

คุณลักษณะของเจ็ทปั๊มที่ใช้หัวฉีดต่างขนาดในสารผสมของแข็ง-ของเหลว

CHARACTERISTICS OF A JET PUMP WITH DIFFERENT NOZZLES  
IN SOLID-LIQUID MIXTURE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1893-5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

คุณลักษณะของเจ็ทปั๊มที่ใช้หัวฉีดต่างขนาดในสารผสมของแข็ง - ของเหลว

CHARACTERISTICS OF A JET PUMP WITH DIFFERENT NOZZLES  
IN SOLID - LIQUID MIXTURE



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....60502  
วัน,เดือน,ปี.....จ.ป.จ. 2549

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1893-5

**CHARACTERISTICS OF A JET PUMP WITH DIFFERENT NOZZLES  
IN SOLID – LIQUID MIXTURE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2005**

**ISBN 974-15-1893-5**



**COPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณลักษณะของเจ็ทปั๊มที่ใช้หัวฉีดต่างขนาดในสารผสม
	ของแข็ง-ของเหลว
นักศึกษา	นายปรีชา ชันชะ
รหัสประจำตัว	43062026
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. จำลอง ปราบแก้ว

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาสมรรถนะการทำงานของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด โดยในการศึกษานี้จะใช้น้ำเป็นของไหลต้นกำลัง และของไหลที่นำมาใช้เป็นของไหลด้านดูดจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือน้ำ และน้ำที่มีส่วนผสมของกรวด 20% โดยปริมาตร โดยที่การศึกษาการดูดกรวด ซึ่งมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรประมาณ  $2650 \text{ kgf/m}^3$  และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3.5 mm. และศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับเส้นผ่าศูนย์กลางของห้องผสม, อัตราส่วนของเสถียรความดัน และอัตราการไหล ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของปั๊ม จากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ปั๊มสามารถทำได้ คือ ที่อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับเส้นผ่าศูนย์กลางของห้องผสม( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5(หัวฉีดขนาด 10 mm.) ทั้ง 2 กรณี คือ กรณีดูดน้ำเท่ากับ 28.3% และกรณีดูดกรวดเท่ากับ 19.7% และจากผลการทดลองก็พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ปั๊มสามารถทำได้ คือ ที่อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับเส้นผ่าศูนย์กลางของห้องผสม( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5(หัวฉีดขนาด 10 mm.) ทั้ง 2 กรณีเช่นเดียวกัน คือ กรณีดูดน้ำเท่ากับ 21.9% และ กรณีดูดกรวดเท่ากับ 11.2%

<b>Thesis Title</b>	Characteristics Of A Jet Pump With Different Nozzles In Solid-Liquid Mixture
<b>Student</b>	Mr. Preecha Khanha
<b>Student ID.</b>	43062026
<b>Degree</b>	Master Degree
<b>Programme</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2548
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Chamlong Prabkaeo

## ABSTRACT

This research investigates the efficiency of a water jet pump used for water transportation and solid particles jet pump. Sand will be used as solid particle exploited in this study has density about  $2650 \text{ kgf/m}^3$  and mean radius of 3.5 mm. The effect of nozzle to mixing throat area ratio, head ratio and flow rate ratio on jet pump performance are studied. From calculation, the maximum efficiency is 28.3% and 19.7 for water-water jet pump and solid handling water jet pump respectively on the nozzle to mixing throat area ratio is 0.5(diameter of nozzle is 10 mm.). From experiment, the maximum efficiency is 21.9% and 11.2% for water-water jet pump and solid handling water jet pump respectively on the nozzle to mixing throat area ratio is 0.5(diameter of nozzle is 10 mm.).

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนเป็นอย่างดีจากบุคคลที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

รศ.จำลอง ปราบแก้ว เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และการแก้ปัญหาต่างๆ ที่พบในระหว่างงานวิจัย

Professor.Katsumi Aoki ที่ให้การสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์การทดลองตลอดจนแนววิธีการศึกษา ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกันเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบุคคลต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น รวมทั้งเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ ให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา และมารดาเป็นอย่างสูงที่ได้สนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมาจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย.....	1
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	3
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	5
3.1 หลักการของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump).....	5
3.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด.....	6
3.3 การวิเคราะห์หาค่า Head ของปั๊มน้ำแบบหัวฉีดทางทฤษฎี.....	7
3.3.1 ปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump).....	7
3.3.2 การขนถ่ายของแข็งด้วยปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Solids Handling Jet Pump).....	12
3.4 การคำนวณประสิทธิภาพของปั๊มแบบหัวฉีดทางทฤษฎี.....	24
3.4.1 การคำนวณประสิทธิภาพของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump).....	24
3.4.2 การคำนวณประสิทธิภาพของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด สำหรับการขนถ่ายส่วนผสมที่เป็นของแข็ง (Solids Handling Jet Pump).....	27
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	30
4.1 ชุดทดลอง.....	31
4.2 การ Calibrate หาอัตราการไหลที่หัวฉีด ( $Q_j$ ) และด้านในจ่าย ( $Q_d$ ) โดย Orifice .....	34
4.3 การทดลอง.....	35
4.3.1 ปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump).....	35
4.3.2 การขนถ่ายของแข็ง โดยปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Solids Handling Jet Pump).....	35

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการทดลอง.....	36
4.4.1 ป้อนน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump).....	36
4.4.2 การขนถ่ายของแข็งโดยป้อนน้ำแบบหัวฉีด (Solids Handling Jet Pump).....	39
บทที่ 5 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี.....	42
5.1 ป้อนน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump).....	42
5.2 การขนถ่ายของแข็งโดยป้อนน้ำแบบหัวฉีด (Solids Handling Jet Pump).....	45
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	48
6.1 บทสรุป.....	48
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก.....	51
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	51
ภาคผนวก ข ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	68

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก.1 ผลการทดลองสมรรถนะการทำงานของปั๊มคูดน้ำแบบหัวฉีดที่ขนาดหัวฉีด เท่ากับ 6.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.3.....	52
ก.2 ผลการทดลองสมรรถนะการทำงานของปั๊มคูดน้ำแบบหัวฉีดที่ขนาดหัวฉีด เท่ากับ 8.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.4.....	53
ก.3 ผลการทดลองสมรรถนะการทำงานของปั๊มคูดน้ำแบบหัวฉีดที่ขนาดหัวฉีด เท่ากับ 10.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.5.....	54
ก.4 ผลการทดลองสมรรถนะการทำงานของปั๊มคูดน้ำแบบหัวฉีดที่ขนาดหัวฉีด เท่ากับ 12.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.6.....	55
ก.5 ผลการทดลองสมรรถนะการขนถ่ายของแข็งโดยปั๊มน้ำแบบหัวฉีดที่ขนาดหัวฉีด เท่ากับ 6.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.3.....	56
ก.6 ผลการทดลองสมรรถนะการขนถ่ายของแข็งโดยปั๊มน้ำแบบหัวฉีดที่ขนาดหัวฉีด เท่ากับ 8.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.4.....	57
ก.7 ผลการทดลองสมรรถนะการขนถ่ายของแข็งโดยปั๊มน้ำแบบหัวฉีดที่ขนาดหัวฉีด เท่ากับ 10.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.5.....	58
ก.8 ผลการทดลองสมรรถนะการขนถ่ายของแข็งโดยปั๊มน้ำแบบหัวฉีดที่ขนาดหัวฉีด เท่ากับ 12.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.6.....	59

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงลักษณะ โครงสร้างของปั้มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump).....	5
3.2 แผนผังแสดงตำแหน่งการวิเคราะห์ค่าเสดต่างๆในระบบ (Head diagram).....	6
3.3 แสดงภาคตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลในปั้มน้ำหัวฉีด.....	7
3.4 แสดงภาคตัด c-c กับ d-d (ปริมาตรควบคุมของห้องผสม).....	8
3.5 แสดงภาคตัด a-a กับ c-c (หัวฉีด) .....	10
3.6 แสดงภาคตัด b-b กับ c-c (ด้านคูกับปากห้องผสม) .....	10
3.7 แสดงภาคตัด d-d กับ e-e (ด้านจ่าย) .....	11
3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	24
3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Head Ratio ( $H/H_c$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	25
3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_c$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	26
3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	27
3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Head Ratio ( $H/H_c$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	28
3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_c$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ .....	29
4.1 ชุดทดลองปั้มน้ำแบบหัวฉีด .....	30
4.2 แสดงองค์ประกอบของชุดทดลองปั้มน้ำแบบหัวฉีด .....	31
4.3 หัวฉีดขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง .....	32
4.4 ชุดต่อหัวฉีดเพื่อจัดตำแหน่งหัวฉีดจ่อเข้าปากทางห้องผสมและเกจวัดความดัน .....	32
4.5 ชุดต่ออุปกรณ์หลักและเกจวัดความดันสุญญากาศ .....	32
4.6 Mixing throat และเกจวัดความดัน .....	33
4.7 กระบะเจาะรูพร้อมแผ่นกรองทราย .....	33
4.8 กรวดที่ใช้ในการทดลอง (เส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3.5 mm.) .....	33
4.9 ผลการ Calibration .....	34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	36
4.11 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Head Ratio (H/H <sub>c</sub> ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	37
4.12 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio (H/H <sub>c</sub> ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	38
4.13 กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ .....	39
4.14 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Head Ratio (H/H <sub>c</sub> ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	40
4.15 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio (H/H <sub>c</sub> ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	41
5.1 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	42
5.2 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Head Ratio (H/H <sub>c</sub> ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ .....	43
5.3 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio (H/H <sub>c</sub> ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ .....	44
5.4 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ .....	45
5.5 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Head Ratio (H/H <sub>c</sub> ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) ต่างๆ.....	46

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.6 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_s$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง หัวฉีดต่อห้องผสม ( $d/D$ ) ต่างๆ.....	47
--	----



## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

- a : Some point in drive line
- c : Section at beginning of mixing throat
- d : Section at the end of mixing chamber
- e : Some point in discharge line
- A : Area
- B : Area ratio
- $C_v$  : Concentration by volume in suction line ( $V_s/V_T$ ,  $V_s$ :volume of solids,  $V_T$ :total volume)
- $C_w$  : Concentration by weight in suction line
- $C_{vd}$  : Concentration by volume in discharge line
- $C_{wd}$  : Concentration by weight in discharge line
- $C_d$  : Discharge coefficient
- $C_{drag}$  : Drag coefficient
- D : Throat diameter
- d : Nozzle diameter
- F : Force
- H : Head ratio
- K : Loss coefficient
- l : Length of mixing throat
- p : Pressure
- Q : Flow rate
- r : Radius
- $\epsilon$  : Specific gravity
- W : Weight flow rate (Kgf/s)
- $\alpha$  : Velocity coefficient
- $\gamma$  : Unit weight

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

$\eta$	: Efficiency
M	: Flow rate ratio
$\mu$	: Average slip velocity
$V_j$	: Average velocity of jet at section "c"
$A_j$	: Area of the jet
$V_s$	: Average velocity of suction fluid(water) at section "c"
$A_s$	: Area of annular suction entry at section "c"
$\mu_s$	: Slip velocity in suction line(It is multiplied by $V_s$ to obtain the average velocity of solid particle)
$\gamma_s$	: Unit weight of solid particles in Kgf/m <sup>3</sup>
$V_d$	: Average velocity of the fluid at section "d"
$\mu_d$	: Slip velocity in discharge line
$\gamma_d$	: Unit weight of suction fluid existing in discharge line
$P_d$	: Pressure over section "d"
$\epsilon_d$	: Specific gravity of discharge slurry
$\alpha_d$ and $\alpha_{mc}$	: Velocity defect term in Bernuolli's equation
$h_{dif}$	: Head loss in difuser
$K_{dif}$	: Loss coefficient in diffuser
$h_j$	: Head loss in drive line
$K_j$	: Loss factor in drive jet
$h_b$	: Total head at "b"
$\alpha_s$	: Velocity defect term in suction
$\epsilon_{su}$	: Specific gravity of suction slurry
$h_s$	: Head loss in suction
$K_s$	: Loss factor in suction

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

### Subscripts

- j : Jet flow at the tip of the driving nozzle
- s : Suction flow at section “c”
- su : Suction slurry at section “c”
- sw : Suction water at section “c”
- ss : Suction solid particle at section “c”
- mc : Mixing throat
- dis : Discharge
- dif : Diffuser



## 1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีขอบเขตของงานวิจัย ดังนี้

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของปั้มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump)
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการขนถ่ายของผสม น้ำ-ของแข็ง ของปั้มน้ำแบบหัวฉีด (Solids Handling Jet Pump).
3. ศึกษาการคำนวณประสิทธิภาพการทำงานของปั้มน้ำแบบหัวฉีดทางทฤษฎี
4. ทดลองหาประสิทธิภาพการทำงานของปั้มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump and Solid Handling Jet Pump).
5. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผล โดยการคำนวณ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองโดยอุปกรณ์การทดลองที่สร้างขึ้น.



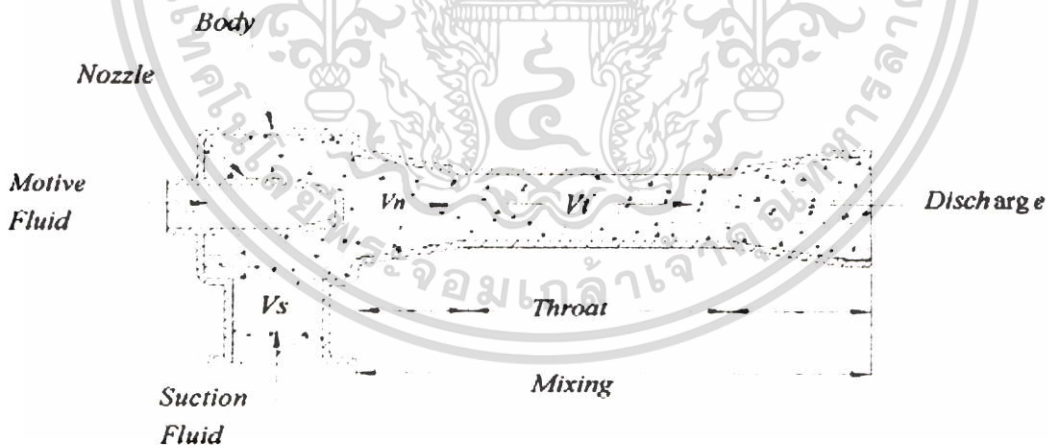
# บทที่ 3

## ทฤษฎี

การคำนวณสมรรถนะการทำงานของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด ต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ), อัตราส่วนอัตราการไหล ( $Q_s/Q_j$ ), ความเข้มข้นของส่วนผสมในช่องคูด, ตัวประกอบความสูญเสียที่จุดต่างๆ, ความเร็วการเลื่อนไหลระหว่างน้ำกับของแข็ง เป็นต้น โดยในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการการทำงานของปั๊มน้ำแบบหัวฉีดและ การวิเคราะห์สมการการคำนวณทางทฤษฎี โดยการคำนวณจะแบ่งออกเป็น การคำนวณเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump) และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการขนถ่ายของแข็งด้วยปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Solids Handling Jet Pump) ตลอดจนผลการคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นการจำลองสมการการคำนวณจากทฤษฎี

### 3.1 หลักการของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump)

ปั๊มน้ำแบบหัวฉีดมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ หัวฉีด (Nozzle) ห้องผสม (Mixing throat) และ ท่อลดความเร็ว (Discharge) ดังรูป



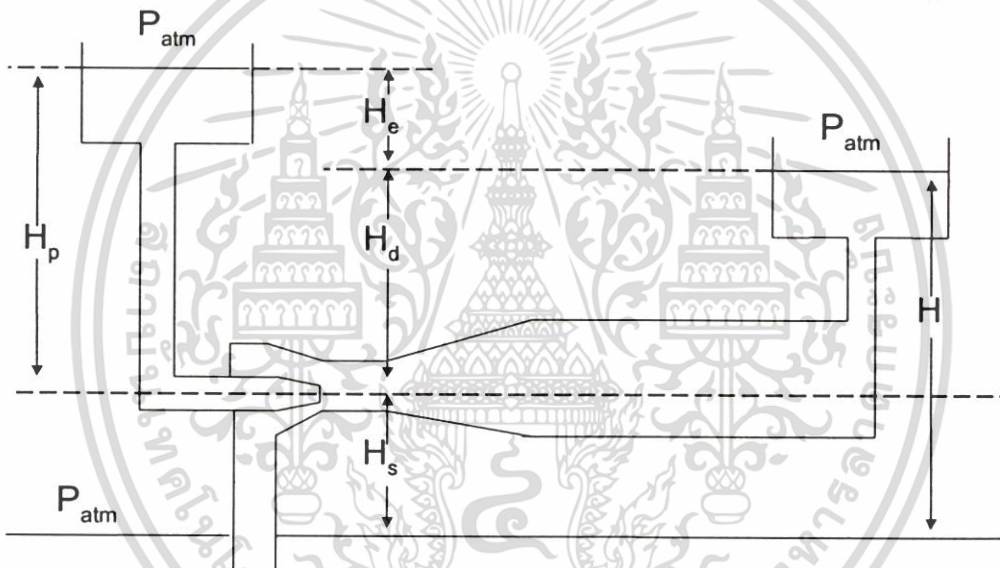
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะ โครงสร้างของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump)

### ปั๊มน้ำแบบหัวฉีดมีหลักการทำงานคือ

1. ของไหลแรงดันสูงจะถูกอัดฉีดจากปั๊มน้ำแรงดันสูงออกมาทางปลายหัวฉีด ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานความดันเป็นพลังงานความเร็วที่บริเวณปลายหัวฉีด
2. ของไหลที่ด้านดุดถูกดูดเข้ามาผสมกับของไหลจากหัวฉีดเข้าไปที่ห้องผสมเนื่องจากพลังงานความดันแตกต่างที่บริเวณ ปลายหัวฉีด-ด้านดุด
3. ของไหลผสมกันในห้องผสมและเปลี่ยนเป็นพลังงานความดันที่ด้านจ่าย
4. ไม่มีส่วนใดของปั๊มน้ำแบบหัวฉีดเคลื่อนที่หรือหมุนขณะทำงาน

### 3.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด

ประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มน้ำแบบหัวฉีดสามารถวิเคราะห์จาก Head diagram ดังรูป



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงตำแหน่งการวิเคราะห์ค่าเสดต่างๆในระบบ (Head diagram)

พิจารณาจากรูปข้างต้น สามารถวิเคราะห์หาค่า Head ต่างๆ ได้ดังนี้

$$H = H_d - H_s \quad (3.1)$$

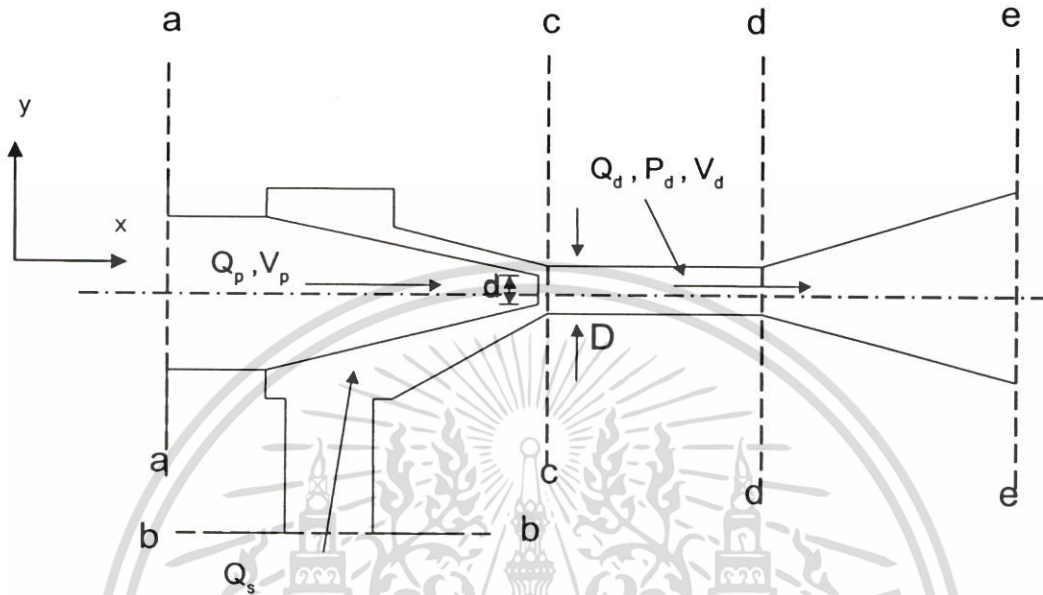
$$H_e = H_p - H_d \quad (3.2)$$

จากสองสมการข้างต้นสามารถนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Jet Pump) ได้จากสมการ

$$\eta = \frac{\gamma_s Q_s H}{\gamma_w Q_j H_e} = \phi \frac{H}{H_e} \quad (3.3)$$

### 3.3 การวิเคราะห์หาค่า Head ของปั้มน้ำแบบหัวฉีดทางทฤษฎี

#### 3.3.1 ปั้มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump)



รูปที่ 3.3 แสดงภาคตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลในปั้มน้ำหัวฉีด

จากรูปข้างต้นสามารถวิเคราะห์สมการต่อเนื่องได้ดังนี้

$$Q_d = Q_j + Q_s \quad (3.4)$$

$$A_d = A_j + A_s \quad (3.5)$$

$$V_s = \frac{Q_s}{A_s} \quad (3.6)$$

$$V_d = \frac{Q_d}{A_d} \quad (3.7)$$

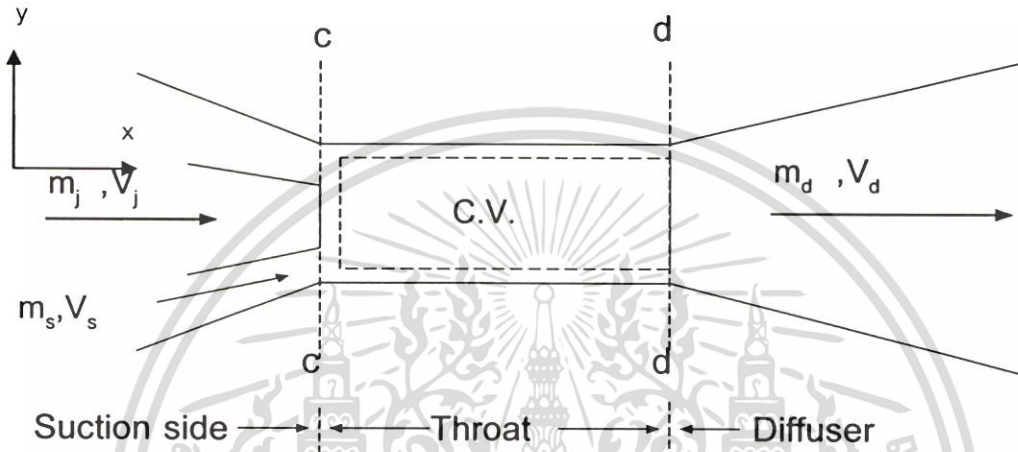
สมการความเร็วที่ด้านดูด (Velocity of suction fluid)

$$V_s = \frac{Q_s}{A_s} = \frac{\phi Q_j}{A_s} = \frac{\phi V_j \beta}{(1-\beta)} \quad (3.8)$$

