

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมรรถนะของระบบขนถ่ายวัสดุแข็งด้วยเจ็ทปั๊ม

Performance study of Hydraulic Transportation of

Solids Using the water jet pump



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่จะนำไปใช้

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 55021  
วัน,เดือน,ปี - 4 เม.ย. 2548

Library stamp box with fields for 'b.' and 'i.'

การศึกษาสมรรถนะของระบบขนถ่ายวัสดุแข็งด้วยเจ็ทปั๊ม

Performance study of Hydraulic Transportation of  
Solids Using the water jet pump



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาสมรรถนะของระบบขนถ่ายวัสดุแข็งด้วยเจ็ตน้ำ

Performance study of Hydraulic Transportation of Solids Using the water jet pump

ผู้จัดทำ

นาย โขมิต วัชรมนานนท์ รหัสประจำตัว 43010589

นาย อนุชิต เก้าเอียน รหัสประจำตัว 43010826

นาย อธิธิพล มีมั่งงธรรม รหัสประจำตัว 43010589



อาจารย์ที่ปรึกษา

( ผศ. จำลอง ปราบแก้ว )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาสมรรถนะของระบบขนถ่ายวัสดุแข็งด้วยเจ็ทปั๊ม

นาย โหมยิต วชิรมนากรณ์ รหัสประจำตัว 43010589

นาย อนุชิต เก้าเอี้ยน รหัสประจำตัว 43010826

นาย อิทธิพล มีมั่งงธรรม รหัสประจำตัว 43010589

ผศ. จีลอง ปราบแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2545

### บทคัดย่อ

รายงานนี้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการขนถ่ายของแข็งด้วยเจ็ทปั๊ม และปั๊มสูบน้ำ โดยในการศึกษานี้ของแข็งที่ใช้คือ ทราย ซึ่งมีค่าน้ำหนักจำเพาะประมาณ  $2650 \text{ kgf/m}^3$  และรัศมีเฉลี่ย คือ 4.5 มม. และศึกษาผลกระทบของ อัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีด กับพื้นที่ของคอคอด, อัตราส่วนความดัน, อัตราการไหล ที่มีต่อประสิทธิภาพของเจ็ทปั๊ม โดยความดันของปั๊มจะให้ค่าเริ่มต้นตั้งแต่  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  จนถึง  $3.5 \text{ kg/cm}^2$  จากการคำนวณทางทฤษฎี พบว่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุดของการขนถ่ายของแข็งด้วยเจ็ทปั๊ม ประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพที่สูงที่สุดของปั๊มสูบน้ำ ประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีดกับพื้นที่ของคอคอดประมาณ 0.5 คือใช้หัวฉีดขนาด 10 มม. และจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุดของปั๊มดูดทราย ประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพที่สูงที่สุดของปั๊มสูบน้ำประมาณ 23 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีดกับพื้นที่คอคอดประมาณ 0.5 คือใช้หัวฉีดขนาด 10 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Performance study of Hydraulic Transportation of Solids Using the water jet pump

Mr. Kosit Vachiramanaporn

Mr. Anuchit Guaiant

Mr. Itipon Memungtum

Asstist. Prof. Chamlong Prabkeaw Advisor

### Abstract

This paper investigates the efficiency of a water jet pump used for solid particle transportation and water transportation by jet pump. The solid particle, sand exploited in this study has specific weight of  $2650 \text{ Kg} / \text{m}^3$  and mean radius of  $4.5 \text{ mm}$ . The effect of nozzle to mixing throat area ratio, pressure ratio and flow rate ratio on jet pump performance is studied. The driving pressure employed in the experiment was varied from  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  to  $3.5 \text{ kg/cm}^2$ . From Calculation, the maximum efficiency of solid handling water jet pump is about 16 percent while it is about 28 percent for water-water jet pump when the nozzle to mixing throat area ratio is 0.5 (diameter of nozzle is  $10 \text{ mm}$ ). From experiment, the maximum efficiency of solid handling water jet pump is about 12 percent while it is about 23 percent for water – water jet pump when the nozzle to mixing throat area ratio is 0.5 (Diameter of nozzle is  $10 \text{ mm}$ ).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนช่วยให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

1. ขอขอบคุณ อ. จำลอง พรบแก้ว (อาจารย์ที่ปรึกษา) ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน
2. ขอขอบคุณ อ. มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับโปรแกรม MATLAB
3. ขอขอบคุณ อ. ณัฐวุฒิ เค้ไปว่า ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับโปรแกรม MATLAB

สิ่งที่ขาดไม่ได้เลยและต้องขอบคุณบุคคลสำคัญในชีวิตพวกผมคือ บิดา มารดา และเพื่อนๆทุกคน อันเป็นที่รักและเคารพซึ่งที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนตลอดมา พวกผมขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นาย ใจนิต วชิรมนากรณ์  
นาย อนุชิต เก้าเอี่ยน  
นาย อธิพิพล มีมั่งธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีการคำนวณสมรรถนะของปั้มน้ำแบบหัวฉีด	4
บทที่ 3 การคำนวณผลทางทฤษฎีและขั้นตอนการประมวลผล	
3.1 ขั้นตอนการประมวลผลของโปรแกรม	18
3.2 โปรแกรมคำนวณผลทางทฤษฎี	21
3.3 ผลการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์	22
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 ชิ้นส่วนหลักของเครื่อง Jet pump	25
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	27
4.3 การ Calibrate	27
4.4 วิธีการทดลอง	28
4.5 ตารางผลการทดลอง	29
4.6 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ออกจากการทดลองปั้มน้ำคูดน้ำกับคูดทราย	36
4.7 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับการทดลอง	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	42
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	44
ภาคผนวก ข.	49
ภาคผนวก ค.	56
เอกสารอ้างอิง	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะ โครงสร้างโดยทั่วไปของบ่อบาดาลทราย	1
รูปที่ 1.2 แสดงลักษณะของ Deep-well pumping	2
รูปที่ 1.3 รูปแสดงการนำเจ็ทปั๊มไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมัน	3
รูปที่ 1.4 รูปแสดงการนำเจ็ทปั๊มไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมัน โดยใช้เจ็ทปั๊ม 2 ตัว	3
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของชุดทดลอง	4
รูปที่ 2.2 แสดงภาคตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลใน water jet pump	6
รูปที่ 2.3 แสดงหน้าตัด c-c และ d-d	8
รูปที่ 2.4 แสดง Section a-a to c-c	10
รูปที่ 2.5 แสดง Section b-b to c-c	11
รูปที่ 2.5 แสดง Section d-d to e-e	11
รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังโปรแกรมการคำนวณ	21
รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเฮดกับประสิทธิภาพของบ่อบาดาลน้ำกับบ่อบาดาลทราย	22
รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการไหลกับประสิทธิภาพของบ่อบาดาลน้ำกับบ่อบาดาลทราย	23
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการไหลกับอัตราส่วนเฮดของบ่อบาดาลน้ำกับบ่อบาดาลทราย	24
รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบต่างๆของ Jet Pump	25
รูป 4.2 ชุด Nozzle และ Mixing Chamber	26
รูปที่ 4.3 Pump และ Motor	26
รูปที่ 4.4 หัว Nozzle ขนาดต่างๆ	26
รูปที่ 4.5 การติดตั้ง Nozzle ใน Jet Pump	26
รูปที่ 4.6 Hopper	26
รูปที่ 4.7 การทำงานของ Jet Pump	26
รูปที่ 4.8 อุปกรณ์ต่างๆของ Jet Pump	27
รูปที่ 4.9 ผลการ Calibrate	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับอัตราส่วนเฮคของปั๊มคูน้ำกับ ปั๊มคูทรายที่ได้จากการทดลอง	36
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับอัตราส่วนการไหล ของปั๊มคูน้ำกับปั๊มคูทรายที่ได้จากการทดลอง	37
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการไหลกับอัตราส่วนเฮคของปั๊มคู น้ำกับปั๊มคูทรายที่ได้จากการทดลอง	38
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับอัตราส่วนเฮคของผลจากการคำนวณ กับผลที่ได้จากการทดลอง	39
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับอัตราส่วนการไหลของผลจากการ คำนวณกับผลที่ได้จากการทดลอง	40
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการไหลกับอัตราส่วนเฮคของผลจากการ คำนวณกับผลที่ได้จากการทดลอง	41



## สารบัญตาราง

ชุดข้อมูลหัวฉีด 6 มม. ความดัน 3.0 kg/cm <sup>2</sup>	29
ชุดข้อมูลหัวฉีด 6 มม. ความดัน 3.5 kg/cm <sup>2</sup>	29
ชุดข้อมูลหัวฉีด 8 มม. ความดัน 2.0 kg/cm <sup>2</sup>	29
ชุดข้อมูลหัวฉีด 8 มม. ความดัน 2.5 kg/cm <sup>2</sup>	30
ชุดข้อมูลหัวฉีด 8 มม. ความดัน 3.0 kg/cm <sup>2</sup>	30
ชุดข้อมูลหัวฉีด 8 มม. ความดัน 3.5 kg/cm <sup>2</sup>	30
ชุดข้อมูลหัวฉีด 10 มม. ความดัน 1.5 kg/cm <sup>2</sup>	31
ชุดข้อมูลหัวฉีด 10 มม. ความดัน 2.0 kg/cm <sup>2</sup>	31
ชุดข้อมูลหัวฉีด 10 มม. ความดัน 2.5 kg/cm <sup>2</sup>	31
ชุดข้อมูลหัวฉีด 10 มม. ความดัน 3.0 kg/cm <sup>2</sup>	32
ชุดข้อมูลหัวฉีด 10 มม. ความดัน 3.5 kg/cm <sup>2</sup>	32
ชุดข้อมูลหัวฉีด 12 มม. ความดัน 1.5 kg/cm <sup>2</sup>	33
ชุดข้อมูลหัวฉีด 12 มม. ความดัน 2.0 kg/cm <sup>2</sup>	33
ชุดข้อมูลหัวฉีด 12 มม. ความดัน 2.5 kg/cm <sup>2</sup>	33
ชุดข้อมูลหัวฉีด 12 มม. ความดัน 3.0 kg/cm <sup>2</sup>	33
ชุดข้อมูลหัวฉีด 12 มม. ความดัน 3.5 kg/cm <sup>2</sup>	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ปัจจุบันนี้ได้มีการนำปั้มน้ำแบบหัวฉีดหรือที่เรียกว่า เจ็ทปั้มไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายทั้งนี้เป็นเพราะเจ็ทปั้มมีโครงสร้างที่เรียบง่ายไม่มีส่วนใดเคลื่อนที่หรือหมุนในขณะใช้งาน จึงไม่ต้องซ่อมบำรุงมากทำให้ประหยัดต้นทุน ส่วนประกอบที่สำคัญของเจ็ทปั้มมี 3 ส่วนคือ หัวฉีด (Nozzle), ห้องผสม (Mixing Chamber) และ ท่อลดความเร็ว (Diffuser) การทำงานของเจ็ทปั้มอาศัยจลนศาสตร์ของไหล โดยให้ของไหลที่มีความดันสูง(Motive Fluid)ไหลผ่านหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ผลของความเร็สูงจะทำให้เกิดความดันต่ำในช่องทางเข้าของห้องผสม จึงทำให้ของผสมที่ช่องทางดูด (Suction Slurry) การดูดเข้ามาในห้องผสมแล้วจะเกิด โมเมนตัมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยระหว่างความเร็วของของไหลจากหัวฉีดและความเร็วของของผสมจากท่อดูด โดยความเร็วจะลดลงในส่วนของท่อขยาย (Diffuser) และเปลี่ยนเป็นความดันผลักดันให้ของผสมไหลออกทางท่อส่ง ลักษณะ โครงสร้าง โดยทั่วไปของเจ็ทปั้ม ดังแสดงในรูปที่ 1.1



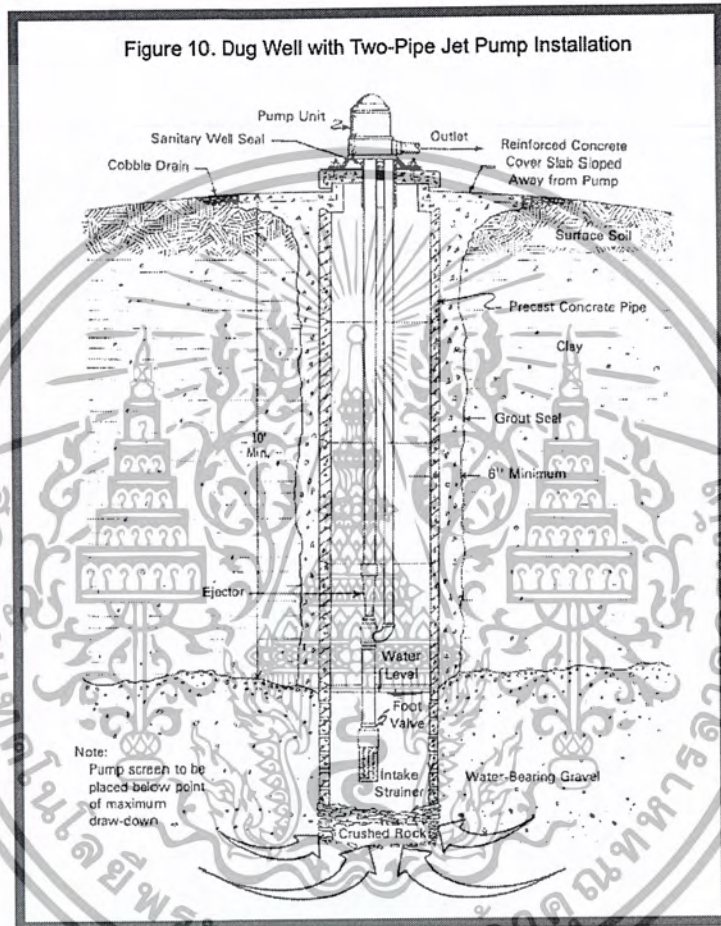
รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของปั้มดูดทราย

ปั้มแบบหัวฉีดอาจแบ่งตามองค์ประกอบของของไหล ที่หัวฉีดอาจใช้ของไหลเป็นของเหลวหรือก๊าซได้เช่นกัน และที่ช่องทางดูดอาจใช้ของเหลวหรือของแข็งเม็ดเล็กๆ, ก้อนหินเล็กๆ, เกล็ด, ตัวดูดซับคาร์บอน, สารเคมีหรือซีเมนต์ มีรายงานการศึกษาสมรรถนะของเจ็ทปั้มทางทฤษฎี และการทดลองมากมายแต่เป็นการศึกษาคุณลักษณะของเจ็ทปั้มที่ใช้น้ำดูดเพื่อที่จะถ่ายเทของเหลวที่เป็นน้ำเหมือนกัน ในบทความนี้เป็นการศึกษาเพื่อออกแบบระบบการขนถ่ายวัสดุแข็งด้วยเจ็ทปั้ม โดยจะเปรียบเทียบผลการทดลอง และผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเปรียบเทียบผลการทดลองของระบบขนถ่ายวัสดุแข็งด้วยเจ็ทปั้มและ ผลการทดลองของปั้มน้ำแบบหัวฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตัวอย่างการประยุกต์งาน

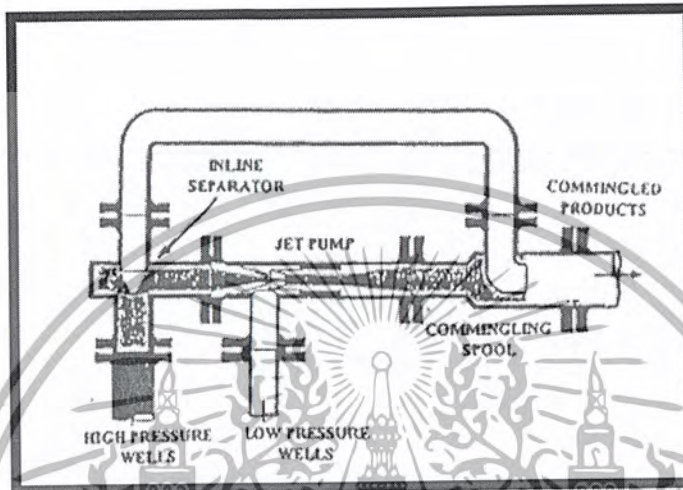
1. **Dug well with two-pipe jet pump installation** เป็นการขุดบ่อที่มีระดับความลึกของบ่อมากไม่สามารถที่จะขุดได้ จึงต้องใช้เจ็ทปั๊มเป็นตัวดูดหินและทรายต่างๆขึ้นมาจากบ่อ



รูปที่ 1.2 แสดงลักษณะของ Deep-well pumping

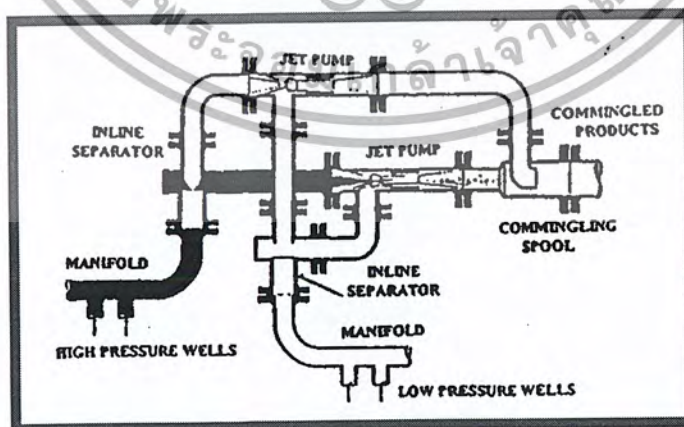
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จากรูปที่ 1.3 จะแสดงให้เห็นถึงรูปพื้นฐานของการนำเจ็ทปั๊มไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมน้ำมัน จะเห็นว่าจากรูปจะมีท่อที่ใช้ส่งไล่ลงไปบ่อน้ำมันที่มีความดันสูง บ่อความดันสูงจะสามารถดันน้ำมันขึ้นมาผ่าน หัวฉีดแล้วดูดน้ำมันจากบ่อความดันต่ำที่มีความดันต่ำแล้วน้ำมันจากทั้ง 2 บ่อ ก็จะผสมกันในห้องผสมและนำไปผ่านกระบวนการต่อไป



รูปที่ 1.3 รูปแสดงการนำเจ็ทปั๊มไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมัน

3. รูปที่ 1.4 คือการประยุกต์ใช้เจ็ทปั๊มอีกแบบ โดยในกรณีนี้จะใช้ เจ็ทปั๊ม 2 ตัว ดูดน้ำมันจากบ่อน้ำมันที่มีหลายบ่อคือเมื่อบ่อน้ำมันที่มีความดันสูงและเมื่อความดันเริ่มต่ำลงก็จะสลับเปลี่ยนไปใช้บ่อความสูงบ่ออื่นดูแทน



รูปที่ 1.4 รูปแสดงการนำเจ็ทปั๊มไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันโดยใช้เจ็ทปั๊ม 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการคำนวณสมรรถนะการขนถ่ายของแข็งด้วยปั้มน้ำแบบหัวฉีด

สมรรถนะของปั้มน้ำแบบหัวฉีดจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบมากมาย ดังนั้นการที่จะคำนวณหาสมรรถนะของปั้มน้ำแบบหัวฉีด จึงต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้ด้วย เช่น อัตราส่วนพื้นที่ระหว่างหัวฉีดกับช่องทางดูด ( $d/D$ ) , อัตราส่วนอัตราการไหล , อัตราส่วนความดัน , ความเข้มข้นของของผสม โดยปริมาตรที่ช่องทางดูด , ตัวประกอบการสูญเสียที่ช่องทางดูดและทางปล่อย , ความเร็วการเคลื่อนไถระหว่างน้ำกับของแข็ง , ความเร็วของของผสม ฯลฯ เมื่อได้สมการต่างๆที่จะใช้ในการคำนวณแล้ว หลังจากนั้นนำไปเขียนเป็น โปรแกรมคำนวณผลต่างๆ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริงต่อไป

การวิเคราะห์เบื้องต้นในการคำนวณประสิทธิภาพของการขนถ่ายของแข็งด้วยปั้มน้ำแบบหัวฉีด



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนน้ำผ่านหัวฉีด หัวฉีดขับเคลื่อนจะทำให้ความเร็วที่ปลายหัวฉีดขับเคลื่อนเพิ่มมากขึ้นแต่ความดันลดลงส่งผลให้เกิดการดูดของแข็งผ่านช่องดูดไหลมาผสมกับของเหลวจากหัวฉีดที่ห้องผสม และไหลผ่าน diffuser ที่เป็นท่อส่งออกไป ซึ่ง diffuser จะเปลี่ยนพลังงานจลน์ของของผสมให้เป็นพลังงานความดัน

ในการวิเคราะห์การคำนวณหาประสิทธิภาพ จะต้องใช้สมการต่อเนื่อง (continuity equations) และใช้สมการหลักๆ อีก 4 สมการ คือ

