

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสมเมื่อไหลผ่านท่อขยาย

Loss coefficient in conical diffuser where the combination of solid and liquid flow



เลขหมู่.....**81782**  
เลขทะเบียน.....**24 ส.ย. 2551**  
วัน,เดือน,ปี.....

b. 11931312  
i. ....

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสมเมื่อไหลผ่านท่อขยาย

Loss coefficient in conical diffuser where the combination of solid and liquid flow



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสมเมื่อไหลผ่านท่อขยาย

**Loss coefficient in conical diffuser where the combination of solid and liquid flow**

ผู้จัดทำ

1. นาย นิธิวัฒน์ มิ่งโมฬี รหัสประจำตัว 47010387
2. นาย วีระชัย รอดรักษา รหัสประจำตัว 47010730
3. นาย วีระพงศ์ พรหมแพง รหัสประจำตัว 47010732



(รศ.ดร. จ้างอง ปราบแก้ว)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. มณฑล ใจกุศล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสมเมื่อไหลผ่านท่อขยาย

นาย นิธิวัฒน์ มิ่งโมฬี 47010387

นาย วีระชัย รอดรักษา 47010730

นาย วีระพงษ์ พรหมแพง 47010732

รศ.ดร. จำลอง ปราบแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.มณฑล ใจกุลศล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำเสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียการไหลในท่อที่มีการขยายขนาดของของไหลผสมที่มีการผสมกันระหว่างน้ำกับทรายโดยวิธีการทดลอง การทดลองจะพิจารณาถึงผลของอัตราส่วนผสมของทรายที่ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และขนาดของมุมท่อขยายที่ 30, 60, 90, 120 และ 180 องศา จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างการสูญเสียความดันกับความเร็วเฉลี่ยในท่อ กราฟดังกล่าวสามารถใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายได้ จากการศึกษาพบว่าที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากัน คือ  $2.4041 (10^5)$  โดยที่ขนาดของมุมท่อขยายเท่ากับ 30 องศา ที่อัตราส่วนผสม 5% จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) = 0.6988 และที่อัตราส่วนผสม 25% จะมีค่า  $K_L = 0.9470$  เมื่อขนาดมุมท่อขยายเท่ากับ 90 องศา ที่อัตราส่วนผสม 5% จะมีค่า  $K_L = 1.2930$  และที่อัตราส่วนผสม 25% จะมีค่า  $K_L = 1.8693$  ในขณะที่ขนาดของมุมท่อขยายเท่ากับ 180 องศา ที่อัตราส่วนผสม 5% จะมีค่า  $K_L = 1.3961$  และที่อัตราส่วนผสม 25% จะมีค่า  $K_L = 1.6312$  จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่า  $K_L$  เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มขนาดมุมกรวยจาก 30 ถึง 90 องศา มีผลให้ค่า  $K_L$  เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มขนาดของมุมกรวยจาก 90 ถึง 180 มีผลทำให้ค่า  $K_L$  ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Loss coefficient in conical diffuser where the combination of solid and liquid flow

Nitiwat Mingmoree

Weerachai Rodrugsa

Werapong Prompang

Assoc.Prof.Dr.Chamlong Prabkeo Advisor

Assis.Prof Montol Jaikusol Co.Advisor

### ABSTRACT

This project present about loss coefficient of flow through a conical diffuser in pipeline that combine with water and sand by searching an equation from result of the experiment. The study consider about volume of sand result at 0,5,10,15,20 and 25 percent and mean of angle 's size that 30,60,90,120 and 180 degree. After that using the result to plot graph show the relation between head loss with flow speed in the pipe this graph can use for measuring loss coefficient. From result of studying is found that average Reynolds number is the same at  $2.4041(10^5)$  by angle's size 30 degree and volume of sand at 5 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 0.6988 and volume of sand at 25 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 0.9470 for angle's size 90 degree at volume of sand 5 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 1.2930 and volume of sand 25 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 1.8693 in the other of 180 degree angle at volume of sand 5 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 1.3961 and volume of sand at 25 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 1.6312. From result of studying it can determine that increasing volume of sand cause the loss coefficient ( $K_L$ ) also increased. Increasing degree of angle from 30 to 90 make the loss coefficient ( $K_L$ ) increased. However, if degree of angle is increased from 90 to 180, the result of the loss coefficient is decreased.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร. จำลอง ปรวบแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา ปริญญาบัตร ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะพร้อมทั้งตรวจทานแก้ไขและให้การอนุเคราะห์เป็นอย่างดีตลอดระยะเวลา การศึกษานี้ จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ และขอขอบพระคุณ ผศ. มณฑล ใจกุศล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาชี้แนะข้อบกพร่องและตรวจทานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณ มณฑา และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ชมรม Automotive ทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวก ในด้านต่างๆ ทั้งอุปกรณ์และสถานที่ ซึ่งทำให้ปริญญาบัตรนี้เสร็จสมบูรณ์ได้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ รวมถึงน้องๆ ญาติๆ ที่เป็นกำลังใจ ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาเครื่องกลทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และคอยอบรมสั่งสอนจนทำให้ผู้เขียน ได้รับความสำเร็จ ในการศึกษา

ประ โยชนันต์ไคที่ปริญญาบัตรฉบับนี้พึงมี ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ คณาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน และหากปริญญาบัตรฉบับนี้มีข้อผิดพลาดหรือข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

นิธิวัฒน์ มิ่งโมฬี  
วีระชัย รอดรักษา  
วีระพงศ์ พรหมแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 การไหลของของไหลในท่อ	3
2.1 การไหลราบเรียบในท่อกลมแนวราบ	3
2.2 การไหลแบบราบเรียบในท่อกลมแนวเอียง	4
2.3 การไหลแบบปั่นป่วนในท่อแนวราบ	5
2.4 การสูญเสียหลัก (Major Loss, $H_{loss,f}$ )	6
2.5 การสูญเสียรอง (Minor Loss, $H_{loss,m}$ )	7
2.5.1 การลดขนาดโดยทันทีทันใด	7
2.5.2 การขยายขนาดโดยทันทีทันใด	7
2.5.3 การขยายขนาดโดยโตขึ้นค่อยๆขยาย	7
2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลแบบ Single phase	8
2.7 ความหนืดสัมบูรณ์และความหนืดจลน์	9
2.8 ค่าความหนืดของของผสมระหว่างน้ำกับทราย	11
2.9 ค่าความหนาแน่นของของผสมระหว่างน้ำกับทราย	11
2.10 ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของของผสมระหว่างน้ำกับทราย	11
2.11 ค่าความแตกต่างของความดันจากมานอมิเตอร์	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การวิเคราะห์การไหลของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายในท่อกลม	13
3.1 การวิเคราะห์การไหลของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายในท่อกลมแนวราบ	13
3.2 การหาค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานของทราย ( $\lambda_s$ )	15
บทที่ 4 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย เมื่อไหลผ่านท่อขยาย	19
4.1 ชุดทดลองและอุปกรณ์การทดลอง	19
4.1.1 ชุดทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย	19
4.1.2 ส่วนประกอบของชุดทดลอง	21
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหล	21
4.2.1 อุปกรณ์การทดลอง	22
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าการเปลี่ยนแปลงของความดัน	22
4.4 วิธีการทดลอง	23
บทที่ 5 ผลการทดลอง	25
5.1 กราฟแสดงผลการทดลองของค่าเสดสูญเสียกับเรย์โนลด์์นัมเบอร์	25
5.2 กราฟแสดงผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย	28
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	31
บรรณานุกรม	33
ภาคผนวก	34
ภาคผนวก ก	35
ภาคผนวก ข	45
ภาคผนวก ค	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขของค่า $Re_\nu$ ที่มีผลต่อค่า $k$ และค่า $\varepsilon$	16
ตารางที่ ก-1 การทดลองที่มุมกรวย $30^\circ$	35
ตารางที่ ก-2 การทดลองที่มุมกรวย $60^\circ$	37
ตารางที่ ก-3 การทดลองที่มุมกรวย $90^\circ$	39
ตารางที่ ก-4 การทดลองที่มุมกรวย $120^\circ$	41
ตารางที่ ก-5 การทดลองที่มุมกรวย $180^\circ$	43
ตารางที่ ข-1 การคำนวณที่มุมกรวย $30^\circ$	45
ตารางที่ ข-2 การคำนวณที่มุมกรวย $60^\circ$	47
ตารางที่ ข-3 การคำนวณที่มุมกรวย $90^\circ$	49
ตารางที่ ก-4 การคำนวณที่มุมกรวย $120^\circ$	51
ตารางที่ ก-5 การคำนวณที่มุมกรวย $180^\circ$	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
รูปที่ 2.1 การไหลแบบราบเรียบเต็มท่อ	3
รูปที่ 2.2 การไหลในท่อเอียงทำมุม $\theta$ กับแนวระดับ	4
รูปที่ 2.3 Free body ของของไหลรูปทรงกระบอกรัศมี $r$ ความยาว $L$	5
รูปที่ 2.4 การไหลแบบปั่นป่วนเต็มท่อ	6
รูปที่ 2.5 การสูญเสียพลังงานจากการค่อยๆขยายพื้นที่หน้าตัด	8
รูปที่ 2.6 ค่าการสูญเสียของการไหลแบบ Single phase เทียบกับมุมท่อขยายต่างๆ	8
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau$ กับ $du/dy$ ของของไหลนิวทอนเนียน และของไหลนอนนิวทอนเนียน	9
รูปที่ 2.8 ความดันแตกต่างที่เกิดขึ้นในมานอมิเตอร์เมื่อมีการไหลในท่อ	12
รูปที่ 3.1 แสดง Pressure drop ของการไหลของของผสม	13
รูปที่ 3.2 แสดงการพิจารณาแรงเสียดทานในท่อกลมแนวราบ	15
รูปที่ 4.1 แสดงการออกแบบชุดทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหล ในท่อของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายที่ไหลผ่านท่อขยาย	19
รูปที่ 4.2 แสดงชุดทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลในท่อของของไหล ผสมระหว่างน้ำกับทรายที่ไหลผ่านท่อขยาย	20
รูปที่ 4.3 ชุดท่อขยายขนาดที่มุมกรวยขนาดต่างๆที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของ การไหลในท่อของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายที่ไหลผ่านท่อขยาย	20
รูปที่ 4.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก	21
รูปที่ 4.5 นาฬิกาจับเวลา	22
รูปที่ 4.6 มานอมิเตอร์แบบยูทงาย	23
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดสูญเสีย ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของผสม ( $Re_m$ ) ที่มุมกรวย 30 องศา	25
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดสูญเสีย ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของผสม ( $Re_m$ ) ที่มุมกรวย 60 องศา	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดสูญเสีย ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของผสม ( $Re_m$ ) ที่มุมกรวย 90 องศา	26
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดสูญเสีย ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของผสม ( $Re_m$ ) ที่มุมกรวย 120 องศา	27
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดสูญเสีย ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของผสม ( $Re_m$ ) ที่มุมกรวย 180 องศา	27
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมกรวย ที่ $Re_m = 1.1001(10^5) - 1.2540(10^5)$	28
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมกรวย ที่ $Re_m = 1.7389(10^5) - 1.9362(10^5)$	28
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมกรวย ที่ $Re_m = 1.8194(10^5) - 2.0946(10^5)$	29
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมกรวย ที่ $Re_m = 1.9076(10^5) - 2.3000(10^5)$	29
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมกรวย ที่ $Re_m = 1.9695(10^5) - 2.4041(10^5)$	30
รูปที่ 6.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับมุมกรวย ขนาดต่างๆ	31
รูปที่ ค-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ที่มุมกรวยขนาดต่างๆ	54
รูปที่ ค-2 ค่าการสูญเสียของการไหลแบบ Single phase	55
รูปที่ ค-3 ค่าความหนืดจลน์ของสารชนิดต่างๆ	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่ของท่อ ( $m^2$ )
$a$	พื้นที่ของของแข็งเล็ก ๆ ( $m^2$ )
$C$	ค่าสัมประสิทธิ์ของหนึ่งอนุภาค
$D$	ขนาดของท่อ (m)
$d$	ขนาดของเม็ดอนุภาคเฉลี่ย (m)
$f_s$	ความฝืดระหว่างอนุภาคกับน้ำในหนึ่งอนุภาค (kN)
$g$	$9.81 (m/s^2)$
$\Delta L$	ช่วงความยาวที่พิจารณา
$n$	ค่าสัมประสิทธิ์ของ $\Delta L$
$P$	ค่าความดันภายในท่อ (kPa)
$\Delta P$	ความแตกต่างของความดันในท่อ (kPa)
$\Delta P_w$	ความแตกต่างความดันของน้ำ (kPa)
$\Delta P_s$	ความแตกต่างความดันของของแข็ง (kPa)
$Re$	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
$Re_s$	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของแข็ง
$u_m$	ค่าความเร็วเฉลี่ยในท่อ
$u_s$	ค่าความเร็วเฉลี่ยของของแข็ง
$u_t$	ค่าคงที่ความเร็วของของแข็ง
$\alpha$	อัตราส่วนความดันที่ลดลง
$\gamma$	ค่าความหน่วงจำเพาะ
$\gamma_w$	ค่าความหน่วงจำเพาะของน้ำ
$\gamma_s$	ค่าความหน่วงจำเพาะของของแข็ง
$\lambda$	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของระบบ
$\lambda_w$	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของน้ำ
$\lambda_s$	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของแข็ง
$\dot{w}_s$	อัตราการไหลของของแข็งโดยน้ำหนัก
$\dot{w}_w$	อัตราการไหลของน้ำโดยน้ำหนัก
$w_s$	น้ำหนักของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา Ux ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$w_w$	น้ำหนักของเหลว
$\mu_s$	อัตราส่วนของน้ำหนัก
$f$	ค่าความเสียดทาน
$\phi$	อัตราส่วนความเร็ว
$\eta$	ค่าประสิทธิภาพ
$K$	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ลดขนาด
$\beta$	มุมกรวยของท่อขยาย
$c$	อัตราส่วนผสมของทรายกับน้ำ
$\Delta P_{sac}$	ความแตกต่างความดันเนื่องจากความเร่ง
$h$	ค่าการสูญเสียหลัก
ตัวห้อย	
$s$	ของแข็ง
$w$	ของเหลว
1	ภาคตัดที่ 1
2	ภาคตัดที่ 2
$L$	การสูญเสียรอง
$\theta$	มุมเอียงของท่อจากแนวระนาบ
$m$	ของผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

เนื่องจากในปัจจุบันการขนถ่ายของไหลผ่านระบบท่อนั้นนอกจากจะมีการส่งผ่านของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวแล้ว ยังมีงานบางประเภทที่มีการขนถ่ายของไหลผสมระหว่างของเหลวกับของแข็งที่มีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ เช่น ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน, เหมืองถ่านหิน, อุตสาหกรรมก่อสร้าง, การดูทรายหรือโคลนขึ้นจากแม่น้ำลำคลอง ในกรณีหลังนี้การไหลของของไหลในท่อจะเป็นของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายหรือโคลน ในการขนถ่ายของไหลผ่านระบบท่อจะมีการสูญเสียความดันเนื่องจากความฝืดระหว่างผิวด้านในของท่อ กับของไหลที่ไหลผ่านซึ่งเป็นการสูญเสียหลัก นอกจากนี้หากระบบท่อมีการเชื่อมต่อข้อต่อต่างๆหรือหากมีการเปลี่ยนขนาดของท่อ ก็จะมีการสูญเสียความดันเกิดขึ้นอีกเช่นกัน ดังนั้น ใครงานนี้จึงได้ศึกษาถึงวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่เกิดจากการไหลของน้ำกับทรายผ่านท่อที่มีการขยายขนาดจากการทดลอง โดยจะศึกษาผลของขนาดมุมของท่อขยาย อัตราส่วนผสม และความเร็วของของไหลผสมที่ขนาดต่างๆกัน เพื่อจะได้นำค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียไปใช้ในการคำนวณหาค่าตั้งที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหลดังกล่าวต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ออกแบบชุดการทดลองและทำการทดลองเพื่อพิจารณาถึงผลของค่าของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสม

1.2.2 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลอง

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของของไหลผสมระหว่างที่ไหลผ่านท่อขยายรูปทรงกรวยจากการทดลอง โดยจะทำการออกแบบชุดการทดลอง และทำการทดลองโดยนำทรายผสมน้ำที่อัตราส่วนผสม 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ นำมาไหลผ่านท่อขยายขนาดที่มุมกรวยของท่อขยาย 30 60 90 120 และ 180 องศา และเปลี่ยนความเร็วของของไหล แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 วิธีการดำเนินงาน