สมการความเร็วที่ด้านจ่าย (Velocity of discharges fluid)

$$V_d = \frac{Q_d}{A_s} = \frac{(1+\phi)Q_d}{A_d} = \beta(1+\phi)V_j \quad (3.9)$$

สมการ โมเมนตัม (Total momentum equation) ที่หน้าตัด c-c กับ d-d



รูปที่ 3.4 แสดงภาคตัด c-c กับ d-d (ปริมาตรควบคุมของห้องผสม)

สมการ โมเมนตัมที่หน้าตัด c-c

$$m_j V_j + m_s V_s = \frac{V_j^2}{2g} \left[ 2A_j \gamma_w + 2\phi^2 \frac{\beta^2}{(1+\beta)} A_s \gamma_s \right] \quad (3.10)$$

สมการ โมเมนตัมที่หน้าตัด d-d

$$\begin{aligned} m_d V_d &= V_d (m_j + m_s) \\ &= \frac{V_j^2}{2g} \beta(1+\phi) \left[ 2\gamma_w A_j + 2\phi \gamma_s \frac{\beta}{(1+\beta)} A_s \right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

สมการการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ห้องผสม (พิจารณาที่หน้าตัด c-c ถึง d-d)

$$\begin{aligned} F_t &= \tau_0 \int 2\pi r dX \\ &= \frac{V_j^2}{2g} \beta^2 (1+\phi)^2 V_d [K_{mc} A_d] \end{aligned}$$

ค่าความดันที่เปลี่ยนแปลง ( $P_c - P_d$ )

$$\begin{aligned} F_p &= - \left[ \int (P_d - P_c) 2\pi r dr \right] \\ &= - \left[ \int P_d 2\pi r dr - \int P_c 2\pi r dr \right] \end{aligned}$$

จากสมการโมเมนตัม

$$\begin{aligned} F &= F_{bx} + F_{sx} \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} V_x \rho dV + \int_{cs} V_x \rho V_x dA \end{aligned}$$

โดย 1) ไม่มีแรง Body force ( $F_{bx}$ ) ในแนวแกน x

2) Steady flow

แทนค่าได้

$$\int \left[ \frac{P_d - P_c}{\gamma_w A_d} \right] 2\pi r dr = \frac{V^2}{2g} \left[ 2\beta + 2\phi^2 \frac{\beta^2}{(1-\beta)} - \beta(1+\phi)[2\beta + 2\beta\phi] - \beta^2(1+\phi)^2 K_{mc} \right] \quad (3.12)$$

การวิเคราะห์โดยใช้สมการพลังงาน (Energy Equation) เพื่อวิเคราะห์หาค่าเฮดต่างๆ จากสมการพลังงานการไหลของของไหล

$$Q + W = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \left[ u + \frac{V^2}{2} + gZ \right] \rho dV + \int_{cs} \left[ u + \frac{V^2}{2} + gZ \right] \rho V dA$$

โดย 1) ไม่มีงานเกิดขึ้นในระบบ

2) Steady flow

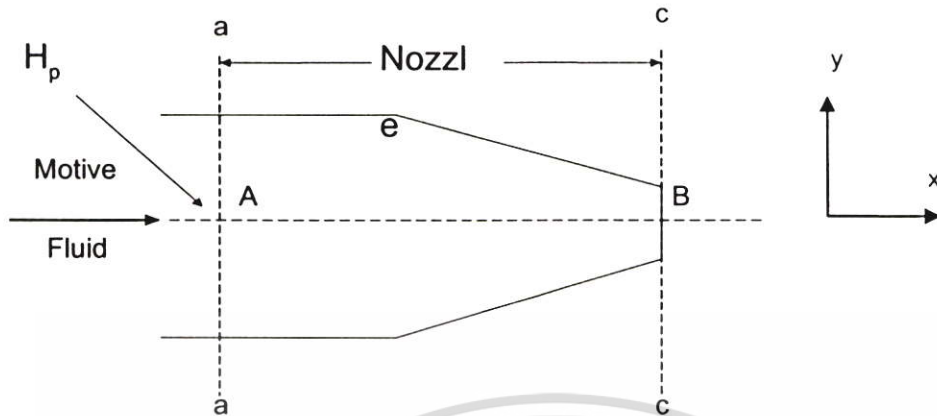
3) พลังงานภายในมีค่าคงที่

จะได้

$$Q = m(u_2 - u_1) + \int_{cv} \frac{P}{\rho} \rho V dA + mg(Z_2 - Z_1) + \int_{cs} \frac{V^2}{2} \rho V dA$$

$$\text{Head losses} = \int_{cv} \frac{P}{\rho} \rho V dA + mg(Z_2 - Z_1) + \int_{cs} \frac{V^2}{2} \rho V dA$$

สมการพลังงานระหว่างหน้าตัด a-a ถึงหน้าตัด c-c

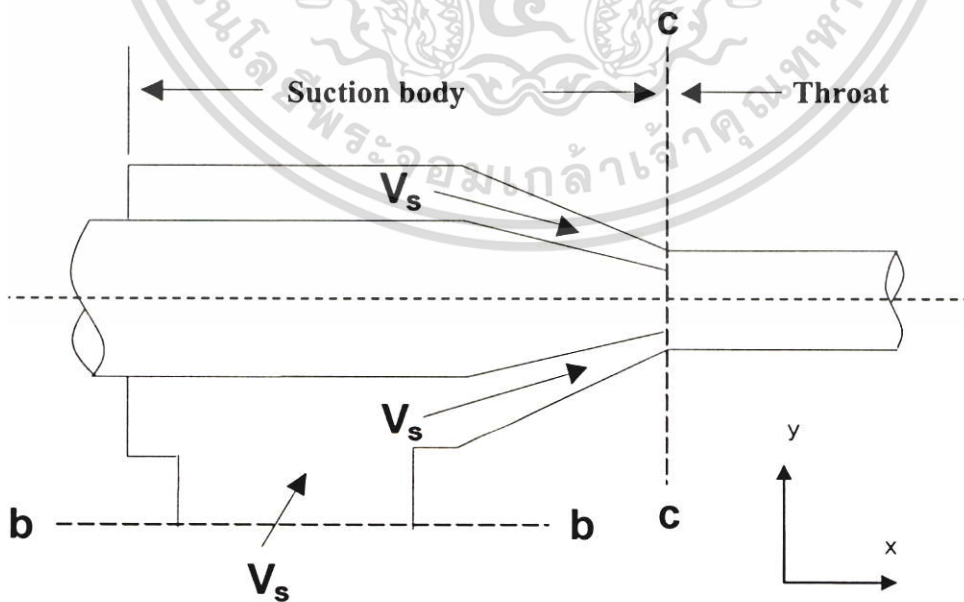


รูปที่ 3.5 แสดงภาคตัด a-a กับ c-c (หัวฉีด)

พลังงานที่ด้านหัวฉีด (Jet Total head,  $H_j$ )

$$\begin{aligned}
 H_p &= \int \frac{P_j 2\pi r dr}{\gamma_w A_j} + \alpha_j \frac{V_j^2}{2g} + h_j \quad ; \quad h_j = K_j \frac{V_j^2}{2g} \\
 &= \int \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{V_j^2}{2g} (\alpha_j + K_j)
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

สมการพลังงานระหว่างหน้าตัด b-b ถึงหน้าตัด c-c



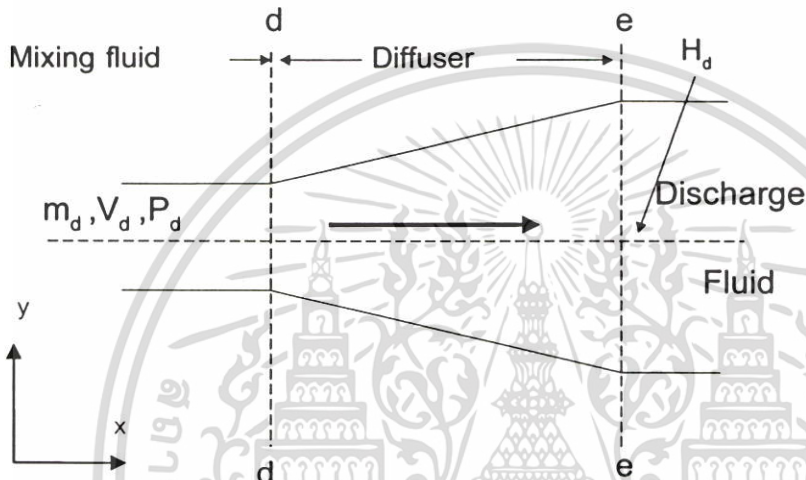
รูปที่ 3.6 แสดงภาคตัด b-b กับ c-c (ด้านดูดกับปากห้องผสม)

พลังงานที่ด้านดูด (Suction total head,  $H_s$ )

$$H_s = \int \frac{P_c 2\pi r dr}{\gamma_w A_s} + \alpha_s \frac{V_s^2}{2g} + h_s \quad ; \quad h_s = K_s \frac{V_s^2}{2g}$$

$$H_s = \int \frac{P_c 2\pi r dr}{\gamma_w A_s} + \frac{V_j^2}{2g} \phi^2 \frac{\beta^2}{(1-\beta)^2} [\alpha_s + K_s] \quad (3.14)$$

สมการพลังงานระหว่างหน้าตัด d-d ถึงหน้าตัด e-e



รูปที่ 3.7 แสดงภาคตัด d-d กับ e-e (ด้านจ่าย)

พลังงานที่ด้านจ่าย (Delivery Total Head,  $H_d$ )

$$H_d = \int \frac{P_c 2\pi r dr}{\gamma_w A_d} + \alpha_d \frac{V_d^2}{2g} - h_{dif} \quad ; \quad h_{dif} = K_{dif} \frac{V_d^2}{2g}$$

$$H_d = \int \frac{P_d 2\pi r dr}{\gamma_w A_d} + \frac{V_j^2}{2g} \beta^2 (1+\phi)^2 [K_{dif} - \alpha_d] \quad (3.15)$$

พลังงานที่ของไหลที่ด้านดูดได้รับ (Output Head;  $H$ )

$$H = H_d - H_s$$

$$H = \frac{V_j^2}{2g} \left[ 2\beta + 2\phi^2 \frac{\beta^2}{1-\beta} - 2\beta^2 (1+\phi)^2 K_{mc} - \beta^2 (1+\phi)^2 (K_{dif} - \alpha_d) - \phi^2 \frac{\beta^2}{1-\beta} (\alpha_s + K_s) \right]$$

(3.16)

พลังงานที่ของไหลฉีดถ่ายเทให้ของไหลด้านดูด (Input Head;  $H_e$ )

$$H_e = H_p - H_d$$

$$H_e = \frac{V_j^2}{2g} \left[ \alpha_j + K_j + \beta^2(1+\phi)^2(K_{df} - \alpha_d) - 2\beta - 2\phi^2 \frac{\beta^2}{1-\beta} - \beta^2(1+\phi)^2(2+K_{mc}) \right] \quad (3.17)$$

จะได้สมการประสิทธิภาพของปั๊มหัวฉีด คือ

$$\eta = \frac{\gamma_s Q_s H}{\gamma_w Q_j H_e} = \phi \frac{H_o}{H_i} \quad (3.18)$$

### 3.3.2 การขนถ่ายของแข็งด้วยปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Solid Handling Jet Pump)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการขนถ่ายของแข็งด้วยปั๊มน้ำแบบหัวฉีดนี้ จะใช้สมการการวิเคราะห์ชุดเดียวกับปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump) แต่จะต้องพิจารณาตัวแปรในส่วนหนึ่งของแข็งเพิ่มเติม ซึ่งจะกล่าวถึงในการวิเคราะห์สมการต่อเนื่อง โดยอ้างอิงจากรูปที่ 3.2 แผนผังแสดงตำแหน่งการวิเคราะห์ค่าเสดต่างๆในระบบ (Head diagram) และรูปที่ 3.3 แสดงภาคตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลในปั๊มหัวฉีด สามารถวิเคราะห์สมการต่อเนื่องได้ดังนี้

$$Q_d = Q_j - Q_{su} \quad (3.19)$$

$$A_d = A_j + A_s \quad (3.20)$$

$$Q_{su} = Q_{ss} + Q_{sw} \quad (3.21)$$

$$Q_{ss} = \mu_s V_s A_s C_s \quad (3.22)$$

$$Q_{sw} = V_s A_s (1 - C_s) \quad (3.23)$$

$$\gamma_d Q_{ss} = \gamma_{su} Q_{su} + \gamma_w Q_j \quad (3.24)$$

$$W_d = W_{su} + W_{sj} \quad (3.25)$$

$$W_{su} = W_{ss} + W_{sw} \quad (3.26)$$

$$W_{ss} = \gamma_s Q_{ss} = \gamma_s \mu_s V_s A_s C_s \quad (3.27)$$

$$W_{sw} = \gamma_w Q_{sw} = \gamma_w V_s A_s (1 - C_s) \quad (3.28)$$

$$W_{su} = \gamma_{su} Q_{su} \quad (3.29)$$

ค่าน้ำหนักจำเพาะของของผสม ( $\gamma_{su}$ )

$$\gamma_{su} = \frac{W_{su}}{Q_{su}} = \frac{W_{ss} + W_{sw}}{Q_{ss} + Q_{sw}} \quad (3.30)$$

แทนค่าจากสมการ (3.27) และ (3.28) จะได้

$$\gamma_{su} = \frac{\gamma_s \mu_s V_s A_s C_s + \gamma_w V_s A_s (1 - C_s)}{\mu_s V_s A_s C_s + V_s A_s (1 - C_s)} = \frac{C_s (\mu_s \gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w}{(1 - C_s) + \mu_s C_s} \quad (3.31)$$

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

$$\phi = \frac{W_{su}}{W_j} = \frac{Q_{su} \gamma_{su}}{Q_j \gamma_w} \quad (3.32)$$

$$\gamma_d = \frac{W_d}{Q_d} = \frac{W_{su} + W_{sj}}{Q_j + Q_{su}} = \frac{\gamma_{su} Q_{su} + \gamma_w Q_j}{Q_j + Q_{su}} = \frac{\gamma_{su} \gamma_w (\phi + 1)}{\gamma_w \phi + \gamma_{su}} \quad (3.33)$$

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

$$C_d = \frac{Q_{ss}}{Q_j + Q_{su}} = \frac{\mu_s C_s \gamma_w \phi}{\{\mu_s C_s + (1 - C_s)\} (\gamma_{su} + \gamma_w \phi)} \quad (3.34)$$

ความเร็วเฉลี่ยในท่อที่หน้าตัด b-b (ด้านดูด) และที่หน้าตัด e-e (ด้านจ่าย)

จากสมการ (3.21), (3.22) และ (3.23)

$$\begin{aligned} Q_{su} &= Q_{ss} + Q_{sw} \\ Q_{su} &= \mu_s V_s A_s C_s + V_s A_s (1 - C_s) = A_s V_s \{\mu_s C_s + (1 - C_s)\} \end{aligned} \quad (3.35)$$

สมการความเร็วที่ด้านดูด (Velocity of suction)

$$V_{su} = \frac{Q_{su}}{A_s \{\mu_s C_s + (1 - C_s)\}} = \frac{\phi Q_j \gamma_w}{\gamma_{su} A_s \{\mu_s C_s + (1 - C_s)\}} \quad (3.36)$$

สมการความเร็วที่ด้านจ่าย (Velocity of discharges)

$$Q_d = V_d A_d (1 - C_d) + \mu_d V_d A_d C_d = V_d A_d \{ \mu_d C_d + (1 - C_d) \} \quad (3.37)$$

$$V_d = \frac{Q_d}{A_d \{ \mu_d C_d + (1 - C_d) \}} = \frac{B(1 + \phi)V_j \gamma_w}{\gamma_d \{ \mu_d C_d + (1 - C_d) \}} \quad (3.38)$$

สมการโมเมนตัม (Total momentum equation) ที่หน้าตัด c-c กับ d-d

อ้างอิงจากรูปที่ 4 แสดงภาคตัด c-c กับ d-d (ปริมาตรควบคุมของห้องผสม)

สมการ โมเมนตัมที่หน้าตัด c-c

$$\begin{aligned} \dot{M}_j V_j + \dot{M}_{sw} V_{sw} + \dot{M}_{ss} V_{ss} &= \rho_j Q_j V_j + \rho_{sw} Q_{sw} V_{sw} + \rho_{ss} Q_{ss} V_{ss} \\ &= \frac{\gamma_w}{g} V_j^2 A_j + \frac{\gamma_{sw}}{g} V_s A_s (1 - C_s) V_{sw} + \frac{\gamma_{ss}}{g} \mu_s V_{sw} A_s C_s V_{ss} \end{aligned} \quad (3.39)$$

จาก  $V_{ss} = \mu_s V_{sw}$  แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} &= \frac{\gamma_w}{g} V_j^2 A_j + \frac{\gamma_{sw}}{g} V_{sw}^2 A_s (1 - C_s) + \frac{\gamma_{ss}}{g} \mu_s^2 V_{sw}^2 A_s C_s \\ &= \frac{\gamma_w}{g} V_j^2 A_j + \frac{\gamma_{sw}}{g} A_s (1 - C_s) \left[ \frac{\phi Q_j \gamma_w}{\gamma_{su} A_s \{ \mu_s C_s + (1 + C_s) \}} \right] + \\ &\quad \frac{\gamma_{ss}}{g} \mu_s^2 A_s C_s \left[ \frac{\phi Q_j \gamma_w}{\gamma_{su} A_s \{ \mu_s C_s + (1 + C_s) \}} \right]^2 \\ &= \frac{V_j^2}{2g} \left[ 2\gamma_w A_j + 2 \left[ \frac{Q_{su} \gamma_{su}}{Q_j \gamma_w} \right]^2 \frac{B^2}{(1 - B)^2} \left( \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w} \right)^2 \left[ \frac{C_s (\mu_s^2 \gamma_{ss} - \gamma_w) + \gamma_w}{\{1 - C_s (1 - \mu_s)\}^2} A_s \right] \right] \end{aligned} \quad (3.40)$$

สมการ โมเมนตัมที่หน้าตัด d-d

$$\begin{aligned} \dot{M}_d V_d &= V_{dw} (\dot{M}_j + \dot{M}_{sw}) + V_{ds} \dot{M}_{ss} \\ &= V_{dw} (\rho Q_j + \rho Q_{sw}) + \mu_d V_{dw} \rho Q_{ss} \\ &= V_{dw} \left( \frac{\gamma_j}{g} V_j A_j + \frac{\gamma_{sw}}{g} V_s A_s (1 - C_s) \right) + \mu_d V_{dw} \frac{\gamma_{ss}}{g} \mu_s V_s A_s C_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left[ \frac{B(1+\phi)V_j\gamma_w}{\gamma_d\{\mu_d C_d + (1-C_d)\}} \left( V_j A_j \frac{\gamma_j}{g} + \frac{\gamma_{sw}}{g} \left[ \frac{\phi Q_j \gamma_w}{\gamma_{su} A_s \{\mu_s C_s + (1-C_s)\}} \right] A_s (1-C_s) \right) \right] \\
&+ \left[ \frac{\mu_d B(1+\phi)V_j\gamma_w}{\gamma_d\{\mu_d C_d + (1-C_d)\}} \frac{\gamma_{ss}}{g} \mu_s \left[ \frac{\phi Q_j \gamma_w}{\gamma_{su} A_s \{\mu_s C_s + (1-C_s)\}} \right] A_s C_s \right] \\
&= \frac{V_j^2}{2g} \frac{B(1+\phi)}{\{1-C_d(1+\mu_d)\}} \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \left[ 2\gamma_w A_j + 2 \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \phi \frac{B}{(1-B)} \left\{ \frac{[C_s(\mu_d \mu_s \gamma_{ss} - \gamma_w)] A_s}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}} \right\} \right] \\
\end{aligned} \tag{3.41}$$

สมการการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ห้องผสม (พิจารณาที่หน้าตัด c-c ถึง d-d)

$$\begin{aligned}
F_t &= \int_0^l \tau_0 2\pi r dl \quad \tau = \text{Shear} \\
&= \lambda 2\pi r l \gamma_d \frac{V_d^2}{2g} \quad ; K_{mc} = \frac{2\lambda l}{r} \\
F_t &= K_{mc} A_d \gamma_d \frac{V_d^2}{2g} \\
&= \frac{V_j^2}{2g} B^2 (1+\phi)^2 \frac{\gamma_w^2}{\gamma_d \{\mu_d C_d + (1-C_d)\}^2} \frac{K_{mc} A_d}{\gamma_d \{\mu_d C_d + (1-C_d)\}^2} \tag{3.42}
\end{aligned}$$

ค่าความดันที่เปลี่ยนแปลง (Pc-Pd)

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

จากสมดุลของแรง

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

จัดรูปสมการใหม่เพื่อแสดงความดันเปลี่ยนแปลงระหว่างหน้าตัด c-c กับ d-d

$$\int P_d 2\pi r dr - \int P_c 2\pi r dr =$$

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

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

$$\left[ \frac{V_j^2}{2g} B^2 (1+\phi)^2 \frac{\gamma_w^2}{\gamma_d} \frac{K_{mc} A_d}{\{\mu_d C_d + (1 - C_d)\}^2} \right]$$

ดึงตัวร่วม  $\frac{V_j^2}{2g}$  แล้วจัดสมการใหม่

$$\int \frac{P_d 2\pi r}{\gamma_w A_d} dr - \int \frac{P_c 2\pi r}{\gamma_w A_d} dr = \frac{V_j^2}{2g} \left[ \left[ 2B + 2\phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 (1-B) \frac{\left\{ 1 - C_s \left( 1 - \frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w} \right) \right\}}{\{1 - C_s (1 - \mu_s)\}^2} \right] - \right.$$

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

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

(3.43)

การวิเคราะห์โดยใช้สมการพลังงาน (Energy Equation) เพื่อหาค่าเฮดต่าง ๆ

สมการพลังงานระหว่างหน้าตัด a-a ถึงหน้าตัด c-c

อ้างอิงรูปที่ 3.5 แสดงภาคตัด a-a กับ c-c (หัวฉีด)

พลังงานที่ด้านหัวฉีด (Jet Total head,  $H_j$ )

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

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

$$= \int \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{V_j^2}{2g} (\alpha_j + K_j) \quad (3.44)$$