- 1) สมการการเคลื่อนที่ระหว่างหน้าตัด c-c และ d-d
- 2) สมการพลังงานระหว่างหน้าตัด a-a และ c-c
- 3) สมการการพลังงานระหว่างหน้าตัด b-b และ c-c
- 4) สมการการเคลื่อนที่ระหว่างหน้าตัด d-d และ e-e

สัญลักษณ์ตัวแปร (Nomenclature) ในการคำนวณจะใช้สัญลักษณ์ดังต่อไปนี้

A : พื้นที่หน้าตัด

$\beta$  : อัตราส่วนพื้นที่ระหว่างหัวฉีดและหัวผสม (nozzle-throat area ratio)  $(d/D)^2$

C : ความเข้มข้นโดยปริมาตร

C' : ความเข้มข้นโดยมวล

H : Total head

He: Effective head

Hd: discharge head

Hp: drive head

Hs: Suction head

h : Loss of head

K : Loss factor

p : ความดัน (pressure)

Q : อัตราการไหลโดยปริมาตร (Volumetric flow rate)

v : ความเร็ว (velocity)

$m_i$  : อัตราการไหลโดยมวล (weight flow rate)

$\alpha$  : สัมประสิทธิ์ของความเร็ว

$\gamma$  : น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight)

$\epsilon$  : ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

$\mu$  : ตัวประกอบการลื่นไถล (Slip factor)

$\Phi$  : Flow rate ratio

$\Psi$  : Head ratio

$\eta$  : Efficiency

สัญลักษณ์ตัวห้อย

d : ด้านจ่าย (discharge side)

diff : diffuser

j : หัวฉีด (nozzle)

mc : ห้องผสม (Mixing chamber)

s : ด้านดูด (Suction side)

ss : ของแข็งที่ด้านดูด (Solid in suction side)

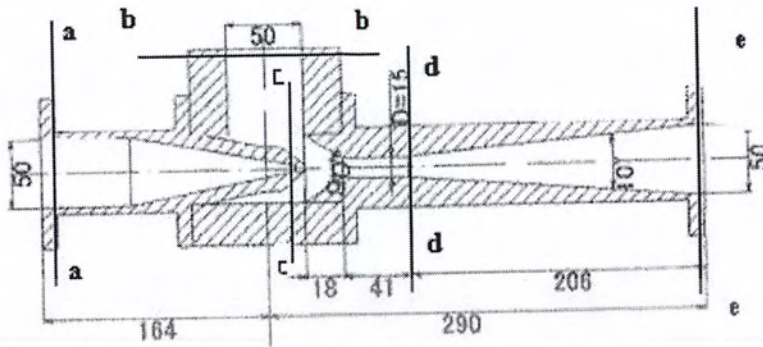
su : ของผสม (slurry)

sw : น้ำที่ด้านดูด (Water in suction side)

w : น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณประสิทธิภาพของการขนถ่ายของแข็งด้วยปั้มน้ำแบบหัวฉีด



รูปที่ 2.2 แสดงภาคตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลใน water jet pump

จากรูป วิเคราะห์หาค่า Head ต่างๆจากรูปได้ดังนี้

$$H = H_d - H_s \quad (1)$$

$$H_c = H_p - H_d \quad (2)$$

จากสองสมการข้างต้นสามารถนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของ jet pump ได้จากสมการ

$$\eta = \frac{\gamma_s \cdot Q_s \cdot H}{\gamma_w \cdot Q_j \cdot H_e} = \phi \cdot \frac{H}{H_e} \quad (3)$$

จากการวิเคราะห์สมการต่อเนื่องได้ดังนี้

$$Q_d = Q_j + Q_{su} \quad (4)$$

$$A_d = A_j + A_s \quad (5)$$

$$Q_{su} = Q_{ss} + Q_{sw} \quad (6)$$

$$Q_{ss} = \mu_s \cdot V_s \cdot A_s \cdot C_s \quad (7)$$

$$Q_{sw} = V_s \cdot A_s (1 - C_s) \quad (8)$$

$$\gamma_d Q_{ss} = \gamma_{su} Q_{su} + \gamma_w Q_j \quad (9)$$

$$W_d = W_{su} + W_{sj} \quad (10)$$

$$W_{su} = W_{ss} + W_{sw} \quad (11)$$

$$W_{ss} = \gamma_s \cdot Q_{ss} = \gamma_s \cdot \mu_s \cdot V_s \cdot A_s \cdot C_s \quad (12)$$

$$W_{sw} = \gamma_w \cdot Q_{sw} = \gamma_w \cdot V_s \cdot A_s \cdot (1 - C_s) \quad (13)$$

$$W_{su} = \gamma_{su} \cdot Q_{su} \quad (14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าน้ำหนักจำเพาะของของผสม ( $\gamma_{su}$ )

$$\gamma_{su} = \frac{W_{su}}{Q_{su}} = \frac{W_{ss} + W_{sw}}{Q_{ss} + Q_{sw}}$$

แทนค่าจากสมการ (7),(8),(12) และ (13)

$$\begin{aligned} \gamma_{su} &= \frac{\gamma_s \cdot \mu_s \cdot V_s \cdot A_s \cdot C_s + \gamma_w \cdot V_s \cdot A_s \cdot (1 - C_s)}{\mu_s \cdot V_s \cdot A_s \cdot C_s + V_s \cdot A_s \cdot (1 - C_s)} \\ &= \frac{C_s \cdot (\mu_s \cdot \gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w}{(1 - C_s) + \mu_s \cdot C_s} \end{aligned} \quad (15)$$

ค่าน้ำหนักจำเพาะ ( $\gamma_d$ ) และความเข้มข้นโดยปริมาตร  $C_d$  ทางด้านปล่อยของหน้าตัด d-d

$$\Phi = \frac{W_{su}}{W_j} = \frac{Q_{su} \cdot \gamma_{su}}{Q_j \cdot \gamma_w} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \gamma_d &= \frac{W_d}{Q_d} = \frac{W_{su} + W_{sj}}{Q_j + Q_{su}} = \frac{\gamma_{su} \cdot Q_{su} + \gamma_w \cdot Q_j}{Q_j + Q_{su}} \\ &= \frac{\gamma_{su} \cdot \gamma_w \cdot (\phi + 1)}{\gamma_w \cdot \phi + \gamma_{su}} \end{aligned} \quad (17)$$

จาก  $\frac{Q_j}{Q_{su}} = \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w \cdot \phi}$  ]

$$C_d = \frac{Q_{ss}}{Q_j + Q_{su}} = \frac{\mu_s \cdot C_s \cdot \gamma_w \cdot \phi}{\{\mu_s \cdot C_s + (1 - C_s)\} (\gamma_{su} + \gamma_w \cdot \phi)} \quad (18)$$

ความเร็วเฉลี่ยในท่อที่หน้าตัด b-b และ e-e

จาก (6),(7) และ (8)

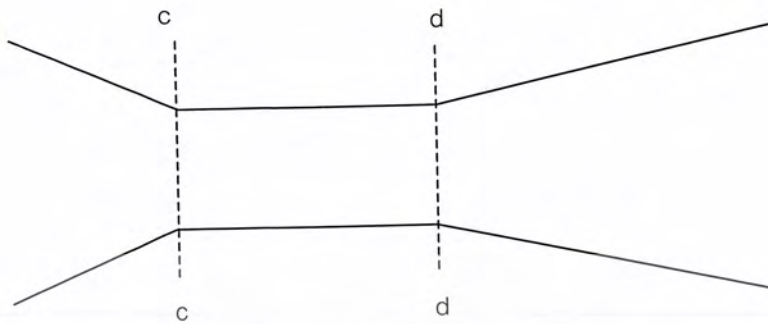
$$\begin{aligned} Q_{su} &= Q_{ss} + Q_{sw} \\ &= \mu_s V_s A_s C_s + V_s A_s (1 - C_s) \\ &= A_s V_s \{\mu_s C_s + (1 - C_s)\} \\ V_{sw} &= \frac{Q_{su}}{A_s \{\mu_s C_s + (1 - C_s)\}} = \frac{\phi \cdot Q_j \cdot \gamma_w}{\gamma_{su} \cdot A_s \{\mu_s \cdot C_s + (1 - C_s)\}} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Q_d &= V_d A_d (1 - C_d) + \mu_d V_d A_d C_d \\ &= V_d A_d \{\mu_d C_d + (1 - C_d)\} \end{aligned}$$

$$V_d = \frac{Q_d}{A_d \{\mu_d \cdot C_d + (1 - C_d)\}} = \frac{B \cdot (1 + \phi) \cdot V_j \cdot \gamma_w}{\gamma_d \cdot \{\mu_d \cdot C_d + (1 - C_d)\}} \quad (20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สมการเคลื่อนที่ระหว่างพื้นที่หน้าตัด c-c และ d-d  
พิจารณาการไหลแบบมิติเดียว และจากการรวมสมการการเคลื่อนที่ในแนวแกน x



รูปที่ 2.3 แสดงหน้าตัด c-c และ d-d

$$\begin{aligned}\Sigma F &= \Sigma F_{bx} + \Sigma F_{sx} \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} V_x \cdot \rho \cdot dV + \int_{cs} V_x \cdot \rho \cdot \vec{n} \cdot d\vec{A}\end{aligned}$$

เมื่อ  $F_{bx}$  คือ Body force ขึ้นอยู่กับแรงโน้มถ่วงของโลก

$F_{sx}$  คือ Surface force ขึ้นกับความดันและความเร็วของไหล

สมการการเคลื่อนที่ที่หน้าตัด c-c จะได้

$$\begin{aligned}\dot{M}_j V_j + \dot{M}_{sw} V_{sw} + \dot{M}_{ss} V_{ss} &= \rho_j Q_j V_j + \rho_{sw} Q_{sw} V_{sw} + \rho_{ss} Q_{ss} V_{ss} \\ &= \frac{\gamma_w}{g} V_j^2 A_j + \frac{\gamma_{sw}}{g} V_{sw}^2 A_s (1 - C_s) V_{sw} + \frac{\gamma_{ss}}{g} \mu_s V_{sw} A_s C_s V_{ss}\end{aligned}$$

จาก  $V_{ss} = \mu_s V_{sw}$

$$= \frac{\gamma_w}{g} V_j^2 A_j + \frac{\gamma_{sw}}{g} V_{sw}^2 A_s (1 - C_s) + \frac{\gamma_{ss}}{g} \mu_s^2 V_{sw}^2 A_s C_s$$

จาก (19)

$$= \frac{\gamma_w}{g} V_j^2 A_j + \frac{\gamma_{sw}}{g} A_s (1 - C_s) \left[ \frac{\phi \cdot Q_j \cdot \gamma_w}{\gamma_{su} \cdot A_s \cdot \{\mu_s \cdot C_s + (1 + C_s)\}} \right]^2 +$$

$$\frac{\gamma_{ss}}{g} \mu_s^2 A_s C_s \left[ \frac{\phi \cdot Q_j \cdot \gamma_w}{\gamma_{su} \cdot A_s \cdot \{\mu_s \cdot C_s + (1 - C_s)\}} \right]^2$$

$$= \frac{V_j^2}{2g} [2\gamma_w A_j + 2 \left[ \frac{Q_{su} \gamma_{su}}{Q_j \gamma_w} \right]^2 \cdot \frac{B^2}{(1 - B)^2}]$$

$$\left( \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w} \right)^2 \left[ \frac{(C_s (\mu_s^2 \gamma_{ss} - \gamma_w) + \gamma_w) A_s}{\{1 - C_s (1 - \mu_s)\}^2} \right] \quad (21)$$

สมการการเคลื่อนที่ที่หน้าตัด d-d

$$\begin{aligned}\dot{M}_d V_d &= V_{dw} (\dot{M}_j + \dot{M}_{sw}) + V_{ds} \dot{M}_{ss} \\ &= V_{dw} (\rho \cdot Q_j + \rho \cdot Q_{sw}) + \mu_d \cdot V_{dw} \cdot \rho \cdot Q_{ss}\end{aligned}$$

จาก (7),(8)

$$= V_{dw} \left( \frac{\gamma_j}{g} V_j A_j + \frac{\gamma_{sw}}{g} V_{sw} A_s (1 - C_s) \right) + \mu_d \cdot V_{dw} \cdot \frac{\gamma_{ss}}{g} \cdot \mu_s \cdot V_s \cdot A_s \cdot C_s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก (20)

$$\begin{aligned}
&= \frac{B(1+\phi)V_j\gamma_w}{\gamma_d\{\mu_d C_d + (1-C_d)\}} \left( V_j A_j \frac{\gamma_j}{g} + \frac{\gamma_{sw}}{g} \left[ \frac{\phi Q_j \gamma_w}{\gamma_{su} A_s \{\mu_s C_s + (1-C_s)\}} \right] A_s (1-C_s) \right. \\
&C_s) + \frac{\mu_d B(1+\phi)V_j\gamma_w}{\gamma_d\{\mu_d C_d + (1-C_d)\}} \frac{\gamma_{ss}}{g} \mu_s \left[ \frac{\phi Q_j \gamma_w}{\gamma_{su} A_s \{\mu_s C_s + (1-C_s)\}} \right] A_s C_s \\
&= \frac{V_j^2}{2g} \cdot \frac{B(1+\phi)}{\{1-C_d(1+\mu_d)\}} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \left[ 2\gamma_w A_j + 2 \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \phi \frac{B}{(1-B)} \left\{ \frac{C_s(\mu_d \mu_s \gamma_{ss} - \gamma_w) A_s}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}} \right\} \right] \quad (22)
\end{aligned}$$

การสูญเสียเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ห้องผสมพิจารณาที่หน้าตัด c-c ถึง d-d จะได้

$$F_t = \int_0^l \tau_o 2\pi r \, dl \quad \tau_o = \text{Shear force}$$

$$= \lambda 2\pi r l \gamma_d \frac{V_d^2}{2g}$$

$$K_{mc} = \frac{2\lambda l}{r}$$

$$F_t = K_{mc} \cdot A_d \cdot \gamma_d \cdot \frac{V_d^2}{2g}$$

จาก (20)

$$= \frac{V_j^2}{2g} \frac{B^2 (1+\phi)^2 \gamma_w^2}{\gamma_d \{\mu_d C_d + (1-C_d)\}^2} \frac{K_{mc} \cdot A_d}{\gamma_d \{\mu_d C_d + (1-C_d)\}^2}$$

ค่าความดันที่เปลี่ยนแปลง

$$\begin{aligned}
F_p &= \int_0^r (P_d - P_c) 2\pi r \, dr \\
&= \int_0^r P_d 2\pi r \, dr - \int_0^r P_c 2\pi r \, dr
\end{aligned}$$

จากสมการของแรง

$$\begin{aligned}
&\frac{V_j^2}{2g} \left[ 2\gamma_w A_j + 2 \left( \frac{Q_{su} \gamma_{su}}{Q_j \gamma_w} \right)^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 \frac{\{C_s(\mu_s^2 \gamma_{ss} - \gamma_w) + \gamma_w\} A_s}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}^2} \right] + \int_0^r P_c 2\pi r \, dr = \\
&\frac{V_j^2}{2g} \frac{B(1+\phi)}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}} \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \left[ 2\gamma_w A_j + \frac{2B}{(1-B)} \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \left\{ \frac{C_s(\mu_s \mu_d \gamma_{ss} - \gamma_w) + \gamma_w}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}} \right\} A_s \right] + \frac{V_j^2}{2g} B^2 \\
&(1+\phi)^2 \frac{\gamma_w^2}{\gamma_d \{\mu_d C_d + (1-C_d)\}^2} + \int_0^r P_d 2\pi r \, dr
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_0^r P_d 2\pi r dr - \int_0^r P_c 2\pi r dr =$$

$$\frac{V_j^2}{2g} [2\gamma_w A_j + 2 \left( \frac{Q_{su} \cdot \gamma_{su}}{Q_j \cdot \gamma_w} \right)^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 \frac{\{C_s \cdot (\mu_s^2 \cdot \gamma_{ss} - \gamma_w) + \gamma_w\} A_s}{\{1 - C_s(1 - \mu_s)\}^2}] -$$

$$\frac{V_j^2}{2g} \frac{B(1+\phi)}{\{1 - C_d(1 - \mu_d)\}} \frac{\gamma_w}{\gamma_d} [2\gamma_w A_j + \frac{2B}{(1-B)} \Phi \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \frac{\{C_s(\mu_s \cdot \mu_d \cdot \gamma_{ss} - \gamma_w) + \gamma_w\} A_s}{\{1 - C_s(1 - \mu_s)\}} -$$

$$\frac{V_j^2}{2g} B^2(1+\Phi)^2 \frac{\gamma_w^2}{\gamma_d} \frac{K_{mc} A_d}{\{\mu_d C_d + (1 - C_d)\}^2}$$

$$\int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{\gamma_w A_d} dr - \int_0^r \frac{P_c 2\pi r}{\gamma_w A_d} dr = \frac{V_j^2}{2g} [[2B + 2\Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 (1 -$$

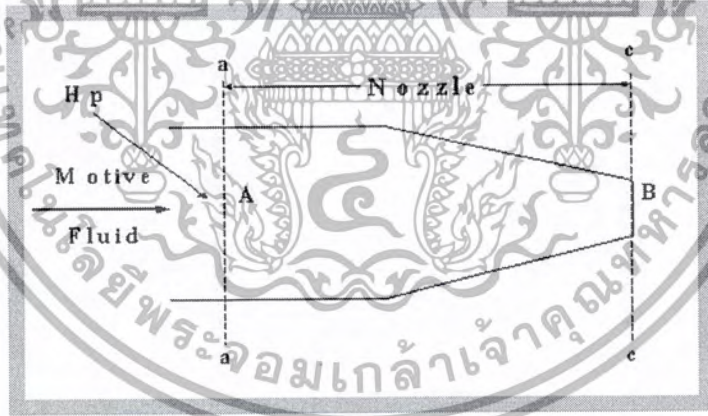
$$B) \frac{\{1 - C_s(1 - \frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1 - C_s(1 - \mu_s)\}^2}] - \frac{B(1+\phi)}{\{1 - C_d(1 - \mu_d)\}} \frac{\gamma_w}{\gamma_d} [2B + 2B\Phi \frac{\{1 - C_s(1 - \frac{\mu_s \mu_d \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1 - C_s(1 - \mu_s)\}} -$$

$$B^2(1+\Phi)^2 \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \frac{K_{mc}}{\{\mu_d C_d + (1 - C_d)\}^2}]$$

จากสมการพลังงานของเบอร์นูลลี

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + 2gZ = \text{constant}$$

สมการพลังงานระหว่าง a และ c, the drive head (H<sub>p</sub>)



รูปที่ 2.4 แสดง Section a-a to c-c

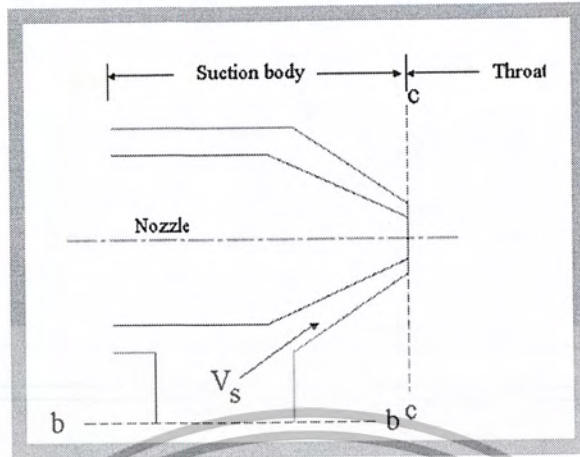
$$H_p = \int_0^r \frac{P_a 2\pi r}{A_a \gamma_w} dr + \frac{\alpha_d V_a^2}{2g}$$

$$= \int_0^r \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{\alpha_j V_j^2}{2g} + h_j \quad ; h_j = K_j \frac{V_j^2}{2g}$$

$$= \int_0^r \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{V_j^2}{2g} (\alpha_j + K_j)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

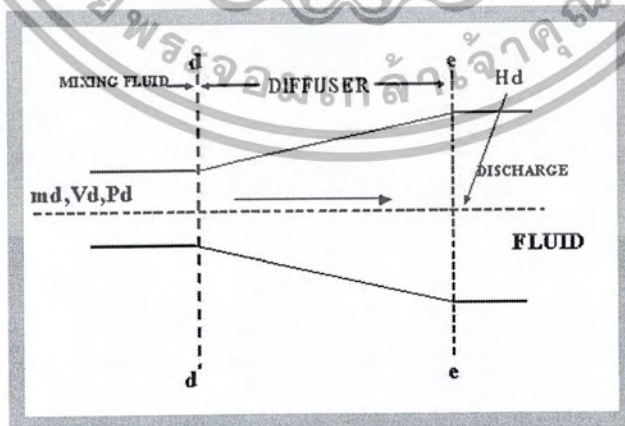
สมการพลังงานระหว่าง b และ c , the suction head ( $H_s$ )



