries before energy input of bentonite increase to be above the curve of sand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

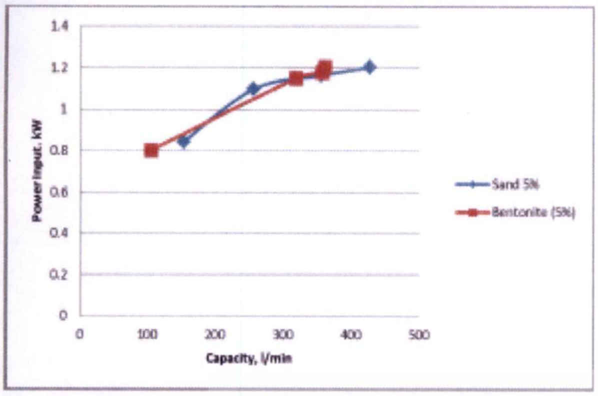


Figure 15a Variation of P-Q curve with 5%concentration of sand and Bentonite

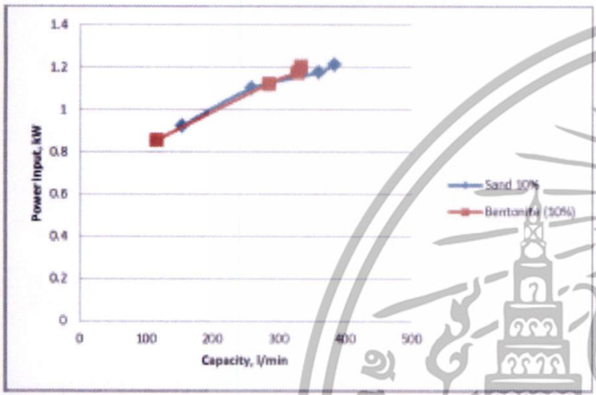


Figure 15b Variation of P-Q curve with 10%concentration of sand and Bentonite

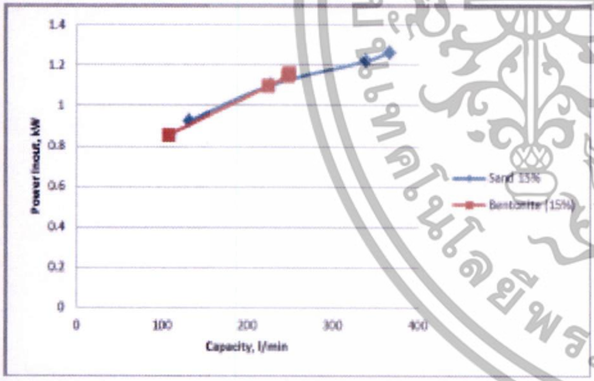


Figure 15c Variation of P-Q curve with 15%concentration of sand and Bentonite

The comparison of pump efficiency handling two materials can be seen in figure 16a, 16b and 16c. It can be seen than bentonite slurries show the high efficiency for low flow rate before decreasing to low efficiency at high flow rate. Particularly, at 10% and 15% concentration, efficiency of bentonite slurries drops sharply and its slope almost becomes vertical line (16C).

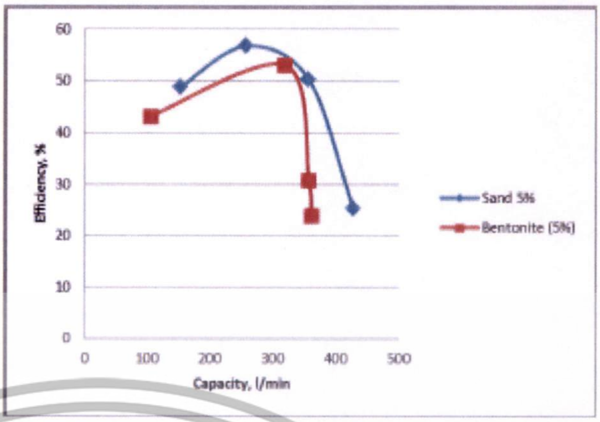


Figure 16a Variation of Efficiency-Q curve with 5%concentration of sand and Bentonite

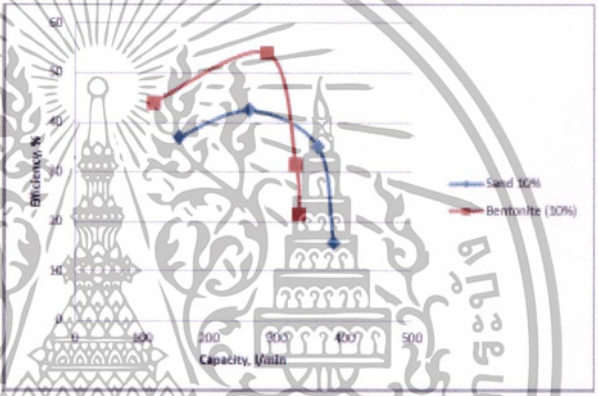


Figure 16b Variation of Efficiency-Q curve with 10%concentration of sand and Bentonite