สมการพลังงานระหว่างหน้าตัด b-b ถึงหน้าตัด c-c

อ้างอิงรูปที่ 3.6 แสดงภาคตัด b-b กับ c-c (ด้านคูกับปากห้องผสม)

พลังงานที่ด้านคู (Suction total head,  $H_s$ )

$$\begin{aligned} H_s &= \varepsilon_{su} \left\{ \int \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w \varepsilon_{su}} dr + \alpha_s (1 - C'_s) \frac{V_s^2}{2g} + \alpha_s C'_s \mu_s^2 \frac{V_s^2}{2g} + h_s \right\} ; h_s = K_s \frac{V_s^2}{2g} \\ &= \int \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{V_s^2}{2g} \varepsilon_{su} \{ \alpha_s (1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_2 \} ; \varepsilon_{su} = \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w} \\ &= \int \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{\varepsilon_{su}}{2g} \left[ \frac{\phi Q_j \gamma_w}{\gamma_{su} A_s \{ \mu_s C_s + (1 - C_s) \}} \right]^2 \{ \alpha_s (1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_2 \} \\ &= \int \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{V_j^2}{2g} \frac{B^2}{(1 - B)^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 \frac{\varepsilon_{su} \{ \alpha_s (1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_2 \}}{\{ 1 - C_s (1 - \mu_s) \}^2} \end{aligned} \quad (3.45)$$

สมการพลังงานระหว่างหน้าตัด d-d ถึงหน้าตัด e-e

อ้างอิงรูปที่ 3.7 แสดงภาคตัด d-d กับ e-e (ด้านจ่าย)

พลังงานที่ด้านจ่าย (Delivery Total Head,  $H_d$ )

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

$$= \frac{\int P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \frac{V_j^2}{2g} \frac{B^2 (1+\phi)^2 \varepsilon_d}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right)^2 \{K_{df} - \alpha_d(1-C'_d + C'_d \mu_d^2)\} \quad (3.46)$$

จาก  $H = H_d - H_s$

$$H = \left[ \frac{\int P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \frac{V_j^2}{2g} \frac{B^2 (1+\phi)^2 \varepsilon_d}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right)^2 \{K_{df} - \alpha_d(1-C'_d + C'_d \mu_d^2)\} \right] - \left[ \frac{\int P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{V_j^2}{2g} \phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_{su}}\right)^2 \frac{\varepsilon_{su} \{\alpha_s(1-C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}^2} \right]$$

จัดรูปสมการใหม่โดยการแยกตัวแปรร่วม

$$H = \int \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \int \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr - \frac{V_j^2}{2g} \left[ \left( \frac{B^2 (1+\phi)^2 \varepsilon_d}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right)^2 \{K_{df} - \alpha_d(1-C'_d + C'_d \mu_d^2)\} \right) + \left( \phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_{su}}\right)^2 \frac{\varepsilon_{su} \{\alpha_s(1-C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}^2} \right) \right]$$

แทนค่าตัวแปร  $\varepsilon_{su}$  โดยที่  $\varepsilon_{su} = \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w}$  จะได้

$$H = \int \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \int \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr - \frac{V_j^2}{2g} \left[ \left( \frac{B^2 (1+\phi)^2}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_w}\right) \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right)^2 \{K_{df} - \alpha_d(1-C'_d + C'_d \mu_d^2)\} \right) + \left( \phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left(\frac{\gamma_{su}}{\gamma_w}\right) \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_{su}}\right)^2 \frac{\{\alpha_s(1-C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}^2} \right) \right]$$

$$H = \int \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \int \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr - \frac{V_j^2}{2g} \left[ \left( \frac{B^2 (1+\phi)^2}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right) \{K_{df} - \alpha_d(1-C'_d + C'_d \mu_d^2)\} \right) + \left( \phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_{su}}\right) \frac{\{\alpha_s(1-C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s\}}{\{1-C_s(1-\mu_s)\}^2} \right) \right]$$

จากสมการที่ (3.43) นำมาแทนค่าในสมการ ดึงตัวร่วม  $\frac{V_j^2}{2g}$  แล้วจัดสมการใหม่ จะได้

$$H = \frac{V_j^2}{2g} [T1 - T2 - T3]$$

Hence;

$$T1 = 2B + \left( 2\phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 \frac{\left\{ 1 - C_s \left( 1 - \frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w} \right) \right\}}{\left\{ 1 - C_s (1 - \mu_s) \right\}^2} \right)$$

$$T2 = \frac{B(\gamma_w \phi + \gamma_{su})}{\{1 - C_d (1 - \mu_d)\} \gamma_{su}} \left( \left( 2B + 2B\phi \frac{\left\{ 1 - C_s \left( 1 - \frac{\mu_s \mu_d \gamma_{ss}}{\gamma_w} \right) \right\}}{\{1 - C_s (1 - \mu_s)\}} \right) - \left( B^2 (1 + \phi) \frac{(\gamma_w \phi + \gamma_{su})}{\gamma_{su}} \frac{K_{mc}}{\{1 - C_d (1 - \mu_d)\}^2} \right) \right)$$

$$T3 = \left( \frac{B^2 (1 - \phi)}{\{1 - C_d (1 - \mu_d)\}^2} \frac{(\gamma_w \phi + \gamma_{su})}{\gamma_{su}} \{K_{diff} - \alpha_d (1 - C'_d (1 - \mu_d^2))\} \right) - \left( \phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 \frac{\{\alpha_s (1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s\}}{\{1 - C_s (1 - \mu_s)\}^2} \right)$$

จากสมการต่อเนื่อง

$$\frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} = \frac{\gamma_w}{\left( \frac{C_s (\gamma_s \mu_s - \gamma_w) + \gamma_w}{(1 - C_s) + \mu_s C_s} \right)} = \frac{\gamma_w ((1 - C_s) + \mu_s C)}{C_s \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - \gamma_w \right) + \gamma_w} = \frac{[(1 - C_s) + \mu_s C]}{C_s \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1}$$

$$= \frac{[C_s (\mu_s - 1) + 1]}{C_s \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1}$$

$$= \frac{[1 - C_s (1 - \mu_s)]}{C_s \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1}$$

ดังนั้นแทนค่า  $\frac{\gamma_w}{\gamma_{su}}$  ลงในสมการจะได้

$$H = \frac{V_j^2}{2g} [U1 - U2 - U3]$$

Hence;

$$\begin{aligned}
 U1 &= 2B + \left( 2\phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \frac{\left[ \frac{1-C_s(1-\mu_s)}{C_s \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1} \right]^2 \left\{ 1 - C_s \left( 1 - \frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w} \right) \right\}}{\left\{ 1 - C_s(1-\mu_s) \right\}^2} \right) \\
 U2 &= \frac{B(\gamma_w \phi + \gamma_{su})}{\{1 - C_d(1 - \mu_d)\} \gamma_{su}} \left( \frac{2B + 2B\phi \frac{\left\{ 1 - C_s \left( 1 - \frac{\mu_s \mu_d \gamma_{ss}}{\gamma_w} \right) \right\}}{\{1 - C_s(1-\mu_s)\}}}{\left( B^2(1+\phi) \frac{(\gamma_w \phi + \gamma_{su})}{\gamma_{su}} - \frac{K_{mc}}{\{1 - C_d(1-\mu_d)\}^2} \right)} \right) - \\
 U3 &= \left( \frac{B^2(1-\phi)}{\{1 - C_d(1 - \mu_d)\}^2} \frac{(\gamma_w \phi + \gamma_{su})}{\gamma_{su}} \{K_{dif} - \alpha_d(1 - C'_d(1 - \mu_d^2))\} \right) - \\
 &\left( \phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \frac{\left[ \frac{1-C_s(1-\mu_s)}{C_s \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1} \right]^2 \frac{\{\alpha_s(1 - C'_s) + \alpha_s C'_s \mu_s^2 + K_s\}}{\{1 - C_s(1-\mu_s)\}^2}}{\left\{ 1 - C_s(1-\mu_s) \right\}^2} \right)
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

จาก  $H_e = H_p - H_d$

$$\begin{aligned}
 H_e &= \left[ \int \frac{P_c 2\pi r}{A_c \gamma_w} dr + \frac{V_j^2}{2g} (\alpha_j + K_j) \right] - \\
 &\left[ \int \frac{P_d 2\pi r}{A_d \gamma_w} dr - \left( \frac{V_j^2}{2g} \frac{B^2(1+\phi)^2 \varepsilon_d}{\{1 - C_d(1 - \mu_d)\}^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \right)^2 \{K_{dif} - \alpha_d(1 - C'_d + C'_d \mu_d^2)\} \right) \right]
 \end{aligned}$$

แทนค่าจากสมการที่ (3.43) จะได้

$$H_e = X1 - X2 + X3$$

Hence;

$$\begin{aligned}
 X1 &= -\frac{V_j^2}{2g} \left( 2B + \left( 2\phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_{su}} \right)^2 (1-B) \frac{\left\{ 1 - C_s \left( 1 - \frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w} \right) \right\}}{\{1 - C_s(1 - \mu_s)\}^2} \right) \right) \\
 X2 &= \frac{B(1+\phi)}{\{1 - C_d(1 - \mu_d)\}} \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \left( \left( \frac{2B + 2B\phi}{\{1 - C_s(1 - \mu_s)\}} \frac{\left\{ 1 - C_s \left( 1 - \frac{\mu_s \mu_d \gamma_{ss}}{\gamma_w} \right) \right\}}{\left\{ 1 - C_s(1 - \mu_s) \right\}} \right) - \right. \\
 &\quad \left. \left( \frac{B^2(1+\phi)^2 \gamma_w}{\gamma_d \{ \mu_d C_d + (1 - C_d) \}^2} \frac{K_{mc}}{\gamma_d} \right) \right) \\
 X3 &= \frac{V_j^2}{2g} \left( (\alpha_j + K_j) + \frac{B^2(1+\phi)^2 \epsilon_d}{\{1 - C_d(1 - \mu_d)\}^2} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \right)^2 \left\{ K_{df} - \alpha_d (1 - C'_d + C'_d \mu_d^2) \right\} \right)
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

จากสมการต่อเนื่อง

$$\frac{\gamma_w}{\gamma_d} = \frac{\gamma_w}{\left( \frac{\gamma_{su} \gamma_w (\phi + 1)}{\gamma_w \phi + \gamma_{su}} \right)} = \frac{\gamma_w \phi + \gamma_{su}}{\gamma_{su} (\phi + 1)} = \frac{\left( \frac{\gamma_w \phi}{\gamma_{su}} \right) + 1}{(\phi + 1)}$$

$$\frac{\gamma_w}{\gamma_d} = \frac{\left( \frac{[1 - C_s(1 - \mu_s)] \phi}{C_s \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1} \right) + 1}{(\phi + 1)}$$

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

$$C_d = C'_d \frac{\gamma_d}{\gamma_{ss}} = \frac{C_s \phi \gamma_w}{\gamma_{su} + \phi \gamma_w} = \frac{C_s \phi}{\frac{\gamma_{su}}{\gamma_w} + \phi} = \frac{C'_s \gamma_{su}}{\gamma_{ss} \phi}$$

$$C'_d = \frac{C_d \gamma_{ss}}{\gamma_d} = \left( \frac{C'_s \gamma_{su}}{\gamma_{ss} \phi} \right) \left( \frac{\gamma_{ss}}{\gamma_d} \right) = \left( \frac{C'_s \gamma_{su} \phi}{\gamma_{su} + \phi} \right) \left( \frac{(\gamma_w \phi + \gamma_{su})}{\gamma_{su} \gamma_w (\phi + 1)} \right) = C'_s \frac{\phi}{\phi + 1}$$

แทนค่าตัวแปรดังกล่าวลงในสมการ 3.47 จะได้

$$H = \frac{V_j^2}{2g} [Y1 - Y2 - (Y3 - Y4)]$$

Hence;

$$\begin{aligned}
 Y1 &= 2B + 2\phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \frac{\left[ \frac{1 - C_s(1 - \mu_s)}{C_s \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1} \right]^2 \left\{ 1 - C_s \left( 1 - \frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w} \right) \right\}}{\left\{ 1 - C_s(1 - \mu_s) \right\}^2} \\
 Y2 &= \frac{B(\gamma_w \phi + \gamma_{su})}{\{1 - C_d(1 - \mu_d)\} \gamma_{su}} \left[ \frac{\left( 1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s) \right) \phi}{\left[ C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1 \right]} \right] \left[ \left( 2B + 2B\phi \frac{\left( 1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} \left( 1 - \frac{\mu_s \mu_d \gamma_{ss}}{\gamma_w} \right) \right)}{\left( 1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s) \right)} \right) \right. \\
 &\quad \left. - \left( B^2(1 + \phi) \frac{\left[ \frac{1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s) \right] \phi}{\left[ C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1 \right]} + 1 \frac{K_{mc}}{\{\mu_d C_d + (1 - C_d)\}^2} \right) \right] \\
 Y3 &= \frac{B^2(1 + \phi)}{\{1 - C_d(1 - \mu_d)\}^2} \left[ \frac{\left[ 1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s) \right] \phi}{\left[ C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1 \right]} + 1 \left( K_{dif} - \alpha_d \left( 1 - C'_s \frac{\phi}{\phi + 1} (1 - \mu_d^2) \right) \right) \right] \\
 Y4 &= \phi^2 \frac{B^2}{(1-B)^2} \frac{1}{\left\{ 1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1 - \mu_s) \right\}} \frac{\left[ \alpha_s \left\{ 1 - C'_s (1 - \mu_s^2) \right\} + K_s \right]}{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1}
 \end{aligned}$$

(3.49)

แทนค่าตัวแปรดังกล่าวลงในสมการ 3.48 จะได้

$$H_e = \frac{V_j^2}{2g} [Z1 - (Z2 - (Z3(Z4 - Z5)))]$$

Hence;

$$\begin{aligned} Z1 &= (\alpha_j + K_j) + \frac{B^2(1+\phi)}{\{1-C_d(1-\mu_d)\}^2} \left( \frac{\left[1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1-\mu_s)\right] \phi}{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} \left(\gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1\right) + 1} + 1 \right) \left( K_{dif} - \alpha_d \left( 1 - \left( C'_s \frac{\phi}{\phi+1} \right) + \left( C'_s \frac{\phi}{\phi+1} \mu_d^2 \right) \right) \right) \\ Z2 &= 2B + \left( 2\phi^2 \frac{B^2 \left\{ 1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} \left( 1 - \frac{\mu_s^2 \gamma_{ss}}{\gamma_w} \right) \right\}}{(1-B)^2 \left\{ C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} \left( \gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1 \right) + 1 \right\}^2} \right) \\ Z3 &= \frac{B}{\left\{ 1 - \frac{C'_s \gamma_{su}}{\gamma_{ss} \phi} (1-\mu_d) \right\}} \left( \frac{\left[1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1-\mu_s)\right] \phi}{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} \left(\gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1\right) + 1} + 1 \right) \\ Z4 &= 2B + \left( 2B\phi \frac{\left\{ 1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} \left( 1 - \frac{\mu_s \mu_d \gamma_{ss}}{\gamma_w} \right) \right\}}{\left\{ 1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1-\mu_s) \right\}} \right) \\ Z5 &= B^2(1+\phi) \left( \frac{\left[1 - C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} (1-\mu_s)\right] \phi}{C'_s \frac{\gamma_{su}}{\gamma_{ss}} \left(\gamma_s \frac{\mu_s}{\gamma_w} - 1\right) + 1} + 1 \right) \left( \frac{K_{mc}}{\{\mu_d C_d + (1-C_d)\}^2} \right) \end{aligned} \quad (3.50)$$

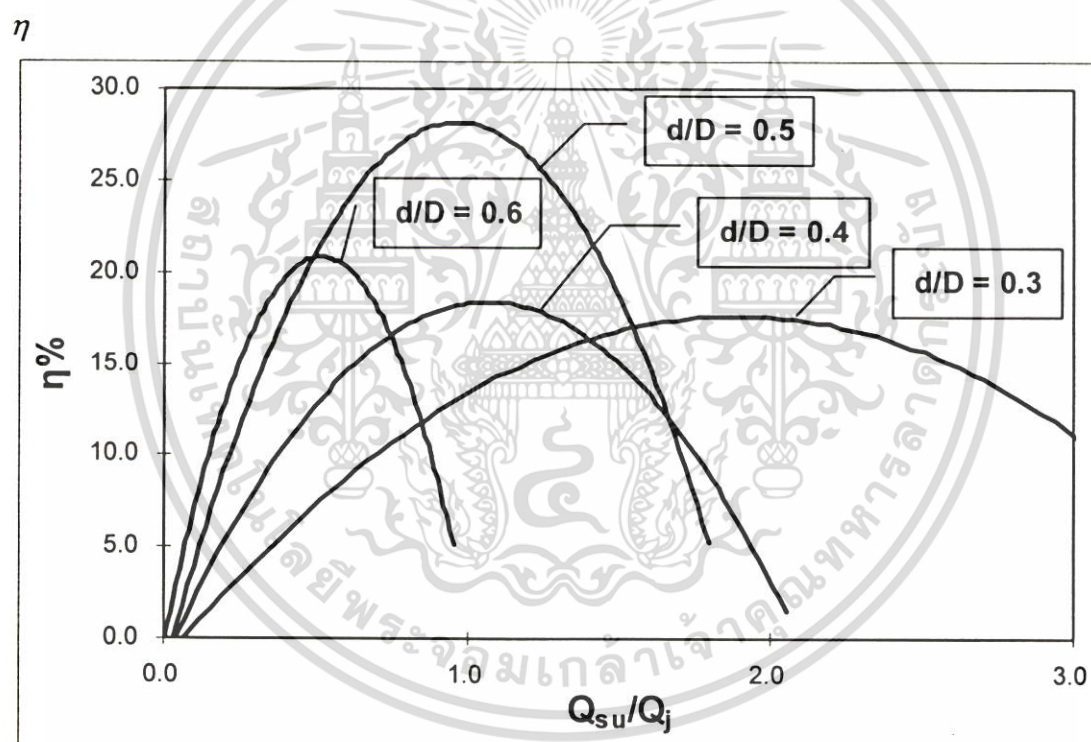
จะได้สมการประสิทธิภาพของปั๊มหัวฉีด คือ

$$\eta = \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w} \frac{Q_{su}}{Q_j} \frac{H}{H_e} = \frac{\gamma_{su}}{\gamma_w} \frac{Q_{su}}{Q_j} \frac{H_d - H_s}{H_j - H_d} \quad (3.51)$$

### 3.4 การคำนวณประสิทธิภาพของปั๊มแบบหัวฉีดทางทฤษฎี

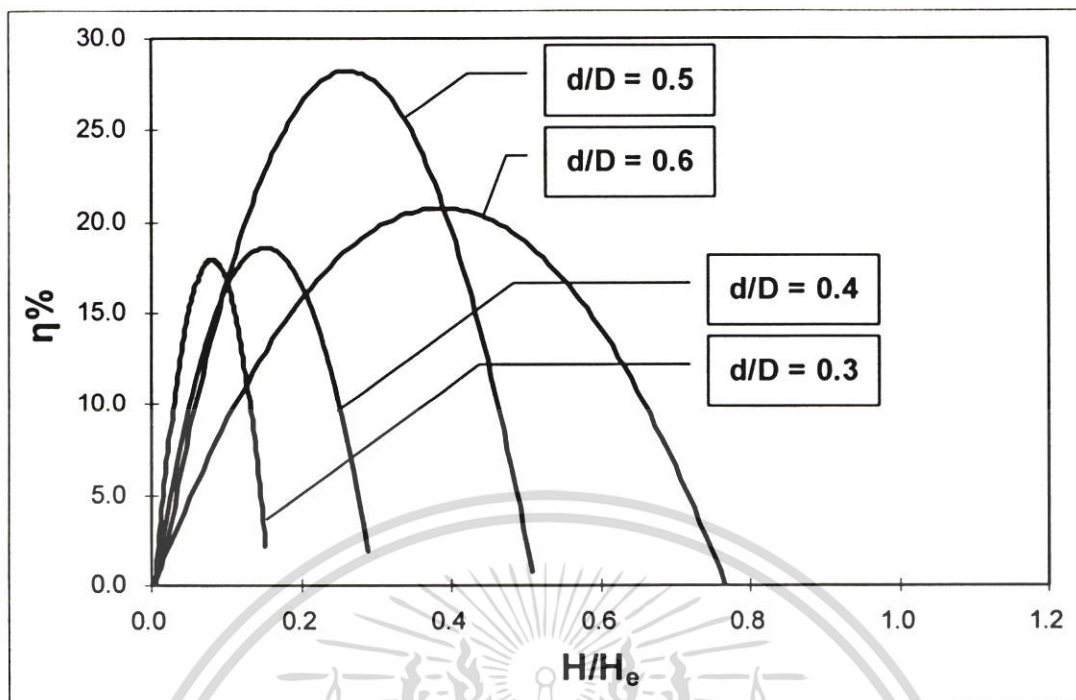
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มน้ำแบบหัวฉีดจากการคำนวณทางทฤษฎี โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของประสิทธิภาพและตัวแปรต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณจากการวิเคราะห์สมการทางทฤษฎี โดยจะประกอบด้วยการคำนวณประสิทธิภาพของปั๊มแบบหัวฉีดทางทฤษฎี สำหรับการขนถ่ายน้ำ (Water Jet Pump) และการคำนวณประสิทธิภาพของปั๊มแบบหัวฉีดทางทฤษฎี สำหรับการขนถ่ายส่วนผสมที่เป็นของแข็ง (Solids Handling Jet Pump)

#### 3.4.1 การคำนวณประสิทธิภาพของปั๊มแบบหัวฉีดทางทฤษฎี สำหรับการขนถ่ายน้ำ (Water Jet Pump)



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta\%$ ) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