ในโครงการนี้เริ่มต้นโดยการสร้างชุดทดลองและทำการทดลองเพื่อศึกษาค่าของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย โดยศึกษาจากความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลระหว่างน้ำกับทรายไหลผ่านท่อขยายขนาดรูปทรงกรวย ที่อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับทรายที่ต่างกัน ขนาดของมุมกรวยที่ต่างกัน และความเร็วของการไหลที่ต่างกัน จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ และทำการวิเคราะห์เพื่อสร้างเป็นกราฟที่สามารถใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย โดยรายละเอียดของผลการทดลอง และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพื่อสร้างกราฟที่สามารถนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะแสดงไว้ในผลการทดลองและสรุปผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

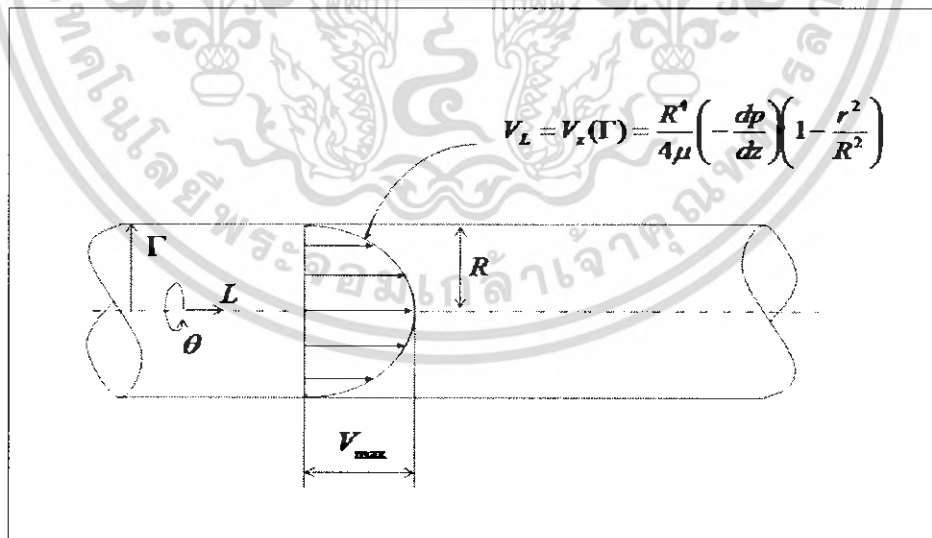
### การไหลของของไหลในท่อ

ลักษณะการไหลของของไหลที่ไหลในท่อจะมี 2 แบบคือ การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่จะมีค่าที่เป็นตัวกำหนดลักษณะการไหล คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) การไหลแบบราบเรียบ  $Re < 2100$  และการไหลแบบปั่นป่วน  $Re > 4000$

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.1)$$

#### 2.1 การไหลราบเรียบในท่อกลมแนวราบ

เมื่อมีของไหลไหลเข้าท่อด้วยความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด ยกเว้นของไหลชั้นบางๆ ที่อยู่ติดผนังท่อจะมีความเร็วเป็นศูนย์เนื่องจากผลของความหนืดที่อยู่ติดผนังท่อเป็นตัวต้านทานการไหลในขณะที่ยังไหลไปตามความยาวท่อจะพบว่าเส้นแสดงลักษณะโพรไฟล์ความเร็วจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นขีตผิวจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงแนวศูนย์กลางท่อและสภาพการไหลในช่วงถัดไปก็จะเป็นการไหลแบบราบเรียบเต็มท่อที่มีเส้นแสดงโพรไฟล์ความเร็วเป็นรูปพาราโบลาตลอดความยาวท่อ



รูปที่ 2.1 การไหลแบบราบเรียบเต็มท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบเต็มท่อในสถานะคงตัว โดยสมการของนาเวียร์-สโตกส์ในทิศ  $z$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{r \partial v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z = \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

ภายใต้ข้อสมมติฐานดังนี้

1. เป็นการไหล 2 มิติพิกัด  $(r, z)$  โดยมีสมมาตรในทิศ  $\theta$  และภายใต้สถานะคงตัว
2. พิจารณาเป็นการไหลยู่ตัวไม่ได้ และมีคุณสมบัติคงตัว
3. เป็นการไหลเต็มท่อ  $v_z = v_z(r)$
4. ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหล

ผลการวิเคราะห์ความเร็ว  $v_z$  จากสมการของนาเวียร์-สโตกส์ จะได้สมการ

$$v_z = \frac{R^2}{4\mu} \left( -\frac{dp}{dz} \right) \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (2.3)$$

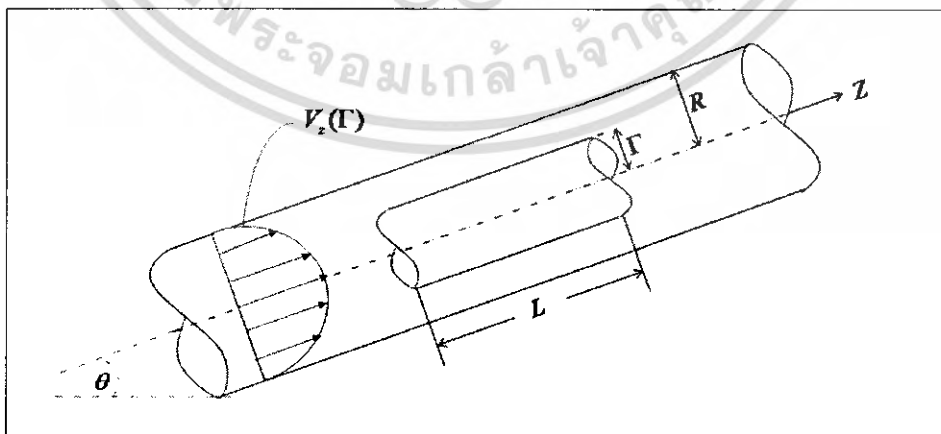
อัตราการไหลโดยปริมาตรของการไหลในท่อแนวราบ

$$Q = \int_A v_z dA = \frac{R^4}{8\mu} \left( -\frac{dp}{dz} \right) = \frac{\pi R^4}{8\mu} \left( \frac{\Delta p}{L} \right)$$

$$Q = \frac{\pi D^4 \Delta L}{128 \mu L} \quad (2.4)$$

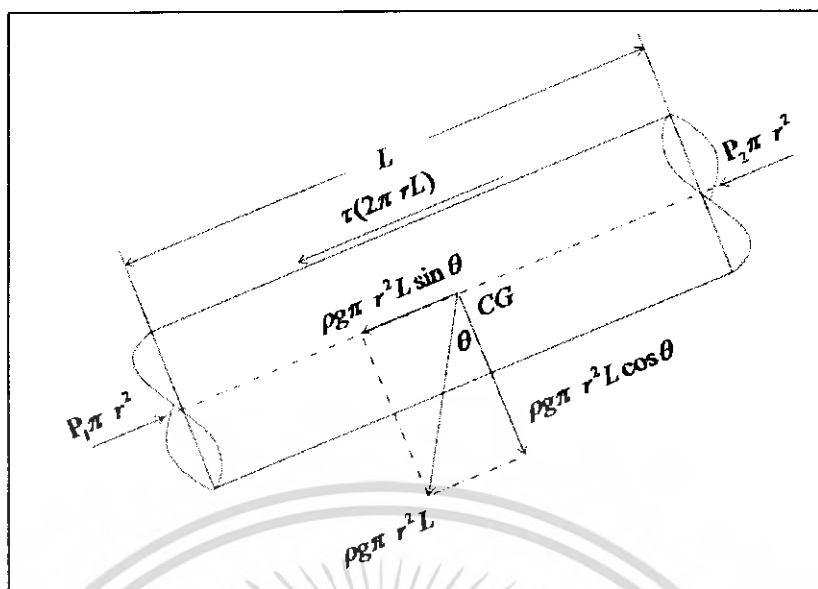
## 2.2 การไหลแบบราบเรียบในท่อกลมแนวเอียง

พิจารณาการไหลแบบราบเรียบเต็มท่อในท่อกลมเอียงทำมุม  $\theta$  กับแนวระดับ



รูปที่ 2.2 การไหลในท่อเอียงทำมุม  $\theta$  กับแนวระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 Free body ของของไหลรูปทรงกระบอกรัศมี  $r$  ความยาว  $L$

เมื่อพิจารณา Free body ในแนวเอียง

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 = \tau(2\pi rL) + \rho g \pi r^2 L \sin \theta$$

$$\frac{\Delta p - \gamma \sin \theta}{L} = \frac{2\tau}{r} \quad (2.5)$$

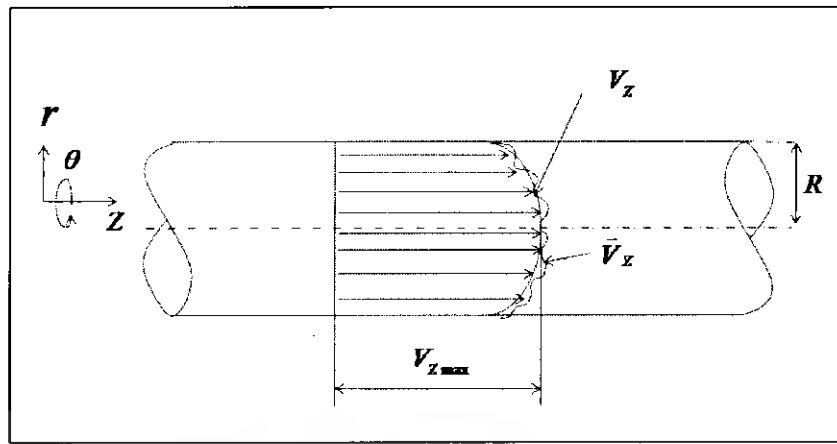
อัตราการไหลโดยปริมาตรของการไหลในท่อแนวราบ

$$Q = \frac{\pi(\Delta p - \gamma L \sin \theta)D^4}{128\mu L} \quad (2.6)$$

### 2.3 การไหลแบบปั่นป่วนในท่อแนวราบ

การไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์  $Re > 4000$  จะมีอัตราการไหลสูงมีการไหลเวียนวนไปมาตลอดหน้าตัดท่อขณะที่ของไหลไหลผ่าน โดยที่ความเร็วย่อย ( $v_r, v_\theta, v_z$ ) ทุกตัวไม่เป็นศูนย์และความเร็วยังขึ้นกับเวลา ซึ่งส่วนตัวประกอบความเสียหายสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเต็มท่อจะขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์และความขรุขระสัมพัทธ์  $\left(\frac{\epsilon}{D}\right)$  โดยค่า  $\epsilon$  คือค่าความขรุขระสัมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การไหลแบบปั่นป่วนเต็มท่อ

#### 2.4 การสูญเสียหลัก (Major Loss, $H_{loss,f}$ )

การไหลในท่อจะมีการสูญเสียความดัน (Pressure Drop) หรือที่เรียกว่า การสูญเสียเฮด (Head Loss) การสูญเสียดังกล่าวมีสองแบบ คือ การสูญเสียในท่อตรงถือเป็นการสูญเสียหลัก (Major Loss) ส่วนการเสียของอุปกรณ์ในระบบท่อ เช่น ข้อต่อ ข้องอ และวาล์ว เป็นต้น ถือว่าเป็นการสูญเสียรอง (Minor Loss)

$$H_{loss,T} = H_{loss,f} + H_{loss,m} \quad (2.7)$$

การสูญเสียหลักเป็นพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานไปในท่อ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$H_{loss,f} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.8)$$

โดยที่  $H_{loss,f}$  = การสูญเสียเนื่องจากความฝืด (m)

$f$  = สัมประสิทธิ์ของความฝืด

$L$  = ความยาวของท่อ (m)

$D$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)

$V$  = ความเร็วของการไหลในท่อ (m/s)

$g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การสูญเสียรอง (Minor Loss , $H_{loss,m}$ )

เป็นการสูญเสียพลังงานเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ เช่น ข้องอ ข้อลด ข้อเพิ่ม วาล์ว ประตูน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$H_{loss,m} = K \frac{v^2}{2g} \quad (2.9)$$

โดย  $H_{loss,m}$  = การสูญเสียเสดเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ  
 $K$  = สัมประสิทธิ์ของความต้านการไหล

### 2.5.1 การลดขนาดโดยทันทีทันใด

การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อทันทีทันใด ขนาดของความดันนั้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของความเร็วที่เพิ่มสูงขึ้น และเนื่องจากมีพลังงานที่ต้องสูญเสียกับการไหลที่เทอร์บิวเลนต์ จะเห็นได้ว่าความดันทางด้านเหนือหน้าตัดนั้นมีความสูงมาก ทั้งนี้เพราะเส้น stream line ในบริเวณนั้นมีลักษณะเป็นส่วนโค้งของวงกลม ดังนั้นแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะส่งผลไปทำให้ความดันบริเวณผิวท่อที่มีความสูงกว่าความดันที่กลางท่อของลำน้ำนั้น

### 2.5.2 การขยายขนาดโดยทันทีทันใด

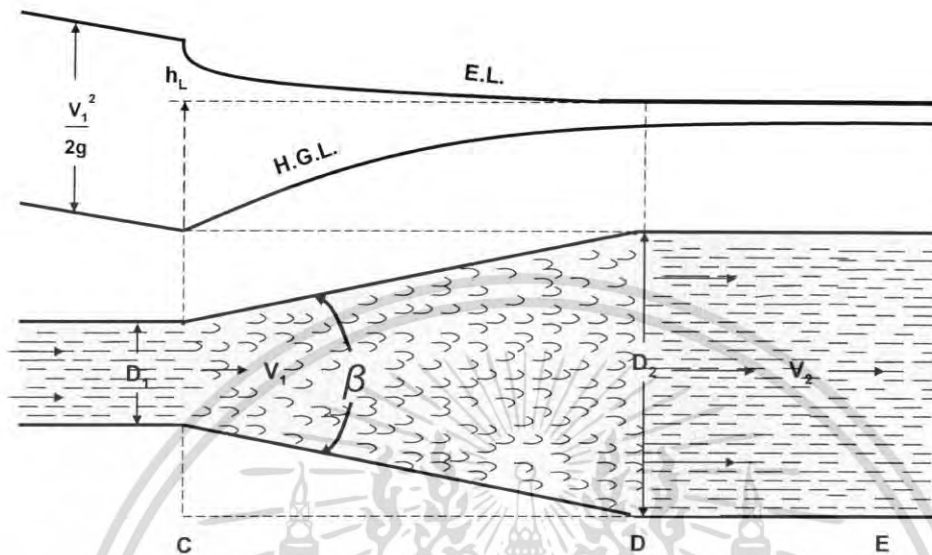
การขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อทันทีทันใด ความดันในท่อช่วงที่โตขึ้นนั้นจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากท่อที่โตนั้นจะมีความเร็วต่ำ แต่ขนาดความดันที่เพิ่มขึ้นนี้ก็ไม่มากนักเมื่อเทียบกับในกรณีที่ไม่มีการสูญเสียพลังงาน

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการขยายขนาดโดยทันทีทันใดมีค่ามากกว่าการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการลดขนาดในทันทีทันใด ทั้งนี้เนื่องจากการไหลแบบขยายขนาดนั้นเป็นการไหลที่ไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของมัน ของไหลตรงเส้นทางที่ขยายขนาดโตขึ้นนี้จะพยายามโน้มน้ำวให้เกิดการไหลวนขึ้นภายในของไหล ยิ่งไปกว่านั้นการแยกตัวออกจากผนังท่อของของไหลยังทำให้เกิดโพรงของการไหลวนที่เทอร์บิวเลนต์ขึ้นในบริเวณด้านนอกของการไหล สำหรับการไหลที่ลดขนาดพื้นที่ลงนั้นจะมีผลไปช่วยหน่วงการเกิดการไหลวนและทำการเปลี่ยนพลังงานที่อยู่ในรูปของความดันไปเป็นพลังงานจลน์อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.5.3 การขยายขนาดโดยค่อยๆขยายโตขึ้น