รูปที่ 2.5 แสดง Section b-b to e-c

$$\begin{aligned}
 H_s &= \epsilon_{su} \left\{ \frac{\int_0^r P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w \epsilon_{su}} dr + \alpha_s (1 - C'_s) \frac{V_s^2}{2g} + \alpha_s C'_s \mu_s^2 \frac{V_s^2}{2g} + h_s \right\} ; h_s = k_s \frac{V_s^2}{2g} \\
 &= \frac{\int_0^r P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{V_s^2}{2g} \epsilon_{su} \{ \alpha_s (1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s \} ; \epsilon_{su} = \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w} \\
 &= \frac{\int_0^r P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{\epsilon_{su}}{2g} \left[ \frac{\phi Q_j \gamma_w}{\gamma_{su} A_s \{ \mu_s C_s + (1 - C_s) \}} \right]^2 \{ \alpha_s (1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s \} \\
 &= \frac{\int_0^r P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{V_j^2}{2g} \frac{B^2}{\Phi^2 (1 - B)^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 \frac{\epsilon_{su} \{ \alpha_s (1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s \}}{\{ 1 - C_s (1 - \mu_s) \}^2}
 \end{aligned}$$

สมการพลังงานระหว่าง d และ e , delivery head



รูปที่ 2.5 แสดง Section d-d to e-e

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
H_d &= \varepsilon_d \left\{ \int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w \varepsilon_d} dr + \alpha_d (1 - C'_d) \frac{V_d^2}{2g} + \alpha_d C'_d \mu_d^2 \frac{V_d^2}{2g} - h_{\text{dif}} \right\} \quad ; \quad h_{\text{dif}} = K_{\text{dif}} \frac{V_d^2}{2g} \\
&= \int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \frac{V_d^2}{2g} \varepsilon_d \{ -\alpha_d (1 - C'_d) - \alpha_d C'_d \mu_d^2 + K_{\text{dif}} \} \quad ; \quad \varepsilon_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \\
&= \int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \frac{V_d^2}{2g} \varepsilon_d \{ K_{\text{dif}} - \alpha_d (1 - C'_d + C'_d \mu_d^2) \} \\
&= \int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \frac{\varepsilon_d}{2g} \left[ \frac{B(1+\phi)V_j \gamma_w}{\gamma_d \{ \mu_d C_d + (1 - C_d) \}} \right]^2 \{ K_{\text{dif}} - \alpha_d (1 - C'_d + C'_d \mu_d^2) \} \\
&= \int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \frac{\varepsilon_d}{2g} \frac{B^2 (1+\phi)^2 V_j^2 \gamma_w^2}{\gamma_d^2 \{ \mu_d C_d + (1 - C_d) \}^2} \{ K_{\text{dif}} - \alpha_d (1 - C'_d + C'_d \mu_d^2) \} \\
&= \int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \frac{V_j^2}{2g} \frac{B^2 (1+\phi)^2 \varepsilon_d}{\{ 1 - C_d (1 - \mu_d) \}^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \right)^2 \{ K_{\text{dif}} - \alpha_d (1 - C'_d + C'_d \mu_d^2) \}
\end{aligned}$$

จาก  $H = H_d - H_s$

$$\begin{aligned}
H &= \int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \frac{V_j^2}{2g} \frac{B^2 (1+\phi)^2 \varepsilon_d}{\{ 1 - C_d (1 - \mu_d) \}^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \right)^2 \{ K_{\text{dif}} - \alpha_d (1 - C'_d + C'_d \mu_d^2) \} - \\
&\left[ \int_0^r \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{V_j^2}{2g} \Phi^2 \frac{B^2 (1+\phi)^2 \varepsilon_{su}}{(1-B)^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 \frac{\{ \alpha_s (1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s \}}{\{ 1 - C_s (1 - \mu_s) \}^2} \right] \\
&= \int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \int_0^r \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr - \frac{V_j^2}{2g} \left[ \frac{B^2 (1+\phi)^2 \varepsilon_d}{\{ 1 - C_d (1 - \mu_d) \}^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \right)^2 \{ K_{\text{dif}} - \alpha_d (1 - C'_d + C'_d \mu_d^2) \} + \right. \\
&\left. \Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 \frac{\varepsilon_{su} \{ \alpha_s (1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s \}}{\{ 1 - C_s (1 - \mu_s) \}^2} \right] \\
&= \int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \int_0^r \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr - \frac{V_j^2}{2g} \left[ \frac{B^2 (1+\phi)^2}{\{ 1 - C_d (1 - \mu_d) \}^2} \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \right)^2 \{ K_{\text{dif}} - \alpha_d (1 - \right. \\
&C'_d + C'_d \mu_d^2) \} + \\
&\left. \Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \cdot \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w} \cdot \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 \frac{\varepsilon_{su} \{ \alpha_s (1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s \}}{\{ 1 - C_s (1 - \mu_s) \}^2} \right] \\
&= \int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \int_0^r \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr - \frac{V_j^2}{2g} \left[ \frac{B^2 (1+\phi)^2}{\{ 1 - C_d (1 - \mu_d) \}^2} \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \{ K_{\text{dif}} - \alpha_d (1 - C'_d + C'_d \mu_d^2) \} + \right. \\
&\left. \Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \frac{\varepsilon_{su} \{ \alpha_s (1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s \}}{\{ 1 - C_s (1 - \mu_s) \}^2} \right]
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า

$$\begin{aligned}
H &= \frac{V_j^2}{2g} \left[ [2B+2\Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} (\frac{\gamma_w}{\gamma_{su}})^2 (1-B) \frac{\{1-C_s(1-\frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}^2}] - \right. \\
&\quad \frac{B(1+\phi)}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}} \frac{\gamma_w}{\gamma_d} [2B+2B\Phi \frac{\{1-C_s(1-\frac{\mu_s \mu_d \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}} - \\
&\quad B^2(1+\Phi)^2 \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \frac{K_{mc}}{\{\mu_d C_d + (1-C_d)\}^2}] - \frac{V_j^2}{2g} \left[ \frac{B^2(1+\phi)^2}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \{K_{dir} \alpha_d (1- \right. \\
&\quad C'_d + C'_d \mu_d^2)\} + \\
&\quad \left. \Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \frac{\varepsilon_{su} \{\alpha_s (1-C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}^2} \right] \\
&= \frac{V_j^2}{2g} \left[ [2B+2\Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} (\frac{\gamma_w}{\gamma_{su}})^2 \frac{\{1-C_s(1-\frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}^2}] - \frac{B(\gamma_w \phi + \gamma_{su})}{\{1-C_d(1-\mu_d)\} \gamma_{su}} \right. \\
&\quad \left. [2B+2B\Phi \frac{\{1-C_s(1-\frac{\mu_s \mu_d \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}} - B^2(1+\Phi) (\frac{\gamma_w \phi + \gamma_{su}}{\gamma_{su}}) \frac{K_{mc}}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2}] - \right. \\
&\quad \left. \frac{B^2(1+\phi)}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} \left[ \frac{\gamma_w \phi + \gamma_{su}}{\gamma_{su}} \right] \{K_{dir} \alpha_d (1-C'_d (1-\mu_d^2))\} - \right. \\
&\quad \left. \Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \frac{\varepsilon_{su} \{\alpha_s (1+C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}^2} \right] \\
\text{จาก} \\
\frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} &= \frac{\gamma_w}{C_s (\gamma_s \mu_s - \gamma_w) + \gamma_w} = \frac{\gamma_w [(1-C_s) + \mu_s C_s]}{C_s (\gamma_s \mu_s - \gamma_w) + \gamma_w} = \frac{[(1-C_s) + \mu_s C_s]}{C_s (\frac{\gamma_s \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1} \\
&= \frac{[C_s (\mu_s - 1) + 1]}{C_s (\frac{\gamma_s \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1} \\
&= \frac{[1 - C_s (1 - \mu_s)]}{C_s (\frac{\gamma_s \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1}
\end{aligned}$$

ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
H = & \frac{V_j^2}{2g} [2B+2\Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)} \frac{\{1-C_s(1-\frac{\mu_s^2\gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{C_s(\frac{\gamma_s\mu_s}{\gamma_w}-1)+1\}^2} - \frac{B}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}} \frac{\{1-C_s(1-\mu_s)\}\phi}{\{C_s(\frac{\gamma_s\mu_s}{\gamma_w}-1)+1\}} + 1 \\
& ] [2B+2B\Phi \frac{\{1-C_s(1-\frac{\mu_s\mu_d\gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}} - B^2(1+\Phi) \frac{\{1-C_s(1-\mu_s)\}\phi}{C_s(\frac{\gamma_s\mu_s}{\gamma_w}-1)+1} + 1] \\
& [ \frac{K_{mc}}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} ] - \frac{B^2(1+\phi)}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} \frac{\{1-C_s(1-\mu_s)\}\phi}{\{C_s(\frac{\gamma_s\mu_s}{\gamma_w}-1)+1\}} + 1] \\
& \{K_{dir}-\alpha_d(1-C'_d(1-\mu_d^2))\} - \Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \frac{1}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}} \frac{[\alpha_s\{1-C'_s(1-\mu_s^2)\}+K_s]}{\{C_s(\frac{\gamma_s\mu_s}{\gamma_w}-1)+1\}} ]
\end{aligned}$$

จาก  $H_e = H_p - H_d$

$$\begin{aligned}
H_e = & \int_0^r \frac{P_e 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{V_j^2}{2g} (\alpha_j + K_j) - \int_0^r \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr + \frac{V_j^2}{2g} \frac{B^2(1+\phi)^2 \varepsilon_d}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right)^2 \{K_{dir}-\alpha_d(1- \\
& C'_d+C'_d\mu_d^2)\} \\
= & -\frac{V_j^2}{2g} [2B+2\Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \frac{\{1-C_s(1-\frac{\mu_s^2\gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}^2} (1-B) \frac{\{1-C_s(1-\mu_s)\}\phi}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}} ] - \\
& \frac{B(1+\phi)}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}} \frac{\gamma_w}{\gamma_d} [2B+2B\Phi \frac{\{1-C_s(1-\frac{\mu_s\mu_d\gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}} - \\
& B^2(1+\Phi)^2 \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \frac{K_{mc}}{\{\mu_d C_d + (1-C_d)\}^2} ] + \\
& \frac{V_j^2}{2g} [(\alpha_j+K_j) + \frac{B^2(1+\phi)^2 \varepsilon_d}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right)^2 \{K_{dir}-\alpha_d(1-C'_d+C'_d\mu_d^2)\}]
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= \frac{V_j^2}{2g} [(\alpha_j + K_j) + \left[ \frac{B^2(1+\phi)}{\{1 - C_d(1 - \mu_d)\}^2} \right] \left[ \frac{\{1 - C_s(1 - \mu_s)\}\phi}{C_s(\frac{\gamma_s \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1} + 1 \right] \{K_{dir} - \alpha_d(1 - C'_d + C'_d \mu_d^2)\} - \\
&[2B + 2\Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)} \frac{\{1 - C_s(1 - \frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{C_s(\mu_s \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1) + 1\}^2} - \frac{B}{\{1 - C_d(1 - \mu_d)\}} \left[ \frac{[1 - C_s(1 - \mu_s)]}{C_s(\frac{\gamma_s \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1} \Phi + 1 \right] \\
&\frac{\{1 - C_s(1 - \frac{\mu_s \mu_d \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1 - C_s(1 - \mu_s)\}} - B^2(1 + \Phi) \left[ \frac{[1 - C_s(1 - \mu_s)]\phi}{C_s(\frac{\gamma_s \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1} + 1 \right] \\
&\frac{K_{mc}}{\{\mu_d C_d + (1 - C_d)\}^2} ] ]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{จาก } \frac{\gamma_w}{\gamma_d} &= \frac{\gamma_w}{\gamma_{su} \gamma_w (\phi + 1)} = \frac{\gamma_w \phi + \gamma_{su}}{\gamma_{su} (\phi + 1)} = \frac{\gamma_w \phi + 1}{(\phi + 1)} \\
&= \frac{\gamma_w \phi + \gamma_{su}}{[1 - C_s(1 - \mu_s)]\phi + 1} \\
&= \frac{C_s(\frac{\gamma_s \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1}{(\phi + 1)}
\end{aligned}$$

$$C_s = C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}}$$

$$C_d = C'_d \frac{\gamma_d}{\gamma_{ss}}$$

$$C_d = \frac{C_s \phi \gamma_w}{\gamma_{su} + \phi \gamma_w} = \frac{C_s \phi}{\frac{\gamma_{su}}{\gamma_w} + \phi}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{C'_s \gamma_{su}}{\gamma_{ss} \phi} \\
&= \frac{\gamma_{su} + \phi}{\gamma_w}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C'_d &= \frac{C_d \gamma_{ss}}{\gamma_d} \\
&= \frac{C'_s \gamma_{su}}{\gamma_{ss} \phi} \frac{\gamma_{ss}}{\gamma_w} \\
&= \frac{\gamma_{su} + \phi}{\gamma_w} \frac{\gamma_{ss}}{\gamma_d}
\end{aligned}$$

$$C'_d = \frac{C'_s \gamma_{su} \phi}{\gamma_{su} + \phi} \frac{(\gamma_w \phi + \gamma_{su})}{\gamma_{su} \gamma_w (\phi + 1)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= C'_s \frac{\phi}{\phi+1}$$

$$\begin{aligned}
 H = & \frac{V_j^2}{2g} [2B+2\Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)} \frac{\{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (\frac{\gamma_{ss} \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1\}^2} - \\
 & \frac{B}{\{1 - \frac{(C'_s \gamma_{su} \phi)}{\gamma_{ss}} \frac{(1 - \mu_d)}{(\phi + \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w})}\}} \left[ \frac{\{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s)\} \phi}{\{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (\frac{\gamma_{ss} \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1\}} + 1 \right. \\
 & \left. \frac{\{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \frac{\mu_s \mu_d \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s)\}} - B^2 (1 + \Phi) \left[ \frac{\{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s)\} \phi}{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (\frac{\gamma_{ss} \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1} + 1 \right] \right. \\
 & \left. \left[ \frac{K_{mc}}{(\phi C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}})} \right] \frac{B^2 (1 + \phi)}{(\phi C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}})} \left[ \frac{\{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s)\} \phi}{\{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (\frac{\gamma_{ss} \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1\}} + 1 \right] \right. \\
 & \left. \frac{\{1 - \frac{(C'_s \gamma_{su} \phi)}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_d)\}^2}{(\phi + \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w})} \frac{1}{\{1 - \frac{(C'_s \gamma_{su} \phi)}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_d)\}^2} \frac{\{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s)\} \phi}{\{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (\frac{\gamma_{ss} \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1\}} \right. \\
 & \left. \{K_{dir} \alpha_d (1 - C'_s \frac{\phi}{\phi+1} (1 - \mu_d^2))\} - \right. \\
 & \left. \Phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \frac{1}{\{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s)\}} \frac{[\alpha_s \{1 - C'_s (1 - \mu_s^2)\} + K_s]}{\{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (\frac{\gamma_{ss} \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1\}} \right]
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_c = \frac{V_j^2}{2g} [(\alpha_j + K_j) + \left[ \frac{B^2(1+\phi)}{C'_s \phi \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}}} \right] \left[ \frac{\{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s)\} \phi}{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (\frac{\gamma_s \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1} + 1 \right] \{K_{dif} - \alpha_d (1 - \frac{\phi + \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w}}{1 - \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_d)})^2} \} - [2B + 2\Phi^2 (1 - B) \frac{B^2}{\{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (\mu_s \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1) + 1\}^2} \frac{\{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\gamma_w} ]$$

$$\frac{B}{\left\{ 1 - \frac{\phi C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}}}{\phi + \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w}} (1 - \mu_d) \right\}} \left[ \frac{[1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s)]}{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (\frac{\gamma_s \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1} \Phi + 1 \right] \\ [2B + 2B\Phi \frac{\{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \frac{\mu_s \mu_d \gamma_{ss}}{\gamma_w})\}}{\{1 + C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s)\}} - B^2(1 + \Phi) \left[ \frac{[1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s)] \phi}{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (\frac{\gamma_s \mu_s}{\gamma_w} - 1) + 1} + 1 \right] \\ \frac{K_{mc}}{\left\{ \mu_d \frac{(\phi C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}})}{(\phi + \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w})} + (1 - \frac{(\phi C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}})}{(\phi + \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w})})^2 \right\}} ]$$

จะได้สมการประสิทธิภาพของปั๊มหัวฉีด คือ

$$\eta = \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w} \cdot \frac{Q_{su}}{Q_j} \cdot \frac{H}{H_e} = \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w} \cdot \frac{Q_{su}}{Q_j} \cdot \frac{H_d - H_s}{H_j - H_d}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การคำนวณผลทางทฤษฎีและขั้นตอนการประมวลผล

### 3.1 ขั้นตอนการประมวลผลของโปรแกรม

#### ขั้นที่ 1

เริ่มต้นโดยการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่เป็นค่าคงที่ก่อนเพื่อให้หน่วยประมวลผลโปรแกรมทราบค่าตัวแปรใดไม่มีค่าหรืออยู่ในรูปสมการที่หาค่าไม่ได้ โปรแกรมก็จะไม่มีการประมวลผลไปยังคำสั่งต่อไป ซึ่งค่าคงที่และความหมายของตัวแปรต่างๆ มีดังต่อไปนี้

ที่อัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีดกับพื้นที่ช่องทางดูด( $d/D$ ) เท่ากับ 0.3 , 0.4 , 0.5 , 0.6 ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากพลังงานจลน์ที่ห้องผสม( $K_{mc}$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.3 , 0.2 , 0.1 , 0.3 ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากพลังงานจลน์ที่ท่อดูด( $K_s$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.2 , 0.2 , 0.2 , 0.2 ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากพลังงานจลน์ที่หัวฉีด( $K_j$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 1.0 , 1.0 , 1.0 , 1.0 ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากพลังงานจลน์ที่ท่อขยาย( $K_d$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.2 , 0.2 , 0.15 , 0.2 ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การสูญเสียของหัวฉีด( $a_f$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.3 , 0.3 , 0.3 , 0.3 ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การสูญเสียของท่อดูด( $a_s$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 1.3 , 1.3 , 1.2 , 1.3 ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การสูญเสียของท่อขยาย( $a_d$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 1.4 , 1.7 , 1.8 , 1.4 ตามลำดับ

ความเข้มข้น โดยน้ำหนักทางด้านดูด( $C_{sd}$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.65

ค่าน้ำหนักจำเพาะของน้ำ( $G_w$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 1000

ค่าน้ำหนักจำเพาะของของแข็ง( $G_s$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 2600

ค่าน้ำหนักจำเพาะของของผสม( $G_{su}$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 1650

ค่าตัวประกอบการสิ้นเปลืองที่ด้านปล่อย( $M_d$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.8 , 0.6 , 0.45 , 0.3 ตามลำดับ

ค่าตัวประกอบการสิ้นเปลืองที่ด้านดูด( $M_s$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.6 , 0.5 , 0.5 , 0.6 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นที่ 2

กำหนดให้  $b = 0.09:0.03:0.36$  ความหมายคือกำหนดให้  $b$  เริ่มต้นที่ค่า 0.09 และวนรอบเพิ่มขึ้นทีละ 0.03 จนถึง 0.36 ซึ่ง  $b$  หมายถึงอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดระหว่างหัวฉีดกับห้องผสม ซึ่งกำหนดให้ แสดงผลตามขนาดของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองเท่านั้น

กำหนดให้  $N2 = \text{length}(b)$  ความหมายคือ  $N2$  มีค่าเท่ากับความยาวของ  $b$  คือมีทั้งหมด 10 ค่า

สร้างเมตริกซ์เพื่อเก็บค่า  $K_{mc}$   $K_s$   $K_j$   $K_d$   $a_j$   $a_s$   $a_d$   $M_d$  และ  $M_s$  ของหัวฉีดขนาดต่างๆ

กำหนดให้  $j = 1:N2$  ความหมายคือเป็นการวางเงื่อนไขในการวนรอบ โดยมีจำนวนรอบเท่ากับค่า  $N2$  เมื่อการประมวลผลเกินจำนวนรอบที่วน โปรแกรมก็จะออกไปทำงานยังคำสั่งอื่นต่อไปซึ่งจะให้  $j$  มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $N2$

โดยเมื่อ  $j$  มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $N2$  ให้  $B = \text{beta}(j)$  ( $\text{beta}$  ลำดับที่  $j$ )