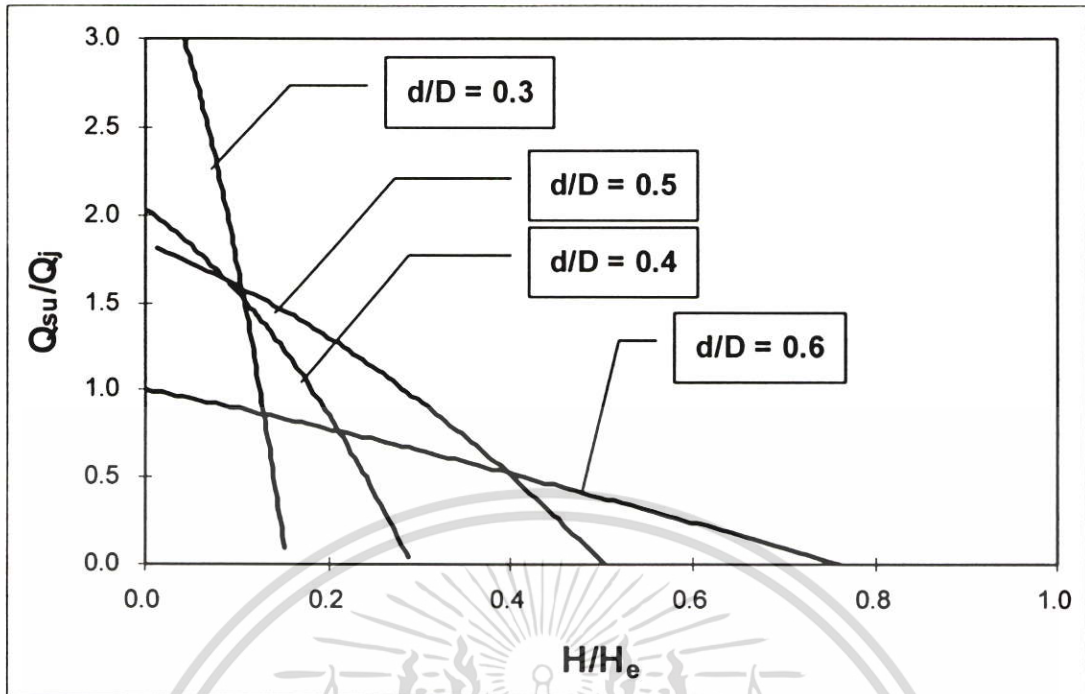
จากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือ 28.3% และรองลงมาคือ ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.6 ให้ค่าประสิทธิภาพที่ 20.8%



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta\%$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

ค่าประสิทธิภาพจากการคำนวณทางทฤษฎี เมื่อเทียบกับค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ พบว่าเมื่อถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะลดลง โดยที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

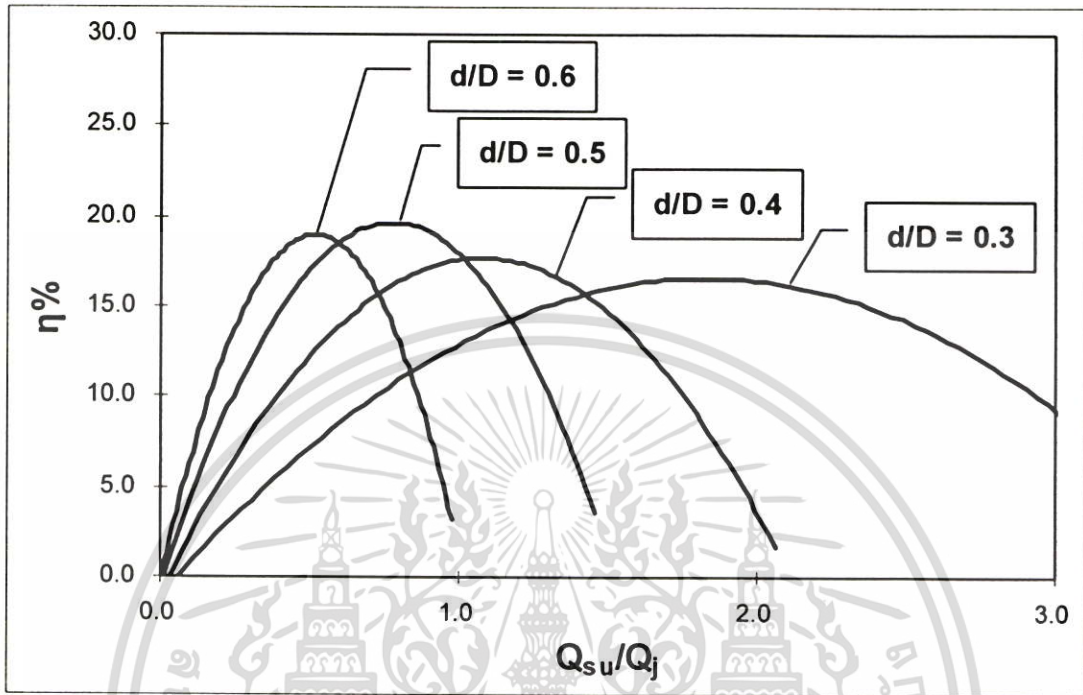
กล่าวคือ เมื่อค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) เพิ่มขึ้นเนื่องจากเสถียรภาพด้านจ่าย ( $H_d$ ) เพิ่มขึ้นมาถึงค่าหนึ่ง (ค่าวิกฤต) จะส่งผลให้ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_i$ ) ลดลง เนื่องจากความดันที่ด้านจ่ายสูงขึ้นทำให้อัตราการไหลในห้องผสม (Mixing throat) ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถอธิบายจากสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

จากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) เมื่อ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ Head Ratio ( $H/H_e$ ) มีค่าลดลง กล่าวคือ เมื่อค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) เพิ่มขึ้นเนื่องจากเหตุความดันทางด้านจ่าย ( $H_d$ ) เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ลดลง เนื่องความดันที่ด้านจ่ายสูงขึ้นทำให้อัตราการไหลในห้องผสม (Mixing throat) ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถอธิบายจากสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3

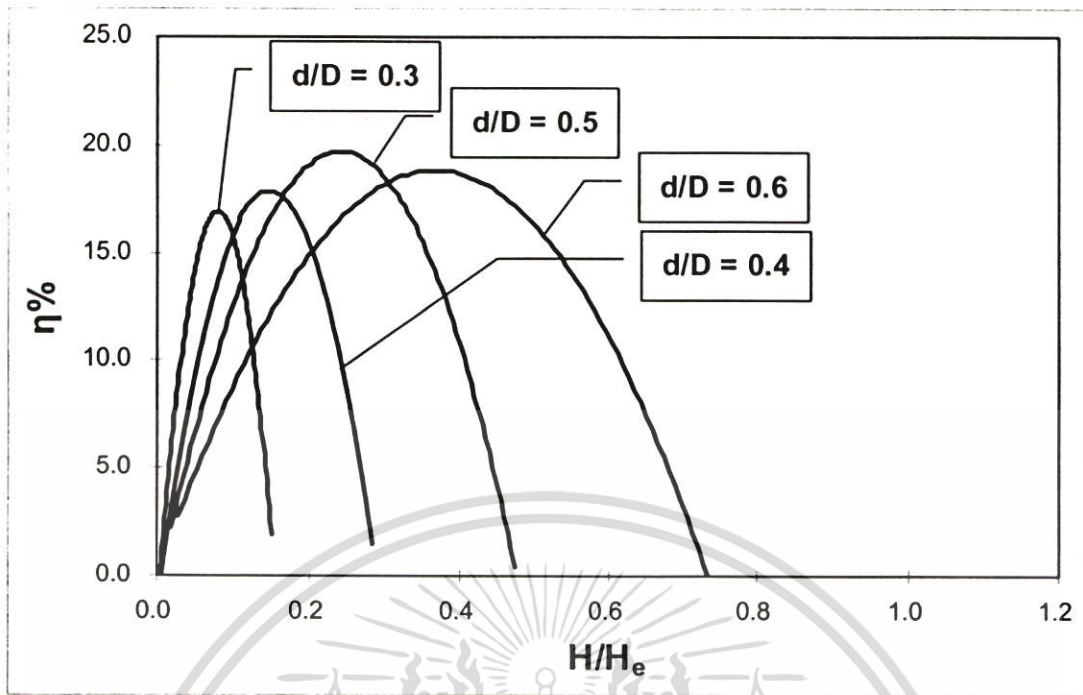
### 3.4.2 การคำนวณประสิทธิภาพของปั๊มแบบหัวฉีดทางทฤษฎี สำหรับการขนถ่ายส่วนผสมที่เป็นของแข็ง (Solids Handling Jet Pump)



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

จากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือ 19.7% และรองลงมาคือ ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.6 ให้ค่าประสิทธิภาพที่ 18.9%

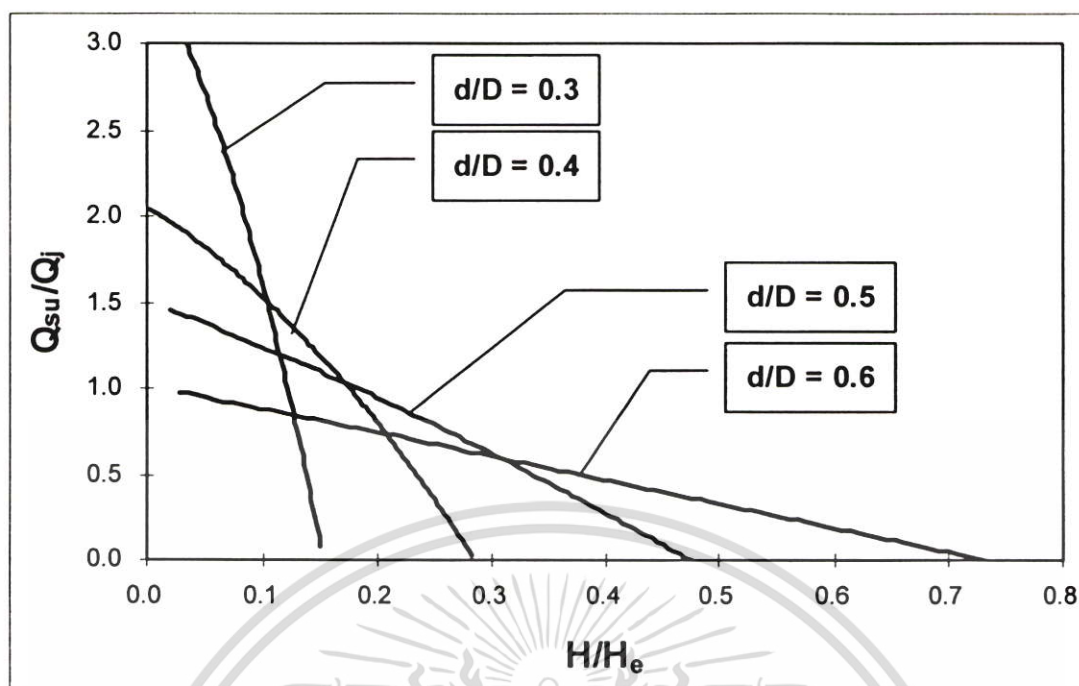
ค่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) เมื่อถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะพบว่ามีแนวโน้มลดลงเนื่องจาก ความสัมพันธ์ของค่า Head Ratio ( $H/H_c$ ) ที่มีผลต่อค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กล่าวคือ เมื่อเสถียรความดันที่ด้านจ่ายเพิ่มขึ้น ค่า Head Ratio ( $H/H_c$ ) จะเพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลให้อัตราการไหลในห้องผสม (Mixing throat) ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถอธิบายจากสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( %) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

ค่าประสิทธิภาพจากการคำนวณทางทฤษฎี เมื่อเทียบกับค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ พบว่าเมื่อถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะลดลง โดยที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

กล่าวคือ เมื่อค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) เพิ่มขึ้นเนื่องจากเสดความดันทางด้านจ่าย ( $H_d$ ) เพิ่มขึ้นมาถึงค่าหนึ่ง (ค่าวิกฤต) จะส่งผลให้ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ลดลง เนื่องจากความดันที่ด้านจ่ายสูงขึ้นทำให้อัตราการไหลในห้องผสม (Mixing throat) ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถอธิบายจากสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3



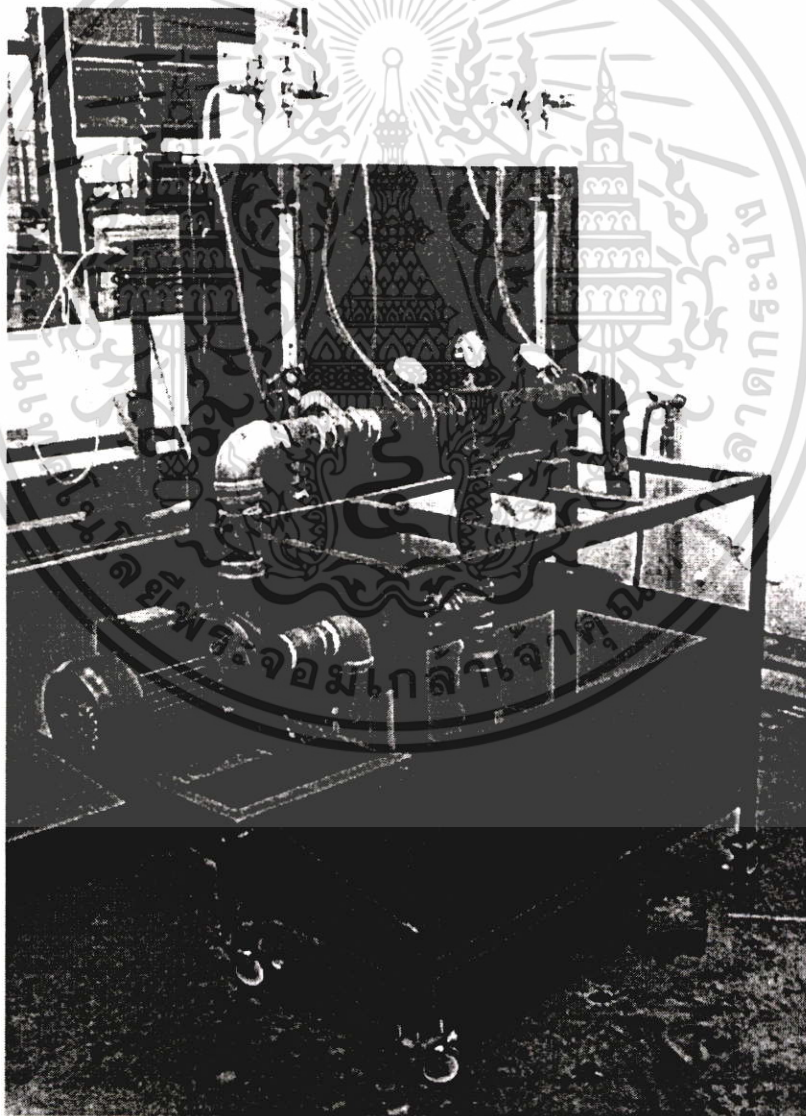
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

จากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) เมื่อ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ Head Ratio ( $H/H_e$ ) มีค่าลดลง กล่าวคือ เมื่อค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) เพิ่มขึ้นเนื่องจากเสถียรภาพด้านข้าง ( $H_e$ ) เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ลดลง เนื่องความดันที่ด้านจ่ายสูงขึ้นทำให้อัตราการไหลในห้องผสม (Mixing throat) ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถอธิบายจากสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3

## บทที่ 4

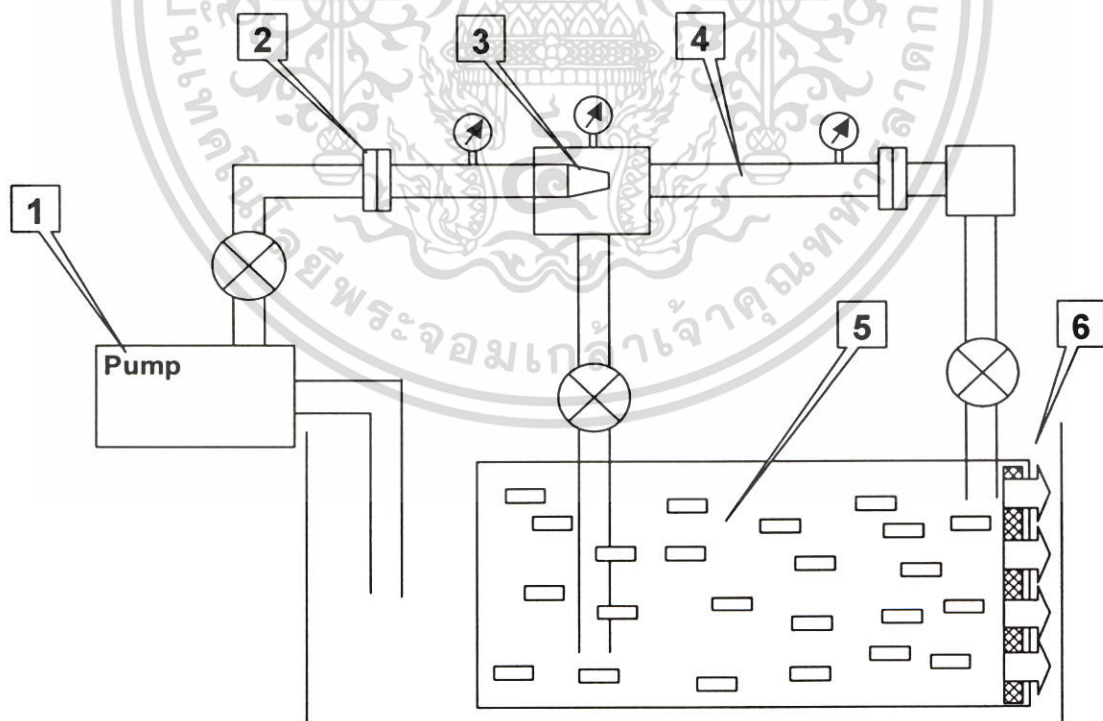
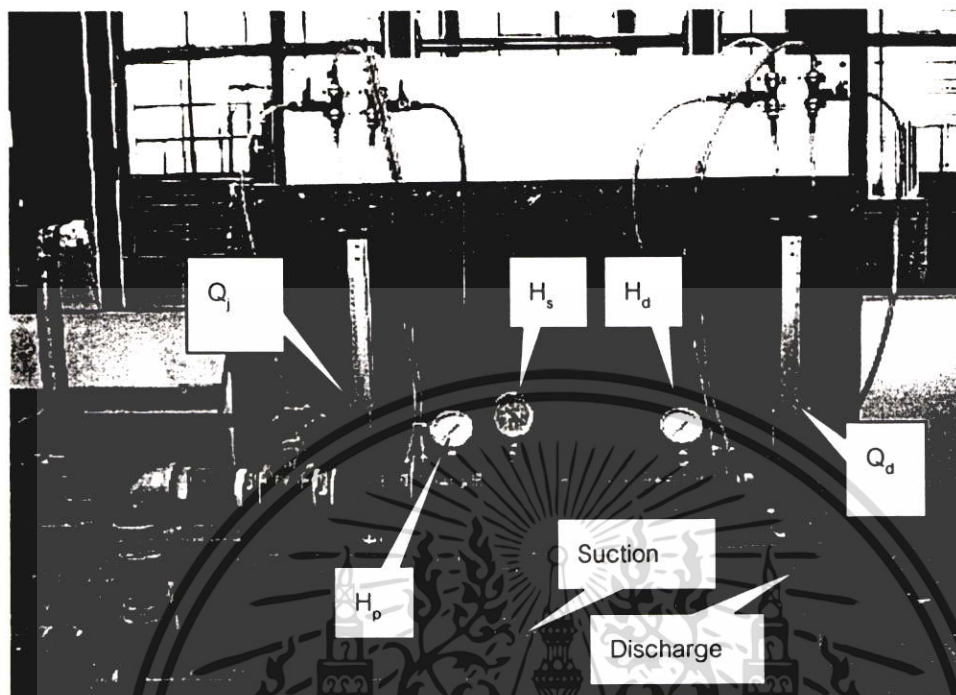
### การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการออกแบบชุดทดลองเพื่อให้สามารถรองรับการทดลองทั้งแบบควบน้ำและส่วนผสมของของแข็งได้ โดยการเพิ่มชุดกระเบาะเจาะรูพรุนและติดตั้งแผ่นกรองเพื่อจัดการให้ปลายด้านดูดส่วนผสมจากกระเบาะดังกล่าว และส่วนปลายด้านจ่ายให้จ่ายลงมาในกระเบาะดังกล่าวด้วยเช่นกัน เมื่อปั้มน้ำแบบหัวฉีดทำงาน จะทำให้ส่วนที่เป็นของแข็งเดินทาง เข้า-ออก ระบบเป็นวัฏจักร ไม่เล็ดลอดออกได้ ส่วนน้ำจะสามารถไหลผ่านแผ่นกรองออกมาซึ่งถึงเก็บน้ำรวม แล้วถูกดูดโดยปั้มเป็นวัฏจักรการทำงานของปั้มน้ำด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.1 ชุดทดลองปั้มน้ำแบบหัวฉีด

## 4.1 ชุดทดลอง



รูปที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของชุดทดลองปั้มน้ำแบบหัวฉีด

### ชิ้นส่วนหลักของชุดทดลอง

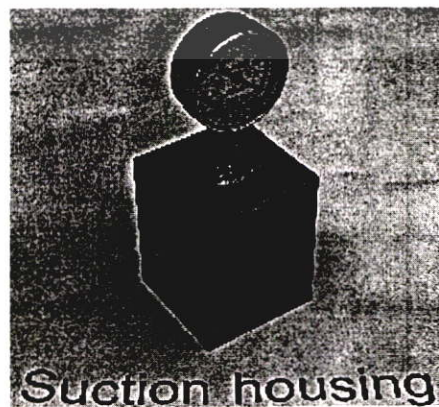
1. Pump
2. Orifice
3. Nozzle
4. Mixing throat
5. Filtered chamber
6. Main tank



รูปที่ 4.3 หัวฉีดขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.4 ชุดต่อหัวฉีดเพื่อจัดตำแหน่งหัวฉีดจ่อเข้าปากทางห้องผสมและเกจวัดความดัน



รูปที่ 4.5 ชุดต่ออุปกรณ์หลักและเกจวัดความดันสุญญากาศ



รูปที่ 4.6 Mixing throat และเกจวัดความดัน



รูปที่ 4.7 กระบะเจาะรูพร้อมแผ่นกรองทราย



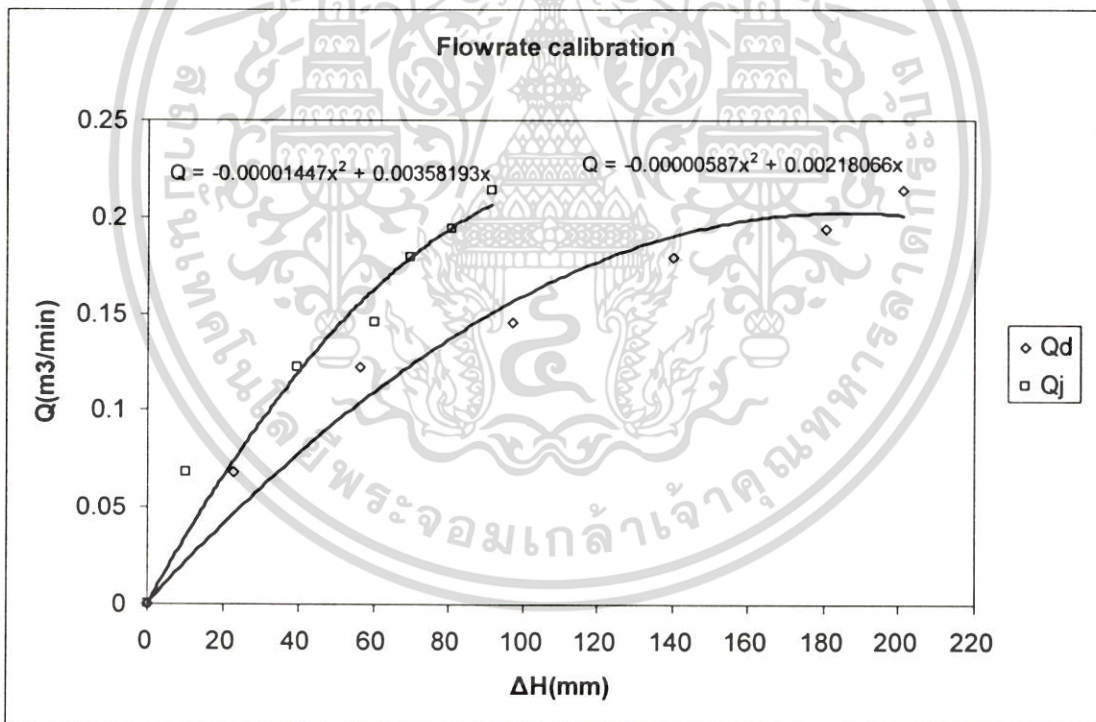
รูปที่ 4.8 กรวดที่ใช้ในการทดลอง (เส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3.5 mm.)