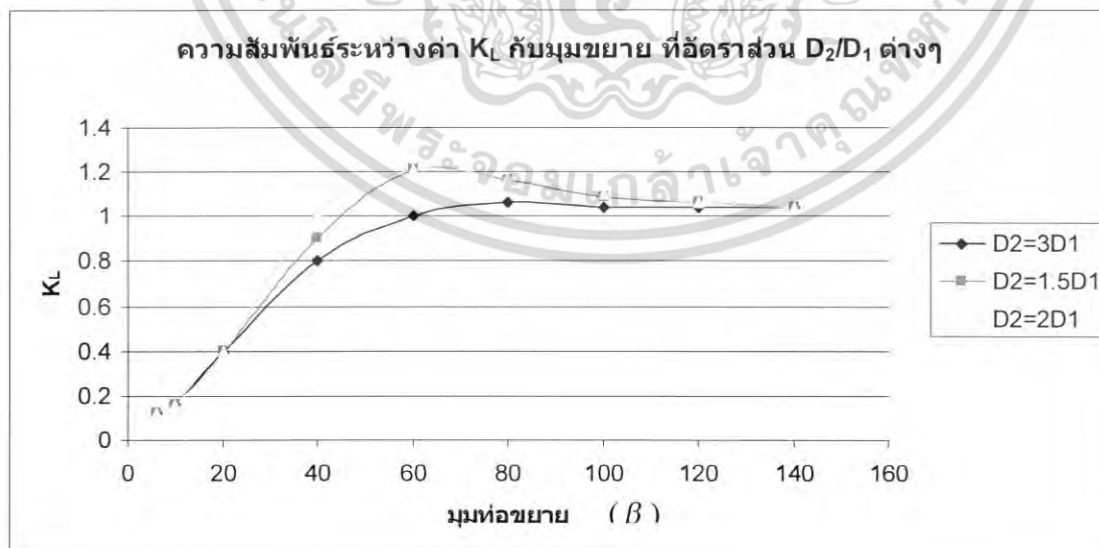
เราสามารถลดการสูญเสียพลังงานจากการขยายพื้นที่หน้าตัดนี้ให้น้อยลงได้ด้วยการลดความเร็วของของไหลลงทีละน้อย โดย diffuser ผิวของ diffuser นี้อาจจะทำเป็นส่วนโค้งของวงกลม ตามแนวที่ขนานกับแกนของมันหรืออาจจะทำเป็นรูปของกรวยตัดก็ได้ head loss จะเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์หรือการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันของมุม  $\beta$  และเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของพื้นที่ทั้งสอง สำหรับความยาวของ diffuser นี้หาได้จากตัวแปรทั้งสองนั้น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การสูญเสียพลังงานจากการค่อยๆ ขยายพื้นที่หน้าตัด

## 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลแบบ Single phase



รูปที่ 2.6 ค่าการสูญเสียของการไหลแบบ Single phase เทียบกับมุมทอขยายต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$h_L = K_L \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad 2.10$$

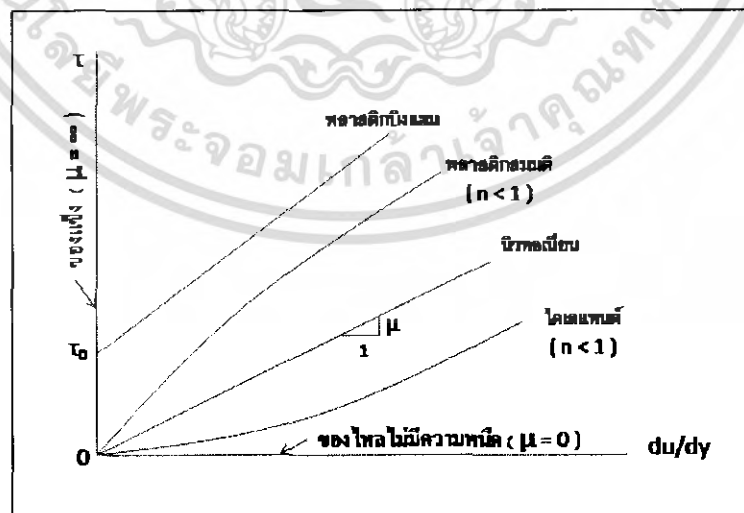
## 2.7 ความหนืดสัมบูรณ์และความหนืดจลน์

ความหนืด (viscosity) คือสมบัติของของไหลที่ใช้ต้านทานต่อความเค้นเฉือน และเป็นแรงต้านต่อแรงเฉือน ความหนืดเป็นผลมาจากเมื่อของไหลมีการเคลื่อนที่ ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและมีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างโมเลกุลของของไหล จากกฎความหนืดของนิวตันพบว่า ความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือน ความเค้นเฉือนในของไหลหนึ่งจะมีค่ามากขึ้นอยู่กับความหนืดของของไหลนั้นด้วย

จะได้ความสัมพันธ์ในรูปของสมการ

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad 2.11$$

ในที่นี้  $\tau$  คือความเค้นเฉือนที่กระทำในของไหล มีมิติ  $FL^{-2}$  (มีหน่วยเป็น  $N/m^2$ )  
 $\frac{du}{dy}$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือน มีมิติ  $T^{-1}$  (มีหน่วยเป็น  $rad/s$ )  
 $\mu$  คือความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล มีมิติ  $FL^{-2}T$  (ในระบบ SI มีหน่วยเป็น  $N \cdot s/m^2$  ในระบบเมตริก มีหน่วยเป็น  $g/cm \cdot s$  หรือเรียกว่า poise ที่นิยมใช้กันคือ centipoises)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  กับ  $du/dy$  ของของไหลนิวตันเนียนและของไหลนอนิวตันเนียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับของไหลนอนนิวทอน ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  และ  $du/dy$  จะไม่เป็นไปตามสมการ 2.11 จากรูปที่ 2.7 จะใช้สมการยกกำลังดังนี้

$$\tau = M \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad 2.12$$

โดยที่  $M$  คือครรชนีค่าคงตัว มีมิติ  $FL^{-2}T^n$  (มีหน่วยเป็น  $N \cdot s^n/m^2$ )

$n$  คือครรชนีซึ่งบ่งพฤติกรรมการไหล

ถ้า  $n > 1$  พบว่าของไหลมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามความเค้นเฉือน ถ้าออกแรงคนของเหลวเพิ่มมากขึ้น (ความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น) จะทำให้ความหนืดของของเหลวเพิ่มขึ้น ของไหลที่มีพฤติกรรมเช่นนี้เรียกว่า ของไหลไดเลเทนต์ (dilatant fluid) เช่น น้ำผสมทราย เป็นต้น

ถ้า  $n < 1$  พบว่าของไหลมีความหนืดลดลงเมื่อความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น ถ้าคนสิลูไซต์ (lucite) ในกระป๋อง จะพบว่าความหนืดของสีจะลดลง ของไหลที่มีพฤติกรรมเช่นนี้เรียกว่า ของไหลพลาสติกสมมติ (pseudoplastic fluid)

นอกจากนี้ ของไหลบางชนิดอาจมีพฤติกรรมคล้ายของแข็งเมื่อมีความเค้นเฉือนกระทำเกินกว่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น ( $\tau_0$ ) ของไหลนี้จะมีพฤติกรรมการไหลนิวทอน ซึ่งได้แก่ สีจาระบี ยาสีฟัน เป็นต้น ซึ่งเรียกว่า ของไหลพลาสติกบิงแฮม (Bingham plastic fluid) ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  กับ  $du/dy$  ดังสมการ

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad 2.13$$

ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity,  $\nu$ ) ในสมการการคำนวณในวิชากลศาสตร์ของไหล มักจะพบอัตราส่วนระหว่างความหนืดสัมบูรณ์ ( $\mu$ ) กับความหนาแน่น ( $\rho$ ) อยู่เสมอ เพื่อความสะดวกจะกำหนดอัตราส่วนนี้เป็นความหนืดจลน์ ตามสมการ

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad 2.14$$

ความหนืดจลน์ ( $\nu$ ) มีมิติ  $L^2T^{-1}$  (ในระบบ SI มีหน่วยเป็น  $m^2/s$  ในระบบเมตริกมีหน่วยเป็น  $cm^2/s$  หรือเรียกว่า stoke (St) แต่นิยมใช้ centistokes (cSt) มากกว่า)

ประการที่สำคัญก็คือทั้งความหนืดสัมบูรณ์และความหนืดจลน์ของของไหลต่าง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดของของเหลวจะลดลง

## 2.8 ค่าความหนืดของของผสมระหว่างน้ำกับทราย

ในกรณีของของไหลผสมระหว่างของแข็งกับของเหลว ค่าความหนืดของอนุภาคของแข็งในของไหลผสมจะมีค่ามากกว่าค่าความหนืดของของเหลวมาก ดังนั้นเราสามารถหาค่าความหนืดของของผสมได้จากสมการ

$$\mu_m = \mu_l(1 + \beta\alpha) \quad 2.15$$

โดยที่  $\mu_m$  คือค่าความหนืดของของผสมระหว่างน้ำกับทราย

$\mu_l$  คือค่าความหนืดของน้ำ

$\alpha$  คืออัตราส่วนของของผสมระหว่างน้ำกับทรายโดยปริมาตร

$\beta$  คืออัตราส่วนการไหลของทรายต่อปริมาณการไหลของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย

## 2.9 ค่าความหนาแน่นของของผสมระหว่างน้ำกับทราย

การหาความหนาแน่นของของผสมจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนผสมของของแข็ง หรือ  $\alpha = V_2/V$  โดยที่  $\alpha$  คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของอนุภาคกับปริมาตรของของผสมทั้งหมด ซึ่งเราสามารถหาค่าความหนาแน่นของของผสมจากสมการ

$$\rho_m = \alpha\rho_2 + (1-\alpha)\rho_1 \quad 2.16$$

โดยที่  $\rho_m$  คือความหนาแน่นของของผสมระหว่างน้ำกับทราย

$\alpha$  คืออัตราส่วนของของผสมระหว่างน้ำกับทรายโดยปริมาตร

$\rho_1$  คือความหนาแน่นของน้ำ

$\rho_2$  คือความหนาแน่นของอนุภาคผสมระหว่างน้ำกับทราย

## 2.10 ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของของผสมระหว่างน้ำกับทราย

$$\text{Re}_m = \frac{\rho_m u_m D}{\mu_m} \quad 2.17$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $Re_m$  คือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย

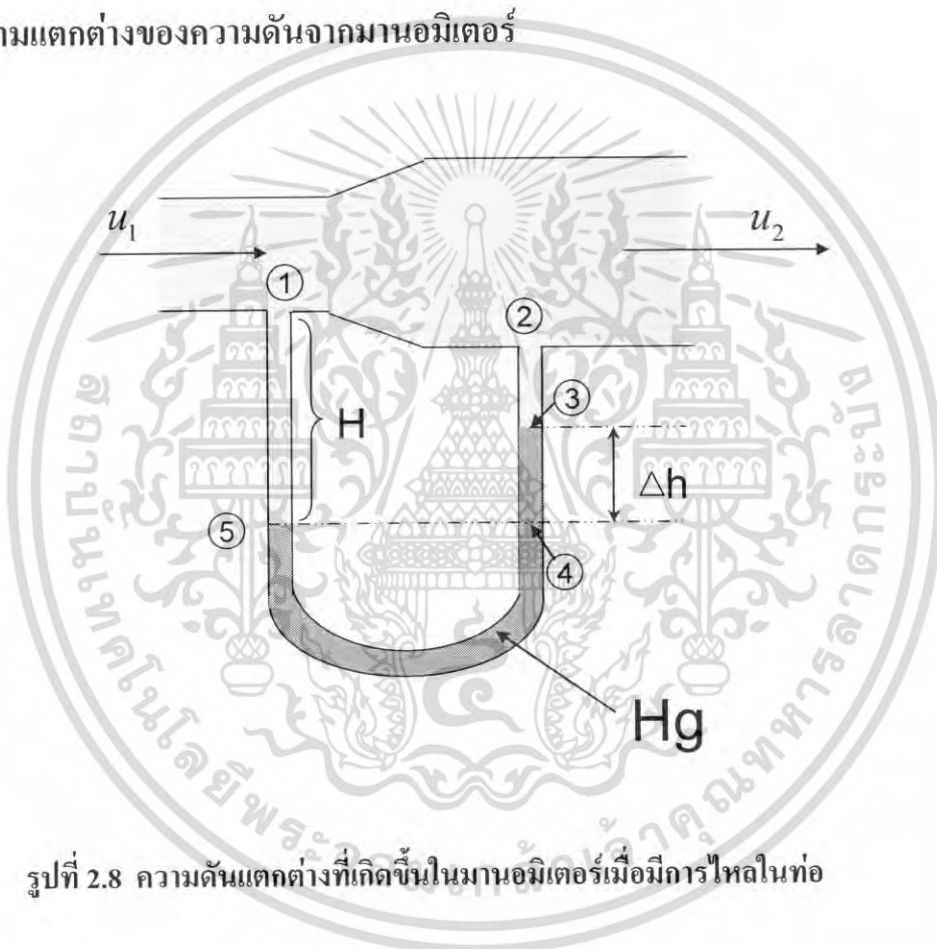
$\rho_m$  คือค่าความหนาแน่นของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย

$u_m$  คือค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย

$D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

$\mu_m$  คือค่าความหนืดของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย

## 2.11 ค่าความแตกต่างของความดันจากมานอมิเตอร์



รูปที่ 2.8 ความดันแตกต่างที่เกิดขึ้นในมานอมิเตอร์เมื่อมีการไหลในท่อ

สามารถหาค่า  $\Delta h$  ได้จากมานอมิเตอร์ชนิดบรรจุปรอทดังนี้

$$P_5 = P_4 \quad 2.18$$

$$P_1 + \rho_{water} gH = \rho_{Hg} g\Delta h + \rho_{water} g(H - \Delta h) + P_2 \quad 2.19$$

$$P_1 - P_2 = \rho_{Hg} g\Delta h \quad 2.20$$

$$\Delta h = \frac{P_1 - P_2}{\rho_{Hg} g} = \frac{\Delta P}{\rho_{Hg} g} \quad 2.21$$

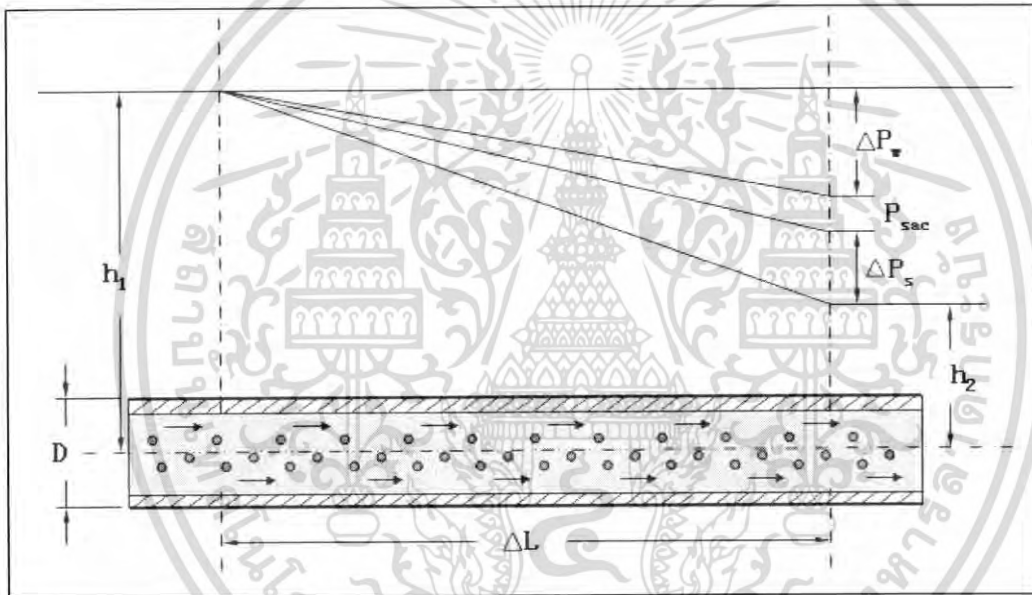
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การวิเคราะห์การไหลของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย ในท่อกลม

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานการไหลในท่อของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายจะมีตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เช่น ความเร็วเฉลี่ย ( $u_m$ ) ความยาวที่พิจารณา ( $\Delta L$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย ( $d_s$ ) และอัตราส่วนผสมของทราย เป็นต้น

### 3.1 การวิเคราะห์การไหลของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายในท่อกลมแนวราบ



รูปที่ 3.1 แสดง Pressure drop ของการไหลของผสม

เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลผสมระหว่างของแข็งกับน้ำในท่อแนวราบสามารถหาค่าความแตกต่างของความดันภายในท่อ ( $\Delta P$ ) ได้โดย

$$\Delta P = \Delta P_w + \Delta P_{sc} + \Delta P_s \quad (3.1)$$

เมื่อความเร็วคงที่  $\Delta P_{sc} = 0$  จะได้สมการ

$$\Delta P = \Delta P_w + \Delta P_s \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพัทธ์จะได้

$$\Delta P_w = \lambda_w \cdot \frac{\Delta L}{D} \cdot \frac{\gamma_w}{2g} \cdot u_m^2 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $P = \gamma \cdot h$