กำหนดให้โปรแกรมทำงานโดยใช้เงื่อนไขให้เลือกการกระทำ คือถ้าเงื่อนไข  $B = 0.09$  เป็นจริงให้ทำงานวนรอบ  $x = 1$  ถึง 9 และรับค่า  $y$  เท่ากับ 1 หลังจากนั้นให้เก็บค่า  $A(x,y) = T(x,y)$  แต่ถ้า  $B = 0.09$  เป็นเท็จให้ทำเงื่อนไขให้เลือกการกระทำ คือถ้าเงื่อนไข  $B = 0.16$  เป็นจริงให้ทำงานวนรอบ  $x = 1$  ถึง 9 และรับค่า  $y$  เท่ากับ 2 หลังจากนั้นให้เก็บค่า  $A(x,y) = T(x,y)$  แต่ถ้า  $B = 0.16$  เป็นเท็จให้ทำเงื่อนไขให้เลือกการกระทำ คือถ้าเงื่อนไข  $B = 0.25$  เป็นจริงให้ทำงานวนรอบ  $x = 1$  ถึง 9 และรับค่า  $y$  เท่ากับ 3 หลังจากนั้นให้เก็บค่า  $A(x,y) = T(x,y)$  แต่ถ้า  $B = 0.25$  เป็นเท็จให้ทำเงื่อนไขให้เลือกการกระทำ คือถ้าเงื่อนไข  $B = 0.36$  เป็นจริงให้ทำงานวนรอบ  $x = 1$  ถึง 9 และรับค่า  $y$  เท่ากับ 4 หลังจากนั้นให้เก็บค่า  $A(x,y) = T(x,y)$  แต่ถ้า  $B = 0.36$  เป็นเท็จให้ทำเงื่อนไขให้เลือกการกระทำ คือถ้าเงื่อนไข  $B$  มากกว่า 0.09 แต่น้อยกว่า 0.16 เป็นจริงให้ทำงานวนรอบ  $x = 1$  ถึง 9 และรับค่า  $y$  เท่ากับ 1 หลังจากนั้นให้เก็บค่า  $A(x,y) = (B-0.09)*(T(x,y+1)-T(x,y))/(0.16-0.09)+T(x,y)$  ซึ่งสมการนี้เป็นการ interpolate ค่าคงที่ต่างๆ แต่ถ้า  $B$  มากกว่า 0.09 แต่น้อยกว่า 0.16 เป็นเท็จให้ทำเงื่อนไขให้เลือกการกระทำ คือถ้าเงื่อนไข  $B$  มากกว่า 0.16 แต่น้อยกว่า 0.25 เป็นจริงให้ทำงานวนรอบ  $x = 1$  ถึง 9 และรับค่า  $y$  เท่ากับ 2 หลังจากนั้นให้เก็บค่า  $A(x,y) = (B-0.16)*(T(x,y+1)-T(x,y))/(0.25-0.16)+T(x,y)$  แต่ถ้า  $B$  มากกว่า 0.16 แต่น้อยกว่า 0.25 เป็นเท็จให้ทำเงื่อนไขให้เลือกการกระทำ คือถ้าเงื่อนไข  $B$  มากกว่า 0.25 แต่น้อยกว่า 0.36 เป็นจริงให้ทำงานวนรอบ  $x = 1$  ถึง 9 และรับค่า  $y$  เท่ากับ 3 หลังจากนั้นให้เก็บค่า  $A(x,y) = (B-0.25)*(T(x,y+1)-T(x,y))/(0.36-0.25)+T(x,y)$  แต่ถ้าเงื่อนไข  $B$  มากกว่า 0.25 แต่น้อยกว่า 0.36 เป็นเท็จให้จบการทำงาน

หลังจากนั้นให้ไปปรับค่า  $\text{elta} = 0.01$  ความหมายคือกำหนดให้ประสิทธิภาพมีค่าเริ่มต้นที่ 0.01 หรือ 1 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดค่า  $i = 1$  คือให้โปรแกรมเก็บผลที่ประมวลไปแล้วไว้ โดยกำหนดให้เริ่มต้นครั้งที่ 1 และเก็บผลครั้งต่อไปตามเงื่อนไข

แล้วให้ค่าคงที่ต่างๆ ไปปรับค่าที่ได้จากการคำนวณข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ โปรแกรมจะทำงาน โดยใช้เงื่อนไขการควบคุมการวนรอบ เมื่อ  $\epsilon$  มากกว่าหรือเท่ากับ 0.001

เมื่อเงื่อนไขที่กำหนดให้เป็นจริง โปรแกรมจะประมวลผลตามสูตรที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะมีการเก็บผลการประมวลและการวนรอบตามเงื่อนไขข้างต้น ตัวแปรต่างๆที่โปรแกรมจะประมวลมีดังนี้ P , Gd , Cs , Cd , Cdd , Ed , Esu , phi , Hd , Hs , Hp , Hdp , He , H , HR , และ n

กำหนดให้  $\epsilon = n(i,j)$  ความหมายคือกำหนดให้ n คือประสิทธิภาพจะวนรอบตามค่า และมีการเก็บผลการประมวล กำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $\epsilon$  เพื่อนำไปตรวจสอบตามเงื่อนไขของค่า  $\epsilon$  ที่กำหนดไว้ ถ้าเป็นจริงโปรแกรมก็จะเพิ่มค่าให้กับ i ทีละ 1 ค่า และวนรอบไปคำนวณตัวแปรอื่นๆอีกรอบ จนกว่าค่า  $\epsilon$  จะมีค่าน้อยกว่า 0.001 ตามเงื่อนไขที่วางไว้ โปรแกรมจึงจะวนรอบไปคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ โดยโปรแกรมจะกลับไปทำงานตั้งแต่ เงื่อนไขที่กำหนดค่าให้โปรแกรมทำงาน จนกว่า j จะมากกว่า N2 เงื่อนไขก็จะเป็นเท็จ โปรแกรมก็จะออกไปพล็อตกราฟผลที่ได้จากการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆดังนี้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการไหล กับ ประสิทธิภาพ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเฮด กับ อัตราส่วนอัตราการไหล

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเฮด กับ ประสิทธิภาพ

ในการหาประสิทธิภาพ สามารถหาโดยใช้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณซึ่งจะทำให้การหาค่าประสิทธิภาพได้ง่ายขึ้น ผลที่ได้ก็จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้ปฏิบัติจริงดูแนวโน้มความเป็นไปได้

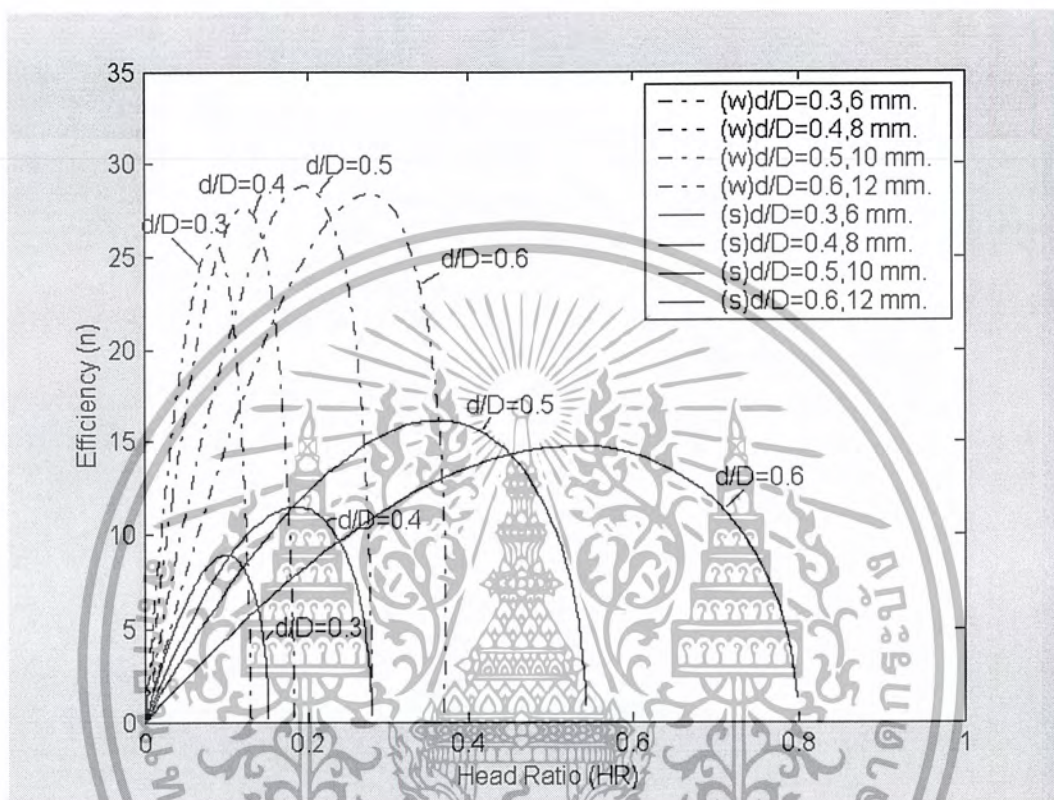
### 3.2 โปรแกรมคำนวณผลทางทฤษฎี



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังโปรแกรมการคำนวณ

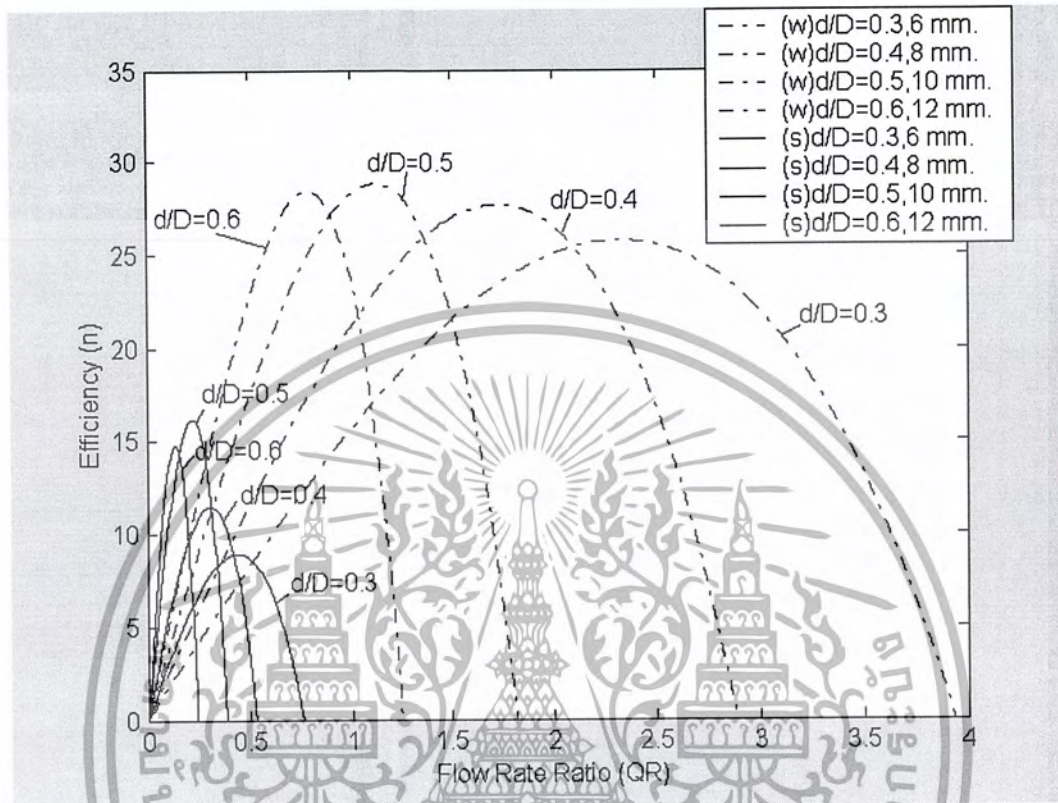
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ผลการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์



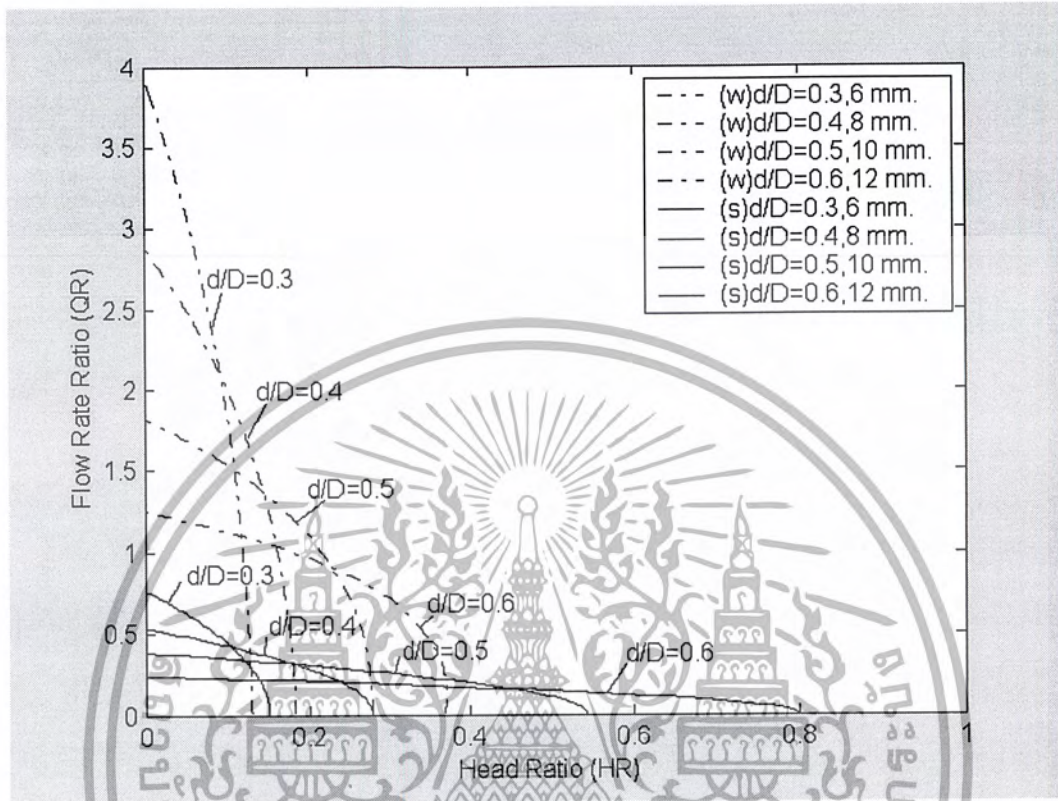
รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเฮดกับประสิทธิภาพของปั๊มดูดน้ำกับปั๊มดูดทราย

จากกราฟจะเห็นว่าแนวโน้มประสิทธิภาพของทั้งสองการทดลองคล้ายคลึงกันคือเมื่อใช้หัวฉีดขนาด 10 mm. ( $d/D = 0.5$ ) จะได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยปั๊มดูดน้ำจะได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 28 เปอร์เซ็นต์ และปั๊มดูดทรายจะได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 16 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการไหลกับประสิทธิภาพของปั๊มดูดน้ำกับปั๊มดูดทราย

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อใช้หัวฉีดขนาด 10 mm. ( $d/D = 0.5$ ) จะได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยปั๊มดูดน้ำจะได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 28 เปอร์เซ็นต์ และปั๊มดูดทรายจะได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 16 เปอร์เซ็นต์



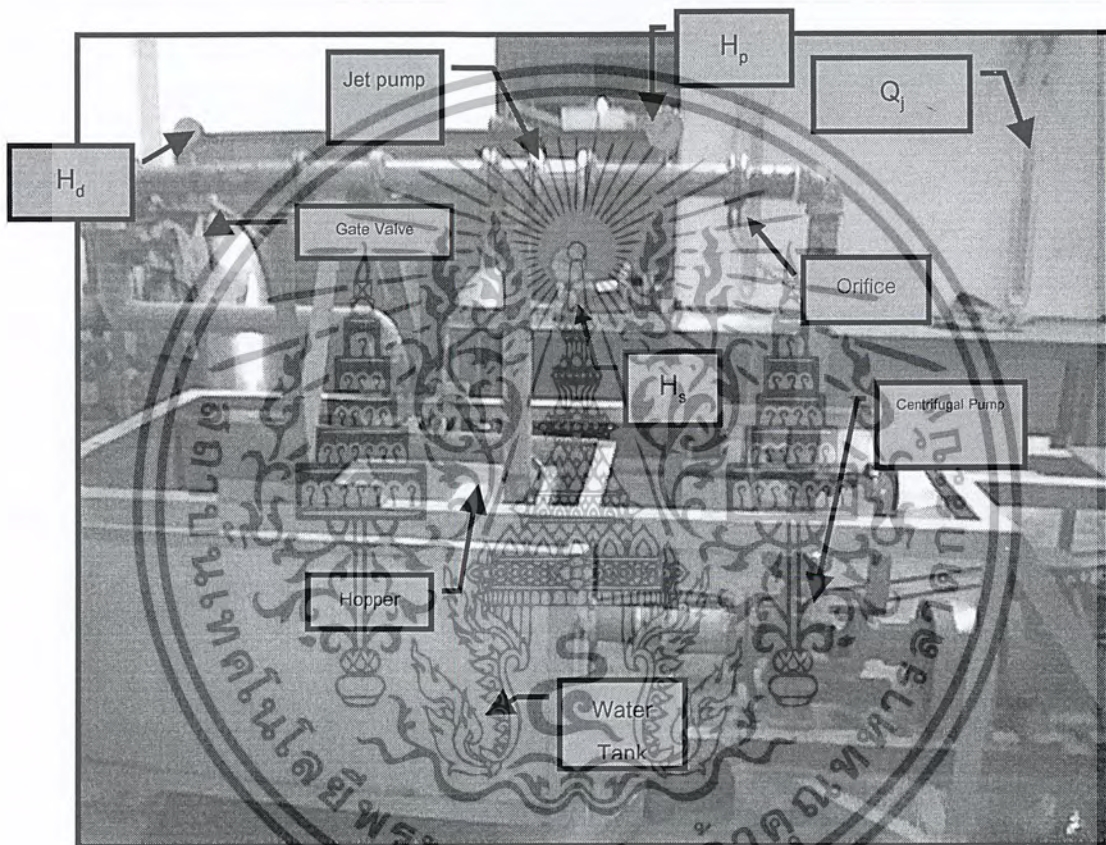
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการไหลกับอัตราส่วนเฮดของปั๊มดูดน้ำกับปั๊มดูดทราย

จากกราฟจะเห็นว่าหัวฉีดขนาดโตขึ้นจะให้อัตราส่วนเฮดเพิ่มขึ้นแต่อัตราส่วนการไหลจะต่ำลงเมื่อขนาดหัวฉีดเพิ่มขึ้น เนื่องจากหัวฉีดขนาดโตขึ้นอัตราการไหลที่ท่อดูดและเฮดที่ท่อส่งยิ่งมากขึ้น

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

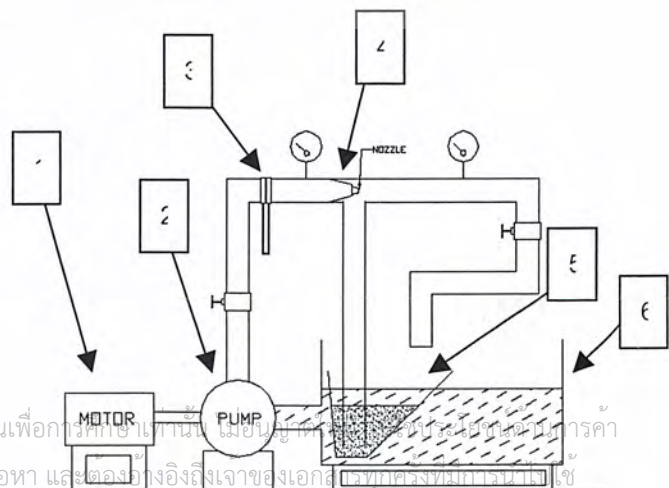
ในการปรับปรุงชุดทดลอง เพื่อให้สามารถขนถ่ายของแข็งได้ โดยการใส่กระบะทราย (Hopper) ตรงช่องทางดูด และปรับให้ช่องทางออกของของผสมลงที่กระบะทราย จะทำให้ทรายที่เป็นของแข็งตกลงไปด้านล่างของกระบะทราย และถูกดูดไหลวนเป็นวัฏจักร ส่วนน้ำที่ถูกดูดมาพร้อมกับของแข็งจะล้นออกจากกระบะทราย และไหลลงไปในถังเก็บน้ำ



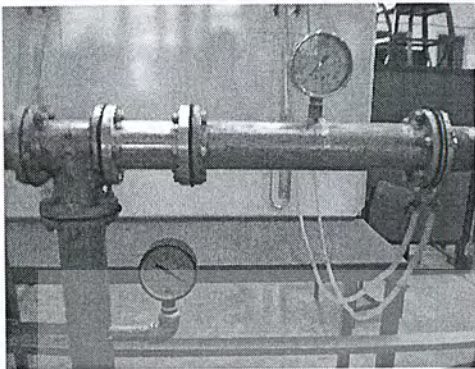
รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบต่างๆของ Jet Pump