## 4.2 การ Calibrate หาดอัตราการไหลที่หัวฉีด ( $Q_d$ ) และด้านจ่าย ( $Q_j$ ) โดย Orifice

การ Calibrate เพื่อหาดอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันต่างๆ เพราะการคำนวณอัตราการไหลโดยใช้ทฤษฎี และการปฏิบัติ อาจไม่เท่ากัน จึง Calibrate เพื่อให้ได้อัตราการไหลจากเครื่องอย่างแท้จริง

### วิธีการ Calibrate

เริ่มทำโดยการเปิดวาล์วทางด้านดูดกับวาล์วทางด้านทางออกจนสุด แล้วเปิดวาล์วด้านปั๊มจนเกจวัดความดันได้  $0.1 \text{ Kg/cm}^2$  แล้วทำการบันทึก H1 และ H2 เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการไหล หลังจากนั้นเพิ่มความดันทางด้านปั๊มขึ้นครั้งละ  $0.1 \text{ Kg/cm}^2$  จนถึงค่าความดัน  $3.5 \text{ Kg/cm}^2$  หลังจากนั้น นำค่า H ที่ได้มาคำนวณหาอัตราการไหล เมื่อเราทราบผลต่างของแรงดันเมื่อผ่านออริฟิซ เราสามารถหาความเร็วของของไหลได้



รูปที่ 4.9 ผลการ Calibration

### 4.3 วิธีการทดลอง

#### 4.3.1 ป้อนน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump)

1. ใช้ Nozzle ขนาด 6 mm. เปิดป้อนโดยปิดวาล์วด้าน Nozzle ให้สนิท และเปิดวาล์วด้าน Discharge ให้สุด

2. เปิดวาล์วด้าน Nozzle ตั้งค่า  $P_j$  ที่ 1.5 kg/cm<sup>2</sup>

3. วาล์วด้าน Discharge ตั้งค่า  $P_d$  ที่ 0.1 kg/cm<sup>2</sup>

4. เก็บข้อมูล โดยชั่งน้ำหนักของน้ำที่ออกมาทางด้าน Discharge ในช่วงระยะเวลา 10

วินาที

5. ปรับค่า  $P_d$  ไปที่ 0.15 แล้วจึงปรับค่าเพิ่มขึ้น และเก็บข้อมูลตามข้อ 4 จนกระทั่งไม่สามารถเพิ่มความดันได้อีก แล้วหยุดการทดลอง

6. เปลี่ยนค่า  $P_j$  ไปที่ 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 kg/cm<sup>2</sup> แล้วทำการทดลองตามข้อ 4 และข้อ 5

7. เปลี่ยนขนาด Nozzle ไปที่ 8, 10 และ 12 mm. แล้วทำการทดลองตามข้อ 1 – 6

#### 4.3.2 การขนถ่ายของแข็งโดยป้อนน้ำแบบหัวฉีด (Solids Handling Jet Pump)

1. ใช้ Nozzle ขนาด 6 mm. ใส่กรวดที่คัดแล้วใส่ลงในกระเบจาะรูปกรวยพร้อมแผ่นกรอง ให้ท่วมช่องดูด แล้วเติมน้ำลงในกระเบจาะให้ได้ระดับ

2. เปิดป้อนโดยปิดวาล์วด้าน Nozzle ให้สนิท และเปิดวาล์วด้าน Discharge ให้สุด

3. ค่อยๆเปิดวาล์วด้าน Nozzle ตั้งค่า  $P_j$  ที่ 1.5 kg/cm<sup>2</sup>

4. ค่อยๆปิดวาล์วด้าน Discharge ตั้งค่า  $P_d$  ที่ 0.1 kg/cm<sup>2</sup>

5. เก็บข้อมูล โดยชั่งน้ำหนักของของผสมที่ออกมาทางด้าน Discharge ในช่วงระยะเวลา 10 วินาที

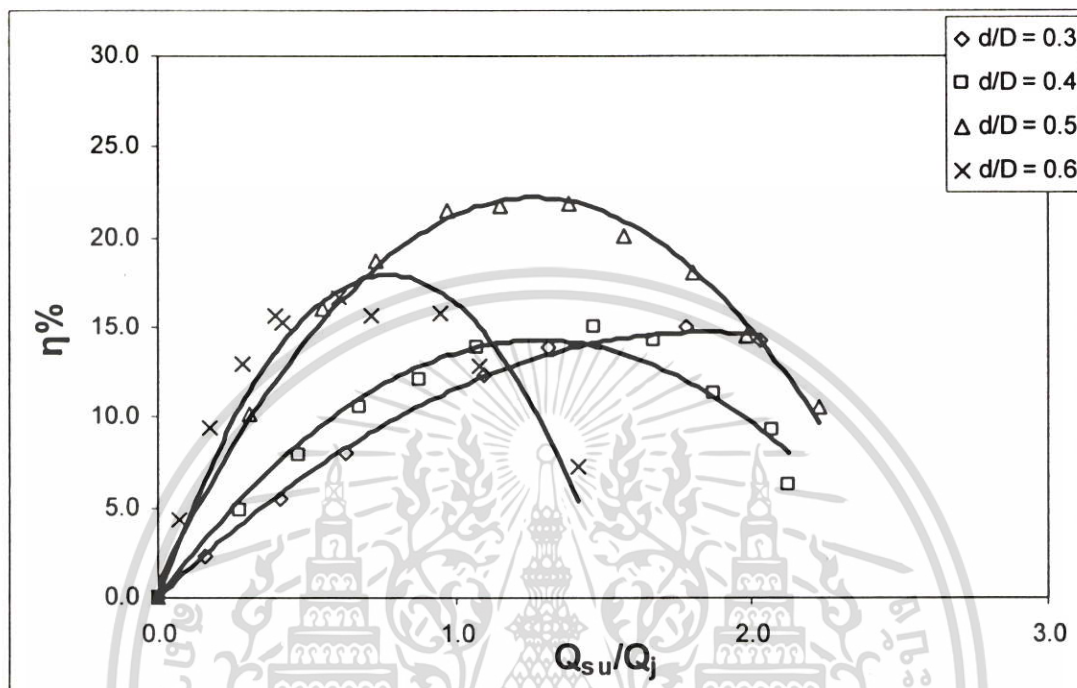
6. ปรับค่า  $P_d$  ไปที่ 0.15, 0.20, 0.25, และเก็บข้อมูลตามข้อ 5 จนกระทั่งไม่สามารถดูดทรายขึ้นมาได้อีก แล้วหยุดการทดลอง

7. เปลี่ยนค่า  $P_j$  ไปที่ 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 kg/cm<sup>2</sup> แล้วทำการทดลองตามข้อ 5 และข้อ 6

8. เปลี่ยนขนาด Nozzle ไปที่ 8, 10 และ 12 mm. แล้วทำการทดลองตามข้อ 1 – 7

## 4.4 ผลการทดลอง

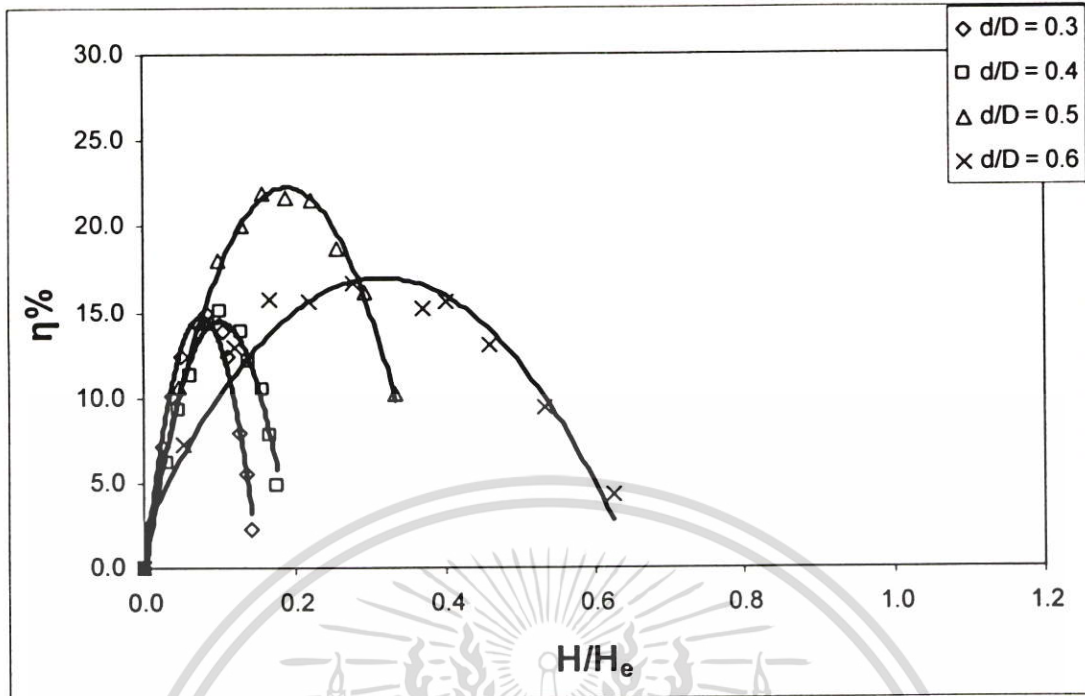
### 4.4.1 ป้อนน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump)



รูปที่ 4.10 กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$  %) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

ผลจากการทดลองพบว่า ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่สุดคือ 21.9% และรองลงมาคือ ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.6 ให้ค่าประสิทธิภาพที่ 16.7% ส่วนที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) 0.4 และ 0.3 ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 15.1% และ 14.9% ตามลำดับ

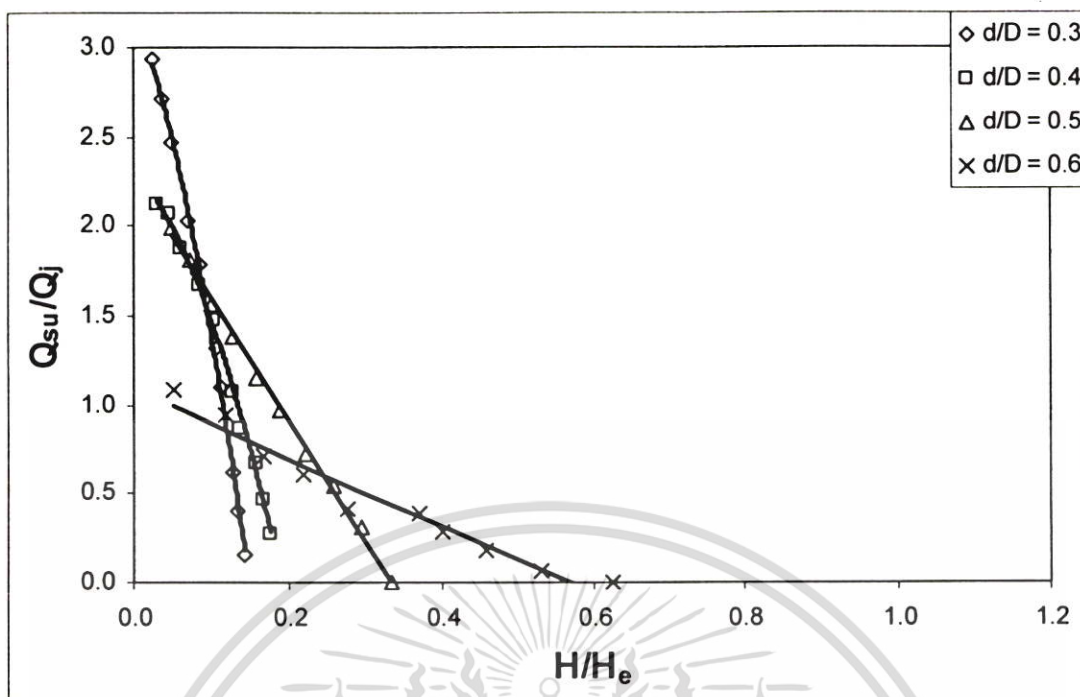
พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 พบว่า ที่ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) เท่ากับ 1.4 จะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดจากนั้นจะมีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจาก เหนือความดันที่ด้านจ่ายเพิ่มขึ้น ค่า Head Ratio ( $H/H_0$ ) จะเพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลให้อัตราการไหลในห้องผสม (Mixing throat) ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3



รูปที่ 4.11 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$  %) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

ค่าประสิทธิภาพจากการทดลอง เมื่อเทียบกับค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ พบว่าเมื่อถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะลดลง โดยที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 พบว่า ค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) ประมาณ 0.16 จะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด กล่าวคือ เมื่อค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) เพิ่มขึ้นเนื่องจากเสถียรภาพด้านข้าง ( $H_e$ ) เพิ่มขึ้น มาถึงค่าหนึ่ง (ค่าวิกฤต) จะส่งผลให้ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{ss}/Q_j$ ) ลดลง เนื่องจากความดันที่ด้านจ่ายสูงขึ้นทำให้อัตราการไหลในห้องผสม (Mixing throat) ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3

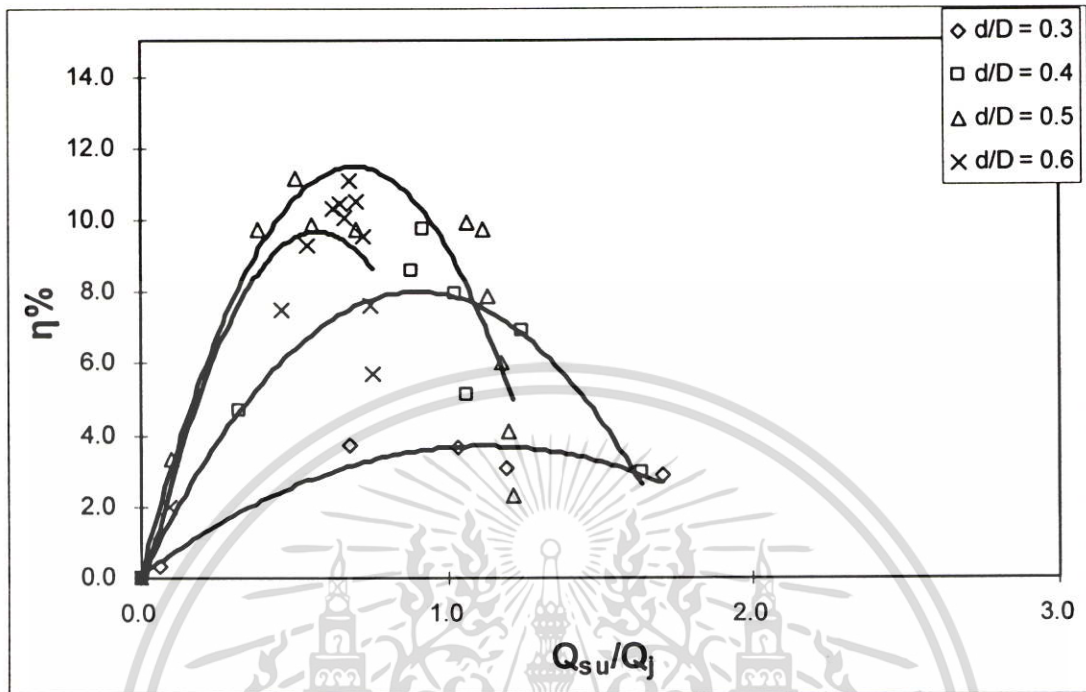


รูปที่ 4.12 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

จากการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) พบว่าเมื่อ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) มีค่าลดลงจะส่งผลให้ Head Ratio ( $H/H_e$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการคำนวณจากสมการทางทฤษฎี

พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 พบว่า ค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) ประมาณ 0.16 และที่ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ประมาณ 1.4 อธิบายได้ว่าที่ค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะได้พื้นที่ได้กราฟสูงสุด และจะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3

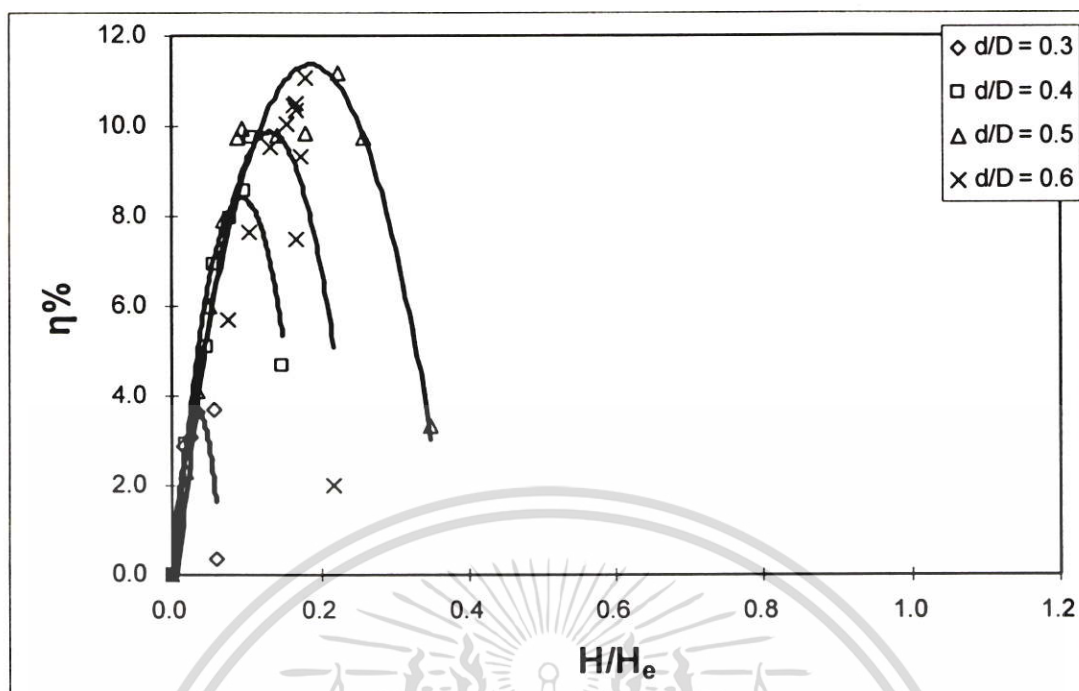
#### 4.4.2 การขนถ่ายของแข็งโดยปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Solids Handling Jet Pump)



รูปที่ 4.13 กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ %) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

ผลจากการทดลองพบว่า ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 11.2% และรองลงมาคือ ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.6 ให้ค่าประสิทธิภาพที่ 10.0% ส่วนที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) 0.4 และ 0.3 ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 9.7% และ 3.7% ตามลำดับ

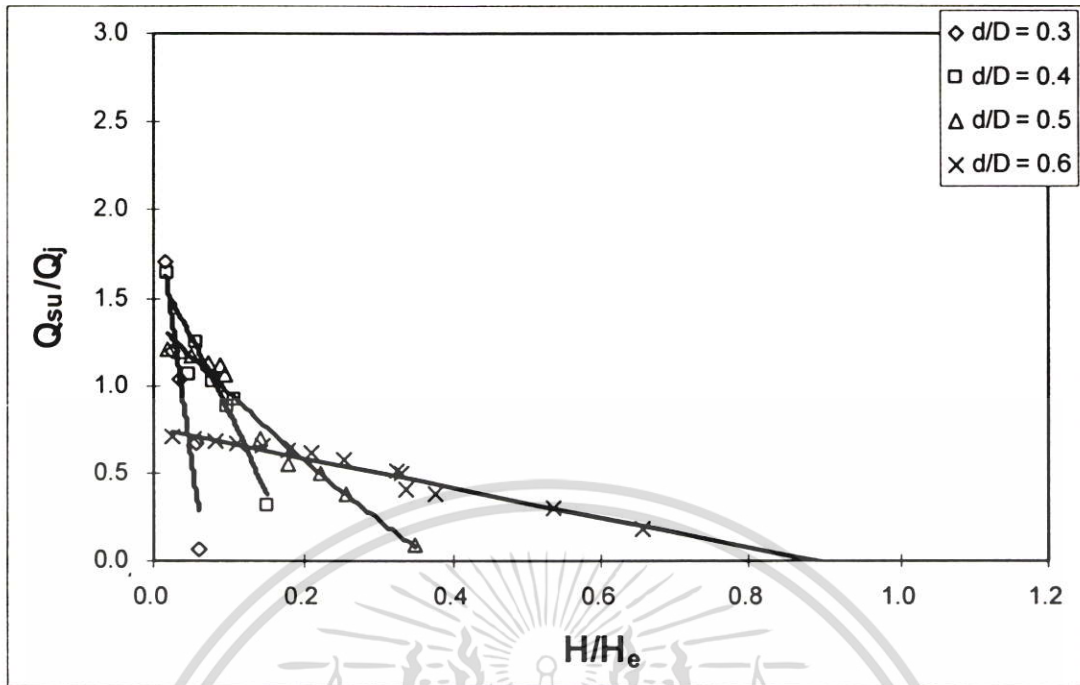
พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 พบว่า ที่ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ประมาณ 0.5 จะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดจากนั้นจะมีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจาก เหตุความดันที่ด้านจ่ายเพิ่มขึ้น ค่า Head Ratio ( $H/H_s$ ) จะเพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลให้อัตราการไหลในห้องผสม (Mixing throat) ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3



รูปที่ 4.14 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta\%$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

ค่าประสิทธิภาพ Efficiency ( $\eta\%$ ) จากการทดลอง เมื่อเทียบกับค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ พบว่าเมื่อถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะลดลง โดยที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 พบว่า ค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) ประมาณ 0.22 จะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดจากนั้นจะมีแนวโน้มลดลง กล่าวคือ เมื่อค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) เพิ่มขึ้นเนื่องจากเสถียรภาพด้านข้าง ( $H_e$ ) เพิ่มขึ้น มาถึงค่าหนึ่ง (ค่าวิกฤต) จะส่งผลให้ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ลดลง เนื่องจากความดันที่ด้านข้างสูงขึ้นทำให้อัตราการไหลในห้องผสม (Mixing throat) ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3