จากทฤษฎีของการสูญเสียหลัก (Major loss)

$$h = \lambda \cdot \frac{\Delta L}{D} \cdot \frac{u_m^2}{2g} \quad (3.4)$$

และ

$$\Delta P_s = \lambda_s \cdot \frac{\Delta L}{D} \cdot \frac{\gamma_w}{2g} \cdot u_m^2 \quad (3.5)$$

นำสมการ(3.4) และ (3.5) แทนในสมการ (3.2) จะได้

$$\Delta P = (\lambda_s + \lambda_w) \frac{\Delta L}{D} \cdot \frac{\gamma_w}{2g} \cdot u_m^2 \quad (3.6)$$

กำหนดให้  $\lambda = \lambda_s + \lambda_w$

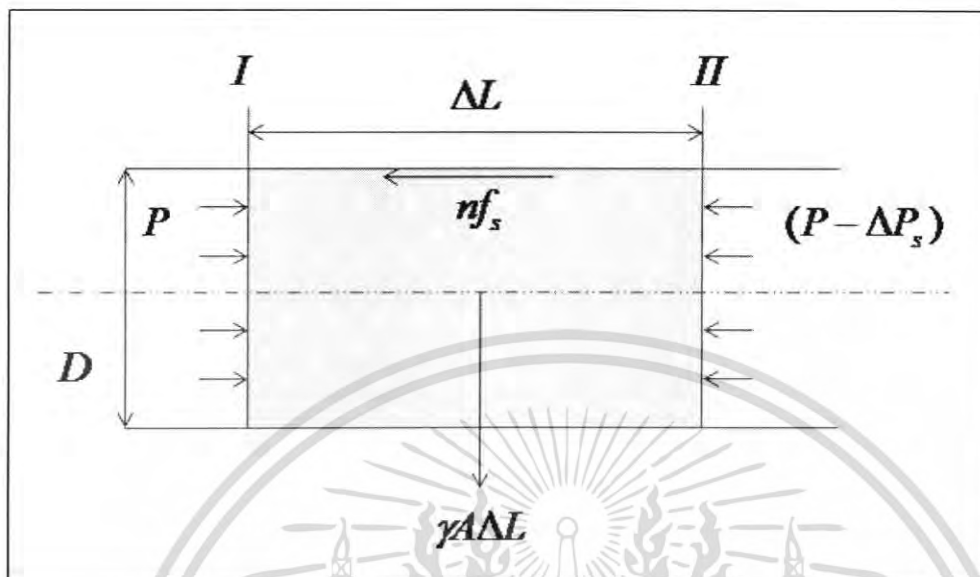
$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{\Delta L}{D} \cdot \frac{\gamma_w}{2g} \cdot u_m^2 \quad (3.7)$$

อัตราส่วนความดัน (Pressure drop ratio)

$$\alpha = \frac{\Delta P}{\Delta P_w} = \frac{\lambda}{\lambda_w} = 1 + \frac{\lambda_s}{\lambda_w} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การหาค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานของทราย ( $\lambda_s$ )



รูปที่ 3.2 แสดงการพิจารณาแรงเสียดทานในท่อกลมแนวราบ

พิจารณาการไหลของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายในท่อกลมแนวราบเพื่อหาค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานของทราย ( $\lambda_s$ ) โดยใช้หลักการสมดุลแรง

$$PA = nf_s + (P - \Delta P_s)A \quad (3.9)$$

จะได้ค่า Pressure drop ของทราย ( $\Delta P_s$ )

$$\Delta P_s = f_s \frac{n}{A} \quad (3.10)$$

โดยที่ Drag coefficient ( $f_s$ ) หาได้จากสมการ

$$f_s = C \frac{\gamma_s}{2g} (u_m - u_s)^2 a \quad (3.11)$$

และ

$$C = \frac{k}{Re_s^\epsilon} \quad (3.12)$$

เมื่อค่า C ขึ้นอยู่กับค่า  $Re_s$

$$Re_s = (1-\phi) \frac{d_s}{D} Re \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	$k$	$\varepsilon$	
$0 < Re_s < 1$	24	1	Stokes
$1 < Re_s < 500$	10	0.5	Allen
$500 < Re_s < 2 \times 10^5$	0.44	0	Newton

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขของค่า  $Re_s$  ที่มีผลต่อค่า  $k$  และค่า  $\varepsilon$

เมื่อพิจารณาความสมดุลของน้ำหนัก

น้ำหนักของของแข็ง + น้ำหนักของน้ำ = น้ำหนักทั้งหมด

$$nw_s + \left( A \Delta L - \frac{nw_s}{\gamma_s} \right) \gamma_w = \gamma A \Delta L$$

จะได้สมการของจำนวนเม็ดของแข็งในส่วนของความยาว ( $\Delta L$ ) ที่พิจารณา

$$n = \frac{A \Delta L (\gamma - \gamma_w)}{w_s \left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)} \quad (3.14)$$

จากความสัมพันธ์

$$\gamma A \Delta L = w_s \frac{\Delta L}{u_s} + w_w \frac{\Delta L}{u_m}$$

$$\gamma A = w_w \frac{\left( \frac{u_m}{u_s} \frac{w_s}{w_w} + u_s \right)}{u_s u_m} \quad (3.15)$$

ให้อัตราส่วนน้ำหนัก ( $\mu_s$ ) ของการไหลของของไหลผสมระหว่างของแข็งกับน้ำ  $\mu_s = \frac{w_s}{w_w}$

จะได้สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma \cdot A = w_w \left( \frac{u_m \cdot \mu_s + u_s}{u_s u_m} \right)$$

$$\gamma \cdot A = w_w \left( \frac{\mu_s \frac{u_m}{u_s} + I}{u_m} \right) \tag{3.16}$$

ให้อัตราส่วนความเร็ว ( $\phi$ ) ของการไหลของของไหลผสมระหว่างของแข็งกับน้ำ  $\phi = \frac{u_s}{u_m}$

จะได้สมการ

$$\gamma \cdot A = w_w \left( \frac{\frac{\mu_s}{\phi} + I}{u_m} \right) \tag{3.17}$$

โดยที่

$$\gamma_w = \frac{w_w}{A \cdot u_m}$$

จะได้ความสัมพันธ์ของสมการ  $\gamma = \gamma_w \left( \frac{\mu_s}{\phi} + I \right)$  แทนใน สมการที่(3.13) จะได้

$$n = \frac{\mu_s \gamma_w A \cdot \Delta L}{w_w \phi \left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)} \tag{3.18}$$

นำสมการที่ (3.11) กับสมการที่ (3.16) และค่า C มาแทนในสมการที่ (3.10) จัดรูป แล้วคูณด้วย ตัวแฟกเตอร์ ( $\eta$ ) ทำให้ค่าที่ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

$$\Delta P_s = \left\{ \eta \frac{3k \cdot u_s (1-\phi)^{2-\varepsilon}}{2Re^\varepsilon \phi} \left( \frac{D}{d_s} \right)^{l+\varepsilon} \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{l}{\left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)} \right\} \frac{\Delta L}{D} \frac{\gamma_w}{2g} \cdot u_m^2 \tag{3.19}$$

จากสมการที่ (3.6)

$$\Delta P = (\lambda_s + \lambda_w) \frac{\Delta L}{D} \cdot \frac{\gamma_w}{2g} \cdot u_m^2$$

นำสมการที่ (3.23) มาแทนในสมการที่ (3.6) จะได้ว่า

$$\Delta P = \left[ \lambda_w + \left\{ \eta \frac{3ku_s (1-\phi)^{2-\varepsilon}}{2Re^\varepsilon \phi} \left( \frac{D}{d_s} \right)^{1+\varepsilon} \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{1}{\left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)} \right\} \right] \frac{\Delta L \gamma_w}{D} \frac{u^2}{2g} \quad (3.20)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ( $K$ )

$$\Delta P = \left[ \lambda_w + \left\{ \eta \frac{3ku_s (1-\phi)^{2-\varepsilon}}{2Re^\varepsilon \phi} \left( \frac{D}{d_s} \right)^{1+\varepsilon} \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{1}{\left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)} \right\} \right] \frac{\Delta L \gamma_w}{D} \frac{u^2}{2g} \quad (3.21)$$

อัตราส่วนความดัน (Pressure drop ratio)

$$\alpha = 1 + \eta \frac{3ku_s (1-\phi)^{2-\varepsilon}}{2\lambda_w Re^\varepsilon \phi} \left( \frac{D}{d_s} \right)^{1+\varepsilon} \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{1}{\left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

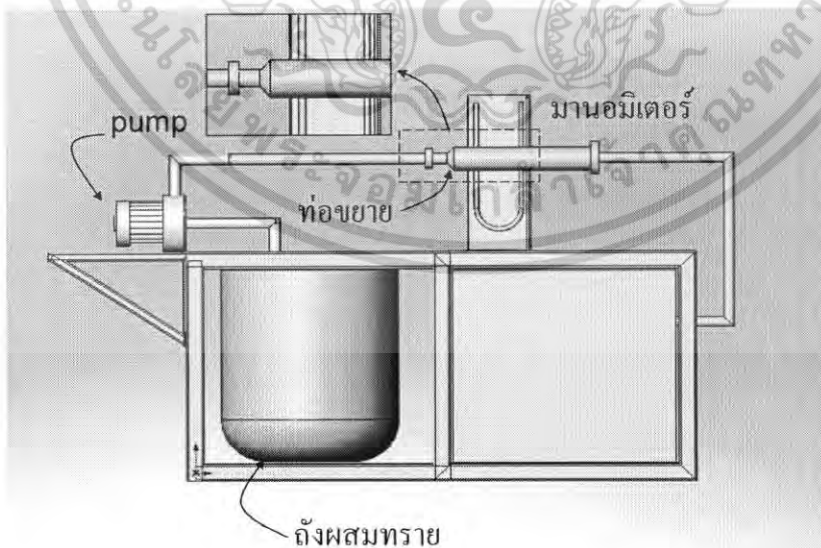
# การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสม ระหว่างน้ำกับทรายเมื่อไหลผ่านท่อขยาย

การสูญเสียรอง หรือการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ เช่น วาล์ว ข้อต่อ ข้องอ หรือข้อลด ข้อเพิ่ม เป็นต้นนั้น ถึงแม้จะมีการสูญเสียที่น้อย แต่หากเราสามารถทราบค่าการสูญเสียที่แน่นอนได้นั้น ก็จะทำให้เราสามารถลดความสับสนเปลี่ยนแปลง ในส่วนของอุปกรณ์การขับเคลื่อนได้ ดังนั้นทางกลุ่มของกระผมจึงได้มีแนวคิดในการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายเมื่อไหลผ่านท่อขยาย ที่มีขนาดมุมขยายค่าต่างๆ และได้ทำการออกแบบชุดทดลองในการหาค่าและวิธีการทดลองดังต่อไปนี้

### 4.1 ชุดทดลองและอุปกรณ์การทดลอง

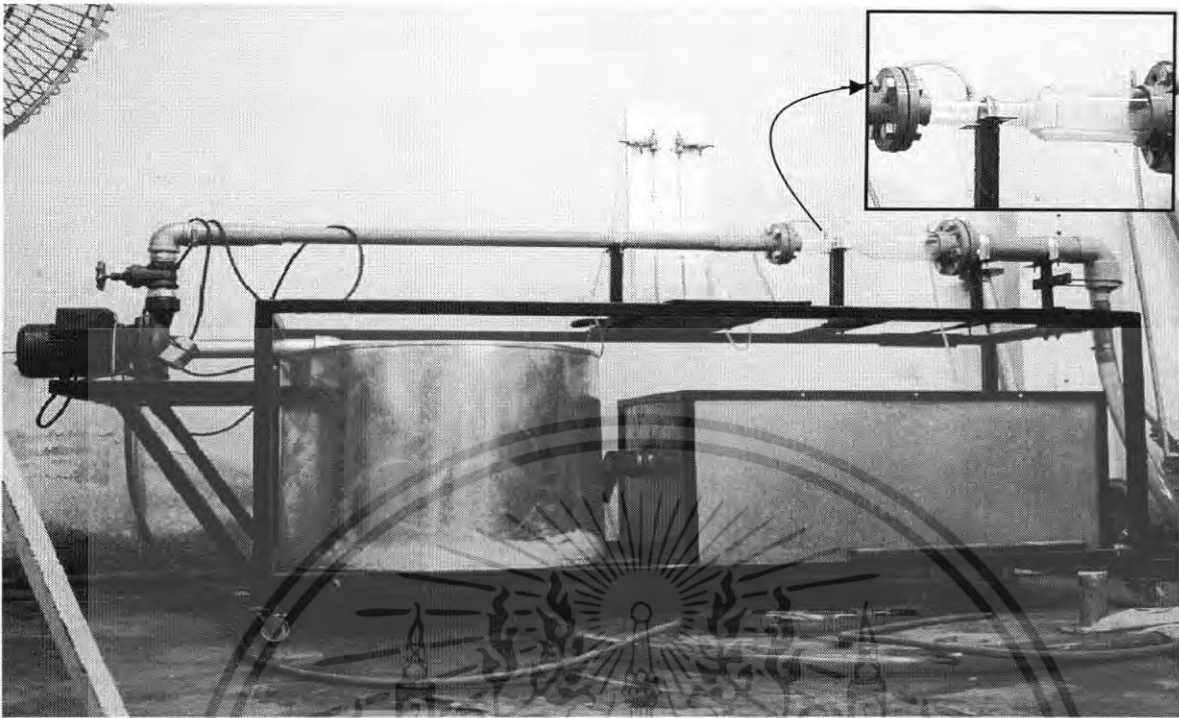
#### 4.1.1 ชุดทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลในท่อของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทราย จะใช้น้ำผสมกับทราย โดยได้ออกแบบและประกอบอุปกรณ์ต่างๆ ของชุดทดสอบไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และรูปที่ 4.3

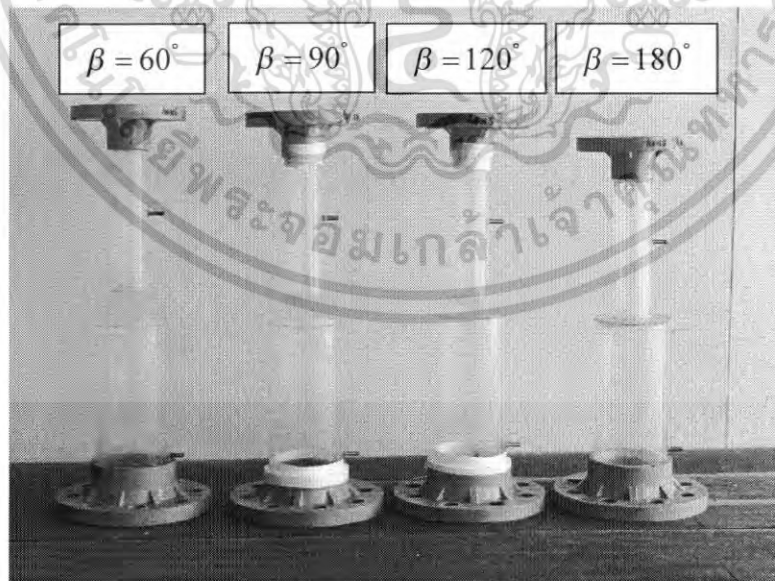


#### รูปที่ 4.1 แสดงการออกแบบชุดทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลในท่อของของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ให้กลุ่มผสมระหว่างน้ำกับทรายที่ไหลผ่านท่อขยาย ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงชุดทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลในท่อของงอไหล  
ผสมระหว่างน้ำกับทรายที่ไหลผ่านท่อขยาย



รูปที่ 4.3 ชุดท่อขยายขนาดที่มุมกรวยขนาดต่างๆที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการ

ไหลในท่อของงอไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายที่ไหลผ่านท่อขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ส่วนประกอบของชุดทดลอง

1. ปีมหอยโข่ง
2. มานอมิเตอร์แบบหลอดรูปตัวยูหงาย
3. ถังผสมระหว่างทรายกับน้ำ
4. ถังวัดปริมาตร
5. ชุดท่อขยายขนาด ที่มีขนาดมุมกรวย  $30^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}, 120^{\circ}$  และ  $180^{\circ}$