#### 4.1 ชั้นส่วนหลักของเครื่อง jet pump

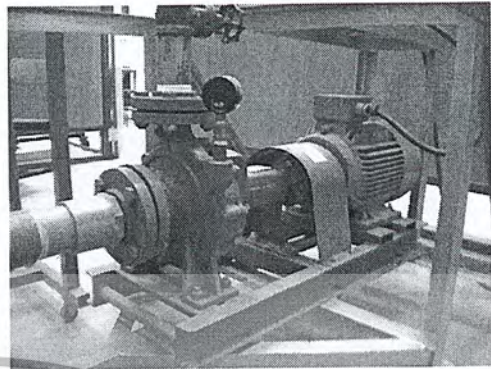
1. Motor
2. Pump
3. Orifice and Manometer
4. Nozzle and Mixing Chamber
5. Hopper
6. Water Tank



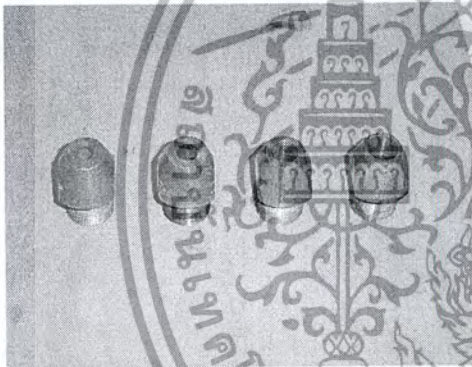
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้



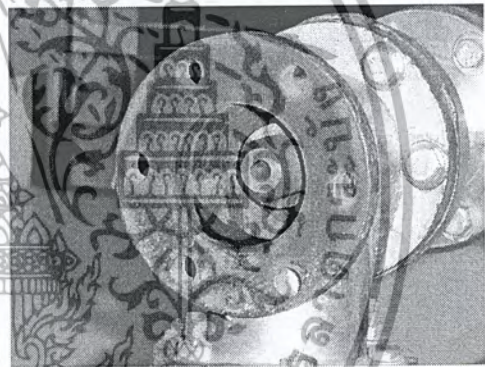
รูป 4.2 ชุด Nozzle และ Mixing Chamber



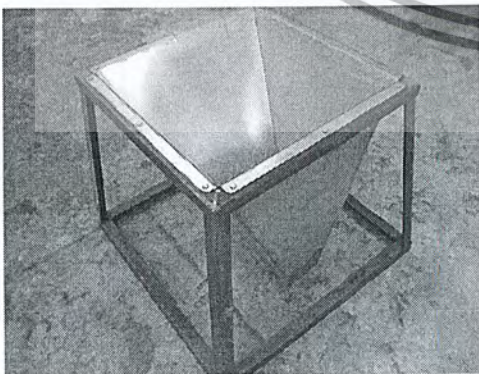
รูปที่ 4.3 Pump และ Motor



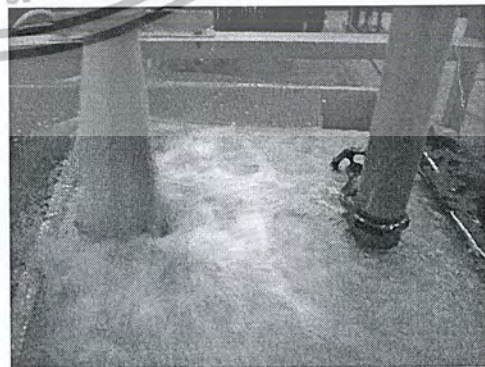
รูปที่ 4.4 หัว Nozzle ขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.5 การติดตั้ง Nozzle ใน Jet Pump



รูปที่ 4.6 Hopper



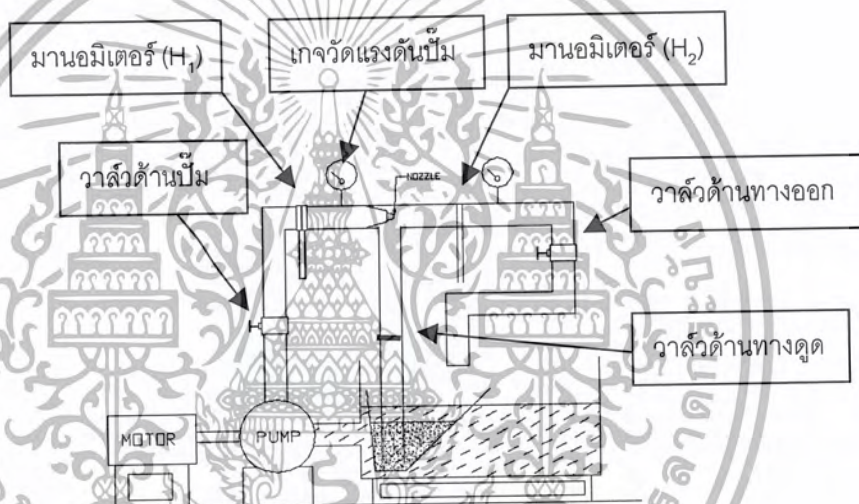
รูปที่ 4.7 การทำงานของ Jet Pump

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. ชุดปั้มน้ำอัตราการไหล 300 ลิตรต่ออนาที
2. หัวฉีด (Nozzle) ขนาด 6, 8, 10, และ 12 มิลลิเมตร
3. เกจวัดความดัน (Pressure Gauge)
4. วาล์วปรับอัตราการไหล (Gauge Valve)
5. ถังเก็บน้ำ ขนาด 0.85x1.2x0.75 ลูกบาศก์เมตร
6. กระบะทราย (Hopper) ขนาดความจุ 30 ลิตร
7. ออร์ฟิซ และ มานอมิเตอร์ วัดอัตราการไหล

#### 4.3 การ Calibrate



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์ต่างๆของ Jet Pump

การ Calibrate เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันต่างๆ เพราะการคำนวณอัตราการไหลโดยใช้ทฤษฎี และการปฏิบัติ อาจไม่เท่ากัน จึง Calibrate เพื่อให้ได้อัตราการไหลจากเครื่องอย่างแท้จริง

#### วิธีการ Calibrate

เริ่มทำโดยการเปิดวาล์วทางด้านดูดกับวาล์วทางด้านทางออกจนสุด แล้วเปิดวาล์วด้านปั้มจน เกจวัดความดันได้  $0.1 \text{ Kg/cm}^2$  แล้วทำการบันทึก  $H_1$  และ  $H_2$  เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการไหล หลังจากนั้นเพิ่มความดันทางด้านปั้มขึ้นครั้งละ  $0.1 \text{ Kg/cm}^2$  จนถึงค่าความดัน  $3.5 \text{ Kg/cm}^2$  หลังจากนั้น นำค่า  $H$  ที่ได้มาคำนวณหาอัตราการไหล

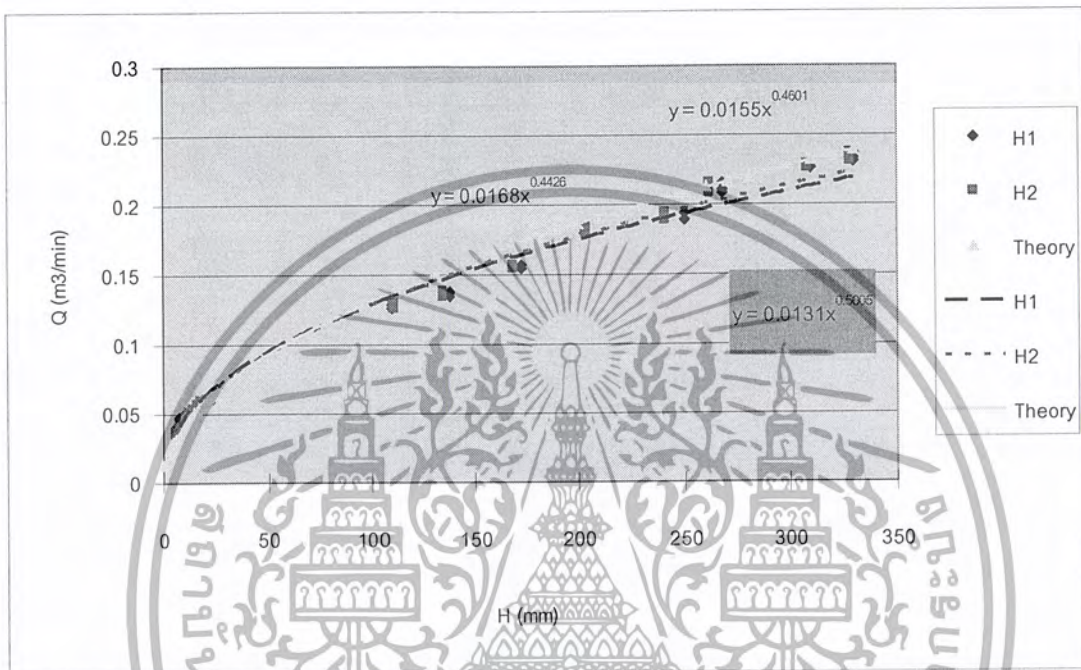
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณหาอัตราการไหล

จากสมการพลังงานของเบอร์นูลลี

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + 2gZ = \text{constant}$$

เมื่อเราทราบผลต่างของแรงดันเมื่อผ่านออริฟิซ เราสามารถหาความเร็วของของไหลได้



รูปที่ 4.9 ผลการ Calibrate

### 4.4 วิธีการทดลอง

1. ใช้ Nozzle ขนาด 6 mm. ใส่ทรายที่คัดแล้วใส่ลงใน Hopper ให้ท่วมช่องวัดประมาณ 1 ฟุต แล้วเติมน้ำลงในเครื่องให้ได้ระดับ
2. เปิดปัมโดยปิดวาล์วด้าน Nozzle ให้สนิท และเปิดวาล์วด้าน Discharge ให้สุด
3. ค่อยๆเปิดวาล์วด้าน Nozzle ตั้งค่า  $P_j$  ที่  $1.5 \text{ kg/cm}^2$
4. ค่อยๆปิดวาล์วด้าน Discharge ตั้งค่า  $P_d$  ที่  $0.1 \text{ kg/cm}^2$
5. เก็บข้อมูลโดยชั่งน้ำหนักของของผสมที่ออกมาทางด้าน Discharge ในช่วงระยะเวลา 5 วินาที
6. ปรับค่า  $P_d$  ไปที่ 0.15 , 0.20 , 0.25 , ... และเก็บข้อมูลตามข้อ 5 จนกระทั่งไม่สามารถวัดทรายขึ้นมาได้อีก แล้วหยุดการทดลอง
7. เปลี่ยนค่า  $P_j$  ไปที่ 2.0 , 2.5 , 3.0 และ  $3.5 \text{ kg/cm}^2$  แล้วทำการทดลองตามข้อ 5 และ ข้อ 6
8. เปลี่ยนขนาด Nozzle ไปที่ 8 , 10 และ 12 mm. แล้วทำการทดลองตามข้อ 1 – 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ตารางผลการทดลอง

Nozzle = 6 mm																								
Ht mmHg	Cj (m <sup>3</sup> /s)	Wj (kg/s)	Weight(kg)	Time (sec)	Wd (kg/s)	wd (m <sup>3</sup> /s)	Qd (m <sup>3</sup> /s)	Qs Qd-Qj	Ws Wd-Wj	(Ys)	Ps (kg/cm <sup>2</sup> )	x Pd >> Hp	Hs (m)	Hp (m)	x Pd >> Hd	Hd (m)	H (Hd-Hs)	He (Hp-Hd)	FRR Qs/Qj	Head Ratio (H/He)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(H/He)	Efficiency %	Y*Q
13	0.000871	0.870472	17	10	1.7	0.011	0.0013	0.000429	0.829528	18984.12	0	10.01001	0	0.516748	30.03003	5.167476	30.03003	29.51328	0.491949	0.017509	1.937118	0.016685419	1.668542	0.952963
13	0.000871	0.870472	21.65	15	1.443333	0.0161	0.00112	0.000249	0.572861	22600.52	0	10.01001	0	0.651091	30.06003	4.340607	30.06003	29.37894	0.285371	0.022162	2.306131	0.014584792	1.458479	0.668104
13	0.000871	0.870472	18	15	1.2	0.0153	0.001033	0.000162	0.329528	19955.99	0	10.01001	0	0.983163	30.03003	4.915817	30.03003	29.04687	0.185908	0.033847	2.036286	0.012813383	1.281338	0.378562
13	0.000871	0.870472	13.5	15	0.9	0.014	0.000933	6.2E-05	0.029528	4672.839	0	10.01001	0	6.238098	30.03003	20.98366	30.03003	23.73193	0.071143	0.265385	0.478811	0.0090202317	0.9020232	0.033922
Nozzle = 6 mm																								
Ht mmHg	Cj (m <sup>3</sup> /s)	Wj (kg/s)	Weight(kg)	Time (sec)	Wd (kg/s)	wd (m <sup>3</sup> /s)	Qd (m <sup>3</sup> /s)	Qs Qd-Qj	Ws Wd-Wj	(Ys)	Ps (kg/cm <sup>2</sup> )	x Pd >> Hp	Hs (m)	Hp (m)	x Pd >> Hd	Hd (m)	H (Hd-Hs)	He (Hp-Hd)	FRR Qs/Qj	Head Ratio (H/He)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(H/He)	Efficiency %	Y*Q
16	0.000794	0.793051	21.45	10	2.145	0.0151	0.00158	0.000786	1.351949	16870.23	0	10.01001	0	0.581498	35.03504	5.814977	35.03504	34.46354	0.990314	0.016878	1.721419	0.02877239	2.87724	1.704745
16	0.000794	0.793051	17.35	10	1.735	0.0131	0.00135	0.000555	0.941949	16615	0	10.01001	0	0.865646	35.03504	5.904303	35.03504	34.14939	0.700585	0.025934	1.695375	0.030803748	3.080375	1.187754
16	0.000794	0.793051	16.1	10	1.61	0.0121	0.00128	0.000486	0.816949	16485	0	10.01001	0	1.190173	35.03504	5.950384	35.03504	33.84466	0.612406	0.035166	1.68211	0.03625255	3.625255	1.030135
16	0.000794	0.793051	13.25	10	1.325	0.0112	0.00112	0.000326	0.531949	15939.8	0	10.01001	0	1.839398	35.03504	6.181528	35.03504	33.19564	0.410856	0.055411	1.632601	0.03716755	3.716755	0.670763
16	0.000794	0.793051	8.2	10	0.84	0.0332	0.00082	2.62E-05	0.046949	17609.05	0	10.01001	0	1.94985	35.03504	5.571	35.03504	33.08519	0.032948	0.058934	1.796807	0.003488958	0.348896	0.059201
Nozzle = 8 mm																								
Ht mmHg	Cj (m <sup>3</sup> /s)	Wj (kg/s)	Weight(kg)	Time (sec)	Wd (kg/s)	wd (m <sup>3</sup> /s)	Qd (m <sup>3</sup> /s)	Qs Qd-Qj	Ws Wd-Wj	(Ys)	Ps (kg/cm <sup>2</sup> )	x Pd >> Hp	Hs (m)	Hp (m)	x Pd >> Hd	Hd (m)	H (Hd-Hs)	He (Hp-Hd)	FRR Qs/Qj	Head Ratio (H/He)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(H/He)	Efficiency %	Y*Q
32	0.001298	1.296889	22.55	10	2.235	0.017	0.0017	0.000402	0.938111	22903.38	0	10.01001	0	4.28321	20.02002	4.28321	20.02002	19.5917	0.309518	0.021862	2.337035	0.015814246	1.581425	0.723355
32	0.001298	1.296889	21.65	10	2.165	0.0167	0.001675	0.000377	0.868111	22600.54	0	10.01001	0	0.651091	20.02002	4.340605	20.02002	19.36883	0.29026	0.033615	2.306133	0.022501325	2.250132	0.669379
32	0.001298	1.296889	19.95	10	1.995	0.0153	0.00153	0.000232	0.698111	29543.12	0	10.01001	0	0.654114	20.02002	3.32057	20.02002	19.35591	0.178566	0.034311	3.014546	0.018469303	1.84693	0.538296
32	0.001298	1.296889	16.4	10	1.64	0.0141	0.00141	0.000112	0.345111	30103.21	0	10.01001	0	0.977637	20.02002	3.259789	20.02002	19.04238	0.08613	0.05134	3.071697	0.013582745	1.358274	0.264564
32	0.001298	1.296889	10	10	1	0.015	0.0015	0.000202	-0.29689	-14431.6	0	10.01001	0	-3.05891	20.02002	-6.79757	20.02002	-3.05891	0.155457	-0.13254	-1.47259	0.030341857	3.034186	-0.22892

หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nozzle = 8 mm

H1 mmHg	Qj (m <sup>3</sup> /s)	Wj (kgs)	weight(kg)	Time (sec)	Wd (kgs)	Vol(m <sup>3</sup> )	Qd (m <sup>3</sup> /s)	Qs Qd - Qj	Ws Wd - Wj	(Ws/Qs)*g	Pj Kg/cm <sup>2</sup>	x Pi >> Hp	Ps Kg/cm <sup>2</sup>	Pd	x Pd >> Hd	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (Hd - Hs)	He (Hp - Hd)	FRR Qs/Qj	Head Ratio (H/He)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(H/He) %	Efficiency Y*Q
38	0.00142	1.41556	27.95	10	2.795	0.024	0.0021	0.00068	1.37944	19812.4	2.5	10.01	0	0	4.95145	25.025	0	0.49514	24.5299	0.48203	0.02019	0.02163	0.019670269	1.96703	0.97448
39	0.00142	1.41556	12.95	5	2.57	0.01	0.002	0.00058	1.15444	19424.7	2.5	10.01	0	0	5.05026	25.025	0	1.01005	0.1005	0.41145	0.04206	1.98208	0.034300767	3.43008	0.81553
39	0.00142	1.41556	22.5	10	2.25	0.0178	0.00178	0.00036	0.83444	22549.2	2.5	10.01	0	0	4.35049	25.025	0	1.30515	1.30515	23.7199	0.05502	2.30089	0.0324349	3.24349	0.58948
39	0.00142	1.41556	14.45	10	1.445	0.015	0.00151	9.3E-05	0.02944	3104.57	2.5	10.01	0	0	31.5985	25.025	0	12.6394	12.6394	12.3856	0.06565	1.02049	0.021222552	2.12226	0.0208
39	0.00142	1.41556	13.4	10	1.34	0.0134	0.00134	-7.7E-05	-0.07556	9629.42	2.5	10.01	0	0	10.1875	25.025	0	5.09376	5.09376	19.9313	-0.05433	0.25557	-0.013641914	-1.36419	-0.05338

Nozzle = 8 mm

H1 mmHg	Qj (m <sup>3</sup> /s)	Wj (kgs)	weight(kg)	Time (sec)	Wd (kgs)	Vol(m <sup>3</sup> )	Qd (m <sup>3</sup> /s)	Qs Qd - Qj	Ws Wd - Wj	(Ws/Qs)*g	Pj Kg/cm <sup>2</sup>	x Pi >> Hp	Ps Kg/cm <sup>2</sup>	Pd	x Pd >> Hd	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (Hd - Hs)	He (Hp - Hd)	FRR Qs/Qj	Head Ratio (H/He)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(H/He) %	Efficiency Y*Q	
48	0.001524	1.522861	32	10	3.2	0.024	0.0024	0.000876	1.677139	18789.92	3	10.01001	0	0	5.220824	30.03003	0	0.522088	0.522088	29.5094	0.574405	0.017693	1.917302	0.019466518	1.94662	1.101309
48	0.001524	1.522861	13.85	5	2.77	0.0108	0.00216	0.000536	1.247139	19248.19	3	10.01001	0	0	5.095594	30.03003	0	1.019317	1.019317	29.01071	0.416965	0.035136	1.964063	0.028774568	2.877436	0.818945
48	0.001524	1.522861	17.8	7	2.542857	0.0142	0.002029	0.000904	1.019997	19846.16	3	10.01001	0	0	4.943021	30.03003	0	1.482906	1.482906	28.54712	0.330747	0.051946	2.025079	0.034792947	3.479285	0.66979
48	0.001524	1.522861	15.35	7	2.192857	0.0128	0.001829	0.000304	0.669997	21607.36	3	10.01001	0	0	4.54012	30.03003	0	1.816048	1.816048	28.21398	0.199547	0.064367	2.20479	0.028318836	2.831884	0.439959
48	0.001524	1.522861	13.85	7	1.95	0.0123	0.001757	0.000233	0.427139	18002.56	3	10.01001	0	0	5.449226	30.03003	0	2.997074	2.997074	27.03296	0.15269	0.110867	1.83696	0.031096642	3.109664	0.280485
48	0.001524	1.522861	10.7	7	1.528571	0.0103	0.001471	-5.3E-05	-0.005711	-1057.92	3	10.01001	0	0	-92.7289	30.03003	0	-55.6373	-55.6373	86.66737	-0.03474	-0.64946	-0.10795	-0.002435532	-0.24355	0.00375
48	0.001524	1.522861	19	10	1.3	0.0132	0.00132	-0.0002	-0.22286	10636.79	3	10.01001	0	0	9.170919	30.03003	0	6.419685	6.419685	28.61034	-0.13408	0.271901	1.091488	-0.039790963	-3.9791	-0.14634