รูปที่ 4.15 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) เมื่อ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) เมื่อมีค่าลดลงจะส่งผลให้ Head Ratio ( $H/H_e$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการคำนวณจากสมการทางทฤษฎี

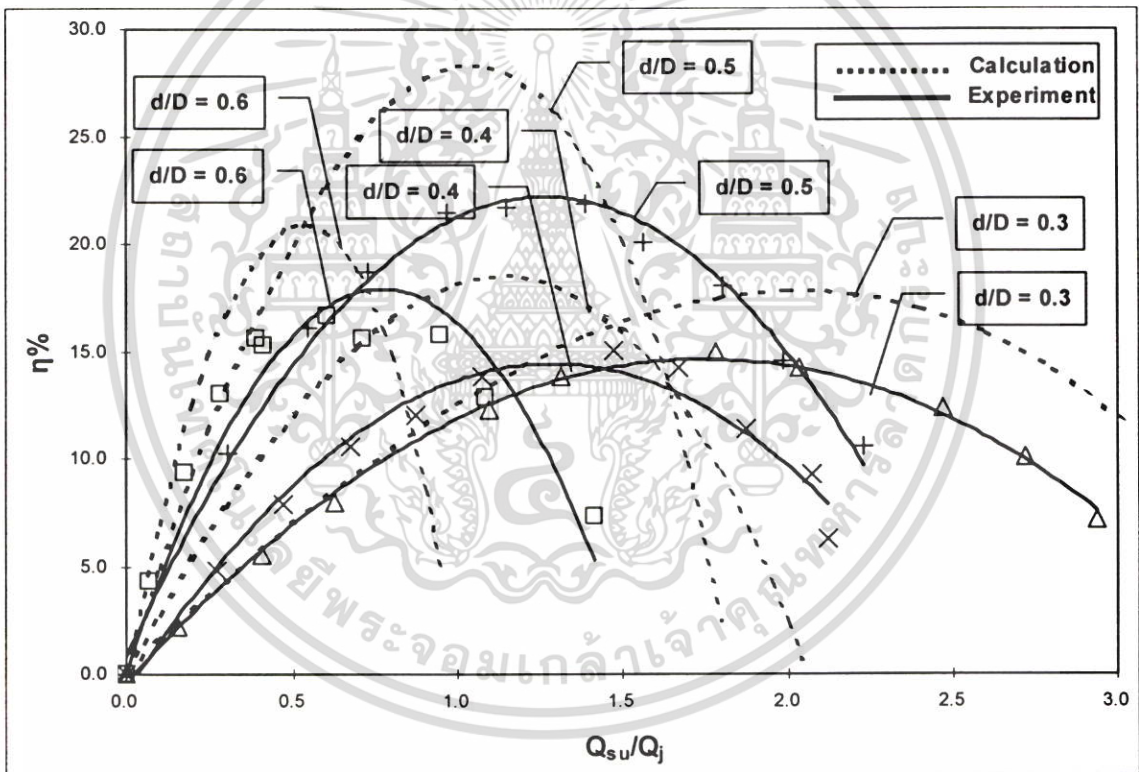
พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 พบว่า ค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) ประมาณ 0.22 และที่ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ประมาณ 0.5 อธิบายได้ว่าที่ค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะได้พื้นที่ได้กราฟสูงสุด และจะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3

## บทที่ 5

### การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

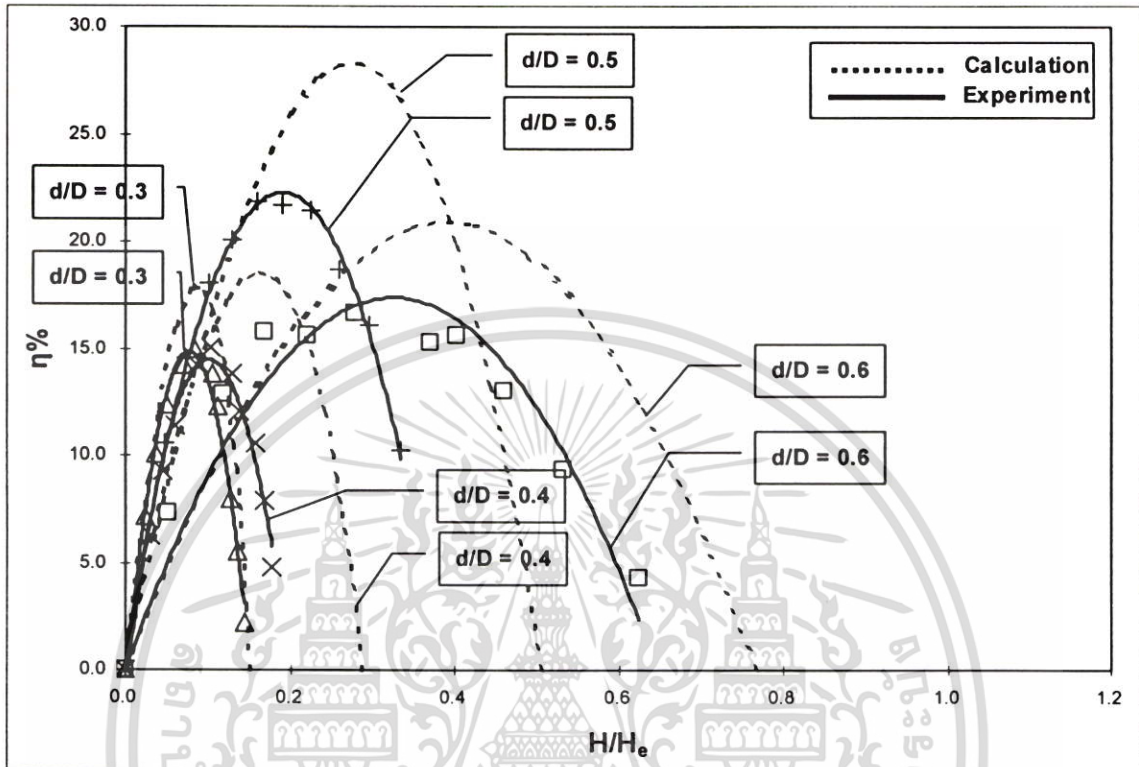
การศึกษาศมรรถนะการทำงานของปั๊มแบบหัวฉีด ได้สร้างสมการวิเคราะห์การคำนวณเชิงทฤษฎี และได้สร้างชุดทดลองที่มีรูปร่างสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณต่างๆ ในทางทฤษฎี ( $K_j=1$ ,  $K_r=0.25$ ,  $K_{mc}=0.3$  และ  $K_g=0.3$ ) ผลที่ได้จะถูกนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

#### 5.1 ปั๊มน้ำแบบหัวฉีด (Water Jet Pump)



รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$  %) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

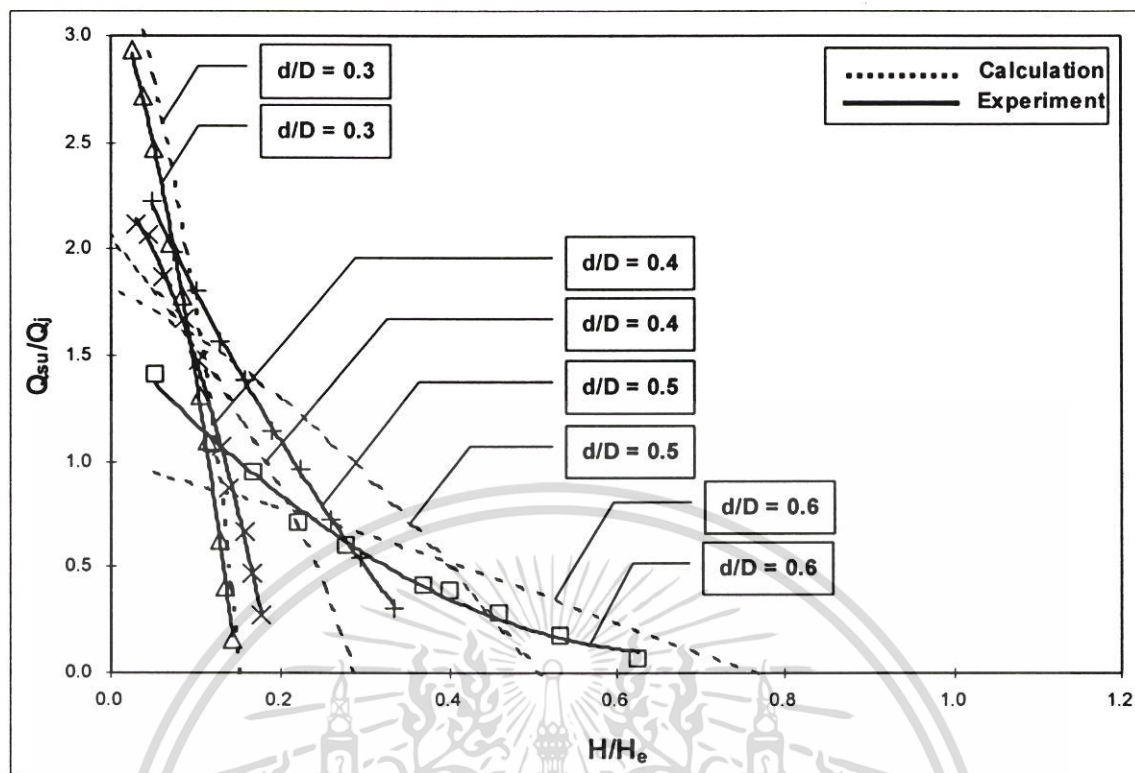
ผลจากการทดลองพบว่า ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 21.9% ส่วนจากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 28.3%



รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$  %) กับ Head Ratio ( $H/H_0$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

ค่าประสิทธิภาพจากการทดลอง เมื่อเทียบกับค่า Head Ratio ( $H/H_0$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ พบว่าเมื่อถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะลดลง โดยที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

จากการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ พบว่าค่าประสิทธิภาพ Efficiency ( $\eta$ %) จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าจากการคำนวณ อันเนื่องจากองค์ประกอบต่างๆ ที่จะกล่าวถึงในบทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ ส่วนแนวโน้มของความสัมพันธ์พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการคำนวณทางทฤษฎี กล่าวคือ เมื่อค่า Head Ratio ( $H/H_0$ ) เพิ่มขึ้นเนื่องจากเหตุความดันทางด้านจ่าย ( $H_0$ ) เพิ่มขึ้น มาถึงค่าหนึ่ง (ค่าวิกฤต) จะส่งผลให้ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{\text{mix}}/Q_0$ ) ลดลง เนื่องจากความดันที่ด้านจ่ายสูงขึ้นทำให้อัตราการไหลในห้องผสม (Mixing throat) ลดลง ส่งผลให้ค่าค่าประสิทธิภาพ Efficiency ( $\eta$  %) ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3

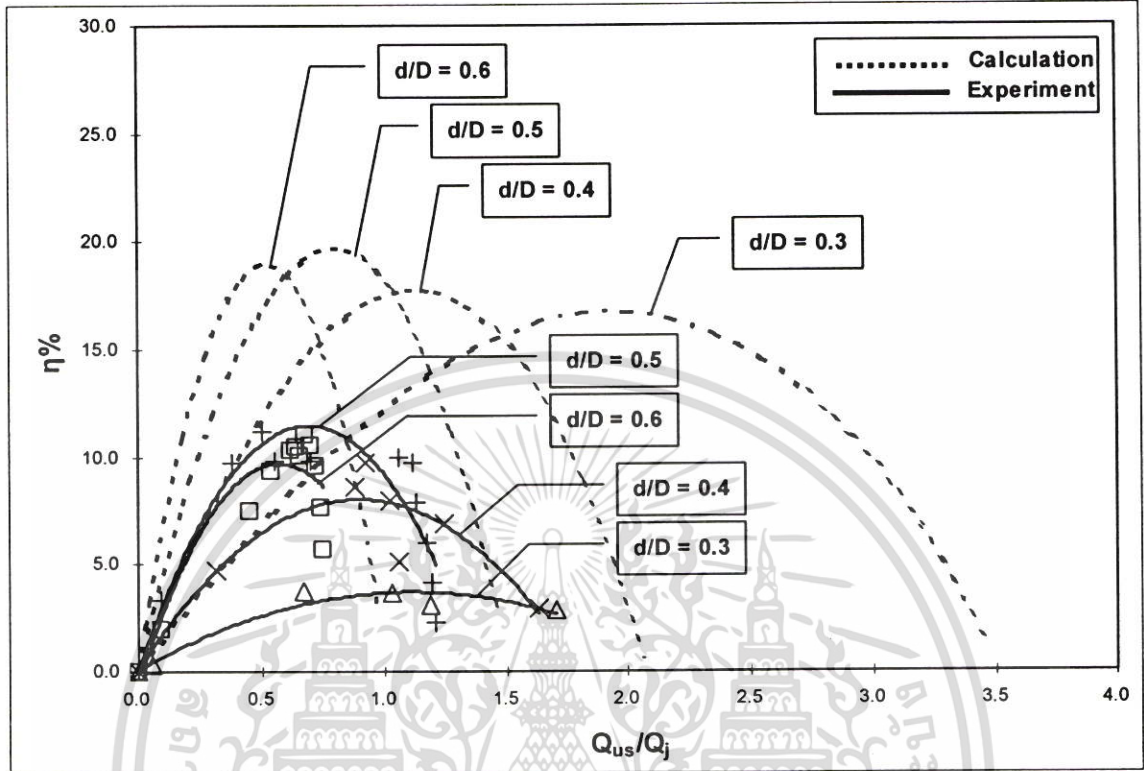


รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) พบว่าเมื่อ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) มีค่าลดลงจะส่งผลให้ Head Ratio ( $H/H_e$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการคำนวณจากสมการทางทฤษฎี

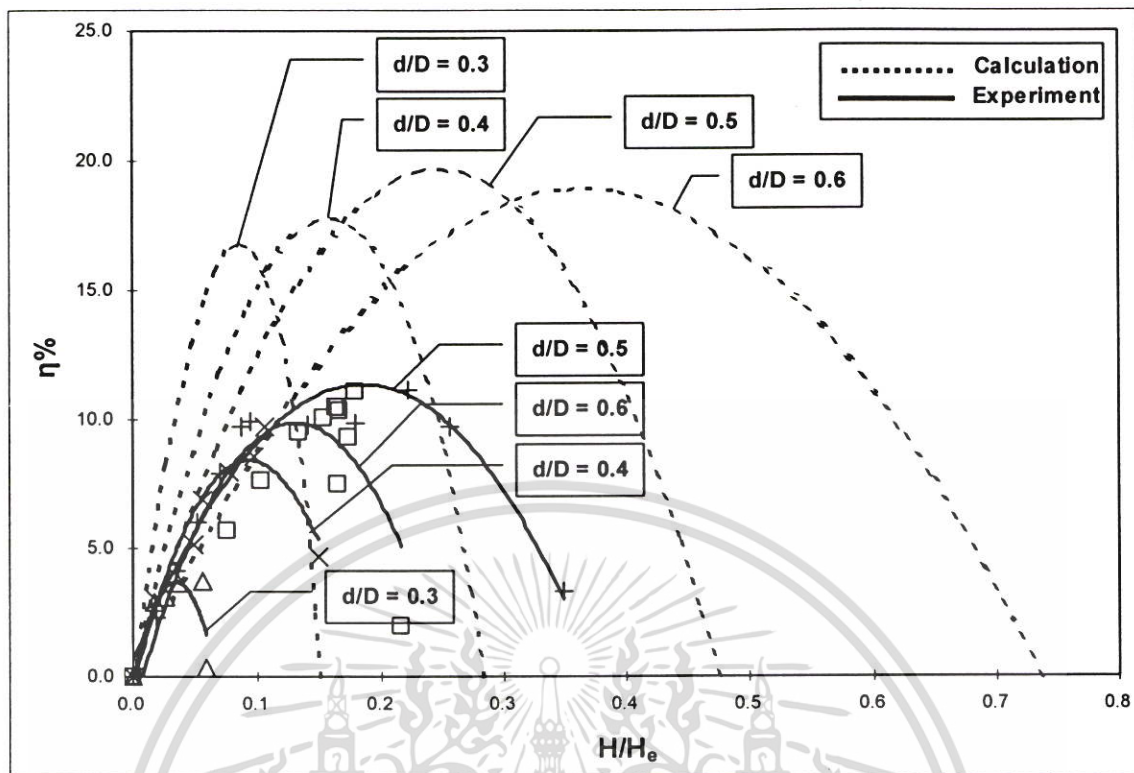
พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 พบว่า จากการทดลอง ค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) ประมาณ 0.16 และที่ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ประมาณ 1.4 และจากการคำนวณ ค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) ประมาณ 0.3 และที่ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ประมาณ 1.0 จะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด และอธิบายได้ว่าที่ค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะได้พื้นที่ได้กราฟสูงสุด โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3

## 5.2 การขนถ่ายของแข็งโดยปั๊มแบบหัวฉีด (Solids Handling Jet Pump)



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta\%$ ) กับ Flowrate Ratio ( $Q_{us}/Q_j$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

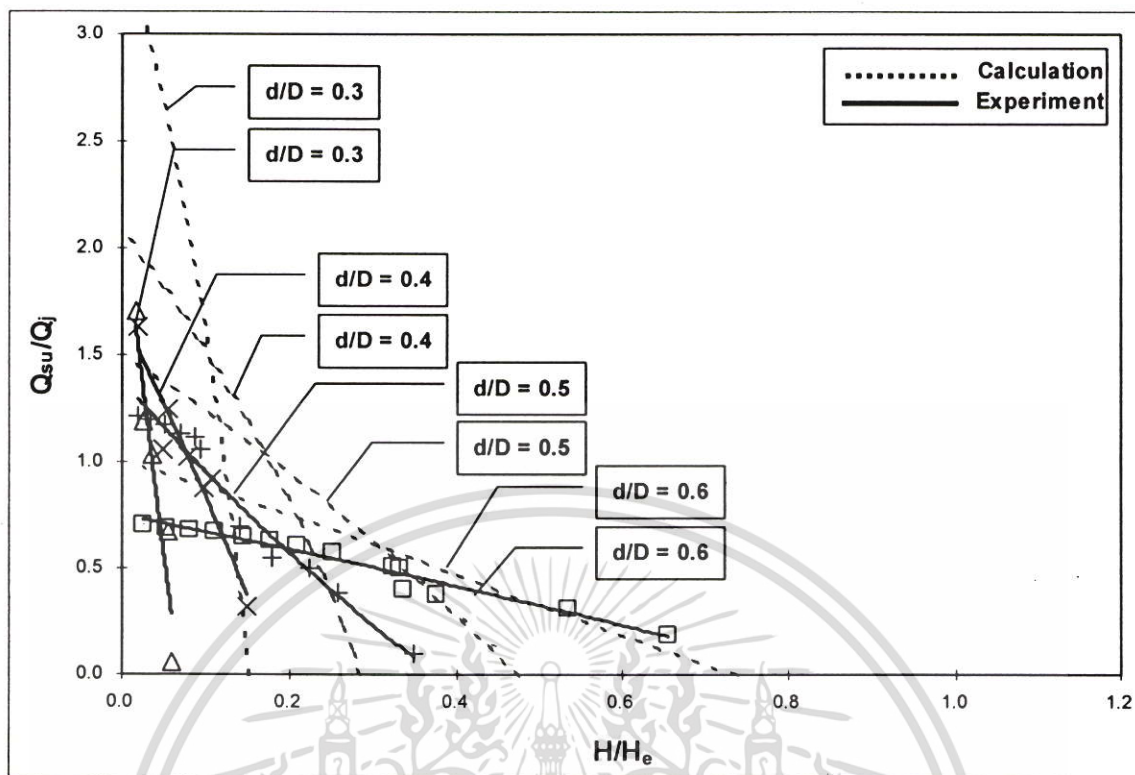
ผลจากการทดลองพบว่า ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 11.2% และรองลงมาคือ ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.6 ให้ค่าประสิทธิภาพที่ 10.0% ส่วนจากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 19.7% และรองลงมาคือ ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.6 ให้ค่าประสิทธิภาพที่ 18.9%



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$  %) กับ Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

ค่าประสิทธิภาพ Efficiency ( $\eta$  %) จากการทดลอง เมื่อเทียบกับค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ พบว่าเมื่อถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะลดลง โดยที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

จากการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ พบว่าค่าประสิทธิภาพ Efficiency ( $\eta$  %) จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าจากการคำนวณ อันเนื่องจากองค์ประกอบต่างๆ ที่จะกล่าวถึงในบทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ ส่วนแนวโน้มของความสัมพันธ์พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการคำนวณทางทฤษฎี กล่าวคือ เมื่อค่า Head Ratio ( $H/H_e$ ) เพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันทางด้านจ่าย ( $H_d$ ) เพิ่มขึ้นมาถึงค่าหนึ่ง (ค่าวิกฤต) จะส่งผลให้ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ลดลง เนื่องจากความดันที่ด้านจ่ายสูงขึ้นทำให้อัตราการไหลในห้องผสม (Mixing throat) ลดลง ส่งผลให้ค่าค่าประสิทธิภาพ Efficiency ( $\eta$  %) ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_c$ ) ที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) กับ Head Ratio ( $H/H_c$ ) เมื่อ Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) เมื่อมีค่าลดลงจะส่งผลให้ Head Ratio ( $H/H_c$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการคำนวณจากสมการทางทฤษฎี

พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดกับห้องผสม ( $d/D$ ) เท่ากับ 0.5 พบว่า จากการทดลอง ค่า Head Ratio ( $H/H_c$ ) ประมาณ 0.22 และที่ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ประมาณ 0.5 และจากการคำนวณ ค่า Head Ratio ( $H/H_c$ ) ประมาณ 0.25 และที่ค่า Flowrate Ratio ( $Q_{su}/Q_j$ ) ประมาณ 0.80 จะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด และอธิบายได้ว่าที่ค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะได้พื้นที่ได้กราฟสูงสุด โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพที่ได้กล่าวในบทที่ 3

## บทที่ 6

# บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทสรุป

การศึกษาสมรรถนะการทำงานของปั๊มแบบหัวฉีดได้สร้างสมการวิเคราะห์การคำนวณเชิงทฤษฎี และได้สร้างชุดทดลองที่มีรูปร่างสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณต่างๆ ในทางทฤษฎี ( $K_j=1$ ,  $K_s=0.25$ ,  $K_{mc}=0.3$  และ  $K_u=0.3$ ) พบว่าผลการทดลองเมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ จะได้เส้นกราฟแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการคำนวณเชิงทฤษฎีทุกการทดลอง

จากผลการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ปั๊มน้ำแบบหัวฉีดทำได้คือ 28.3 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.5 และที่รองลงมาคือ 20.8 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.6 และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.4 และ 0.3 จะได้ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 18.5 เปอร์เซ็นต์ และ 17.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับปั๊มคูคกรวด โดยคุณสมบัติของกรวดที่นำมาใช้ในการคำนวณคือ ค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $2650 \text{ Kg/Cm}^3$  มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3.5 mm. และ ค่าความเข้มข้นโดยปริมาตรเท่ากับ 0.2 จากผลการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ปั๊มคูคกรวดทำได้คือ 19.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.5 และที่รองลงมาคือ 18.9 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.6 และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.4 และ 0.3 จะได้ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 17.8 เปอร์เซ็นต์ และ 16.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ปั๊มน้ำแบบหัวฉีดทำได้คือ 21.9 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.5 และที่รองลงมาคือ 16.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.6 และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.4 และ 0.3 จะได้ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 15.1 เปอร์เซ็นต์ และ 14.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับปั๊มคูคกรวดพบว่า ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ปั๊มคูคกรวดทำได้คือ 11.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.5 และที่รองลงมาคือ 10.0 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.6 และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.4 และ 0.3 จะได้ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 9.7 เปอร์เซ็นต์ และ 3.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสมเท่ากับ 0.5 จะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดทั้ง 2 การทดลอง และที่รองลงมาคือ 0.6, 0.4 และ 0.3 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎี

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ผลที่ได้จากการทดลองที่ทุกๆการทดลองจะให้ผลต่ำกว่าการคำนวณทางทฤษฎี โดยเฉพาะการทดลองปั๊มคูครวด ซึ่งผู้ทำการทดลองสันนิษฐานว่าน่าจะเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. ตำแหน่งการติดตั้งของเกจวัดแรงดัน  $P_d$  โดยใกล้ Orifice ด้านจ่ายมากเกินไป เนื่องจากผู้จัดทำได้ออกแบบ Mixing throat ที่ด้านจ่ายสั้นเกินไป ทำให้ระหว่างการทดลองการอ่านค่าเกจเป็นไปได้ยากเนื่องจากเข็มสั้น ค่าที่ได้จึงคลาดเคลื่อนไปบ้าง

2. กรวดเกิดการติด Orifice ที่ด้านจ่าย ซึ่งมีความเป็นไปได้สูง ถึงแม้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 3.5 mm. แต่ก็ยังมีอีกหลายชิ้นที่มีขนาดมากกว่า 4.5 mm. เมื่อกรวดก่อดั้วกันที่จุดนี้เป็นเหตุให้ค่าความดันที่  $P_d$  สูงขึ้นโดยไม่เกี่ยวข้องกับการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

3. ความต่อเนื่องของการป้อนกรวดเข้าที่ด้านดูด เนื่องจากน้ำและกรวดไม่ได้ผสมรวมกับกรวดเป็นเนื้อเดียวกัน กรวดที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำมากจะกองอยู่ได้กระบะ ดังนั้นผู้ทำการทดลองจึงต้องป้อนกรวดด้วยมือให้ต่อเนื่องเท่าที่จะทำได้ โดยขณะทำการทดลองพบว่าหัวฉีดตั้งแต่ขนาด 0.8 mm. ขึ้นไปมีความสามารถในการดูดกรวดได้ดีมาก ซึ่งหากมีการออกแบบระบบป้อนกรวดที่เหมาะสม เราจะได้กราฟความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับการคำนวณทางทฤษฎียิ่งขึ้น

4. การเจาะรูเพื่อต่อเกจวัดแรงดันเข้ากับชุดทดลองควรเจาะรูที่มีขนาดเพียง 2-3 mm. เท่านั้น แต่สำหรับชุดทดลองชุดนี้ขนาดรูเจาะทั้งหมดเท่ากับ 6 mm. ซึ่งภายหลังได้รับข้อมูลจาก ท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.จำลอง ปราบแก้ว ว่าหากเจาะรูส่งความดันเล็กๆ จะทำให้อ่านค่าเกจได้ง่าย เนื่องจากเกจวัดความดันจะไม่แกว่งมากนัก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] Hansen, A. G., and Kinnavy, R., "The Design of Water Jet Pump," ASME paper No.65-WA/FE-31, Nov.1965, page 97 – 112.
- [3] Mueller, N. H. G., "Water Jet Pump", Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.90, No. HY3, May, 1964, page 83 -113.
- [4] Sanger, N. L., "An Experimental Investigation of Several Low Area Ratio Water Jet Pump," ASME Journal of Basic Engineering, March, 1970, page11-20.
- [5] Staff of BHRA Fluid Engineering, "Engineering Outline: Jet Pump", Journal 'Engineering', 3<sup>rd</sup> May, 1968, page 23 – 55.
- [6] Chamlong Prabkeao, Katsumi Aoki, "Theoretical Analysis on Hydraulic Transportation of Solid Using The Jet Pump", Proceeding of the School of Engineering, Tokai University, Vol. 26 2001, Page 21-47.
- [7] M M Sarshar and N A Beg , "A review of application of jet pump technology in oil and gas industry to increase production" , ASME Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers, Vol.33, 1979, page 161 – 184.
- [8] Jet pump & Ejector and Gas Lift Techniques, BHRA fluid engineering, Cambridge, 1975, page 245 – 291.



ภาคผนวก ก.

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองสมรรถนะการทำงานของปั๊มคูลน้ำแบบหัวฉีดที่ ขนาดหัวฉีด  
เท่ากับ 6.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.3

Q (m <sup>3</sup> /sec)	Qsu (m <sup>3</sup> /sec)	Qd (m <sup>3</sup> /sec)	Qsu/Qd	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (Hd/Hs)	Be (Hp - Hd)	P/Pe	η
0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.000320	0.000500	0.000370	0.16	16.80	0.00	2.10	2.10	14.70	0.14	2.23
0.000320	0.001300	0.000450	0.41	16.80	0.00	2.00	2.00	14.80	0.14	5.49
0.000320	0.002000	0.000520	0.63	16.80	0.00	1.90	1.90	14.90	0.13	7.97
0.000320	0.003500	0.000670	1.09	16.80	0.00	1.70	1.70	15.10	0.11	12.31
0.000320	0.004200	0.000740	1.31	16.80	0.00	1.60	1.60	15.20	0.11	13.82
0.000320	0.005700	0.000890	1.78	16.80	0.00	1.30	1.30	15.50	0.08	14.94
0.000320	0.006500	0.000970	2.03	16.80	0.00	1.10	1.10	15.70	0.07	14.23
0.000320	0.007900	0.001100	2.47	16.80	0.00	0.80	0.80	16.00	0.05	12.34
0.000320	0.008700	0.001190	2.72	16.80	0.00	0.60	0.60	16.20	0.04	10.07
0.000320	0.009400	0.001260	2.94	16.80	0.00	0.40	0.40	16.40	0.02	7.16

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองสมรรถนะการทำงานของปั๊มคูดน้ำแบบหัวฉีดที่ ขนาดหัวฉีดเท่ากับ 8.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.4

Q (m <sup>3</sup> /sec)	Qsu (m <sup>3</sup> /sec)	Qd (m <sup>3</sup> /sec)	Qsu/Qd	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H(Ho+Hs)	Fe(Hp+Hd)	F/Fe	η%
0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.000350	0.000950	0.000445	0.27	14.00	0.00	2.10	2.10	11.90	0.18	4.79
0.000350	0.001650	0.000515	0.47	14.00	0.00	2.00	2.00	12.00	0.17	7.86
0.000350	0.002350	0.000585	0.67	14.00	0.00	1.90	1.90	12.10	0.16	10.54
0.000350	0.003050	0.000655	0.87	14.00	0.00	1.70	1.70	12.30	0.14	12.04
0.000350	0.003750	0.000725	1.07	14.00	0.00	1.60	1.60	12.40	0.13	13.82
0.000350	0.005150	0.000865	1.47	14.00	0.00	1.30	1.30	12.70	0.10	15.06
0.000350	0.005850	0.000935	1.67	14.00	0.00	1.10	1.10	12.90	0.09	14.25
0.000350	0.006550	0.001005	1.87	14.00	0.00	0.80	0.80	13.20	0.06	11.34
0.000350	0.007250	0.001075	2.07	14.00	0.00	0.60	0.60	13.40	0.04	9.28
0.000350	0.007425	0.0010925	2.12	14.00	0.00	0.40	0.40	13.60	0.03	6.24

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองสมรรถนะการทำงานของปั๊มคูดน้ำแบบหัวฉีดที่ ขนาดหัวฉีด  
เท่ากับ 10.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.5

Q (m <sup>3</sup> /sec)	Qsu (m <sup>3</sup> /sec)	Qd (m <sup>3</sup> /sec)	Qsp (g)	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H(Ho-Hs)	He (Hp-Hd)	H/Ho	η%
0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.000375	0.0001150	0.0004900	0.31	11.00	0.00	2.75	2.75	8.25	0.33	10.22
0.000375	0.0002050	0.0005800	0.55	11.00	0.00	2.50	2.50	8.50	0.29	16.08
0.000375	0.0002725	0.0006475	0.73	11.00	0.00	2.25	2.25	8.75	0.26	18.69
0.000375	0.0003625	0.0007375	0.97	11.00	0.00	2.00	2.00	9.00	0.22	21.48
0.000375	0.0004300	0.0008050	1.15	11.00	0.00	1.75	1.75	9.25	0.19	21.69
0.000375	0.0005200	0.0008950	1.39	11.00	0.00	1.50	1.50	9.50	0.16	21.89
0.000375	0.0005875	0.0009625	1.57	11.00	0.00	1.25	1.25	9.75	0.13	20.09
0.000375	0.0006775	0.0010525	1.81	11.00	0.00	1.00	1.00	10.00	0.10	18.07
0.000375	0.0007450	0.0011200	1.99	11.00	0.00	0.75	0.75	10.25	0.07	14.54
0.000375	0.0008350	0.0012100	2.23	11.00	0.00	0.50	0.50	10.50	0.05	10.60

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองสมรรถนะการทำงานของปั๊มคูน้ำแบบหัวฉีดที่ ขนาดหัวฉีดเท่ากับ 12.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.6

Q (m <sup>3</sup> /sec)	Qsu (m <sup>3</sup> /sec)	Qd (m <sup>3</sup> /sec)	Qsu/Qd	Hp (m)	Hs (m)	Hd (m)	H (d/s)	He (hp-d)	H/Hc	ηk
0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.000400	0.000275	0.0004275	0.07	11.00	0.00	4.23	4.23	6.77	0.62	4.30
0.000400	0.000702	0.0004703	0.18	11.00	0.00	3.83	3.83	7.18	0.53	9.36
0.000400	0.001130	0.0005130	0.28	11.00	0.00	3.47	3.47	7.54	0.46	12.99
0.000400	0.001558	0.0005558	0.39	11.00	0.00	3.15	3.15	7.85	0.40	15.62
0.000400	0.001650	0.0005650	0.41	11.00	0.00	2.97	2.97	8.03	0.37	15.26
0.000400	0.002413	0.0006413	0.60	11.00	0.00	2.39	2.39	8.62	0.28	16.70
0.000400	0.002840	0.0006840	0.71	11.00	0.00	1.98	1.98	9.02	0.22	15.59
0.000400	0.003776	0.0007776	0.94	11.00	0.00	1.58	1.58	9.43	0.17	15.78
0.000400	0.004325	0.0008325	1.08	11.00	0.00	1.17	1.17	9.83	0.12	12.87
0.000400	0.005650	0.0009650	1.41	11.00	0.00	0.54	0.54	10.46	0.05	7.29





ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองสมรรถนะการขนถ่ายของแฉ่งโดยป้อนน้ำแบบหัวฉีดที่ ขนาดหัวฉีดเท่ากับ 10.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.5

Q <sub>1</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	W <sub>1</sub> (กก)	W <sub>2</sub> (กก)	Q <sub>2</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>3</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>4</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>5</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>6</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>7</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>8</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>9</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>10</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>11</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>12</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>13</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>14</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>15</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>16</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>17</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>18</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>19</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>20</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>21</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>22</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>23</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>24</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>25</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>26</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>27</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>28</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>29</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>30</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>31</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>32</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>33</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>34</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>35</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>36</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>37</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>38</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>39</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>40</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>41</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>42</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>43</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>44</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>45</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>46</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>47</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>48</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>49</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>50</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>51</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>52</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>53</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>54</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>55</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>56</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>57</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>58</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>59</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>60</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>61</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>62</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>63</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>64</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>65</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>66</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>67</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>68</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>69</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>70</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>71</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>72</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>73</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>74</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>75</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>76</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>77</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>78</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>79</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>80</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>81</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>82</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>83</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>84</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>85</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>86</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>87</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>88</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>89</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>90</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>91</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>92</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>93</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>94</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>95</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>96</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>97</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>98</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>99</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)	Q <sub>100</sub> (ม <sup>3</sup> /ส)
0.002065	2.063036	4.56	0.0037	0.001635	2.496964	14982.71	35.0	0	0.7	0.65	34.38	0.79168	0.019044	1.528818	2.30502	1.210335																																																																																					
0.002065	2.063036	4.53	0.0035	0.001435	2.468964	16865.94	35.0	0	1.2	1.16	33.87	0.694832	0.034344	1.720981	4.106833	1.195793																																																																																					
0.002065	2.063036	4.48	0.00344	0.001375	2.416964	17245.21	35.0	0	1.7	1.71	33.33	0.665778	0.051204	1.759681	5.998876	1.171557																																																																																					
0.002065	2.063036	4.39	0.0034	0.001335	2.326964	17100.56	35.0	0	2.3	2.29	32.74	0.646409	0.070087	1.744921	7.905294	1.127932																																																																																					
0.002065	2.063036	4.36	0.00336	0.001295	2.296964	17401.52	35.0	0	2.8	2.82	32.22	0.627039	0.087494	1.775631	9.741443	1.11339																																																																																					
0.002065	2.063036	4.25	0.00316	0.001095	2.186964	19594.61	35.0	0	3.0	3.00	32.03	0.630192	0.09378	1.999411	9.941367	1.060071																																																																																					
0.002065	2.063036	3.5	0.00295	0.000885	1.436964	15930.2	35.0	0	4.3	4.31	30.72	0.428502	0.140302	1.625499	9.772423	0.696529																																																																																					
0.002065	2.063036	3.2	0.00282	0.000755	1.136964	14774.98	35.0	0	5.3	5.31	29.72	0.365551	0.178704	1.507622	9.848596	0.551112																																																																																					
0.002065	2.063036	3.1	0.00276	0.000695	1.036964	14638.99	35.0	0	6.4	6.37	28.67	0.336496	0.222061	1.493745	11.16166	0.50264																																																																																					
0.002065	2.063036	2.85	0.0026	0.000535	0.786964	14432.85	35.0	0	7.1	7.14	27.90	0.259018	0.255817	1.472711	9.758394	0.381459																																																																																					
0.002065	2.063036	2.26	0.00222	0.000155	0.198964	12474.05	35.0	0	9.0	9.04	25.99	0.075008	0.347965	1.272837	3.322125	0.095473																																																																																					



ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองสมรรถนะการขนถ่ายของแข็ง โดยป้อนน้ำแบบหัวฉีดที่ ขนาดหัวฉีด เท่ากับ 12.0 mm. อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อห้องผสม (d/D) เท่ากับ 0.6

W1 (kg)	W2 (kg)	W3 (kg)	W4 (kg)	W5 (kg)	W6 (kg)	W7 (kg)	W8 (kg)	W9 (kg)	W10 (kg)	W11 (kg)	W12 (kg)	W13 (kg)	W14 (kg)	W15 (kg)	W16 (kg)	W17 (kg)	W18 (kg)	W19 (kg)	W20 (kg)	W21 (kg)	W22 (kg)	W23 (kg)	W24 (kg)	W25 (kg)	W26 (kg)	W27 (kg)	W28 (kg)	W29 (kg)	W30 (kg)	W31 (kg)	W32 (kg)	W33 (kg)	W34 (kg)	W35 (kg)	W36 (kg)	W37 (kg)	W38 (kg)	W39 (kg)	W40 (kg)	W41 (kg)	W42 (kg)	W43 (kg)	W44 (kg)	W45 (kg)	W46 (kg)	W47 (kg)	W48 (kg)	W49 (kg)	W50 (kg)	W51 (kg)	W52 (kg)	W53 (kg)	W54 (kg)	W55 (kg)	W56 (kg)	W57 (kg)	W58 (kg)	W59 (kg)	W60 (kg)	W61 (kg)	W62 (kg)	W63 (kg)	W64 (kg)	W65 (kg)	W66 (kg)	W67 (kg)	W68 (kg)	W69 (kg)	W70 (kg)	W71 (kg)	W72 (kg)	W73 (kg)	W74 (kg)	W75 (kg)	W76 (kg)	W77 (kg)	W78 (kg)	W79 (kg)	W80 (kg)	W81 (kg)	W82 (kg)	W83 (kg)	W84 (kg)	W85 (kg)	W86 (kg)	W87 (kg)	W88 (kg)	W89 (kg)	W90 (kg)	W91 (kg)	W92 (kg)	W93 (kg)	W94 (kg)	W95 (kg)	W96 (kg)	W97 (kg)	W98 (kg)	W99 (kg)	W100 (kg)
0.002778	2.77559	4.86	0.00449	0.001712	2.08441	11946.53	35.0	0	2.5	2.463	32.572	0.616056	0.075633	1.21901	5.679859	0.750979																																																																																			
0.002778	2.77559	4.83	0.00446	0.001682	2.05441	11984.65	35.0	0	3.3	3.274	31.761	0.605259	0.103089	1.22229	7.630331	0.74017																																																																																			
0.002778	2.77559	4.78	0.00442	0.001642	2.00441	11977.88	35.0	0	4.1	4.095	30.940	0.590862	0.132355	1.222209	9.558069	0.722156																																																																																			
0.002778	2.77559	4.72	0.00438	0.001602	1.94441	11909.52	35.0	0	4.9	4.942	30.093	0.576465	0.164234	1.215234	10.50526	0.700539																																																																																			
0.002778	2.77559	4.65	0.0042	0.001422	1.87441	12934.41	35.0	0	5.3	5.309	29.726	0.511678	0.178601	1.319812	11.0613	0.675319																																																																																			
0.002778	2.77559	4.6	0.00384	0.001062	1.82441	16858.45	35.0	0	4.7	4.655	30.380	0.382106	0.153234	1.720217	10.07218	0.657305																																																																																			
0.002778	2.77559	4.56	0.00375	0.000972	1.78441	18016.15	35.0	0	4.9	4.901	30.134	0.349713	0.162625	1.838347	10.45504	0.642894																																																																																			
0.002778	2.77559	4.5	0.00364	0.000862	1.72441	19633.06	35.0	0	5.0	4.997	30.038	0.310121	0.166343	2.003335	10.33451	0.621277																																																																																			
0.002778	2.77559	4.27	0.00348	0.000702	1.49441	20894.39	35.0	0	5.2	5.165	29.870	0.252534	0.172898	2.132039	9.30902	0.538411																																																																																			
0.002778	2.77559	4.04	0.0033	0.000522	1.26441	23778.98	35.0	0	5.0	4.951	30.084	0.187747	0.164557	2.426379	7.496311	0.455546																																																																																			
0.002778	2.77559	3.03	0.0029	0.000122	0.25441	20519.05	35.0	0	6.2	6.215	28.820	0.043778	0.215657	2.093374	1.976706	0.09166																																																																																			





การประชุม  
วิชาการเครือข่าย  
วิศวกรรมเครื่องกล  
แห่งประเทศไทย



Mechanical Engineering  
Network of Thailand  
The 16<sup>th</sup> Conference



14-16 ตุลาคม 2545 จังหวัดภูเก็ต  
October 14-16, 2002 Phuket



TF 117

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16

14-16 ตุลาคม 2545 จังหวัดภูเก็ต

## การศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวฉีดที่มีต่อสมรรถนะของปั๊ม น้ำแบบหัวฉีด

### A Study of the effect of nozzle size on water Jet Pump performance

ปรีชา ชันชะ และ จำลอง ปราบแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนน ฉลองกรุง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร. 0-2326-4197 โทรสาร. 0-2326-4198 E-mail: [kpchamlo@kmitl.ac.th](mailto:kpchamlo@kmitl.ac.th)

Preecha Khanha, Chamlong PRABKEAO

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Chalongkrung Rd. Ladkrabang Bangkok Thailand 10520

Tel: 0-23264197, Fax: 0-23264198, E-mail: [kpchamlo@kmitl.ac.th](mailto:kpchamlo@kmitl.ac.th)

#### บทคัดย่อ

ปัจจุบันได้มีการนำปั๊มน้ำแบบหัวฉีด(เจ็ทปั๊ม)ไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เป็นเพราะเจ็ทปั๊มมีโครงสร้างที่เรียบง่ายไม่มีส่วนใดเคลื่อนที่หรือหมุน การออกแบบเจ็ทปั๊มจะต้องคำนึงถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะ เช่น ขนาดและรูปร่างของหัวฉีด อัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีดกับพื้นที่ช่องทางดูด ( $d/D$ ) ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับห้องผสม (L) ตลอดจนค่าความเสียดทานต่างๆ ปรากฏงานวิจัยนี้ได้แสดงการคำนวณค่าประสิทธิภาพ, เฮด และอัตราการไหล โดยการวิเคราะห์จากสมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน จากนั้นก็เขียนโปรแกรมการคำนวณผล เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับอัตราการไหลและประสิทธิภาพกับค่าเฮดโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวฉีดเพื่อหาค่าอัตราส่วนของพื้นที่หัวฉีดกับพื้นที่ช่องทางดูดที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด จากการศึกษาผลทางทฤษฎีพบว่า อัตราส่วน ( $d/D$ ) = 0.5 - 0.6 จะทำให้เจ็ทปั๊มมีประสิทธิภาพสูงสุดคือประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์

#### Abstract

Nowadays a water jet pump is widely used in industry. This is mainly due to the simplicity of its structure and it operate without any moving or rotating parts. However, the design of a water jet pump various parameters, such as size and shape of a nozzle and suction area ratio ( $d/D$ ), mixing chamber length (L) etc., have to be considered. The goal of this research is to investigate, experimentally and theoretically, the effect of nozzle and

suction area ratio on the water jet pump efficiency. In theoretical analysis, the simulations were carried out and based on the momentum and energy equations of fluid flow. The result from both methods are in good agreement. It was found that the nozzle and suction area ratios ( $d/D$ ), in the range of 0.5 - 0.6 yield the maximum efficiency, about 30%