#### 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหล

วิธีการหาอัตราการไหลของของผสมในโครงการนี้ เนื่องจากของไหลที่ใช้ทดลองเป็นของไหลผสมที่มีการผสมระหว่างน้ำกับทราย การใช้มาตรวัดอัตราการไหลแบบแผ่นออริฟิซจึงทำไม่ได้ ดังนั้นจึงทำการหาอัตราการไหลโดยวิธี weighting method หรือก็คือการหาอัตราการไหลโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก ค่าอัตราการไหลที่ได้จะมีหน่วยคือ นิวตัน/วินาที ( $\dot{w}$ ) เราจะสามารถหาค่าอัตราการไหลโดยปริมาตรได้จาก  $\frac{\dot{w}}{\gamma}$  โดยที่  $\gamma$  คือน้ำหนักจำเพาะของสารนั้นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ**รูปที่ 4.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก** ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 นาฬิกาจับเวลา

#### 4.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก
2. ถังรองน้ำ
3. นาฬิกาจับเวลา

#### 4.3 อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าการเปลี่ยนแปลงของความดัน

โดยการใช้मानอมิเตอร์แบบหลอดรูปตัวยูหงายเพื่ออ่านค่าการเปลี่ยนแปลงความดัน ( $\Delta h$ ) จากความสูงที่แตกต่างกันของของเหลวที่บรรจุอยู่ในमानอมิเตอร์ ซึ่งในที่นี้คือปรอท (mercury)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 มานอมิเตอร์แบบยูหวางย

#### 4.4 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลอง มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

4.3.1 ทำการทดลองที่อัตราส่วนผสมทราย 0% โดยทำการวัดอัตราการไหลของน้ำที่ความเร็วของรอบวาล์วต่างๆ เริ่มจาก 2, 4, 6, 8 และ 10 รอบ ด้วยวิธีการตวงและจับเวลา จากนั้นทำการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงความดันเมื่อใช้ปั๊มขับเคลื่อนน้ำผ่านท่อมุมกรวยขนาดต่างๆ ตั้งแต่มุมกรวยขนาด 30, 60, 90, 120 และ 180 องศา

4.3.2 จากนั้นใช้ทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.45 มิลลิเมตร ทำการผสมกับน้ำในอัตราส่วนทราย 5% โดยปริมาตรในถัง จากนั้นเริ่มทำการทดลองโดยใช้ปั๊มดูดของผสมให้ไหลผ่านท่อขยายที่มีมุมขนาด 30 องศา โดยกำหนดความเร็วเริ่มต้นด้วยการเปิดวาล์ว 2 รอบ จากนั้นบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงความดันที่อ่านได้จากมานอมิเตอร์แบบหลอดรูปตัวยูหวางย โดยระหว่างการทดลองจะต้องกวนของผสมให้ทรายผสมกับน้ำอย่างสม่ำเสมอ

4.3.3 ทำการวัดอัตราการไหลของของผสม อัตราการไหลของน้ำ และอัตราการไหลของทราย โดยแยกน้ำและทรายที่ได้นำมาชั่งน้ำหนัก

4.3.4 ทำการทดลองเหมือนข้อ 4.3.2 และข้อ 4.3.3 โดยเพิ่มความเร็วของของผสมโดยหมุนวาล์วที่ 4, 6, 8 และ 10 รอบ แล้วบันทึกข้อมูล

4.3.5 ทำการทดลองเหมือนข้อ 4.3.2, 4.3.3 และข้อ 4.3.4 โดยการเปลี่ยนมุมกรวยท่อขยายเป็น 60, 90, 120, 180 องศา แล้วบันทึกข้อมูล

4.3.6 ทำการทดลองเหมือนข้อ 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4 และ 4.3.5 โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของทรายเป็น 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ แล้วบันทึกข้อมูล

4.3.7 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ ได้แก่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเสถียรภาพ ( $h_L$ ) และผลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์  
ต่างๆของของผสมระหว่างน้ำกับทราย ( $Re_m$ ) และค่าดังกล่าวกับมุมท่อขยาย ( $\beta$ ) ที่ขนาดต่างๆ



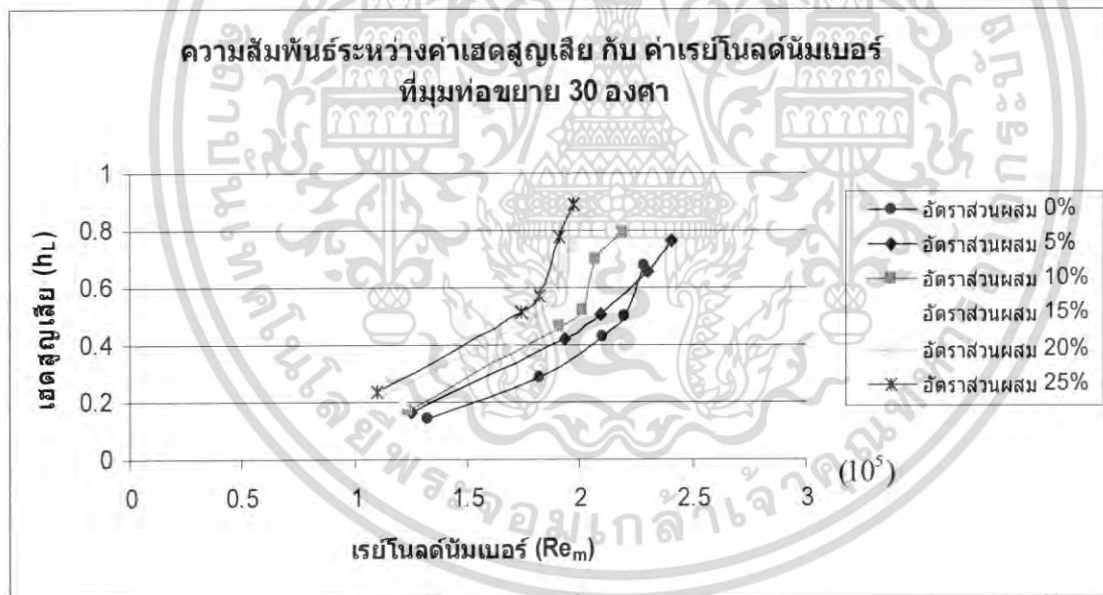
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

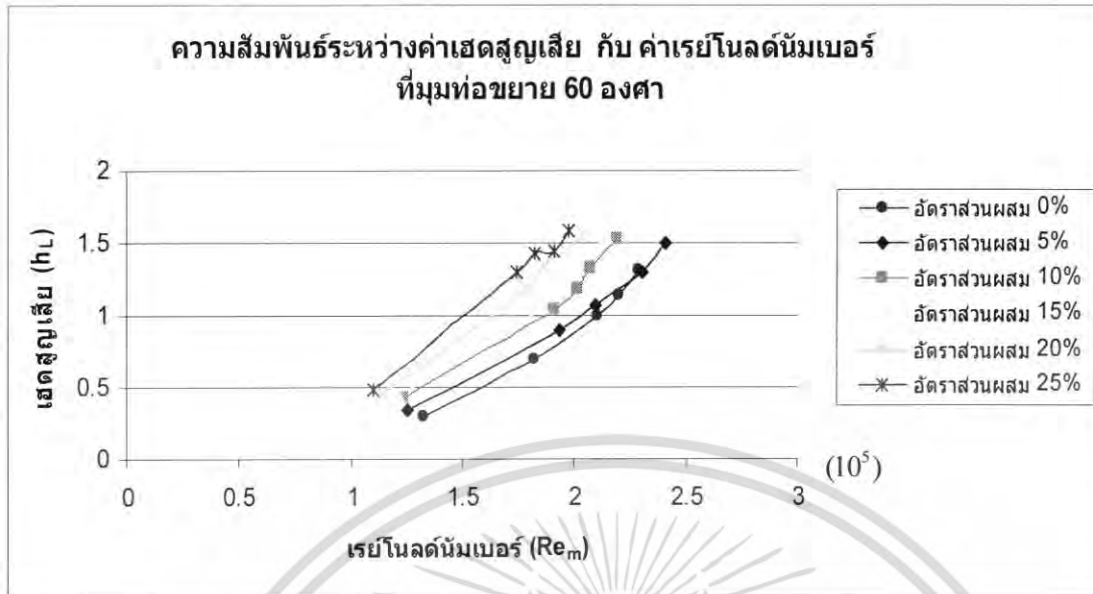
จากการทดลองเมื่อนำค่าการเปลี่ยนแปลงความดัน ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_m$ ) ที่มุมกรวยต่างๆ และอัตราส่วนผสมต่างๆของทรายกับน้ำ ที่ได้มาพล็อตกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ จากนั้นก็จะนำผลที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) ซึ่งผลการทดลอง ผลการคำนวณ ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ และรวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองได้แสดงเอาไว้ดังต่อไปนี้

**5.1 กราฟแสดงผลการทดลองของค่าเสดสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์** เมื่อใช้ของไหลผสมที่มีอัตราส่วนผสมของทรายที่ 0%, 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% โดยการเปลี่ยนชุดทดลองที่มีมุมกรวยตั้งแต่  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  และ  $180^\circ$

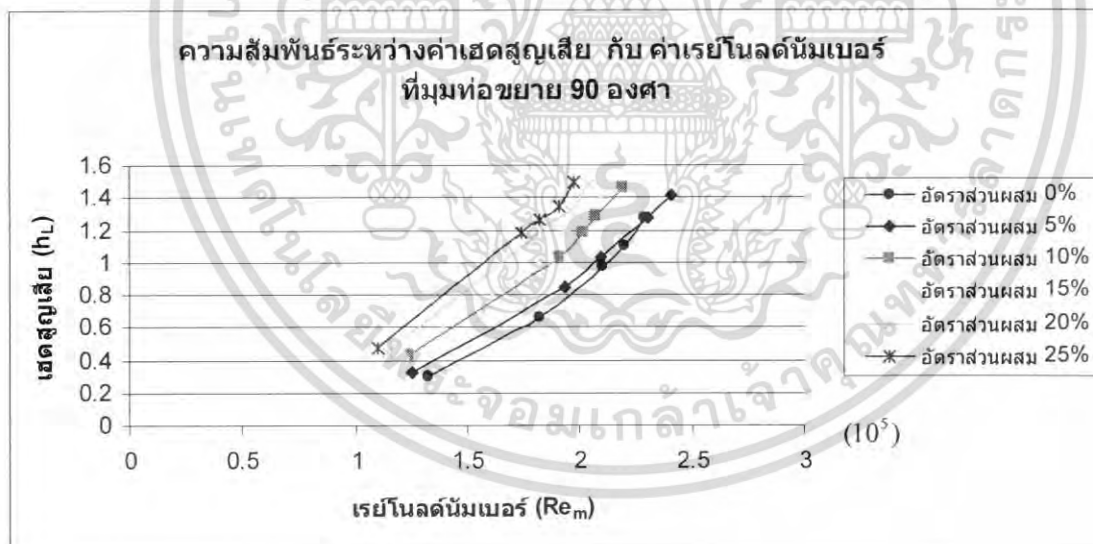


รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดสูญเสีย ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของผสม ( $Re_m$ ) ที่มุมกรวย 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

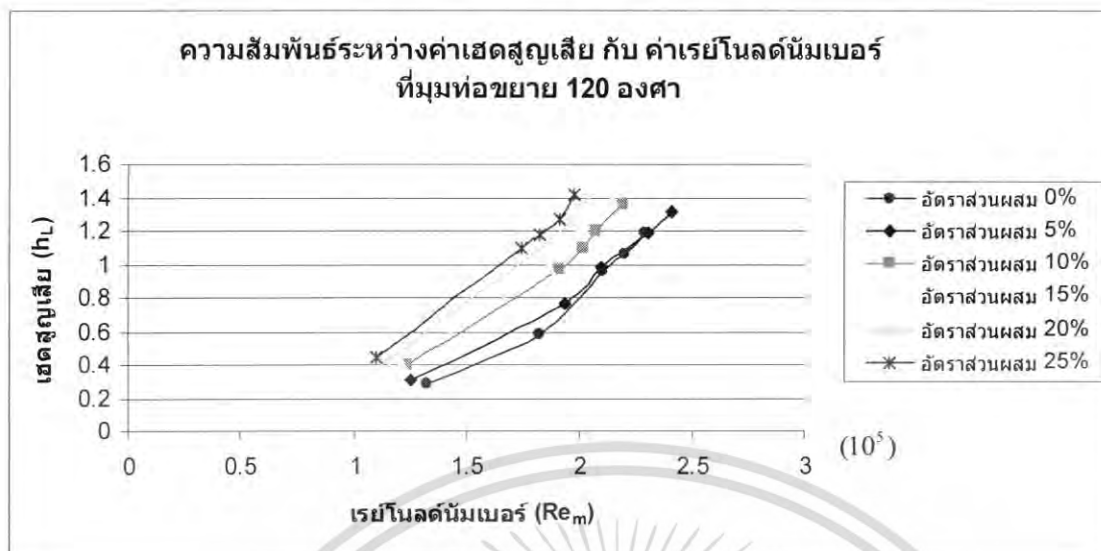


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดสูญเสียบ ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของผสม ( $Re_m$ )  
ที่มุมกรวย 60 องศา

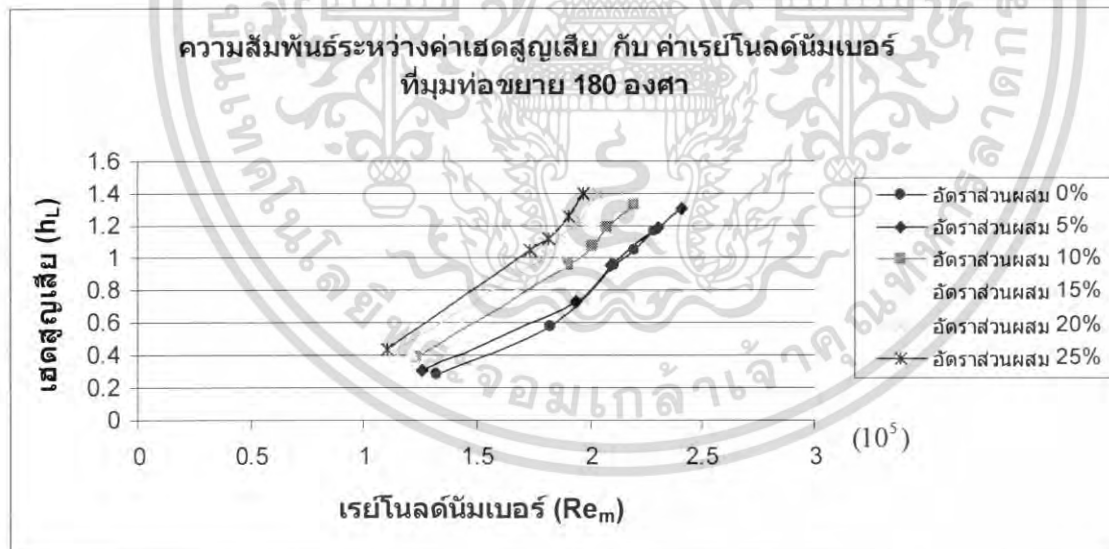


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดสูญเสียบ ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของผสม ( $Re_m$ )  
ที่มุมกรวย 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดสูญเสี ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของผสม ( $Re_m$ ) ที่มุมท่อกววย 120 องศา

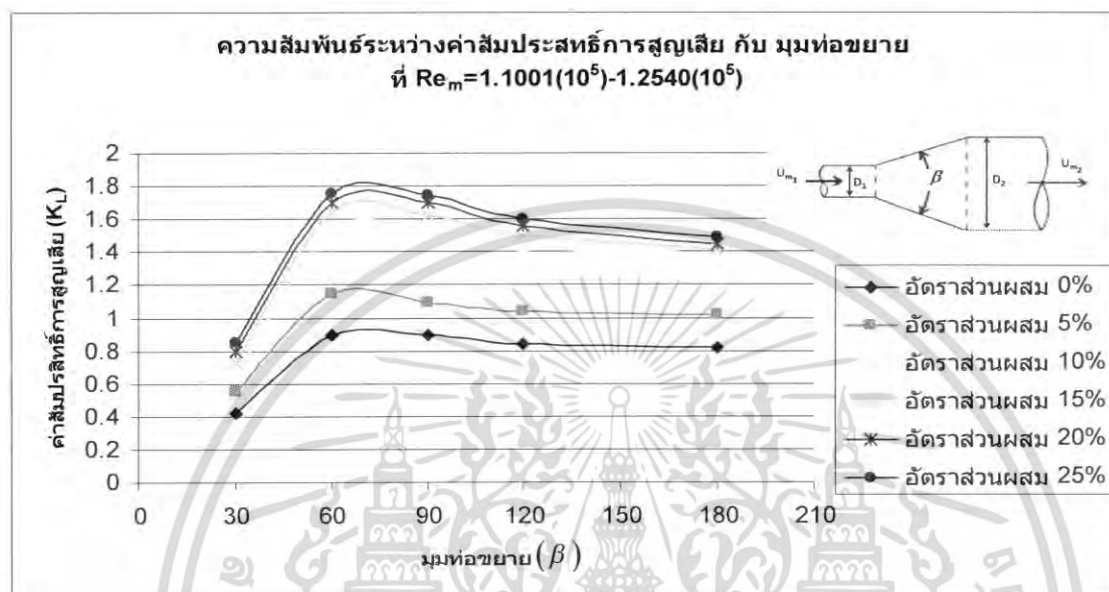


รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดสูญเสี ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของผสม ( $Re_m$ ) ที่มุมท่อกววย 180 องศา