Nozzle = 8 mm

H1 mmHg	Qj (m <sup>3</sup> /s)	Wj (kgs)	weight(kg)	Time (sec)	Wd (kgs)	Vol(m <sup>3</sup> )	Qd (m <sup>3</sup> /s)	Qs Qd - Qj	Ws Wd - Wj	(Ws/Qs)*g	Pj Kg/cm <sup>2</sup>	x Pi >> Hp	Ps Kg/cm <sup>2</sup>	Pd	x Pd >> Hd	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (Hd - Hs)	He (Hp - Hd)	FRR Qs/Qj	Head Ratio (H/He)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(H/He) %	Efficiency Y*Q	
55	0.00136	1.35947	17.9	5	3.58	0.0137	0.00274	0.00138	2.22053	15794.6	3	10.01	0	0	6.21098	35.035	0	0.6211	0.6211	34.4139	1.01347	0.01805	1.61166	0.029478884	2.94789	1.63337
55	0.00136	1.35947	28	10	2.8	0.0252	0.00252	0.00116	1.44083	12191.2	3	10.01	0	0	8.04682	35.035	0	1.60936	1.60936	33.4257	0.8518	0.04815	1.24397	0.051018102	5.10181	1.05962
55	0.00136	1.35947	15.25	5	3.05	0.012	0.0024	0.00104	1.69063	15958	3	10.01	0	0	6.14699	35.035	0	1.8441	1.8441	33.1909	0.76362	0.05556	1.62844	0.069090039	6.909	1.24351
55	0.00136	1.35947	13.75	5	2.75	0.0112	0.00224	0.00088	1.39083	15515.9	3	10.01	0	0	6.32254	35.035	0	2.52901	2.52901	32.506	0.64605	0.0778	1.58323	0.079578506	7.95785	1.02284
55	0.00136	1.35947	13.05	5	2.61	0.011	0.0022	0.00084	1.25053	14618.9	3	10.01	0	0	6.7105	35.035	0	3.35525	3.35525	31.6798	0.61665	0.10591	1.49169	0.097423635	9.74236	0.91986
55	0.00136	1.35947	12.75	5	2.55	0.0099	0.00198	0.00062	1.19063	18662.6	3	10.01	0	0	5.20077	35.035	0	3.12046	3.12046	31.9146	0.45499	0.09778	1.92472	0.085624461	8.56245	0.87573
55	0.00136	1.35947	17.9	10	1.79	0.0162	0.00162	0.00026	0.43063	16296.4	3	10.01	0	0	6.01973	35.035	0	4.5148	4.5148	30.5202	0.19045	0.14793	1.66287	0.046846718	4.68467	0.31669

Nozzle = 10 mm

H1 mmHg	Qj (m³/s)	Wj (kgs)	weight(kg)	Time (sec)	Wd (kgs)	Vol(m³)	Qd (m³/s)	Qs (m³/s)	Ws (Ws/Qs)g	Pj (kg/cm²)	Pj >> Hp (kg/cm²)	x Pd >> Hd	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (Hd - Hs) (Hp - Hd)	He (Hp - Hd)	FRR Qs/Qj	Head Ratio (H/Hc)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(H/Hc) %	Efficiency Y*Q	
62	0.00174	1.73795	14.3	5	2.86	0.0117	0.00234	0.0006	1.12205	18336	10.01	5.35014	15.015	0	0.53501	0.53501	14.48	0.34507	0.03695	1.87098	0.023864735	2.38547	0.64662
62	0.00174	1.73795	13.4	5	2.68	0.011	0.0022	0.00046	0.94205	20076.6	10.01	4.86629	15.015	0	0.73294	0.73294	14.2821	0.2646	0.05132	2.04859	0.02781757	2.78176	0.94205
62	0.00174	1.73795	12.5	5	2.5	0.0106	0.0021	0.00036	0.76205	20747.8	10.01	4.7282	15.015	0	0.94564	0.94564	14.0694	0.20712	0.06721	2.11708	0.029471457	2.94715	0.43848
62	0.00174	1.73795	11.75	5	2.35	0.0102	0.00204	0.0003	0.61205	19993.2	10.01	4.90667	15.015	0	1.22667	1.22667	13.7883	0.17263	0.08896	2.04008	0.031330612	3.13306	0.35217
62	0.00174	1.73795	11.15	5	2.23	0.0099	0.00198	0.00024	0.49205	20066.4	10.01	4.88331	15.015	0	1.46517	1.46517	13.5498	0.13814	0.10813	2.04959	0.030614841	3.06148	0.28312
62	0.00174	1.73795	8.75	5	1.75	0.0087	0.00174	3.2E-07	0.01205	375298	10.01	0.28139	15.015	0	0.10456	0.10456	14.9105	0.00018	0.00701	38.2949	4.86391E-05	0.00486	0.00694
62	0.00174	1.73795	13.55	10	1.355	0.0141	0.00141	-0.00033	-0.38295	11984.8	10.01	8.60819	15.015	0	4.3046	4.3046	10.7104	-0.18951	0.40191	1.6271	-0.08855739	-8.85577	-0.22034

Nozzle = 10 mm

H1 mmHg	Qj (m³/s)	Wj (kgs)	weight(kg)	Time (sec)	Wd (kgs)	Vol(m³)	Qd (m³/s)	Qs (m³/s)	Ws (Ws/Qs)g	Pj (kg/cm²)	Pj >> Hp (kg/cm²)	x Pd >> Hd	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (Hd - Hs) (Hp - Hd)	He (Hp - Hd)	FRR Qs/Qj	Head Ratio (H/Hc)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(H/Hc) %	Efficiency Y*Q	
80	0.00195	1.9455	16.5	5	3.3	0.0134	0.00268	0.00073	1.3545	18138.8	10.01	5.40829	20.02	0	0.54083	0.54083	19.4792	0.37616	0.02776	1.85086	0.019330227	1.93302	0.69622
80	0.00195	1.9455	16.25	5	3.25	0.013	0.00262	0.00067	1.2045	19027.7	10.01	5.15684	20.02	0	0.77335	0.77335	19.2467	0.34535	0.04018	1.94157	0.026942065	2.69421	0.67052
80	0.00195	1.9455	15.75	5	3.15	0.0129	0.00258	0.00063	1.2045	18680.1	10.01	5.25158	20.02	0	1.05032	1.05032	18.9697	0.32481	0.05537	1.9061	0.034279555	3.42796	0.61912
80	0.00195	1.9455	15	5	3	0.0125	0.0025	0.00055	1.0545	18721.6	10.01	5.23959	20.02	0	1.30969	1.30969	18.71	0.28373	0.07002	1.91033	0.037949889	3.79497	0.54202
80	0.00195	1.9455	14.2	5	2.84	0.0123	0.00246	0.00051	0.8945	17120.3	10.01	5.73005	20.02	0	1.71901	1.71901	18.301	0.26319	0.09393	1.74693	0.043187084	4.31871	0.45978
80	0.00195	1.9455	14	5	2.8	0.0121	0.00242	0.00047	0.8545	17739.1	10.01	5.53017	20.02	0	1.93556	1.93556	18.0845	0.24285	0.10703	1.81007	0.047009083	4.70091	0.43922
80	0.00195	1.9455	13.15	5	2.63	0.01125	0.00225	0.0003	0.6845	22194.3	10.01	4.42006	20.02	0	1.78802	1.78802	18.252	0.15536	0.09687	2.26468	0.034081587	3.40816	0.35184
80	0.00195	1.9455	11.55	5	2.31	0.0102	0.00204	9.3E-05	0.3645	38634.6	10.01	2.53917	20.02	0	1.26959	1.26959	18.7504	0.04753	0.06771	3.94223	0.012685798	1.26858	0.18736
80	0.00195	1.9455	19.25	10	1.925	0.0185	0.00185	-9.7E-05	-0.0205	2063.7	10.01	47.5361	20.02	0	30.8984	30.8984	-10.8784	-0.05004	-2.84034	0.21058	0.02992852	2.99285	-0.01054
80	0.00195	1.9455	14.8	10	1.49	0.0155	0.00155	-0.00039	-0.4555	11533.1	10.01	8.50598	20.02	0	6.80478	6.80478	13.2152	-0.19895	0.51492	1.17682	-0.120558068	-12.0558	-0.23413

Nozzle = 10 mm

H1 mmHg	Qj (m³/s)	Wj (kgs)	weight(kg)	Time (sec)	Wd (kgs)	Vol(m³)	Qd (m³/s)	Qs (m³/s)	Ws (Ws/Qs)g	Pj (kg/cm²)	Pj >> Hp (kg/cm²)	x Pd >> Hd	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (Hd - Hs) (Hp - Hd)	He (Hp - Hd)	FRR Qs/Qj	Head Ratio (H/Hc)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(H/Hc) %	Efficiency Y*Q	
110	0.002242	2.239979	19.95	5	3.99	0.0161	0.00302	0.00078	1.750021	22072.73	10.01001	4.444397	25.02503	0	0.44444	0.44444	24.58059	0.346879	0.018081	2.252276	0.014126027	1.412603	0.781267
110	0.002242	2.239979	18.7	5	3.74	0.015	0.003	0.000758	1.500021	19418.87	10.01001	5.051788	25.02503	0	1.010358	1.010358	24.01467	0.337959	0.042073	1.981479	0.028174227	2.817423	0.669659
110	0.002242	2.239979	17.3	5	3.46	0.0141	0.00282	0.000578	1.220021	20714.51	10.01001	4.738811	25.02503	0	1.420743	1.420743	23.60428	0.257682	0.06019	2.113685	0.032782965	3.278296	0.544657
110	0.002242	2.239979	16.25	5	3.27	0.0135	0.0027	0.000458	1.050021	22072.9	10.01001	4.444394	25.02503	0	1.777746	1.777746	23.24728	0.204163	0.076471	2.252283	0.035164117	3.516412	0.459835
110	0.002242	2.239979	14.7	5	2.94	0.0122	0.00252	0.000278	0.700021	24721.85	10.01001	3.98815	25.02503	0	1.984075	1.984075	23.04095	0.123886	0.086111	2.622588	0.026910698	2.69107	0.312512
110	0.002242	2.239979	13.65	5	2.73	0.012	0.0024	0.000158	0.490021	30467.35	10.01001	3.219389	25.02503	0	1.931803	1.931803	23.09312	0.070367	0.083657	3.108854	0.01830095	1.830095	0.218761
110	0.002242	2.239979	12.23	5	2.45	0.0111	0.00222	-2.2E-05	0.210021	-92718.5	10.01001	-1.05804	25.02503	0	-0.74063	-0.74063	25.76565	-0.00991	-0.02874	-9.46089	-0.002695122	-0.26951	0.09376
110	0.002242	2.239979	10.6	5	2.12	0.01	0.002	-0.00024	-0.11988	4859.167	10.01001	20.18665	25.02503	0	16.15092	16.15092	8.874109	-0.10803	1.820004	0.495824	-0.097483988	-9.7484	-0.05356
110	0.002242	2.239979	10.15	5	2.03	0.0099	0.00198	-0.00026	-0.20988	7855.557	10.01001	12.48798	25.02503	0	11.23918	11.23918	13.78985	-0.11695	0.815269	0.801572	-0.076424524	-7.64245	-0.09374
110	0.002242	2.239979	8.45	5	1.69	0.009	0.0018	-0.00044	-0.54988	12200.44	10.01001	8.04632	25.02503	0	8.844762	8.844762	16.18026	-0.19722	0.546639	1.244919	-0.134215486	-13.4215	-0.24553

ด้านการค้า  
ทั่วไป

Nozzle = 10 mm

HI mmHg	Qj (m <sup>3</sup> /s)	Wj (kg/s)	Weight(kg)	Time (sec)	Wd (kg/s)	vol.(m <sup>3</sup> )	Qd (m <sup>3</sup> /s)	Qs Qd - Qj	Ws Wd - Wj	(Ws/Qs) <sup>2</sup> (Ns)	Pj (kg/cm <sup>2</sup> )	x Pj >> Hp	Ps kg/cm <sup>2</sup>	x Pd >> Hd	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (Hd - Hs)	He (Hp - Hd)	FRR Qs/Qj	lead Ratio (HI/He)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(HI/He) %	Efficiency %	Y'Q	
120	0.00233	2.32793	21.45	5	4.29	0.01575	0.00335	0.00102	1.95207	18875.3	5	10.01	0	0.1	5.19728	30.03	0	0.51973	0.51973	29.5103	0.43761	0.01761	1.92601	0.01484391	1.48439	0.84284
120	0.00233	2.32793	21.4	5	4.28	0.017	0.0034	0.00107	1.95207	17901.3	3	10.01	0	0.2	5.48004	30.03	0	1.09601	1.09601	28.934	0.45907	0.03788	1.82663	0.031763757	3.17638	0.83855
120	0.00233	2.32793	20.4	5	4.08	0.0161	0.00322	0.00089	1.75207	19317.7	3	10.01	0	0.3	5.07823	30.03	0	1.52347	1.52347	28.566	0.38182	0.06344	1.97116	0.040222802	4.02228	0.75263
120	0.00233	2.32793	17.9	5	3.58	0.01475	0.00295	0.00062	1.52207	19819.2	3	10.01	0	0.4	4.94974	30.03	0	1.9799	1.9799	28.0501	0.26596	0.07058	2.02233	0.037963668	3.79637	0.53785
120	0.00233	2.32793	17.75	5	3.55	0.0141	0.00282	0.00049	1.22207	24479.2	3	10.01	0	0.5	4.00748	30.03	0	2.00374	2.00374	28.0263	0.21017	0.0715	2.49783	0.037532225	3.75322	0.52496
120	0.00233	2.32793	15.75	5	3.15	0.0136	0.00272	0.00039	0.82207	20591.9	3	10.01	0	0.6	4.74098	30.03	0	2.84459	2.84459	27.1854	0.16725	0.10464	2.11138	0.036950905	3.69509	0.35314
120	0.00233	2.32793	15.1	5	3.02	0.013	0.0026	0.00027	0.69207	25169.2	3	10.01	0	0.7	3.89762	30.03	0	2.72833	2.72833	27.3017	0.11576	0.09993	2.56824	0.029709195	2.97092	0.29729
120	0.00233	2.32793	13.6	5	2.72	0.0123	0.00246	0.00013	0.39207	29544.9	3	10.01	0	0.8	3.30917	30.03	0	2.64783	2.64783	27.3827	0.05568	0.08668	3.02493	0.016282896	1.62829	0.16842
120	0.00233	2.32793	11.4	5	2.28	0.011	0.0022	-0.00013	-0.04783	3909.45	3	10.01	0	0.9	2.71787	30.03	0	24.4608	24.4608	5.5692	-0.0559	4.39215	0.3683	-0.09402266	-9.40227	-0.02059
120	0.00233	2.32793	10.3	5	2.06	0.0107	0.00202	-0.00031	-0.26793	8471.56	3	10.01	0	1.0	11.5799	30.03	0	12.7379	12.7379	17.2921	-0.13314	0.73663	0.86443	-0.084780463	-8.47805	-0.11509
120	0.00233	2.32793	9.2	5	1.84	0.01	0.002	-0.00035	-0.46793	14493.5	3	10.01	0	1.1	6.76657	30.03	0	8.12229	8.12229	21.9077	-0.14173	0.37075	1.4789	-0.07707918	-7.7079	-0.2096

Nozzle = 10 mm

HI mmHg	Qj (m <sup>3</sup> /s)	Wj (kg/s)	Weight(kg)	Time (sec)	Wd (kg/s)	vol.(m <sup>3</sup> )	Qd (m <sup>3</sup> /s)	Qs Qd - Qj	Ws Wd - Wj	(Ws/Qs) <sup>2</sup> (Ns)	Pj (kg/cm <sup>2</sup> )	x Pj >> Hp	Ps kg/cm <sup>2</sup>	x Pd >> Hd	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (Hd - Hs)	He (Hp - Hd)	FRR Qs/Qj	lead Ratio (HI/He)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(HI/He) %	Efficiency %	Y'Q	
143	0.00207	2.06304	22.8	5	4.56	0.0165	0.0037	0.00163	2.49696	14882.7	5	10.01	0	0.1	6.54755	35.035	0	0.65475	0.65475	34.3803	0.79168	0.01904	1.52882	0.023050204	2.30502	1.21033
143	0.00207	2.06304	22.65	5	4.53	0.0175	0.0035	0.00143	2.46696	16865.9	5	10.01	0	0.2	5.81646	35.035	0	1.16329	1.16329	33.8717	0.69483	0.03434	1.72098	0.041086833	4.10863	1.19579
143	0.00207	2.06304	22.4	5	4.48	0.0172	0.00344	0.00137	2.41696	17245.2	5	10.01	0	0.3	5.86854	35.035	0	1.70656	1.70656	33.3285	0.66578	0.0512	1.75968	0.059988761	5.99888	1.17156
143	0.00207	2.06304	21.95	5	4.39	0.017	0.00336	0.00133	2.32696	17100.6	5	10.01	0	0.4	5.73666	35.035	0	2.29466	2.29466	32.7404	0.64641	0.07009	1.74492	0.079052944	7.90529	1.12793
143	0.00207	2.06304	21.8	5	4.36	0.0168	0.00336	0.00129	2.29696	17401.5	5	10.01	0	0.5	5.63744	35.035	0	2.81872	2.81872	32.2163	0.62704	0.08749	1.77563	0.097414429	9.74144	1.11339
143	0.00207	2.06304	21.25	5	4.25	0.0153	0.00316	0.00109	2.18696	19594.6	5	10.01	0	0.6	5.00648	35.035	0	3.00889	3.00889	32.0311	0.53019	0.09378	1.99941	0.099413667	9.94137	1.06007
143	0.00207	2.06304	17.5	5	3.5	0.01475	0.00295	0.00088	1.43696	15930.2	5	10.01	0	0.7	6.15812	35.035	0	4.31088	4.31088	30.7244	0.4285	0.1403	1.6255	0.097724233	9.77242	0.69653
143	0.00207	2.06304	16	5	3.2	0.0141	0.00282	0.00075	1.13696	14775	5	10.01	0	0.8	6.6366	35.035	0	5.31168	5.31168	29.7234	0.36555	0.1787	1.50762	0.098485955	9.8486	0.55111
143	0.00207	2.06304	15.5	5	3.1	0.0138	0.00276	0.00069	1.03696	14639	5	10.01	0	0.9	6.70128	35.035	0	6.36622	6.36622	28.6688	0.3365	0.22206	1.49375	0.111616614	11.1617	0.50264
143	0.00207	2.06304	14.26	5	2.85	0.013	0.0026	0.00063	0.78696	14432.9	5	10.01	0	1.0	6.76989	35.035	0	7.13694	7.13694	27.9992	0.25902	0.25582	1.47271	0.097583943	9.75839	0.38146
143	0.00207	2.06304	11.3	5	2.26	0.0111	0.00222	0.00015	0.19696	12474	5	10.01	0	1.1	7.86433	35.035	0	9.04398	9.04398	25.9911	0.07501	0.34796	1.27284	0.033221255	3.32213	0.09547
143	0.00207	2.06304	9.45	5	1.89	0.0098	0.00198	-8.5E-05	-0.17304	19949.7	5	10.01	0	1.2	4.91811	35.035	0	6.39854	6.39854	28.6415	-0.04121	0.22323	2.03534	-0.018722983	-1.8723	-0.08387

ซึ่งประโยชน์ด้านการค้า  
รังสีที่มีการนำไปใช้

Nozzle = 12 mm

H1 mmHg	Qj (m <sup>3</sup> /s)	Wj (kg/s)	height(kg)	Time (sec)	Wd (kgs)	vol(m <sup>3</sup> )	Qd (m <sup>3</sup> /s)	Qs Qd - Qj	Ws Wd-Wj	Wj (Ys)	Pj Kg/cm <sup>2</sup>	x Pi >> Hp	Ps Kg/cm <sup>2</sup>	Pd >> Hd (Kg/cm <sup>2</sup> )	x	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (Hd - Hs)	He (Hp - Hd)	FRR Qs/Qj	-lead Ratc (H/He)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(H/He)	Efficiency %	Y*Q
118	0.0019	1.90249	16.35	5	3.27	0.0145	0.0029	0.001	1.36751	13474.5	1.5	10.01	0	0	0	0.72804	0.72804	0.72804	0	14.287	0.52279	0.05096	1.37492	0.036629017	3.6629	0.7188
118	0.0019	1.90249	15.5	5	3.1	0.0132	0.00264	0.00074	1.19751	15669.9	1.5	10.01	0	0	0.2	6.1428	6.1428	6.1428	0	13.7865	0.38627	0.08911	1.62955	0.056091962	5.6092	0.62944
118	0.0019	1.90249	14.5	5	2.9	0.013	0.0026	0.0007	0.99751	14067.7	1.5	10.01	0	0	0.3	6.97342	6.97342	6.97342	0	12.923	0.35526	0.16188	1.43545	0.084878881	8.48789	0.52432
118	0.0019	1.90249	13.4	5	2.68	0.0122	0.00244	0.00054	0.77751	14240.6	1.5	10.01	0	0	0.4	6.88873	6.88873	6.88873	0	12.5549	0.28125	0.22476	1.4631	0.091865619	9.18656	0.40868
118	0.0019	1.90249	11.5	5	2.3	0.011	0.0022	0.0003	0.39751	13191.8	1.5	10.01	0	0	0.5	7.43644	7.43644	7.43644	0	11.2968	0.15522	0.32914	1.34608	0.068771149	6.87711	0.20894
118	0.0019	1.90249	10.5	5	2.1	0.0103	0.00206	0.00016	0.19751	12451.8	1.5	10.01	0	0	0.6	7.87837	7.87837	7.87837	0	10.288	0.08171	0.45947	1.27057	0.047700823	4.77008	0.10382