#### 1. บทนำ

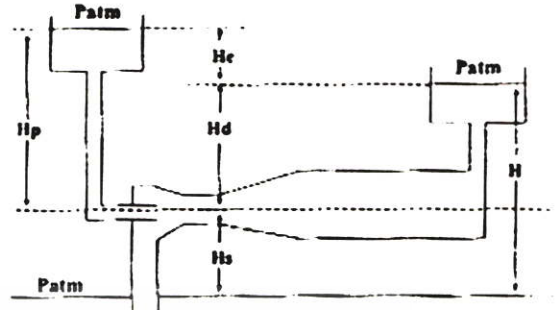
ปั๊มน้ำแบบหัวฉีดมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ หัวฉีด (Nozzle) ห้องผสม (Mixing Chamber) ท่อลดความเร็ว(Diffuser) ในขณะที่ใช้งานไม่มีส่วนใดของปั๊มเกิดการเคลื่อนที่ อาศัยหลักการจลศาสตร์ของของไหล โดยให้ของไหลที่มีความดันสูงไหลผ่านหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ผลของความเร็วยุ่งจะทำให้เกิดความดันต่ำในห้องผสม จึงเป็นเหตุให้ของไหลที่ช่องทางดูด (Suction Side) ถูกดูดเข้ามาในห้องผสม แล้วจะเกิดโมเมนตัม เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยระหว่างความเร็วจากหัวฉีดและความเร็วจากท่อดูด โดยความเร็วจะลดลงอีกในส่วนขยาย ( Diffuser ) และเปลี่ยนเป็นความดันในท่อส่ง



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของปั๊มน้ำแบบหัวฉีด

2. สัญลักษณ์

A : พื้นที่	$\alpha$ : Coefficient of velocity
$\beta$ : อัตราส่วนพื้นที่ ( $d/D$ )	$\gamma$ : specific weight
H : total head	$\phi$ : flow rate ratio
$H_e$ : effective head	$\psi$ : head ratio
$H_d$ : discharge head	$\eta$ : efficiency
$H_s$ : drive head	
$H_s$ : suction head	Subscript
h : loss of head	d : discharge side
K : loss factor	df : diffuser
P : pressure	j : nozzle
Q : volumetric flow rate	mc : mixing chamber
V : velocity	s : suction side
$m$ : mass flow rate	



รูป 3 แสดงค่า Head ในระบบเจ็บบีม

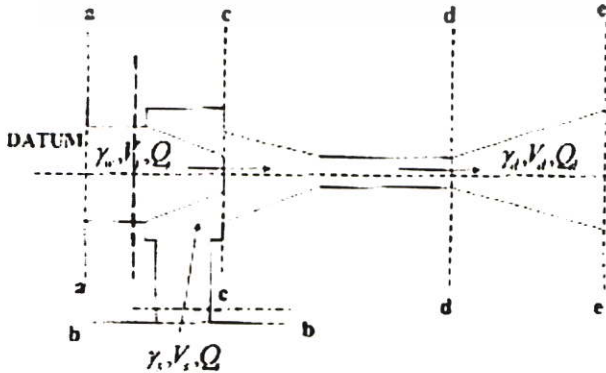
3. ทฤษฎีและสมการการคำนวณ

3.1 เงื่อนไขในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์เพื่อหาสมรรถนะของเจ็บบีม โดยใช้สมการ Continuity Equation, Momentum Equation และ Energy Equation ภายใต้เงื่อนไข ดังนี้

1. ของไหลทั้งสองเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้
2. อุณหภูมิของไหลทั้งระบบมีค่าเท่ากัน
3. ระยะห่างระหว่างหัวฉีดและทางเข้าห้องผสมมีค่าเป็นศูนย์
4. ความหนาของผนังหัวฉีดมีค่าเป็นศูนย์
5. ของไหลจากหัวฉีดและจากทางดูดมีทิศทางขนานกันการกระจายความดันที่ทางเข้า Mixing Chamber เป็นแบบสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดทางเข้า
6. การไหลของส่วนผสมของของไหลจากหัวฉีดเข้าสู่ของทางดูดจะพิจารณาการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานที่หัวฉีด (Driving nozzle loss), ที่ท่อทางดูด (Suction loss), ที่ห้องผสม (Friction loss in mixing chamber) และที่ท่อจ่าย (Diffuser loss)

7. การไหลในระบบเป็นแบบ Steady Flow



รูปที่ 2 แสดงพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหล

3.2 สมการและการวิเคราะห์

จากสมการความต่อเนื่อง การไหลผ่านหน้าตัดในรูปที่ 2

$$\phi = \frac{Q_s}{Q_d} \tag{1}$$

$$\beta = \frac{A_s}{A_d} \tag{2}$$

$$Q_d = Q_j + Q_s \tag{3}$$

$$A_d = A_j + A_s \tag{4}$$

$$V_s = \frac{Q_s}{A_s} \tag{5}$$

$$V_d = \frac{Q_d}{A_d} \tag{6}$$

สมการความเร็วที่ด้านดูด (Velocity of suction)

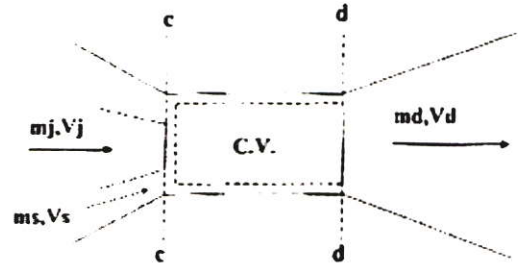
$$V_s = \frac{Q_s}{A_s} = \frac{\phi \cdot Q_d}{A_s} = \frac{\phi \cdot V_d \cdot \beta}{(1 - \beta)} \tag{7}$$

สมการความเร็วที่ด้านจ่าย (Velocity of discharge)

$$V_d = \frac{Q_d}{A_d} = \frac{(1 + \phi)Q_d}{A_d} = \beta(1 + \phi)V_s \tag{8}$$

พิจารณาการไหลแบบมิติเดียวและจากการรวมสมการโมเมนตัม (Total momentum equation) ในแนวแกน x

$$\begin{aligned} \Sigma F &= \Sigma F_{br} + \Sigma F_{sr} \\ &= \frac{d}{dt} \int V_r \cdot \rho \cdot dV + \int V_r \cdot \rho \cdot \bar{V} \cdot d\bar{A} \end{aligned} \tag{9}$$



Suction side    ••••• Throat    ••••• Diffuser

รูปที่ 4 แสดงปริมาณการควบคุมที่หน้าตัด

สมการโมเมนตัมที่หน้าตัด C-C จะได้

$$m_i V_i + m_s V_s = \frac{V_j^2}{2g} \left[ 2A_j \gamma_s + 2\phi^2 \left( \frac{\beta^2}{1-\beta} \right) A_j \gamma_s \right] \quad (10)$$

สมการโมเมนตัมที่หน้าตัด d-d

$$m_d V_d = V_d (m_i + m_s) = \frac{V_j^2}{2g} \beta(1+\phi) \left[ 2\gamma_s A_j + 2\phi \gamma_s \left( \frac{\beta}{1-\beta} \right) A_j \right] \quad (11)$$

การสูญเสียเนื่องจากความเฉื่อยตกหนักที่เกิดขึ้นที่ห้องผสมพิจารณาที่หน้าตัด c-c ถึง d-d จะได้

$$F_i = \int_0^r \tau_r 2\pi r dr = \frac{V_j^2}{2g} \beta^2 (1+\phi)^2 V_d [K_{mc} A_d] \quad (12)$$

ค่าความดันที่เปลี่ยนแปลง (Pc-Pd)

$$F_p = - \left[ \int_0^r (P_d - P_c) 2\pi r dr \right] = - \left[ \int_0^r P_d 2\pi r dr - \int_0^r P_c 2\pi r dr \right] \quad (13)$$

แทนค่าจากสมการที่ (8)-(11) ลงในสมการที่ (7) จะได้

$$\int_0^r \left[ \frac{P_d - P_c}{\gamma_d A_d} \right] 2\pi r dr = \frac{V_j^2}{2g} \left[ 2\beta + 2\phi^2 \left( \frac{\beta^2}{1-\beta} \right) - \beta(1+\phi) \left[ 2\beta + 2\phi \right] - \beta^2 (1+\phi)^2 K_{mc} \right] \quad (14)$$

จากสมการพลังงานการไหลของของไหลพิจารณาโดยถือว่าไม่มีการเกิดขึ้นในระบบ, พลังงานภายในมีค่าคงที่ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในระบบ และการไหลเป็นแบบ Steady flow จะได้

$$\Sigma \dot{Q} + \Sigma \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left[ u + \frac{V^2}{2} + gz \right] \rho dV + \int_V \left[ u + \frac{V^2}{2} + gz \right] \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (15)$$

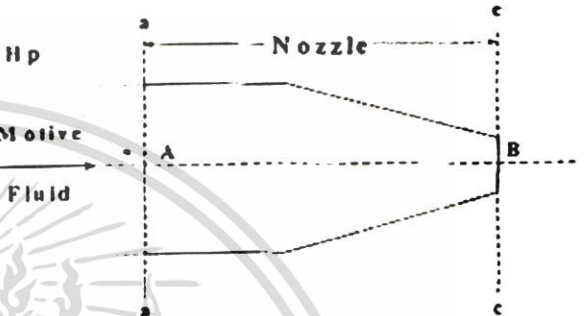
$$\Sigma \dot{Q} = m(u_1 - u_2) + \int_1^2 \frac{P}{\rho} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} + mg(Z_2 - Z_1) + \int_1^2 \frac{V^2}{2} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

จากสมการ Applied Bernoulli's Equation จะได้

Head losses

$$= \int_1^2 \frac{P}{\rho} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} + mg(Z_2 - Z_1) + \int_1^2 \frac{V^2}{2} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (16)$$

สมการพลังงานระหว่างหน้าตัด a-a ถึงหน้าตัด c-c

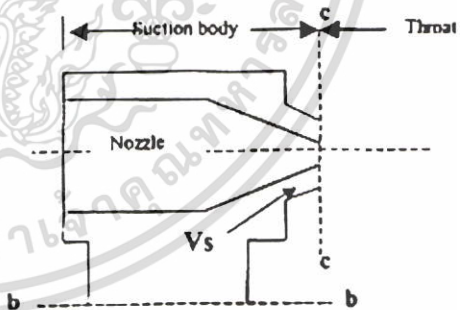


รูป 5 แสดง Section a-a to c-c

พลังงานที่ด้านหัวฉีด (Jet Total head, H<sub>j</sub>)

$$H_p = \int_0^r \frac{P_j 2\pi r dr}{\gamma_j A_j} + \alpha_j \frac{V_j^2}{2g} + h_j \quad (17)$$

สมการพลังงานระหว่างหน้าตัด b-b ถึงหน้าตัด c-c

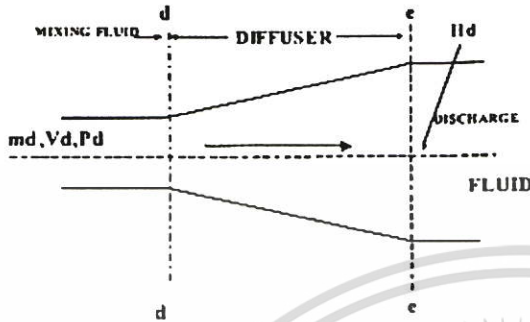


รูปที่ 6 แสดง Section b-b และ c-c

พลังงานที่ด้านดูด (Suction total head, H<sub>s</sub>)

$$H_s = \int_0^r \frac{P_s 2\pi r dr}{\gamma_s A_s} + \alpha_s \frac{V_s^2}{2g} + h_s = \int_0^r \frac{P_s 2\pi r dr}{\gamma_s A_s} + \frac{V_j^2}{2g} \phi^2 \frac{\beta^2}{1-\beta} [\alpha_s + K_s] \quad (18)$$

สมการพลังงานระหว่างหน้าตัด d-d ถึงหน้าตัด e-e



รูปที่ 7 แสดง Section d-d to e-e

พลังงานที่ด้านจ่าย (Delivery Total Head, Hd)

$$H_d = \int_b \frac{P_d \cdot 2\pi r dr}{\gamma_d A_d} + \alpha_d \frac{V_d^2}{2g} - h_{dif}$$

$$= \int_b \frac{P_d \cdot 2\pi r dr}{\gamma_d A_d} + \frac{V_j^2}{2g} \beta^2 (1 + \phi)^2 [\alpha_{dif} - K_{dif}] \quad (19)$$

พลังงานที่ของไหลที่ด้านตุ่ดได้รับ (Output Head: Ho)

จากสมการที่ (16) และ (17)

$$H = H_d - H_s$$

$$H = \frac{V_j^2}{2g} \left[ 2\beta + 2\phi^2 \frac{\beta^2}{1-\beta} - 2\beta^2 (1 + \phi)^2 K_{mc} - \beta^2 (1 + \phi)^2 (K_{dif} - \alpha_{dif}) - \phi^2 \frac{\beta^2}{1-\beta} (\alpha_s + K_s) \right] \quad (20)$$

พลังงานที่ของไหลฉีดถ่ายเทให้ของไหลด้านตุ่ด (Input Head: Hi)

จากสมการที่ (14) และ (16)

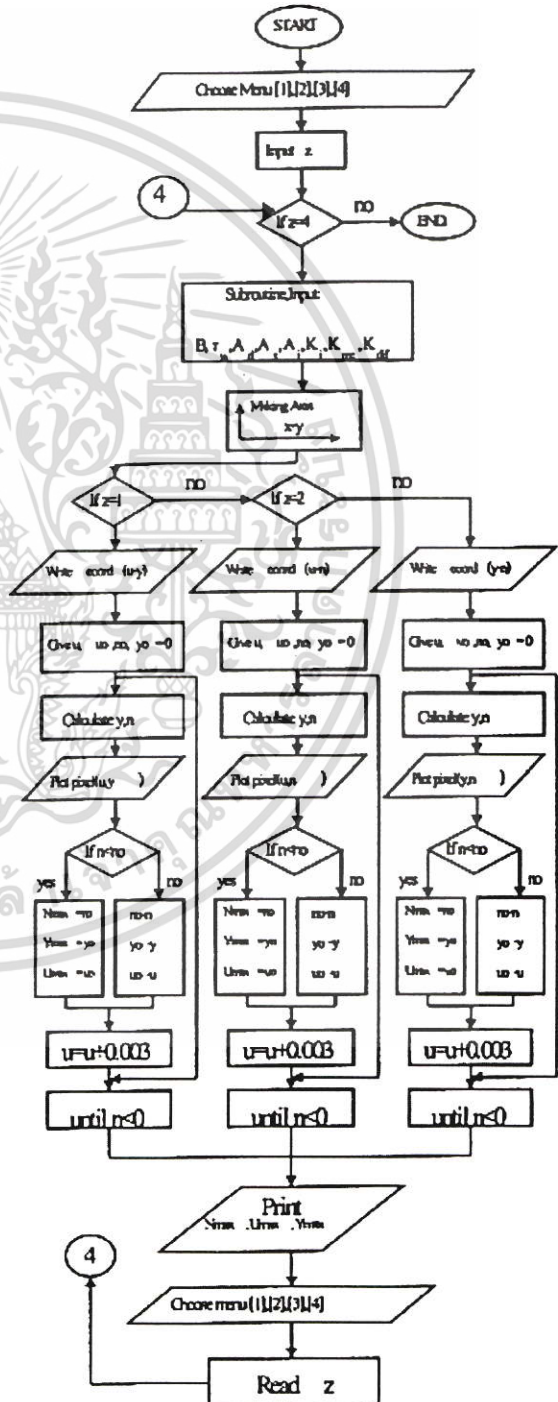
$$H_c = H_p - H_d$$

$$H_c = \frac{V_j^2}{2g} \left[ \alpha_i + K_i + \beta^2 (1 + \phi)^2 (K_{dif} - \alpha_d) - 2\beta - 2\phi^2 \frac{\beta^2}{1-\beta} - \beta^2 (1 + \phi)^2 (2 + K_{mc}) \right] \quad (21)$$

จะได้สมการประสิทธิภาพของบีมหัวฉีดเมื่อ  $r_j = r_s$  คือ

$$\eta = \frac{\gamma_s \cdot Q_s \cdot H}{\gamma_w \cdot Q_j \cdot H_c} = \phi \cdot \frac{H}{H_c} \quad (22)$$

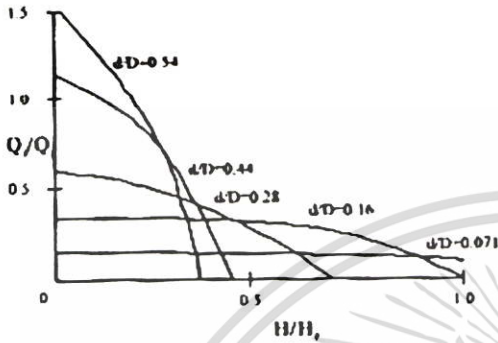
3.3 การคำนวณผล จากสมการที่ได้นำมาเขียนโปรแกรมการคำนวณตามขั้นตอนข้างล่าง



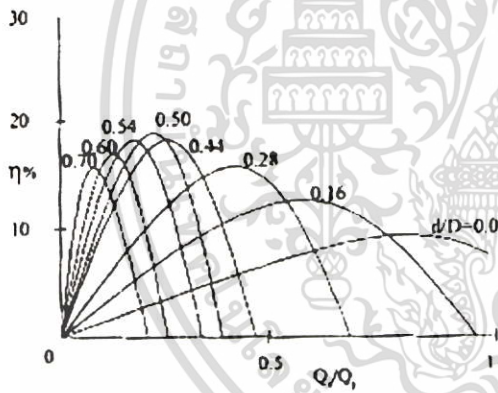
รูปที่ 8 แสดงขั้นตอนการคำนวณ

3.4 ผลการคำนวณ

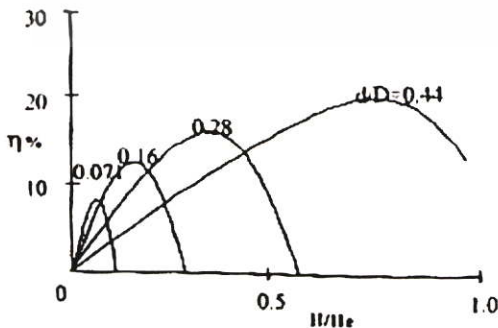
จะได้ค่าความสัมพันธ์ดังรูปที่ 9 - 11



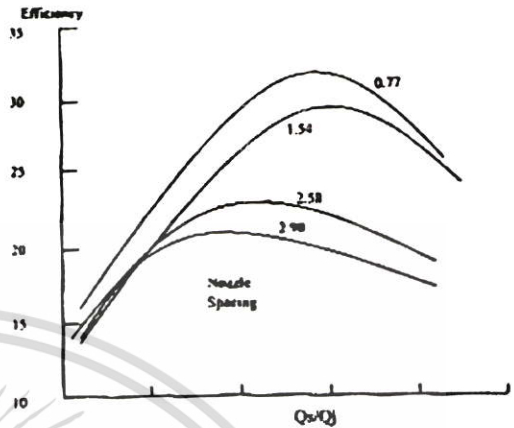
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Head ratio ( $H/H_0$ ) กับ Flow rate ratio ( $Q/Q_0$ ) เมื่อค่าอัตราส่วนพื้นที่ระหว่างหัวฉีดกับห้องผสมค่าต่างๆกัน



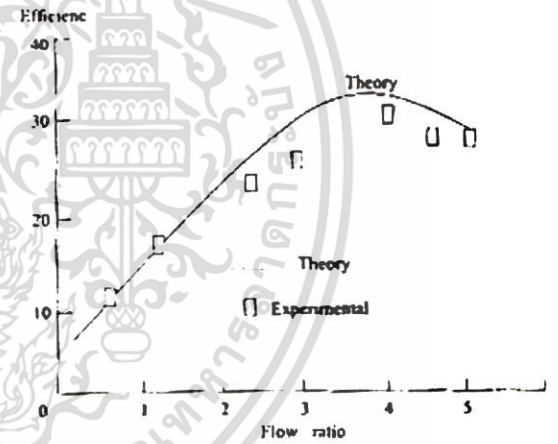
รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับ Flow rate ratio ( $Q/Q_0$ ) เมื่อค่าอัตราส่วนพื้นที่ระหว่างหัวฉีดกับห้องผสมค่าต่างๆกัน



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency ( $\eta$ ) กับ Head ratio ( $H/H_0$ ) เมื่อค่าอัตราส่วนพื้นที่ระหว่างหัวฉีดกับห้องผสมค่าต่างๆกัน



รูปที่ 12 แสดงค่า Efficiency ( $\eta$ ) กับ Flow ratio ซึ่งได้จากการทดลองของ N. L. SANGER



รูปที่ 13 แสดงค่า Efficiency ( $\eta$ ) กับ Flow ratio ( $Q/Q_0$ ) ซึ่งได้จากการทดลองของ N. L. SANGER เปรียบเทียบกับทฤษฎี

4. สรุปและวิจารณ์ผล

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าอัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีดต่อพื้นที่ช่องทางสุดมีค่ามาก จะทำให้ค่า Head สูง และอัตราการไหลต่ำ จากรูปที่ 10 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอัตราการไหล จะเห็นว่าที่ค่าอัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีดต่อพื้นที่ช่องทางสุดมีค่าน้อย จะทำให้ได้อัตราการไหลสูงแต่ค่าประสิทธิภาพต่ำ และที่ค่าอัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีดต่อพื้นที่ช่องทางสุดมีค่า 0.5 จะให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด และจากรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับ Head ratio จะยิ่งสูงตามไปด้วย เมื่อนำผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ N. L. Sanger ดังรูปที่ 12 และ รูปที่ 13 จะเห็นว่าสอดคล้องกัน

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chamlong Prabkeao, Katsumi Aoki, "Theoretical Analysis on Hydraulic Transportation of Solids Using the Jet Pump". Proceedings of the School of Engineering, Tokai University, Vol. 26, 2001, page 21-27.
- [2] 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.
- [3] Sanger, N. L., "An Experimental Investigation of Several Low Area Ratio Water Jet Pump, "ASME Journal of Basic Engineering, March, 1970,page11-20.
- [4] Staff of BHRA Fluid Engineering, "Engineering Outline: Jet Pump", Journal 'Engineering', 3<sup>rd</sup> May, 1968.



## ประวัติผู้เขียน

นายปรีชา ชันชะ เกิดเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดกำแพงเพชร ปีการศึกษา 2541 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ (เทคโนโลยีพลังงาน) จากมหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก และในปีการศึกษา 2543 ได้เข้ารับการศึกษาคือในระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประวัติการทำงาน

- พ.ศ. 2544 – 2545      ทำงานที่ JIDOSHA DENKI CO., LTD. (JIDECO)  
 - ตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิศวกรฝ่ายผลิต (PE)
- พ.ศ. 2545 – 2547      ทำงานที่ SIAM NIPPON STEEL PIPE CO., LTD. (SNP)  
 - ตำแหน่งวิศวกรฝ่ายเทคนิควิศวกรรม (TEF)
- พ.ศ. 2547              ปัจจุบัน ทำงานที่ BOSCH AUTOMOTIVE CORP. (RBTA)  
 - ตำแหน่งผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายเทคนิควิศวกรรม (TEF)