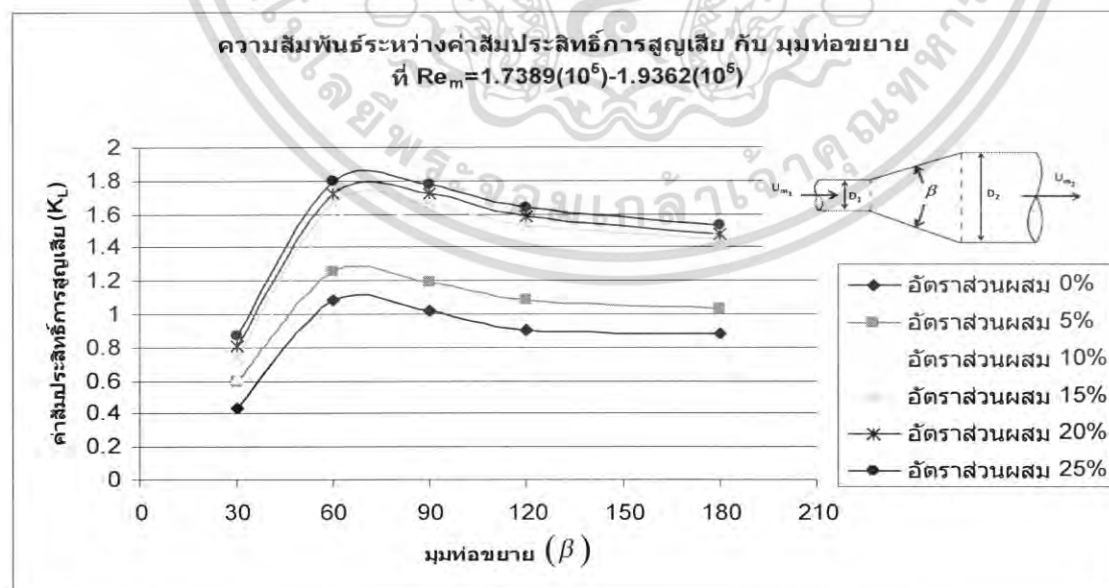
จากรูปที่ 5.1-5.5 ค่าเสดสูญเสี ( $h_L$ ) ที่ท่อขยายขนาดมุม 30 ถึง 180 องศา จะสังเกตได้ว่าเมื่อ ส่วนผสมของทรายเพิ่มขึ้นค่าเสดสูญเสี ( $h_L$ ) จะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

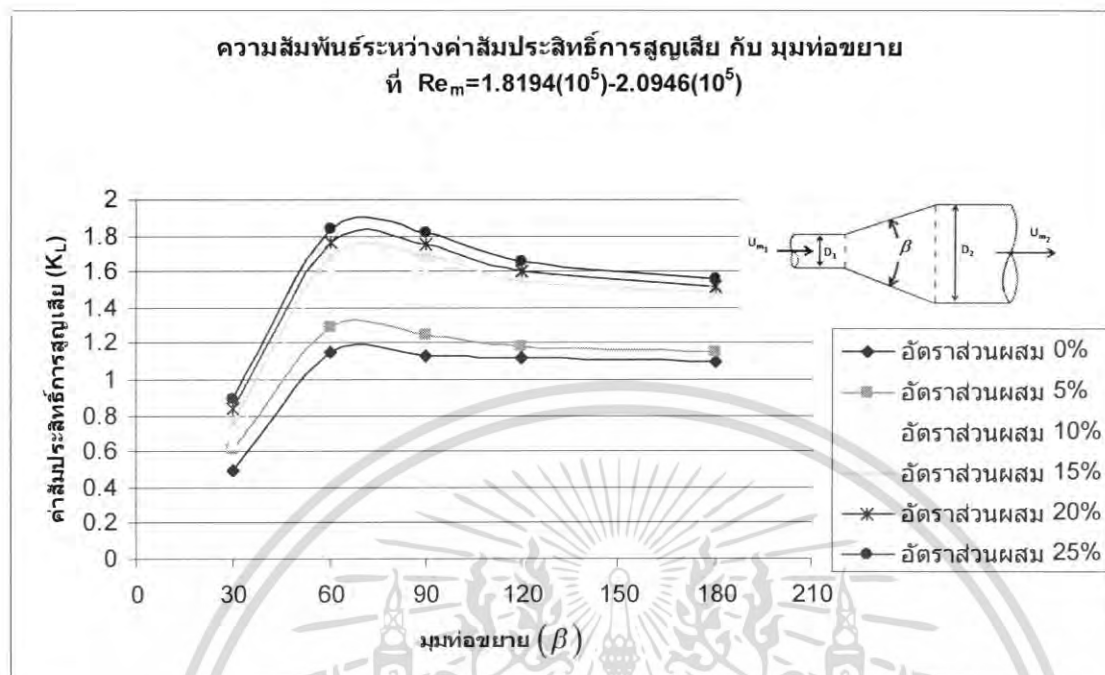
5.2 กราฟแสดงผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ที่เกิดจากการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของทรายที่ 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% และมีการเปลี่ยนชุดทดลองที่มีมุมกรวยตั้งแต่  $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  และ  $180^\circ$



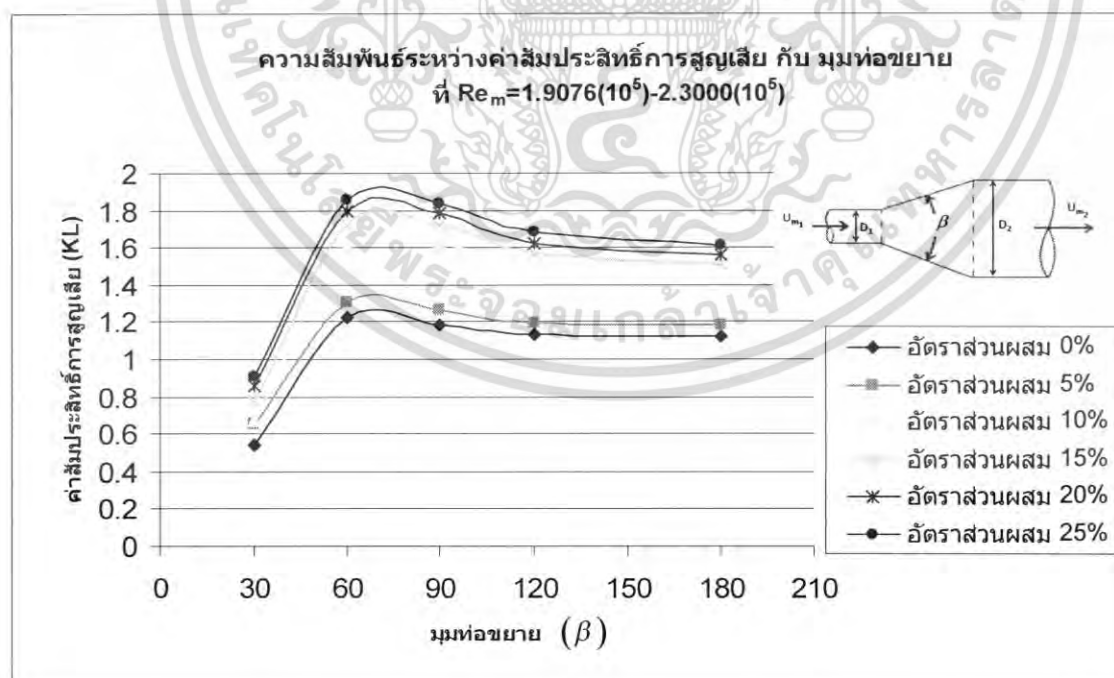
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมกรวย ที่  $Re_m = 1.1001(10^5) - 1.2540(10^5)$



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมกรวย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

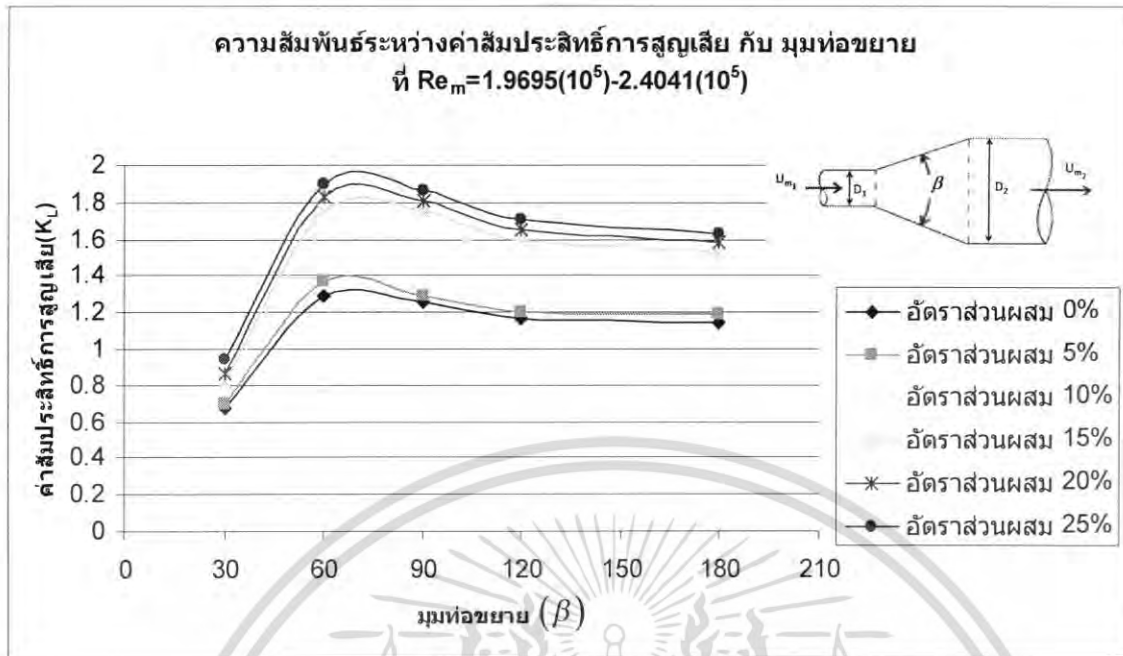


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมกรวย  
ที่  $Re_m = 1.8194(10^5) - 2.0946(10^5)$



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานวิจัยหรือการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมท่อยาว  
ที่  $Re_m = 1.9695(10^5) - 2.4041(10^5)$

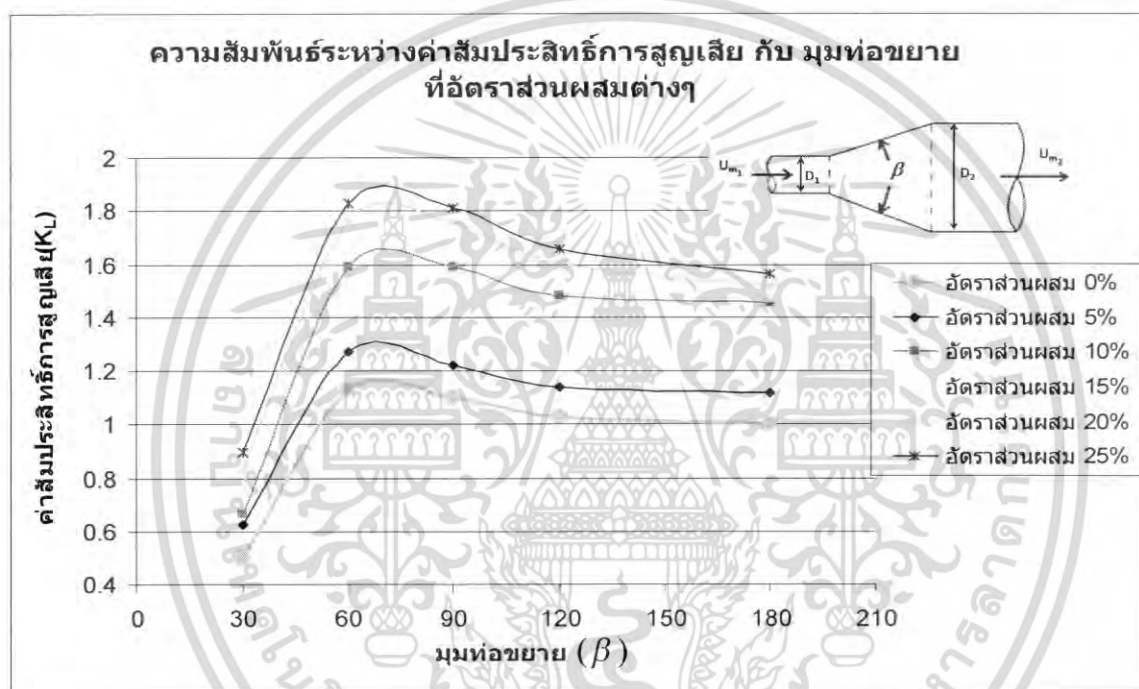
จากรูปที่ 5.6 ถึง 5.10 เป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมท่อยาว ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดมุมท่อยาวเพิ่มขึ้น ค่า  $K_L$  จะเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดในช่วงมุม 60 ถึง 90 องศา จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงและที่อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียมียุทธค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองด้วยชุดทดสอบ และการนำมาคำนวณเพื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ สามารถสรุปเป็นกราฟแสดงพฤติกรรมการไหลของของผสมเมื่อขนาดของมุมท่อขยายเปลี่ยนแปลงไป ได้ดังนี้



รูปที่ 6.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับมุมทวอยขนาดต่างๆ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าอยู่ในช่วง  $1.1000 (10^5) - 2.4000 (10^5)$

จากกราฟ สามารถสรุป ได้ดังนี้

6.1 เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_m$ ) เพิ่มขึ้น ค่าเสดสูญเสีย ( $h_L$ ) และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) จะเพิ่มขึ้น

6.2 เมื่ออัตราส่วนผสมของของไหล (c) เพิ่มขึ้น ค่าเสดสูญเสีย ( $h_L$ ) และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) จะเพิ่มขึ้น

6.3 เมื่อขนาดของมุมทวอย  $\beta$  เพิ่มขึ้น จาก 30 ถึง 60 องศา ค่าเสดสูญเสีย ( $h_L$ ) และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) จะเพิ่มขึ้น มีค่าสูงสุดในช่วงมุมทวอยประมาณ 60 ถึง 90 องศา หลังจากนั้น ตั้งแต่ช่วง 90 ถึง 180 องศา ค่า  $h_L$  และค่า  $K_L$  จะลดลง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิจารณ์ผลการทดลอง

1. ในการหาค่าความเร็วของของของผสม ใช้วิธีการการจับเวลาแล้วชั่งน้ำหนัก อาจมีความคลาดเคลื่อนของผลบ้างถึงแม้จะทำการทดลองหลายครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยก็ตาม
2. ในการผสมทรายกับน้ำ การกวนให้ส่วนผสมมีความสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการทดลองนั้นเป็นไปได้ยากพอสมควร
3. บางครั้งป้อนสร้างแรงดัน ไม่สม่ำเสมอทำให้การอ่านค่าผิดพลาดไปจากความจริงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] วิบูลย์ บุญยชโรกุล, “ปั๊มและระบบสูบน้ำ”, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 1986
- [2] ฉัตรชัย มานะดี, โคลิจิ โอนิชิ, “คู่มือการใช้งานปั๊มชนิดทันทานต่อการกัดกร่อน”, 2542
- [3] มนตรี พิรุณเกษม, “กลศาสตร์ของไหล”, ครั้งที่ 2, บริษัท จูน พับลิชชิ่ง จำกัด, กรุงเทพฯ, 2547
- [4] Anthony Esposito, “Fluid Mechanics with Applications”, Prentice Hall, Inc, 1988
- [5] EBARA Hatakeyama Memorial Fund, “Fundamentals of Pump Technology”, Doc No.EHMF-7D230, 1997
- [6] Japanese Standards Association “Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates”, Nozzles and Venturi Tubes
- [7] Bruce R. Munson, Donald F. Young, “Fundamentals of Fluid Mechanics”, John Wiley & Sons, Inc, 2002
- [8] Yunus A. Cengel, Thermodynamics, Mc Graw Hill, 2004
- [9] Irfan A. Khan, “Fluid Mechanics”, Holt, Rinehart and Winston, 1987
- [10] Clement Kleinstrever, “Two-Phase Flow Theory and Applications”, Taylor & Francis, 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 การทดลองที่มุมท่อขยาย 30 องศา