Nozzle = 12 mm

H1 mmHg	Qj (m <sup>3</sup> /s)	Wj (kds)	height(kg)	Time (sec)	Wd (kgs)	vol(m <sup>3</sup> )	Qd (m <sup>3</sup> /s)	Qs Qd - Qj	Ws Wd-Wj	Wj (Ys)	Pj Kg/cm <sup>2</sup>	x Pi >> Hp	Ps Kg/cm <sup>2</sup>	Pd >> Hd (Kg/cm <sup>2</sup> )	x	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (Hd - Hs)	He (Hp - Hd)	FRR Qs/Qj	-lead Ratc (H/He)	Ys/Yw	Efficiency (Ys/Yw)*(Qs/Qj)*(H/He)	Efficiency %	Y*Q
144	0.00208	2.0755	18	5	3.6	0.0168	0.00316	0.00108	1.5245	13816.6	1.5	10.01	0	0	0.1	7.10018	7.10018	7.10018	0	19.31	0.521	0.03677	1.40983	0.02700794	2.70079	0.73452
144	0.00208	2.0755	17.75	5	3.55	0.0164	0.00308	0.001	1.4745	14429.9	1.5	10.01	0	0	0.15	6.78839	6.78839	6.78839	0	19.0003	0.4825	0.05367	1.47241	0.038129353	3.81294	0.71043
144	0.00208	2.0755	17.55	5	3.51	0.0163	0.00306	0.00098	1.4345	14324.2	1.5	10.01	0	0	0.2	6.84653	6.84653	6.84653	0	18.6503	0.47287	0.07344	1.46163	0.050759708	5.07597	0.69116
144	0.00208	2.0755	17.35	5	3.47	0.0162	0.00304	0.00095	1.3945	14214.2	1.5	10.01	0	0	0.25	6.90156	6.90156	6.90156	0	18.2946	0.46324	0.09431	1.4504	0.063366406	6.33664	0.67189
144	0.00208	2.0755	16.9	5	3.38	0.01515	0.00303	0.00095	1.3045	13436.4	1.5	10.01	0	0	0.3	7.30105	7.30105	7.30105	0	17.8297	0.45843	0.12285	1.37104	0.07721805	7.72118	0.62862
144	0.00208	2.0755	16.7	5	3.34	0.0151	0.00302	0.00094	1.2645	13162.6	1.5	10.01	0	0	0.35	7.45292	7.45292	7.45292	0	17.4115	0.45362	0.14982	1.3431	0.091275565	9.12756	0.60925
144	0.00208	2.0755	16.6	5	3.32	0.0151	0.00302	0.00094	1.2445	12954.4	1.5	10.01	0	0	0.4	7.5727	7.5727	7.5727	0	16.9909	0.45362	0.17828	1.32186	0.10689691	10.6897	0.59961
144	0.00208	2.0755	16.4	5	3.28	0.0148	0.00298	0.0009	1.2045	13093.8	1.5	10.01	0	0	0.45	7.49209	7.49209	7.49209	0	16.6486	0.43436	0.20251	1.33608	0.117522813	11.7523	0.58004
144	0.00208	2.0755	16.25	5	3.25	0.0148	0.00298	0.0009	1.1745	12767.7	1.5	10.01	0	0	0.5	7.68346	7.68346	7.68346	0	16.1783	0.43436	0.23746	1.3028	0.134376778	13.4377	0.56589
144	0.00208	2.0755	15.8	5	3.16	0.0145	0.0029	0.00082	1.0845	12936.1	1.5	10.01	0	0	0.55	7.58342	7.58342	7.58342	0	15.8491	0.39586	0.26316	1.31999	0.137508315	13.7508	0.52282
144	0.00208	2.0755	15.5	5	3.1	0.0142	0.00284	0.00076	1.0245	13182.1	1.5	10.01	0	0	0.6	8.16758	8.16758	8.16758	0	15.5549	0.36698	0.28706	1.34509	0.141695845	14.1696	0.49362
144	0.00208	2.0755	14.8	5	2.96	0.014	0.0028	0.00072	0.8845	12010.9	1.5	10.01	0	0	0.65	8.16758	8.16758	8.16758	0	14.7111	0.34772	0.36088	1.22558	0.153792984	15.3793	0.42616
144	0.00208	2.0755	11.2	5	2.24	0.0109	0.00218	0.0001	0.1645	15755.8	1.5	10.01	0	0	0.7	6.22628	6.22628	6.22628	0	15.6616	0.0493	0.27828	1.6077	0.022056245	2.20562	0.07926
144	0.00208	2.0755	12.65	5	2.53	0.0121	0.00242	0.00034	0.4545	13020.9	1.5	10.01	0	0	0.75	7.53404	7.53404	7.53404	0	14.3695	0.16482	0.39323	1.32864	0.086111039	8.6111	0.21898
144	0.00208	2.0755	10.2	5	2.04	0.01	0.002	-7.8E-06	-0.0356	4489.15	1.5	10.01	0	0	0.8	21.8327	21.8327	21.8327	0	12.0078	-0.03734	6.88853	0.45807	-0.117825017	-11.7825	-0.0171
144	0.00208	2.0755	12.75	5	2.55	0.0125	0.0025	0.00042	0.4745	11019.4	1.5	10.01	0	0	0.85	8.90247	8.90247	8.90247	0	12.0078	0.20332	0.66725	1.2441	0.152546759	15.2547	0.22862
144	0.00208	2.0755	10.75	5	2.15	0.0108	0.00216	8.2E-05	0.0745	8867.06	1.5	10.01	0	0	0.9	11.0634	11.0634	11.0634	0	8.9566	0.03967	1.25523	0.90478	0.044338095	4.43381	0.03589

ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
อีกครั้งที่มีการนำไปใช้

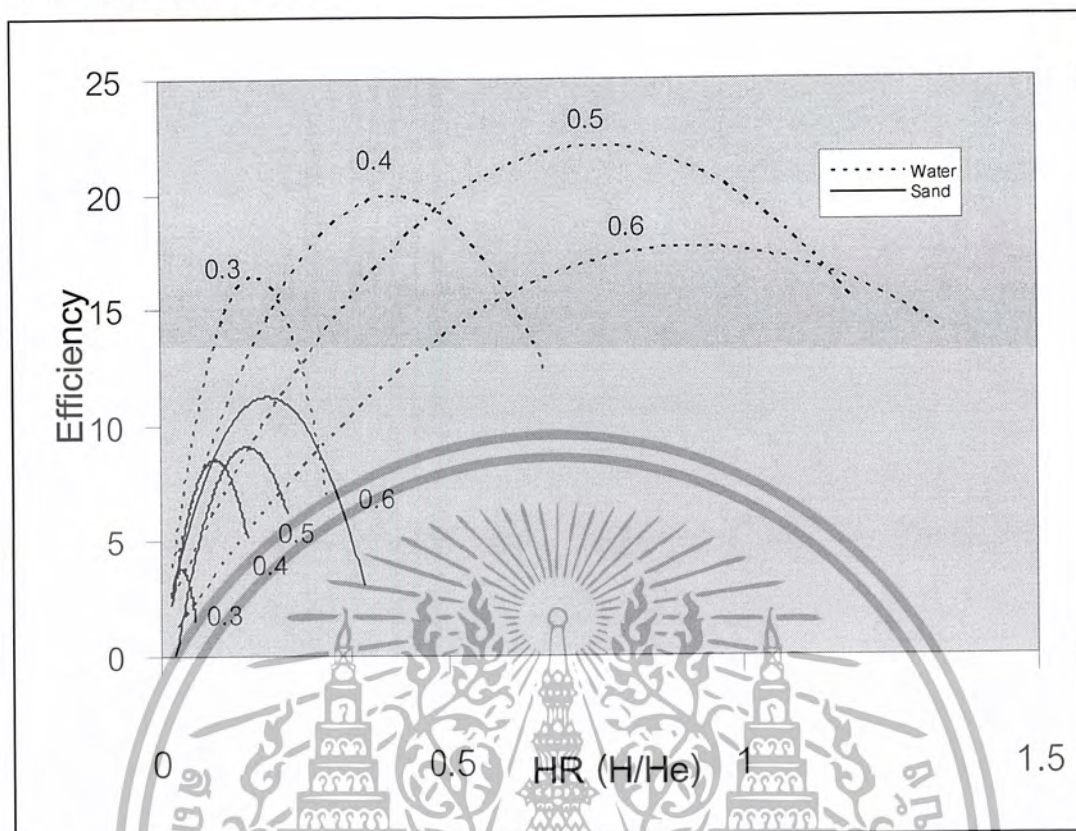
Nozzle = 12 mm													
Hr	Qj	Wj	weight(kg)	Time	Wd	Wd	Ws	Ws	Qs	Qd	Qs	Ws	(Ws/Qs)*g
mmHg	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)		(sec)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)	(kg/cm <sup>2</sup> )
195	0.002372	2.369609	20.75	5	4.15	0.016	0.00362	0.001248	1.780391	13964.69	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	20.25	5	4.05	0.0178	0.00356	0.001188	1.680391	13875.73	2.6	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	20	5	4	0.0175	0.0035	0.001128	1.630391	14178.96	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	19.7	5	3.94	0.01725	0.00345	0.001078	1.570391	14290.6	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	19.4	5	3.88	0.017	0.0034	0.001028	1.510391	14413.1	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	19.1	5	3.82	0.0168	0.00336	0.000988	1.450391	14400.87	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	18.25	5	3.65	0.016	0.0032	0.000828	1.280391	15169.5	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	16.75	5	3.35	0.0155	0.0031	0.000728	0.980391	18210.69	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	16.55	5	3.31	0.01525	0.00305	0.000678	0.940391	18606.16	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	16.3	5	3.18	0.015	0.003	0.000628	0.910391	18688.75	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	14.65	5	2.93	0.0144	0.00282	0.000448	0.860391	12270.54	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	14.75	5	2.95	0.0143	0.00286	0.000468	0.880391	11666.83	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	11.9	5	2.36	0.012	0.0024	2.8E-05	-0.00951	-3364.35	2.5	0.0101001	0

Nozzle = 12 mm													
Hr	Qj	Wj	weight(kg)	Time	Wd	Wd	Ws	Ws	Qs	Qd	Qs	Ws	(Ws/Qs)*g
mmHg	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)		(sec)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)	(kg/cm <sup>2</sup> )
230	0.00255	2.54691	21.75	5	4.35	0.0165	0.0039	0.00135	1.80309	13097.2	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	21.55	5	4.31	0.0164	0.00388	0.00133	1.76309	12996.2	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	21.45	5	4.29	0.01625	0.00385	0.0013	1.74309	13148.2	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	21.3	5	4.26	0.0161	0.00382	0.00127	1.71309	13227	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	21	5	4.2	0.016	0.0038	0.00125	1.65309	12967.8	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	20.8	5	4.16	0.0168	0.00376	0.00121	1.61309	13072.2	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	20.5	5	4.1	0.0165	0.0037	0.00115	1.55309	13242.3	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	20.05	5	4.01	0.01625	0.00365	0.0011	1.46309	13041.7	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	19.2	5	3.84	0.016	0.0036	0.00105	1.28309	12074.9	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	19.1	5	3.82	0.0175	0.0035	0.00095	1.27309	13138.9	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	17.85	5	3.57	0.01625	0.00325	0.0007	1.02309	14326.8	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	17.5	5	3.5	0.016	0.0032	0.00065	0.95309	14372.4	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	16.65	5	3.33	0.0168	0.00318	0.00063	0.78309	12183.4	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	16.15	5	3.03	0.0148	0.00296	0.00041	0.48309	11543.6	10.01	0.0101001	0
230	0.00255	2.54691	13.05	5	2.61	0.0138	0.0027	0.00015	0.06309	4111.22	10.01	0.0101001	0

Yw = 9800.19													
Hr	Qj	Wj	weight(kg)	Time	Wd	Wd	Ws	Ws	Qs	Qd	Qs	Ws	(Ws/Qs)*g
mmHg	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)		(sec)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)	(kg/cm <sup>2</sup> )
195	0.002372	2.369609	20.75	5	4.15	0.016	0.00362	0.001248	1.780391	13964.69	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	20.25	5	4.05	0.0178	0.00356	0.001188	1.680391	13875.73	2.6	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	20	5	4	0.0175	0.0035	0.001128	1.630391	14178.96	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	19.7	5	3.94	0.01725	0.00345	0.001078	1.570391	14290.6	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	19.4	5	3.88	0.017	0.0034	0.001028	1.510391	14413.1	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	19.1	5	3.82	0.0168	0.00336	0.000988	1.450391	14400.87	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	18.25	5	3.65	0.016	0.0032	0.000828	1.280391	15169.5	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	16.75	5	3.35	0.0155	0.0031	0.000728	0.980391	18210.69	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	16.55	5	3.31	0.01525	0.00305	0.000678	0.940391	18606.16	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	16.3	5	3.18	0.015	0.003	0.000628	0.910391	18688.75	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	14.65	5	2.93	0.0144	0.00282	0.000448	0.860391	12270.54	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	14.75	5	2.95	0.0143	0.00286	0.000468	0.880391	11666.83	2.5	0.0101001	0
195	0.002372	2.369609	11.9	5	2.36	0.012	0.0024	2.8E-05	-0.00951	-3364.35	2.5	0.0101001	0

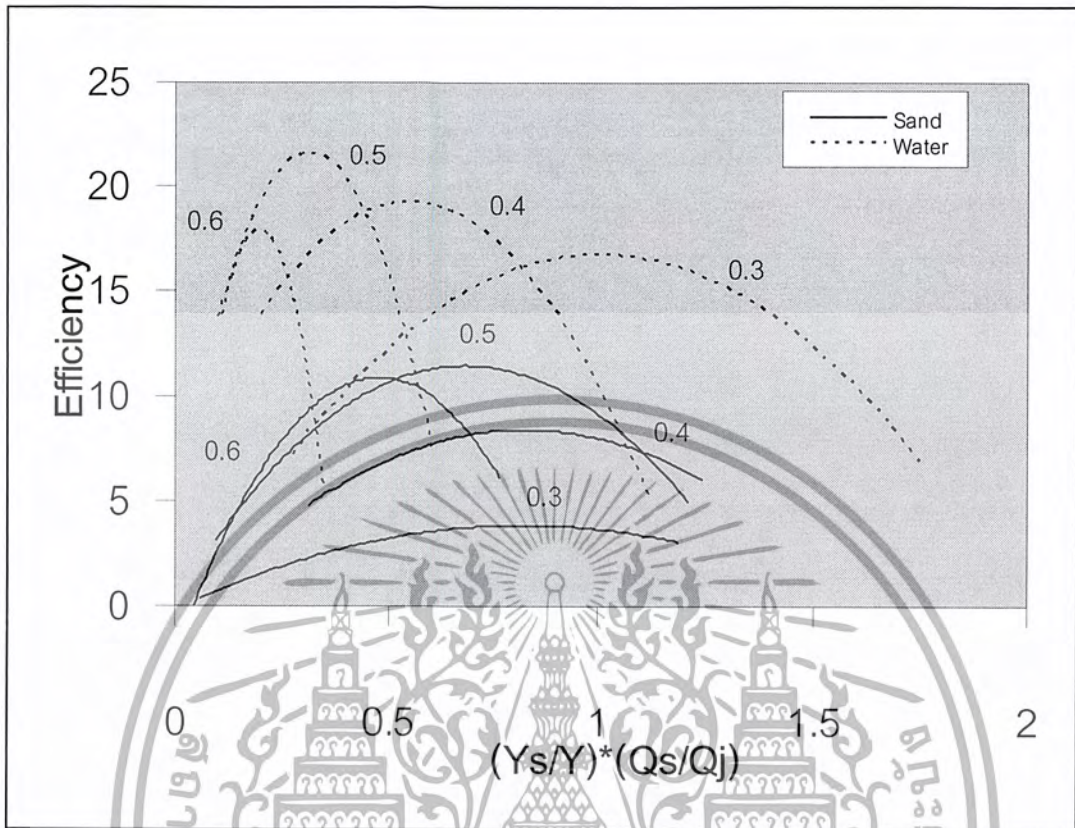


#### 4.6 กราฟที่ได้จากการทดลอง



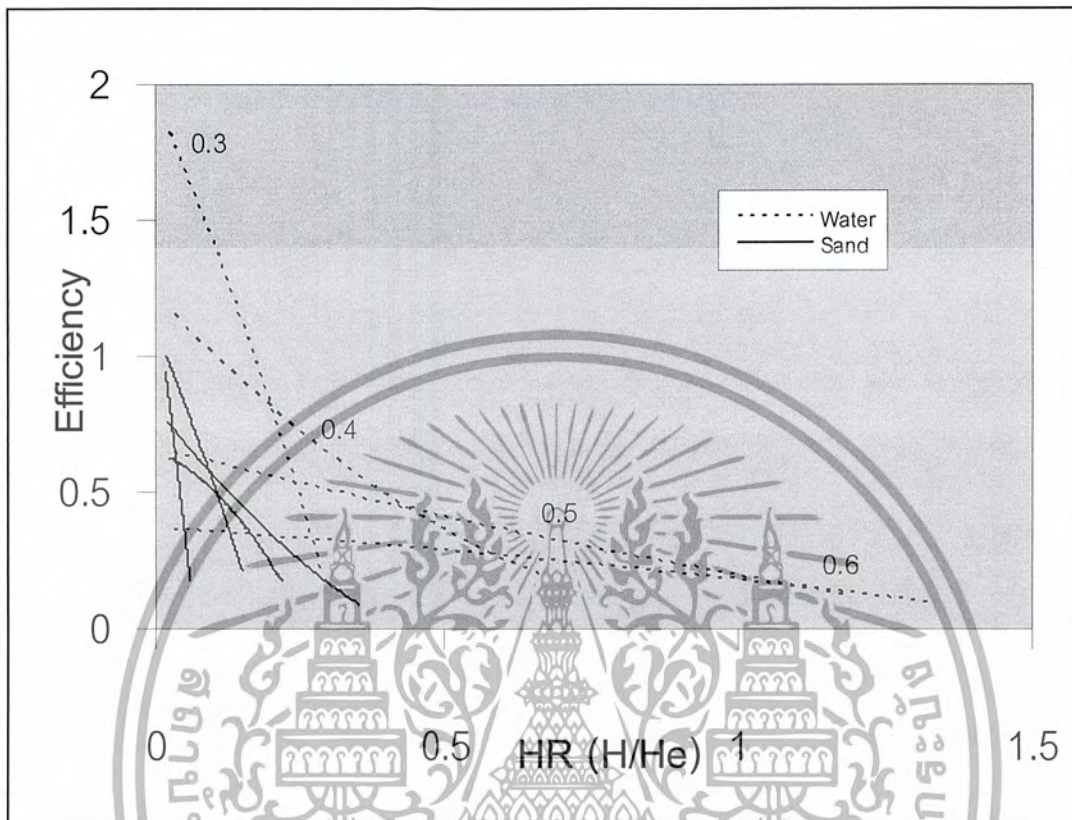
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับอัตราส่วนเฮดของปั๊มคูลน้ำกับปั๊มคูลทรายที่ได้จากการทดลอง

จากกราฟจะเห็นว่ามีความโน้มเอียงเหมือนกัน คือ เมื่อใช้หัวฉีดขนาด 10 มม. ( $d/D = 0.5$ ) จะได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดทั้งสอง การทดลอง โดยปั๊มคูลน้ำจะได้ประสิทธิภาพประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์ และปั๊มคูลทรายจะได้ประสิทธิภาพต่ำกว่า คือ ประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับอัตราส่วนการไหลของปั๊มคูดน้ำกับปั๊มคูดทรายที่ได้จากการทดลอง

จากกราฟจะเห็นว่ามีความโน้มเอียงเหมือนกัน คือ เมื่อใช้หัวฉีดขนาด 10 มม. ( $d/D = 0.5$ ) จะได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดทั้งสอง การทดลอง โดยปั๊มคูดน้ำจะได้ประสิทธิภาพประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์ และปั๊มคูดทรายจะได้ประสิทธิภาพต่ำกว่า คือ ประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์