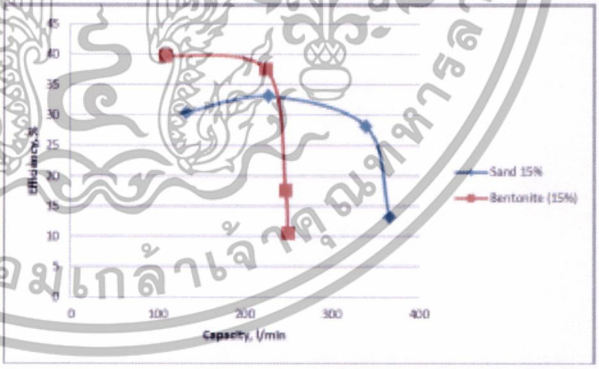


Figure 16c Variation of Efficiency-Q curve with 15%concentration of sand and Bentonite

5. DISCUSSION

The performance characteristic of centrifugal pump handling a mixture of water and solid shows a significant decrease compared to the operation with water. The head and efficiency reduction are proportional to an increase in the concentration of materials. This similar result has

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

been reported by Chandel, Singh and Seshadri 2011 which conclude that the head and efficiency of centrifugal pump drop as a result of increasing in solid concentration and the effect is dependent on type of slurry. Moreover, Gahlot, Seshadri and Malhotra (1992) also explain that head and efficiency reduction vary linearly with low concentration of solid. At high level of concentration, however, decrease rapidly than linear prediction. This behavior is shown in figure 14a, 14b and 14c.

The variation of performance of centrifugal pump operating with two different materials presents impact of solid properties on the pump operation. Bentonite although has a smaller particle size than sand, it shows the lower decrease in head and efficiency of pump at high capacity. This phenomenon is also explained (Gandhi, Singh & Seshadri 2001) that the smaller particle size can increase in friction loss because of higher viscosity. This friction loss from viscosity is relatively greater than head loss from coarse sand particles. The variation of Head, Power and efficiency do not show any linear trend with solid concentration and flow rate but the higher concentration of solid has a more significantly negative impact on performance of a centrifugal pump (Gandhi, Singh & Seshadri 2002).

6. CONCLUSION

From the present experimental study of performance characteristics of centrifugal pump handling mixed fluid, it can be concluded as follows;

1) The increase in solid concentration leads to reduce head and efficiency of centrifugal pumps. As a result of high friction loss from particle size, rough surface and viscosity.
2) At any capacity, the decrease in head and efficiency of pumps is not linear. However, at high solid concentration, the head and efficiency reduce rapidly.

Reference

[1] Gandhi,B Singh,S Seshadri,V 2001,'Performace Characteristics of Centrifugal Slurry Pump', *Journal of Fluids Engineering*, Vol.123, pp. 271-280.

[2] Gandhi,B Singh,S Seshadri,V 2002,'Effect of sped on the performance characteristics of a centrifugal slurry pump', *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.128, pp. 225-233.

[3] Fairbank,L.C., (1940). "Effect on the Characteristics of Centrifugal in "Solids in Suspension Symposium," *Tran. ASME*, 107, pp. 1564-1575.

[4] Chand.P., Adinarayana.B., and Singh,R.P.,(1985) "Effect of Drag Reducing Polymers on Slurry Pump Characteristics," *Bulk Solids Handling*,5,No.4,pp.807-811

[5] Wiedenroth,W 1970,"The Influension of Sand and Gravel on Characteristics of Centrifugal pump, Aspects of Water in Hydraulic Transportation Installations, *Hydrotransport1*. Paper E1.

[6] Vacadlo,J.J., Koo,J.K., and Prang,A.J., (1984) "Performance of Centrifugal Pump in Slurry Service" *Hydrotransport3*. Paper J2.

[7] Sellgren, A., and Vappling, L., (1986) "Effects of highly Concentrated Slurries on the Performance of Centrifugal Pumps" Proc. *International Symposium on slurry Flows*, FED, ASME, USA, Vol.38 pp. 143 -148.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[8] Bedo, T 2011, 'The Apparent Viscosity of Sand-Water Slurries Determined Using Rotational Viscometer Method', *Computers & Applied Sciences Complete*, Vol. 63 pp. 10-16.

[9] University of Delaware 2013, University of Delaware, Delaware viewed 11 November 2013,<http://www.che.udel.edu/research_groups/wagner/stf.html>

[10] Chandal,S Singh,S &Seshadri,V2011,'A Comparative Study on The Performance Characteristics of Centrifugal and Progressive Cavity Slurry Pumps with High Concentration Fly Ash Slurries', *Particulate Science and Technology*, vol. 29, pp. 378-396.

[11] Chandel, S, Singh, S, & Seshadri, V 2011, 'A Comparative Study on the Performance Characteristics of Centrifugal and Progressive Cavity Slurry Pumps with High Concentration Fly Ash Slurries', *Particulate Science & Technology*, Vol. 4, pp. 378-396.

[12] Gahlot, V, Seshadri, V, & Malhotra, R 1992, 'Effect of density, size distribution, and concentration of solid on the characteristics of centrifugal pumps', *Journal Of Fluids Engineering*,Vol 3, p. 386.

[13] Walker, C, Wells, P, & Pomat, C n.d., 'The Effect of Impeller Geometry on the Performance of Centrifugal Slurry Pumps', 4Th International Conference On Bulk Materials, Storage, *Handling And Transportation: 7Th International Symposium On Freight Pipelines*; Preprints Of Papers, p. 97

[14] Kazim, K, Maiti, B, & Chand, P 1997, 'A correlation to predict the performance characteristics of centrifugal pumps handling slurries', *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part A-Journal Of Power And Energy*, 211, 2, pp. 147-157

[15] Engin,T Gur,M Calli,I 2000,'Slurry and Tip Clearance Effects on A Centrifugal Pump Perfromance Used in Hydraulic Transportation System', *The third Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids*, Israel, May 2000

[16] *ASHRAE Handbook. Heating, Ventilating, And Air-Conditioning Systems And Equipment 2008, Atlanta, GA : American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*

[17] *Sharma, A Kumar, S 2008,'Numerical Study of Erosion Wear On a Centrifugal Slurry Pump', Mechanical Engineering Department Thapar University, Thapar.*

[18] Savar, M, Kozmar, H, & Sutlovic, I 2009, 'Improving centrifugal pump efficiency by impeller trimming', *Desalination*, Vol. 249, pp. 654-659.

[19] Hua,T & Yi,L 2013,' Numerical Analysis of Prototype Centrifugal Pump Delivering Solid-liquid Two-phase Flow', Journal of Applied Sciences, Vol.17, pp. 3416-3420.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

งานวิจัยเรื่อง

การศึกษาผลกระทบของของไหลผสมที่มีผลต่อสมรรถณะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง

Effect of Slurry on the Performance Characteristics of a Centrifugal Pump

สถานที่ตีพิมพ์

The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering

วันที่ 17-10 ธันวาคม 2557 โรงแรม The Empress จังหวัด เชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอายุส สันถวะโกมล
วัน เดือน ปีเกิด	31 ตุลาคม พ.ศ. 2525
ประวัติการศึกษา	2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2556 Master of Engineering Management University of Melbourne, Australia

วุฒิบัตรและประกาศนียบัตรทางวิชาชีพ

ใบประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับสามัญวิศวกร (เครื่องกล)
ผู้เชี่ยวชาญอาการเขียว TREES ASSOCIATE สถาบันอาคารเขียวไทย

ประวัติการทำงาน	พ.ศ.2548 - 2551
ตำแหน่ง	วิศวกร
สถานที่ทำงาน	บริษัท Siam Toppan Packaging สมุทรปราการ
ประวัติการทำงาน	พ.ศ.2551 - 2554
ตำแหน่ง	วิศวกรเครื่องกล
สถานที่ทำงาน	บริษัท EEC Engineering Network กรุงเทพมหานคร
ประวัติการทำงาน	พ.ศ.2556 – 2557
ตำแหน่ง	วิศวกรเครื่องกล อาวุโส
สถานที่ทำงาน	บริษัท Engineering & Fire Services Int'l กรุงเทพมหานคร
ประวัติการทำงาน	พ.ศ.2557 – ปัจจุบัน
ตำแหน่ง	วิศวกรเครื่องกล
สถานที่ทำงาน	บริษัท Aurecon Consulting (Thailand) กรุงเทพมหานคร

ผลงานการออกแบบระบบเครื่องกล ระบบปรับอากาศและระบายในอาคาร

ปี พ.ศ.	ชื่อโครงการ
2551 - 2552	ศูนย์การแพทย์เฉลิมพระเกียรติฯ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2551 - 2553	ปรับปรุงอาคารสำนักงาน ธนาคารกสิกร สำนักงานใหญ่ พหลโยธิน
2552 - 2553	ปรับปรุงอาคารสำนักงาน โรงถ่าย ถนนวิภาวดี
2552 - 2554	อาคารสำนักงาน โรงถ่าย ส่วนสันทนาการ แห่งใหม่ สถานีโทรทัศน์ช่อง 5
2553 - 2554	ปรับปรุงอาคารสำนักงาน ธนาคารแห่งประเทศไทย เชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2552 - 2554	ระบบทำความเย็น (Chiller Plant) Utility Plant ส่วนกลางสำหรับโรงผลิตยาแห่งใหม่ องการเภสัชกรรม
2553 - 2554	โรงเรียนโยธินบูรณะแห่งใหม่
2553 - 2554	ศูนย์สัตว์ทดลอง ABSL-3 กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2556 - 2557	โรงงานบริษัท 3M นิคมอุสาหกรรมลาดกระบัง
2557 – ปัจจุบัน	อาคารที่พักอาศัย โรงแรม ส่วนห้างสรรพสินค้า และสันทนาการ โครงการ Mahanakorn ช่องนนทรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้