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$\dot{w}_m (N/s)$	$\dot{w}_s (N/s)$	$\dot{w}_w (N/s)$	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$
1	2	0	49.05	-	-	3.443	0.8612	-	-	1.1
2	4	0	67.689	-	-	4.752	1.1885	-	-	2.1
3	6	0	78.0876	-	-	5.482	1.371	-	-	3.1
4	8	0	81.423	-	-	5.716	1.4296	-	-	3.7
5	10	0	84.8565	-	-	5.957	1.4899	-	-	5.0
6	2	5	46.7831	4.4145	42.3686	3.2231	0.8053	0.2214	2.9745	1.2
7	4	5	72.1739	6.3765	65.7974	4.9724	1.2424	0.3198	4.6193	3.2
8	6	5	78.0718	6.8670	71.2048	5.3788	1.3439	0.3444	4.9989	3.8
9	8	5	85.7690	7.8480	77.9210	5.9091	1.4764	0.3935	5.4704	4.9
10	10	5	89.6676	8.3385	81.3291	6.1777	1.5435	0.4181	5.7097	5.7
11	2	10	46.2725	5.8860	40.3865	3.1296	0.7812	0.2952	2.8353	1.3
12	4	10	71.2206	7.8480	63.3726	4.8170	1.2024	0.3935	4.4490	3.7
13	6	10	75.1446	8.4366	66.7080	5.0824	1.2686	0.4231	4.6832	4.0
14	8	10	77.4990	8.8290	68.6700	5.2416	1.3084	0.4427	4.8209	5.3
15	10	10	82.0116	9.4176	72.5940	5.5468	1.3845	0.4723	5.0964	6.1

ตารางที่ ก-1 ต่อ

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$\dot{w}_m (N/s)$	$\dot{w}_s (N/s)$	$\dot{w}_w (N/s)$	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$
16	2	15	46.1592	8.6328	37.5264	3.0572	0.7646	0.4329	2.6345	1.5
17	4	15	70.6320	11.7720	58.8600	4.6780	1.1699	0.5903	4.1322	3.7
18	6	15	73.9080	13.7340	60.1740	4.8950	1.2242	0.6887	4.2245	4.1
19	8	15	76.6002	14.7150	61.8852	5.0733	1.2688	0.7379	4.3446	5.6
20	10	15	81.7584	16.0884	65.6700	5.4149	1.3542	0.8068	4.6103	6.4
21	2	20	45.0120	12.6960	32.3160	2.9152	0.7318	0.6367	2.2687	1.8
22	4	20	69.1634	15.6584	53.9550	4.4793	1.1244	0.7852	3.7879	3.9
23	6	20	72.4803	17.6580	54.8223	4.6941	1.1783	0.8855	3.8488	4.4
24	8	20	76.4420	19.5820	56.8600	4.9507	1.2427	0.9820	3.9918	5.9
25	10	20	80.3850	22.5630	57.8220	5.2061	1.3068	1.1314	4.0594	6.7
26	2	25	44.8600	15.5820	29.2780	2.8527	0.7160	0.7814	2.0554	1.9
27	4	25	68.4990	18.5630	49.9360	4.3559	1.0933	0.9309	3.5057	4.1
28	6	25	72.4710	21.5540	50.9170	4.6085	1.1567	1.0808	3.5746	4.6
29	8	25	76.3470	23.5060	52.8410	4.8550	1.2186	1.1787	3.7097	6.3
30	10	25	79.3090	25.4870	53.8220	5.0433	1.2659	1.2781	3.7785	7.2

ตารางที่ ก-2 การทดลองที่มุมที่ขยาย 60 องศา

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$\dot{w}_m (N/s)$	$\dot{w}_s (N/s)$	$\dot{w}_w (N/s)$	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$
1	2	0	49.05	-	-	3.443	0.8612	-	-	2.2
2	4	0	67.689	-	-	4.752	1.1885	-	-	5.2
3	6	0	78.0876	-	-	5.482	1.371	-	-	7.3
4	8	0	81.423	-	-	5.716	1.4296	-	-	8.4
5	10	0	84.8565	-	-	5.957	1.4899	-	-	9.6
6	2	5	46.7831	4.4145	42.3686	3.2231	0.8053	0.2214	2.9745	2.6
7	4	5	72.1739	6.3765	65.7974	4.9724	1.2424	0.3198	4.6193	6.7
8	6	5	78.0718	6.8670	71.2048	5.3788	1.3439	0.3444	4.9989	8.0
9	8	5	85.7690	7.8480	77.9210	5.9091	1.4764	0.3935	5.4704	9.8
10	10	5	89.6676	8.3385	81.3291	6.1777	1.5435	0.4181	5.7097	11.2
11	2	10	46.2725	5.8860	40.3865	3.1296	0.7812	0.2952	2.8353	3.3
12	4	10	71.2206	7.8480	63.3726	4.8170	1.2024	0.3935	4.4490	8
13	6	10	75.1446	8.4366	66.7080	5.0824	1.2686	0.4231	4.6832	9.1
14	8	10	77.4990	8.8290	68.6700	5.2416	1.3084	0.4427	4.8209	10.2
15	10	10	82.0116	9.4176	72.5940	5.5468	1.3845	0.4723	5.0964	11.7

ตารางที่ ก-2 ต่อ

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$\dot{w}_m (N/s)$	$\dot{w}_s (N/s)$	$\dot{w}_w (N/s)$	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$
16	2	15	46.1592	8.6328	37.5264	3.0572	0.7646	0.4329	2.6345	3.4
17	4	15	70.6320	11.7720	58.8600	4.6780	1.1699	0.5903	4.1322	8.2
18	6	15	73.9080	13.7340	60.1740	4.8950	1.2242	0.6887	4.2245	9.3
19	8	15	76.6002	14.7150	61.8852	5.0733	1.2688	0.7379	4.3446	10.6
20	10	15	81.7584	16.0884	65.6700	5.4149	1.3542	0.8068	4.6103	12
21	2	20	45.0120	12.6960	32.3160	2.9152	0.7318	0.6367	2.2687	3.6
22	4	20	69.1634	15.6584	53.9550	4.4793	1.1244	0.7852	3.7879	9.4
23	6	20	72.4803	17.6580	54.8223	4.6941	1.1783	0.8855	3.8488	10.7
24	8	20	76.4420	19.5820	56.8600	4.9507	1.2427	0.9820	3.9918	11.4
25	10	20	80.3850	22.5630	57.8220	5.2061	1.3068	1.1314	4.0594	12.4
26	2	25	44.8600	15.5820	29.2780	2.8527	0.7160	0.7814	2.0554	3.9
27	4	25	68.4990	18.5630	49.9360	4.3559	1.0933	0.9309	3.5057	10.5
28	6	25	72.4710	21.5540	50.9170	4.6085	1.1567	1.0808	3.5746	11.5
29	8	25	76.3470	23.5060	52.8410	4.8550	1.2186	1.1787	3.7097	11.7
30	10	25	79.3090	25.4870	53.8220	5.0433	1.2659	1.2781	3.7785	12.8

ตารางที่ ก-3 การทดลองที่มุมท่อขยาย 90 องศา

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$\dot{w}_m (N/s)$	$\dot{w}_s (N/s)$	$\dot{w}_w (N/s)$	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$
1	2	0	49.05	-	-	3.443	0.8612	-	-	2.2
2	4	0	67.689	-	-	4.752	1.1885	-	-	4.9
3	6	0	78.0876	-	-	5.482	1.371	-	-	7.1
4	8	0	81.423	-	-	5.716	1.4296	-	-	8.1
5	10	0	84.8565	-	-	5.957	1.4899	-	-	9.4
6	2	5	46.7831	4.4145	42.3686	3.2231	0.8053	0.2214	2.9745	2.5
7	4	5	72.1739	6.3765	65.7974	4.9724	1.2424	0.3198	4.6193	6.4
8	6	5	78.0718	6.8670	71.2048	5.3788	1.3439	0.3444	4.9989	7.8
9	8	5	85.7690	7.8480	77.9210	5.9091	1.4764	0.3935	5.4704	9.5
10	10	5	89.6676	8.3385	81.3291	6.1777	1.5435	0.4181	5.7097	10.6
11	2	10	46.2725	5.8860	40.3865	3.1296	0.7812	0.2952	2.8353	3.3
12	4	10	71.2206	7.8480	63.3726	4.8170	1.2024	0.3935	4.4490	7.9
13	6	10	75.1446	8.4366	66.7080	5.0824	1.2686	0.4231	4.6832	9.0
14	8	10	77.4990	8.8290	68.6700	5.2416	1.3084	0.4427	4.8209	9.8
15	10	10	82.0116	9.4176	72.5940	5.5468	1.3845	0.4723	5.0964	11.2

ตารางที่ ก-3 ต่อ

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$\dot{w}_m (N/s)$	$\dot{w}_s (N/s)$	$\dot{w}_w (N/s)$	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$
16	2	15	46.1592	8.6328	37.5264	3.0572	0.7646	0.4329	2.6345	3.4
17	4	15	70.6320	11.7720	58.8600	4.6780	1.1699	0.5903	4.1322	8.1
18	6	15	73.9080	13.7340	60.1740	4.8950	1.2242	0.6887	4.2245	9.3
19	8	15	76.6002	14.7150	61.8852	5.0733	1.2688	0.7379	4.3446	10.1
20	10	15	81.7584	16.0884	65.6700	5.4149	1.3542	0.8068	4.6103	11.5
21	2	20	45.0120	12.6960	32.3160	2.9152	0.7318	0.6367	2.2687	3.6
22	4	20	69.1634	15.6584	53.9550	4.4793	1.1244	0.7852	3.7879	9.1
23	6	20	72.4803	17.6580	54.8223	4.6941	1.1783	0.8855	3.8488	9.8
24	8	20	76.4420	19.5820	56.8600	4.9507	1.2427	0.9820	3.9918	10.5
25	10	20	80.3850	22.5630	57.8220	5.2061	1.3068	1.1314	4.0594	11.8
26	2	25	44.8600	15.5820	29.2780	2.8527	0.7160	0.7814	2.0554	3.9
27	4	25	68.4990	18.5630	49.9360	4.3559	1.0933	0.9309	3.5057	9.6
28	6	25	72.4710	21.5540	50.9170	4.6085	1.1567	1.0808	3.5746	10.3
29	8	25	76.3470	23.5060	52.8410	4.8550	1.2186	1.1787	3.7097	10.9
30	10	25	79.3090	25.4870	53.8220	5.0433	1.2659	1.2781	3.7785	12.1

ตารางที่ ก-4 การทดลองที่มุมท่อขยาย 120 องศา

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$\dot{w}_m (N/s)$	$\dot{w}_s (N/s)$	$\dot{w}_w (N/s)$	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$
1	2	0	49.05	-	-	3.443	0.8612	-	-	2.1
2	4	0	67.689	-	-	4.752	1.1885	-	-	4.3
3	6	0	78.0876	-	-	5.482	1.371	-	-	7.1
4	8	0	81.423	-	-	5.716	1.4296	-	-	7.8
5	10	0	84.8565	-	-	5.957	1.4899	-	-	8.7
6	2	5	46.7831	4.4145	42.3686	3.2231	0.8053	0.2214	2.9745	2.3
7	4	5	72.1739	6.3765	65.7974	4.9724	1.2424	0.3198	4.6193	5.8
8	6	5	78.0718	6.8670	71.2048	5.3788	1.3439	0.3444	4.9989	7.3
9	8	5	85.7690	7.8480	77.9210	5.9091	1.4764	0.3935	5.4704	8.9
10	10	5	89.6676	8.3385	81.3291	6.1777	1.5435	0.4181	5.7097	9.9
11	2	10	46.2725	5.8860	40.3865	3.1296	0.7812	0.2952	2.8353	3.1
12	4	10	71.2206	7.8480	63.3726	4.8170	1.2024	0.3935	4.4490	7.4
13	6	10	75.1446	8.4366	66.7080	5.0824	1.2686	0.4231	4.6832	8.4
14	8	10	77.4990	8.8290	68.6700	5.2416	1.3084	0.4427	4.8209	9.2
15	10	10	82.0116	9.4176	72.5940	5.5468	1.3845	0.4723	5.0964	10.4

ตารางที่ ก-4 ต่อ

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$\dot{w}_m (N/s)$	$\dot{w}_s (N/s)$	$\dot{w}_w (N/s)$	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$
16	2	15	46.1592	8.6328	37.5264	3.0572	0.7646	0.4329	2.6345	3.2
17	4	15	70.6320	11.7720	58.8600	4.6780	1.1699	0.5903	4.1322	7.7
18	6	15	73.9080	13.7340	60.1740	4.8950	1.2242	0.6887	4.2245	8.9
19	8	15	76.6002	14.7150	61.8852	5.0733	1.2688	0.7379	4.3446	9.6
20	10	15	81.7584	16.0884	65.6700	5.4149	1.3542	0.8068	4.6103	10.8
21	2	20	45.0120	12.6960	32.3160	2.9152	0.7318	0.6367	2.2687	3.4
22	4	20	69.1634	15.6584	53.9550	4.4793	1.1244	0.7852	3.7879	8.4
23	6	20	72.4803	17.6580	54.8223	4.6941	1.1783	0.8855	3.8488	9.1
24	8	20	76.4420	19.5820	56.8600	4.9507	1.2427	0.9820	3.9918	10
25	10	20	80.3850	22.5630	57.8220	5.2061	1.3068	1.1314	4.0594	11.1
26	2	25	44.8600	15.5820	29.2780	2.8527	0.7160	0.7814	2.0554	3.6
27	4	25	68.4990	18.5630	49.9360	4.3559	1.0933	0.9309	3.5057	8.9
28	6	25	72.4710	21.5540	50.9170	4.6085	1.1567	1.0808	3.5746	9.5
29	8	25	76.3470	23.5060	52.8410	4.8550	1.2186	1.1787	3.7097	10.2
30	10	25	79.3090	25.4870	53.8220	5.0433	1.2659	1.2781	3.7785	11.5

ตารางที่ ก-5 การทดลองที่มุมท่อขยาย 180 องศา

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$\dot{w}_m (N/s)$	$\dot{w}_s (N/s)$	$\dot{w}_w (N/s)$	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$
1	2	0	49.05	-	-	3.443	0.8612	-	-	2.0
2	4	0	67.689	-	-	4.752	1.1885	-	-	4.2
3	6	0	78.0876	-	-	5.482	1.371	-	-	7.0
4	8	0	81.423	-	-	5.716	1.4296	-	-	7.7
5	10	0	84.8565	-	-	5.957	1.4899	-	-	8.5
6	2	5	46.7831	4.4145	42.3686	3.2231	0.8053	0.2214	2.9745	2.3
7	4	5	72.1739	6.3765	65.7974	4.9724	1.2424	0.3198	4.6193	5.5
8	6	5	78.0718	6.8670	71.2048	5.3788	1.3439	0.3444	4.9989	7.2
9	8	5	85.7690	7.8480	77.9210	5.9091	1.4764	0.3935	5.4704	8.9
10	10	5	89.6676	8.3385	81.3291	6.1777	1.5435	0.4181	5.7097	9.8
11	2	10	46.2725	5.8860	40.3865	3.1296	0.7812	0.2952	2.8353	3
12	4	10	71.2206	7.8480	63.3726	4.8170	1.2024	0.3935	4.4490	7.2
13	6	10	75.1446	8.4366	66.7080	5.0824	1.2686	0.4231	4.6832	8.2
14	8	10	77.4990	8.8290	68.6700	5.2416	1.3084	0.4427	4.8209	9.0
15	10	10	82.0116	9.4176	72.5940	5.5468	1.3845	0.4723	5.0964	10.2