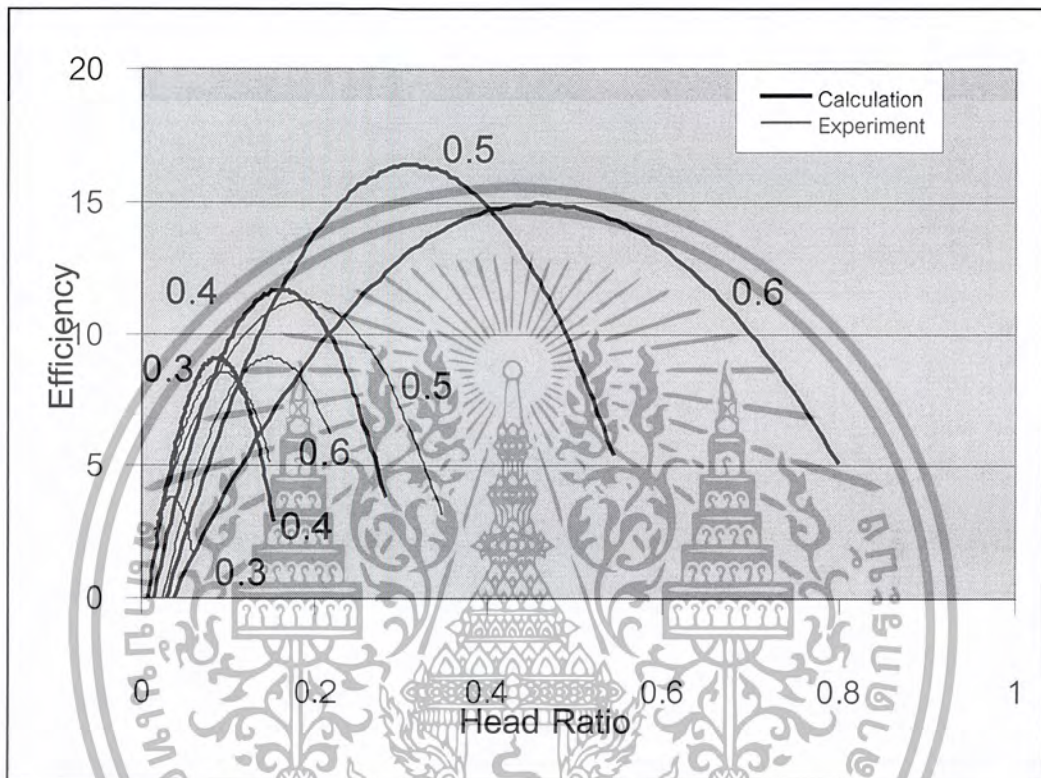


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการไหลกับอัตราส่วนเฮดของปั๊มดูดน้ำกับปั๊มดูดทรายที่ได้จากการทดลอง

จากกราฟจะเห็นว่า หัวฉีดขนาดโตขึ้นจะทำให้อัตราส่วนเฮดเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนการไหลต่ำลง

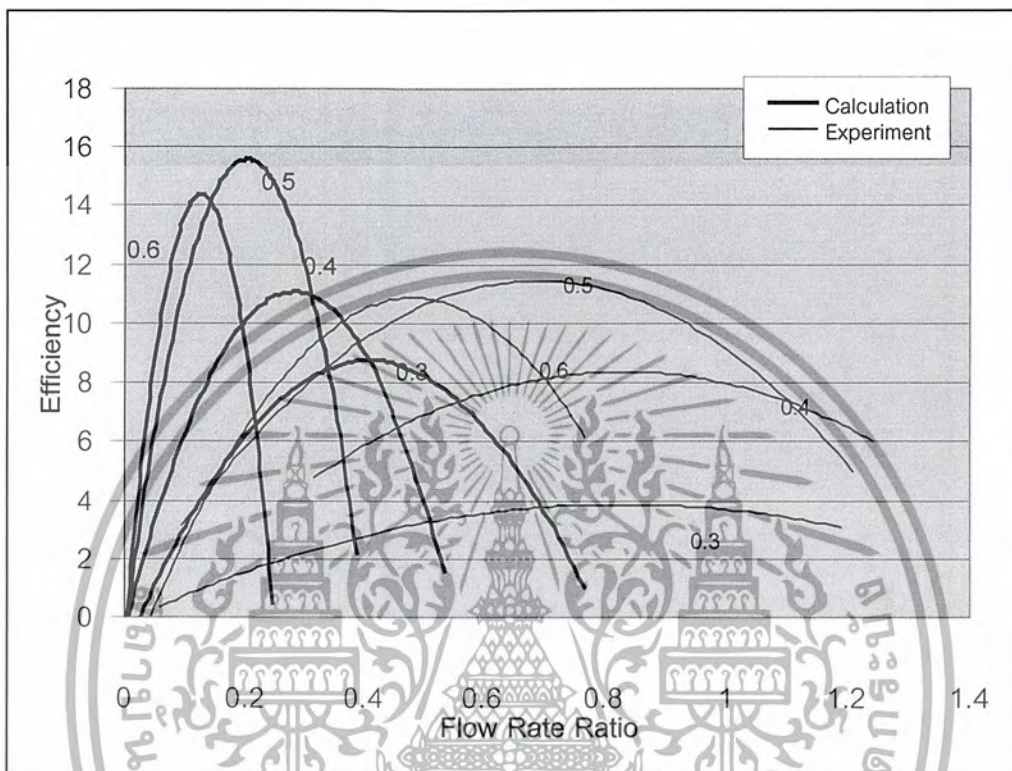
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับการทดลอง



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับอัตราส่วนเสดของผลจากการคำนวณกับผลที่ได้จากการทดลอง

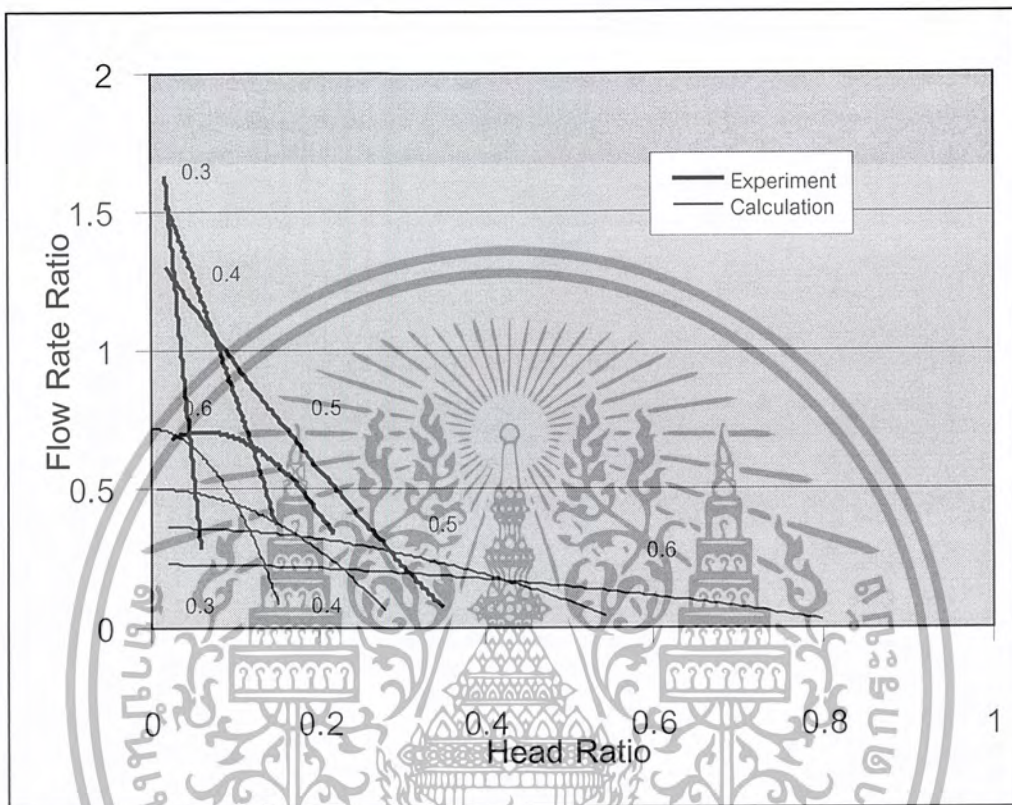
จากกราฟจะเห็นว่ามีความโน้มเอียงเหมือนกันคือเมื่อใช้ หัวฉีดขนาด 10 mm. ( $d/D = 0.5$ ) จะได้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยจากการคำนวณได้ประสิทธิภาพประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราส่วนเสดประมาณ 0.3 และจากการทดลองได้ประสิทธิภาพประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนเสดประมาณ 0.2



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับอัตราส่วนการไหลของผลจากการคำนวณกับผลที่ได้จากการทดลอง

จากกราฟจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กันคือเมื่อใช้ หัวฉีดขนาด 10 mm. ( $d/D = 0.5$ ) จะได้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยจากการคำนวณได้ประสิทธิภาพประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนการไหลประมาณ 0.2 และจากการทดลองได้ประสิทธิภาพประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนการไหลประมาณ 0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการไหลกับอัตราส่วนเฮดของผลจากการคำนวณกับผลที่ได้จากการทดลอง

จากกราฟจะเห็นว่าหัวฉีดขนาดโตขึ้นจะให้อัตราส่วนเฮดเพิ่มขึ้นแต่อัตราส่วนการไหลจะต่ำลงเมื่อขนาดหัวฉีดเพิ่มขึ้น เนื่องจากหัวฉีดขนาดโตขึ้นอัตราการไหลที่ท่อคูดและเฮดที่ท่อส่งยิ่งมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองการศึกษาสมรรถนะของระบบขนถ่ายวัสดุแข็งด้วยเจ็ทปั๊ม โดยหลักการให้ของเหลวไหลผ่านท่อไปยังชุดหัวฉีดที่มีขนาดเล็กกว่าท่อส่งทำให้เกิดความเร็วเพิ่มขึ้นที่ทางด้านปลายของหัวฉีด ซึ่งจะตรงกับท่อทางด้านดูด ทรายที่ความเร็วที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลให้เกิดสูญญากาศที่ท่อดูด ส่งผลให้ทรายทางด้านท่อดูดถูกดึงตัวขึ้นมาผสมกับของเหลวทางด้านท่อฉีดที่ห้องผสม (Mixing Chamber) แล้วส่งของผสมไปยังท่อส่งที่ปล่อยออกไปยังถังฮอปเปอร์ ทรายก็จะตกลงไปด้านล่างและน้ำที่ล้นก็จะลงมาเก็บในถัง

จากการทดลองเราจะได้อัตราต่างๆที่ใกล้เคียง และมีแนวโน้ม คล้ายกับกราฟทางทฤษฎี เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรมทางทฤษฎี จะมีค่าที่แตกต่างกันอยู่เล็กน้อยเนื่องจาก ชุดทดลองที่ไม่สมบูรณ์ การเกิดแรงเสียดทานภายในท่อ และข้อต่อ การปล่อยน้ำที่ท่อส่งเกิดการกระแทกกับผิวหน้าที่ถึงเก็บส่งผลให้ค่าที่เกจ (Hd) คลาดเคลื่อนและมานอมิเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงไม่แน่นอนการทดลองไม่สามารถที่จะใช้ความดันที่สูงที่สุดได้เนื่องจากมานอมิเตอร์รับ ไม่ไหวจึงได้ความดันสูงสุดเพียงแค่  $3.5 \text{ kg/cm}^2$  เท่านั้น

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดสอบในกรณีทดสอบดูดทรายผสมน้ำ จะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพสอดคล้องกัน โดยประสิทธิภาพสูงสุดที่คำนวณได้ประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ ที่สัดส่วนของขนาด Nozzle ( $d/D = 0.5$ )

#### วิจารณ์ผลการทดลอง

ค่าที่ได้จากการทดลองที่ได้ อาจจะมีข้อผิดพลาดบ้าง เนื่องจากการติดตั้งเกจวัดความดันใกล้ข้อต่อ จึงทำให้น้ำที่ไหลผ่านข้อต่อเกิดการปั่นป่วน จะส่งผลทำให้เกจวัดความดันไม่นิ่ง ค่าที่อ่านจากมานอมิเตอร์ต้องอ่านค่าโดยการเฉลี่ยและทำผลการทดลองหลายครั้ง ของผสมที่มีทรายผสมอยู่ไปถูกกับท่อทำให้การวัดอัตราการไหลคลาดเคลื่อน การอ่านค่าบนเกจวัดความดันยังไม่ได้ค่าที่ละเอียดพอ อันเกิดจากการใช้เกจวัดยังหยาบอยู่อยู่ที่ใช้วัดนั้นสามารถรองรับ Load ได้เยอะ แต่ในการปฏิบัติจริงใช้ไม่สูงมากนัก



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## โปรแกรมคำนวณผลทางทฤษฎี ( MATLAB )

```

clear all
beta = 0.09:0.03:0.36;
N2 = length(beta);
T=[0.3 0.2 0.1 0.3;0.7 0.7 0.7 0.7;1.0 1.0 1.0 1.0;0.2 0.2 0.15 0.2;0.3 0.3 0.3 0.3;1.3 1.3 1.2 1.3;1.4 1.7 1.8
1.4;0.8 0.6 0.45 0.3;0.6 0.5 0.5 0.6];
for j=1:N2,
    B=beta(j);
    if B == 0.09
        for x = 1:9;
            y = 1;
            A(x,y)=T(x,y);
        end
    elseif B == 0.16
        for x = 1:9;
            y = 2;
            A(x,y)=T(x,y);
        end
    elseif B == 0.25
        for x=1:9;
            y=3;
            A(x,y)=T(x,y);
        end
    elseif B == 0.36
        for x=1:9;
            y=4;
            A(x,y)=T(x,y);
        end
    elseif 0.09<B<0.16
        for x=1:9;
            y=1;
            A(x,y)=(B-0.09)*(T(x,y+1)-T(x,y))/(0.16-0.09)+T(x,y);
        end
    elseif 0.16<B<0.25

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for x=1:9;
    y=2;
    A(x,y)=(B-0.16)*(T(x,y+1)-T(x,y))/(0.25-0.16)+T(x,y);
end
elseif 0.25<B<0.36
    for x=1:9;
        y=3;
        A(x,y)=(B-0.25)*(T(x,y+1)-T(x,y))/(0.36-0.25)+T(x,y);
    end
end
end

elta=0.01;
i=1;
Kmc=A(1,y);
Ks=A(2,y);
Kj=A(3,y);
Kd=A(4,y);
aj=A(5,y);
as=A(6,y);
ad=A(7,y);
dphi=0.001;
Csd=0.65;
Gw=1000;
Gs=2600;
Gsu=1650;
Md=A(8,y);
Ms=A(9,y);
while (elta>=0.001),
    P=dphi*(i);
    Gd=Gsu*Gw*(P+1)/((Gw*P)+Gsu);
    Cs=Csd*Gsu/Gs;
    Cd=Ms*Cs*P*Gw/(((1-Cs)+Ms*Cs)*(Gsu+P*Gw));
    Cdd=Cd*Gs/Gd;
    Ed=Gd/Gw;
    Esu=Gsu/Gw;
    phi(i,j)=P*Gsu*5/Gw;
    Hd(i)=-((B^2*(1+P)^2*Ed*Gw^2)*(Kd-ad*(1-Cdd+Cdd*Md^2)))/((1-Cd*(1-Md))^2*Gd^2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Hs(i)=P^2*B^2*Gw^2*Esu*(as*(1-Csd+Csd*Ms^2)+Ks)/((1-B)^2*Gsu*(1-Cs*(1-Ms))^2);
Hp(i)=(aj+Kj);
Hdp(i)=2*B+2*P^2*Gw^2*(1-Cs*(1-Ms^2*Gs/Gw))/(Gsu^2*(1-Cs*(1-Ms)^2))-
B*(1+P)*Gw*(2*B+2*B*P*Gw*(1-Cs*(1-Ms*Md*Gs/Gw))/(Gsu*(1-Cs*(1-Ms))))/((1-Cd*(1-Md))*Gd)-
B^2*(1+P)^2*Gw*Kmc/(Gd*(1-Cd*(1-Md)^2));
He(i)=Hp(i)-Hd(i)-Hdp(i);
H(i)=Hd(i)-Hs(i)+Hdp(i);
HR(i,j)=H(i)/He(i);
n(i,j)=Gsu*P*H(i)*1000/(He(i)*Gw);
elta=n(i,j);
i=i+1;
end
end
C1 = 0.1;
C2 = 0.7;
C3 = 1.0;
C4 = 0.2;
C5 = 0.3;
C6 = 1.4;
C7 = 1.3;
G = 0.1:0.05:0.7;
Q = length(G);
W = 0.01;
for F=1:Q
    R =G(F);
    S =0.01;
    E = 1;
    while (S >= 0.001)
        U = W*(E);
        Z(E,F)=U*1.15;
        D1(E) =R*R*(1+U)^2*(C7-C4);
        D2(E) =U^2*R^2*(C6+C2)/(1-R)^2;
        D3(E) =C5+C3;
        D4(E) =2*R+2*U^2*R^2/(1-R)-R^2*(1+U)^2-2*U*R*R*(1+U)+R^2*C1*(1+U)^2;
        D5(E) =D4(E)+D3(E)-D1(E);
        D6(E) =D4(E)+D1(E)-D2(E);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

HEAD(E,F) =D6(E)/D5(E);
EFF(E,F) =U*D6(E)*100*1.5/D5(E);
S =EFF(E,F);
E = E+1;
end
end
figure(1)
plot(HEAD(:,1),EFF(:,1),'k-',HEAD(:,2),EFF(:,2),'k-',HEAD(:,4),EFF(:,4),'k-',HEAD(:,6),EFF(:,6),'k-
.',HR(:,1),n(:,1),'k-',HR(:,3),n(:,3),'k-',HR(:,6),n(:,6),'k-',HR(:,10),n(:,10),'k-');
axis([0 1.0 0 35])
xlabel('Head Ratio (HR)');
ylabel('Efficiency (n)');
text(0.01,25,'d/D=0.3');
text(0.07,29,'d/D=0.4');
text(0.2,30,'d/D=0.5');
text(0.37,25,'d/D=0.6');
legend('(w)d/D=0.3,6 mm.','(w)d/D=0.4,8 mm.','(w)d/D=0.5,10 mm.','(w)d/D=0.6,12 mm.','(s)d/D=0.3,6
mm.','(s)d/D=0.4,8 mm.','(s)d/D=0.5,10 mm.','(s)d/D=0.6,12 mm.')
figure(2)
plot(Z(:,1),EFF(:,1),'k-',Z(:,2),EFF(:,2),'k-',Z(:,4),EFF(:,4),'k-',Z(:,6),EFF(:,6),'k-',phi(:,1),n(:,1),'k-
',phi(:,3),n(:,3),'k-',phi(:,6),n(:,6),'k-',phi(:,10),n(:,10),'k-');
axis([0 5.0 0 35])
xlabel('Flow Rate Ratio (QR)');
ylabel('Efficiency (n)');
text(3.2,23,'d/D=0.3');
text(2,28,'d/D=0.4');
text(1.1,30,'d/D=0.5');
text(0.05,27,'d/D=0.6');
legend('(w)d/D=0.3,6 mm.','(w)d/D=0.4,8 mm.','(w)d/D=0.5,10 mm.','(w)d/D=0.6,12 mm.','(s)d/D=0.3,6
mm.','(s)d/D=0.4,8 mm.','(s)d/D=0.5,10 mm.','(s)d/D=0.6,12 mm.')
figure(3)
plot(HEAD(:,1),Z(:,1),'k-',HEAD(:,2),Z(:,2),'k-',HEAD(:,4),Z(:,4),'k-',HEAD(:,6),Z(:,6),'k-
.',HR(:,1),phi(:,1),'k-',HR(:,3),phi(:,3),'k-',HR(:,6),phi(:,6),'k-',HR(:,10),phi(:,10),'k-');
axis([0 1.0 0 4.0])
xlabel('Head Ratio (HR)');
ylabel('Flow Rate Ratio (QR)');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

text(0.08,2.7,'d/D=0.3');
text(0.14,2.0,'d/D=0.4');
text(0.2,1.4,'d/D=0.5');
text(0.35,0.7,'d/D=0.6');
legend('(w)d/D=0.3,6 mm.','(w)d/D=0.4,8 mm.','(w)d/D=0.5,10 mm.','(w)d/D=0.6,12 mm.','(s)d/D=0.3,6
mm.','(s)d/D=0.4,8 mm.','(s)d/D=0.5,10 mm.','(s)d/D=0.6,12 mm.')
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

Gosline, J.E. and O'Brien, M.p., "The Water Jet Pump",

Publication in Engineering, University of California, Vol 3, No. 3, 1934, page 167-190

Chamlong Prabkeao and Katsumi Aoki, "Theoretical Analysis on Hydraulic Transportation of Solids Using the Jet Pump", Proceedings of the School of Engineer, Tokai University, Vol. 26, 2001

M M SARSHAR and N A BEG, "A review of the application of jet pump technology in oil and gas industry to increase Production

JET PUMP & EJECTORS AND GAS LIFT TECHNIQUES, bhra fluid engineering, Cambridge, 1975

วิศวกรรมปฐพี, ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้