ตารางที่ ก-5 ต่อ

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$\dot{w}_m (N/s)$	$\dot{w}_s (N/s)$	$\dot{w}_w (N/s)$	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$
16	2	15	46.1592	8.6328	37.5264	3.0572	0.7646	0.4329	2.6345	3.2
17	4	15	70.6320	11.7720	58.8600	4.6780	1.1699	0.5903	4.1322	7.5
18	6	15	73.9080	13.7340	60.1740	4.8950	1.2242	0.6887	4.2245	8.8
19	8	15	76.6002	14.7150	61.8852	5.0733	1.2688	0.7379	4.3446	9.4
20	10	15	81.7584	16.0884	65.6700	5.4149	1.3542	0.8068	4.6103	10.7
21	2	20	45.0120	12.6960	32.3160	2.9152	0.7318	0.6367	2.2687	3.3
22	4	20	69.1634	15.6584	53.9550	4.4793	1.1244	0.7852	3.7879	7.8
23	6	20	72.4803	17.6580	54.8223	4.6941	1.1783	0.8855	3.8488	9
24	8	20	76.4420	19.5820	56.8600	4.9507	1.2427	0.9820	3.9918	9.8
25	10	20	80.3850	22.5630	57.8220	5.2061	1.3068	1.1314	4.0594	11.1
26	2	25	44.8600	15.5820	29.2780	2.8527	0.7160	0.7814	2.0554	3.5
27	4	25	68.4990	18.5630	49.9360	4.3559	1.0933	0.9309	3.5057	8.5
28	6	25	72.4710	21.5540	50.9170	4.6085	1.1567	1.0808	3.5746	9.1
29	8	25	76.3470	23.5060	52.8410	4.8550	1.2186	1.1787	3.7097	10.2
30	10	25	79.3090	25.4870	53.8220	5.0433	1.2659	1.2781	3.7785	11.3

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 การคำนวณที่มุมท่อขยาย 30 องศา

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$	$h_L (m)$	$Re_m$	$K_L$
1	2	0	3.443	0.8612	-	-	1.1	0.1444	1.3219	0.425
2	4	0	4.752	1.1885	-	-	2.1	0.2832	1.8244	0.4375
3	6	0	5.482	1.371	-	-	3.1	0.4277	2.1047	0.4965
4	8	0	5.716	1.4296	-	-	3.7	0.5024	2.1945	0.5365
5	10	0	5.957	1.4899	-	-	5.0	0.6814	2.2871	0.67
6	2	5	3.2231	0.8053	0.2214	2.9745	1.2	0.1652	$1.2540(10^5)$	0.5545
7	4	5	4.9724	1.2424	0.3198	4.6193	3.2	0.4249	$1.9362(10^5)$	0.5992
8	6	5	5.3788	1.3439	0.3444	4.9989	3.8	0.5084	$2.0946(10^5)$	0.6127
9	8	5	5.9091	1.4764	0.3935	5.4704	4.9	0.6540	$2.3000(10^5)$	0.6530
10	10	5	6.1777	1.5435	0.4181	5.7097	5.7	0.7649	$2.4041(10^5)$	0.6988
11	2	10	3.1296	0.7812	0.2952	2.8353	1.3	0.1694	$1.2353(10^5)$	0.5762
12	4	10	4.8170	1.2024	0.3935	4.4490	3.7	0.4661	$1.9062(10^5)$	0.6147
13	6	10	5.0824	1.2686	0.4231	4.6832	4.0	0.5189	$2.0106(10^5)$	0.6478
14	8	10	5.2416	1.3084	0.4427	4.8209	5.3	0.6970	$2.0730(10^5)$	0.6778
15	10	10	5.5468	1.3845	0.4723	5.0964	6.1	0.7941	$2.1933(10^5)$	0.7940

ตารางที่ ข-1 ต่อ

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$	$h_L (m)$	$Re_m$	$K_L$
16	2	15	3.0572	0.7646	0.4329	2.6345	1.5	0.1968	$1.2121(10^5)$	0.7346
17	4	15	4.6780	1.1699	0.5903	4.1322	3.7	0.4687	$1.8645(10^5)$	0.7473
18	6	15	4.8950	1.2242	0.6887	4.2245	4.1	0.5244	$1.9413(10^5)$	0.7635
19	8	15	5.0733	1.2688	0.7379	4.3446	5.6	0.7125	$2.0086(10^5)$	0.7795
20	10	15	5.4149	1.3542	0.8068	4.6103	6.4	0.8160	$2.1409(10^5)$	0.8241
21	2	20	2.9152	0.7318	0.6367	2.2687	1.8	0.2278	$1.1386(10^5)$	0.7936
22	4	20	4.4793	1.1244	0.7852	3.7879	3.9	0.4953	$1.7864(10^5)$	0.8115
23	6	20	4.6941	1.1783	0.8855	3.8488	4.4	0.5488	$1.8609(10^5)$	0.8394
24	8	20	4.9507	1.2427	0.9820	3.9918	5.9	0.7450	$1.9535(10^5)$	0.8550
25	10	20	5.2061	1.3068	1.1314	4.0594	6.7	0.8491	$2.0346(10^5)$	0.8698
26	2	25	2.8527	0.7160	0.7814	2.0554	1.9	0.2360	$1.1001(10^5)$	0.8511
27	4	25	4.3559	1.0933	0.9309	3.5057	4.1	0.5122	$1.7389(10^5)$	0.8725
28	6	25	4.6085	1.1567	1.0808	3.5746	4.6	0.5694	$1.8194(10^5)$	0.8899
29	8	25	4.8550	1.2186	1.1787	3.7097	6.3	0.7780	$1.9076(10^5)$	0.9106
30	10	25	5.0433	1.2659	1.2781	3.7785	7.2	0.8937	$1.9695(10^5)$	0.9470

ตารางที่ ข-2 การคำนวณที่มุมท่อขยาย 60 องศา

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$	$h_L (m)$	$Re_m$	$K_L$
1	2	0	3.443	0.8612	-	-	2.2	0.3046	1.3219	0.8965
2	4	0	4.752	1.1885	-	-	5.2	0.7031	1.8244	1.0863
3	6	0	5.482	1.371	-	-	7.3	0.9933	2.1047	1.1532
4	8	0	5.716	1.4296	-	-	8.4	1.1468	2.1945	1.2246
5	10	0	5.957	1.4899	-	-	9.6	1.3113	2.2871	1.2893
6	2	5	3.2231	0.8053	0.2214	2.9745	2.6	0.3420	$1.1479(10^5)$	1.1479
7	4	5	4.9724	1.2424	0.3198	4.6193	6.7	0.8932	$1.2596(10^5)$	1.2596
8	6	5	5.3788	1.3439	0.3444	4.9989	8.0	1.0685	$1.2877(10^5)$	1.2877
9	8	5	5.9091	1.4764	0.3935	5.4704	9.8	1.3033	$1.3014(10^5)$	1.3014
10	10	5	6.1777	1.5435	0.4181	5.7097	11.2	1.4961	$1.3668(10^5)$	1.3668
11	2	10	3.1296	0.7812	0.2952	2.8353	3.3	0.4320	$1.5368(10^5)$	1.5368
12	4	10	4.8170	1.2024	0.3935	4.4490	8	1.0430	$1.5662(10^5)$	1.5662
13	6	10	5.0824	1.2686	0.4231	4.6832	9.1	1.1847	$1.5980(10^5)$	1.5980
14	8	10	5.2416	1.3084	0.4427	4.8209	10.2	1.3357	$1.6139(10^5)$	1.6139
15	10	10	5.5468	1.3845	0.4723	5.0964	11.7	1.5241	$1.6494(10^5)$	1.6494

ตารางที่ ข-2 ต่อ

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$	$h_L (m)$	$Re_m$	$K_L$
16	2	15	3.0572	0.7646	0.4329	2.6345	3.4	0.4398	$1.6418(10^5)$	1.6418
17	4	15	4.6780	1.1699	0.5903	4.1322	8.2	1.0503	$1.6744(10^5)$	1.6744
18	6	15	4.8950	1.2242	0.6887	4.2245	9.3	1.1994	$1.6930(10^5)$	1.6930
19	8	15	5.0733	1.2688	0.7379	4.3446	10.6	1.3580	$1.7254(10^5)$	1.7254
20	10	15	5.4149	1.3542	0.8068	4.6103	12	1.5443	$1.7580(10^5)$	1.7580
21	2	20	2.9152	0.7318	0.6367	2.2687	3.6	0.4517	$1.7060(10^5)$	1.7060
22	4	20	4.4793	1.1244	0.7852	3.7879	9.4	1.1850	$1.7280(10^5)$	1.7280
23	6	20	4.6941	1.1783	0.8855	3.8488	10.7	1.3486	$1.7604(10^5)$	1.7604
24	8	20	4.9507	1.2427	0.9820	3.9918	11.4	1.4362	$1.7997(10^5)$	1.7997
25	10	20	5.2061	1.3068	1.1314	4.0594	12.4	1.5591	$1.8290(10^5)$	1.8290
26	2	25	2.8527	0.7160	0.7814	2.0554	3.9	0.4789	$1.7596(10^5)$	1.7596
27	4	25	4.3559	1.0933	0.9309	3.5057	10.5	1.2930	$1.7993(10^5)$	1.7993
28	6	25	4.6085	1.1567	1.0808	3.5746	11.5	1.4268	$1.8344(10^5)$	1.8344
29	8	25	4.8550	1.2186	1.1787	3.7097	11.7	1.4420	$1.8610(10^5)$	1.8610
30	10	25	5.0433	1.2659	1.2781	3.7785	12.8	1.5850	$1.8961(10^5)$	1.8961

ตารางที่ ข-3 การคำนวณที่มุมท่อขยาย 90 องศา

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$	$h_L (m)$	$Re_m$	$K_L$
1	2	0	3.443	0.8612	-	-	2.2	0.3023	1.3219	0.8898
2	4	0	4.752	1.1885	-	-	4.9	0.6627	1.8244	1.0239
3	6	0	5.482	1.371	-	-	7.1	0.9710	2.1047	1.1272
4	8	0	5.716	1.4296	-	-	8.1	1.1043	2.1945	1.1792
5	10	0	5.957	1.4899	-	-	9.4	1.2800	2.2871	1.2586
6	2	5	3.2231	0.8053	0.2214	2.9745	2.5	0.3274	1.0988(10 <sup>5</sup> )	1.0988
7	4	5	4.9724	1.2424	0.3198	4.6193	6.4	0.8471	1.1946(10 <sup>5</sup> )	1.1946
8	6	5	5.3788	1.3439	0.3444	4.9989	7.8	1.0335	1.2455(10 <sup>5</sup> )	1.2455
9	8	5	5.9091	1.4764	0.3935	5.4704	9.5	1.2716	1.2697(10 <sup>5</sup> )	1.2697
10	10	5	6.1777	1.5435	0.4181	5.7097	10.6	1.4153	1.2930(10 <sup>5</sup> )	1.2930
11	2	10	3.1296	0.7812	0.2952	2.8353	3.3	0.4280	1.5228(10 <sup>5</sup> )	1.5228
12	4	10	4.8170	1.2024	0.3935	4.4490	7.9	1.0368	1.5570(10 <sup>5</sup> )	1.5570
13	6	10	5.0824	1.2686	0.4231	4.6832	9.0	1.1827	1.5953(10 <sup>5</sup> )	1.5953
14	8	10	5.2416	1.3084	0.4427	4.8209	9.8	1.2821	1.6260(10 <sup>5</sup> )	1.6260
15	10	10	5.5468	1.3845	0.4723	5.0964	11.2	1.4628	1.6566(10 <sup>5</sup> )	1.6566

ตารางที่ ข-3 ต่อ

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$	$h_L (m)$	$Re_m$	$K_L$
16	2	15	3.0572	0.7646	0.4329	2.6345	3.4	0.4358	$1.6268(10^5)$	1.6268
17	4	15	4.6780	1.1699	0.5903	4.1322	8.1	1.0396	$1.6574(10^5)$	1.6574
18	6	15	4.8950	1.2242	0.6887	4.2245	9.3	1.1989	$1.6890(10^5)$	1.6890
19	8	15	5.0733	1.2688	0.7379	4.3446	10.1	1.2981	$1.7231(10^5)$	1.7231
20	10	15	5.4149	1.3542	0.8068	4.6103	11.5	1.4704	$1.7496(10^5)$	1.7496
21	2	20	2.9152	0.7318	0.6367	2.2687	3.6	0.4559	$1.7018(10^5)$	1.7018
22	4	20	4.4793	1.1244	0.7852	3.7879	9.1	1.1511	$1.7257(10^5)$	1.7257
23	6	20	4.6941	1.1783	0.8855	3.8488	9.8	1.2348	$1.7551(10^5)$	1.7551
24	8	20	4.9507	1.2427	0.9820	3.9918	10.5	1.3198	$1.7866(10^5)$	1.7866
25	10	20	5.2061	1.3068	1.1314	4.0594	11.8	1.4893	$1.8045(10^5)$	1.8045
26	2	25	2.8527	0.7160	0.7814	2.0554	3.9	0.4789	$1.7495(10^5)$	1.7495
27	4	25	4.3559	1.0933	0.9309	3.5057	9.6	1.1862	$1.7739(10^5)$	1.7739
28	6	25	4.6085	1.1567	1.0808	3.5746	10.3	1.2675	$1.8192(10^5)$	1.8192
29	8	25	4.8550	1.2186	1.1787	3.7097	10.9	1.3417	$1.8365(10^5)$	1.8365
30	10	25	5.0433	1.2659	1.2781	3.7785	12.1	1.4990	$1.8693(10^5)$	1.8693

ตารางที่ ข-4 การคำนวณที่มุมท่อขยาย 120 องศา

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$	$h_L (m)$	$Re_m$	$K_L$
1	2	0	3.443	0.8612	-	-	2.1	0.2835	1.3219	0.8345
2	4	0	4.752	1.1885	-	-	4.3	0.586	1.8244	0.9054
3	6	0	5.482	1.371	-	-	7.1	0.9589	2.1047	1.1132
4	8	0	5.716	1.4296	-	-	7.8	1.0636	2.1945	1.1358
5	10	0	5.957	1.4899	-	-	8.7	1.1898	2.2871	1.1698
6	2	5	3.2231	0.8053	0.2214	2.9745	2.3	0.3103	$1.0415(10^5)$	1.0415
7	4	5	4.9724	1.2424	0.3198	4.6193	5.8	0.7708	$1.0870(10^5)$	1.0870
8	6	5	5.3788	1.3439	0.3444	4.9989	7.3	0.9787	$1.1795(10^5)$	1.1795
9	8	5	5.9091	1.4764	0.3935	5.4704	8.9	1.1928	$1.1910(10^5)$	1.1910
10	10	5	6.1777	1.5435	0.4181	5.7097	9.9	1.3174	$1.2036(10^5)$	1.2036
11	2	10	3.1296	0.7812	0.2952	2.8353	3.1	0.4013	$1.4277(10^5)$	1.4277
12	4	10	4.8170	1.2024	0.3935	4.4490	7.4	0.9688	$1.4548(10^5)$	1.4548
13	6	10	5.0824	1.2686	0.4231	4.6832	8.4	1.0977	$1.4807(10^5)$	1.4807
14	8	10	5.2416	1.3084	0.4427	4.8209	9.2	1.1991	$1.5103(10^5)$	1.5103
15	10	10	5.5468	1.3845	0.4723	5.0964	10.4	1.3568	$1.5366(10^5)$	1.5366

ตารางที่ ข-4 ต่อ

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$	$h_L (m)$	$Re_m$	$K_L$
16	2	15	3.0572	0.7646	0.4329	2.6345	3.2	0.4027	$1.5035(10^5)$	1.5035
17	4	15	4.6780	1.1699	0.5903	4.1322	7.7	0.9843	$1.5296(10^5)$	1.5296
18	6	15	4.8950	1.2242	0.6887	4.2245	8.9	1.1376	$1.5471(10^5)$	1.5471
19	8	15	5.0733	1.2688	0.7379	4.3446	9.6	1.2360	$1.5738(10^5)$	1.5738
20	10	15	5.4149	1.3542	0.8068	4.6103	10.8	1.3859	$1.5980(10^5)$	1.5980
21	2	20	2.9152	0.7318	0.6367	2.2687	3.4	0.4224	$1.5567(10^5)$	1.5567
22	4	20	4.4793	1.1244	0.7852	3.7879	8.4	1.0582	$1.5805(10^5)$	1.5805
23	6	20	4.6941	1.1783	0.8855	3.8488	9.1	1.1401	$1.5997(10^5)$	1.5997
24	8	20	4.9507	1.2427	0.9820	3.9918	10	1.2581	$1.6251(10^5)$	1.6251
25	10	20	5.2061	1.3068	1.1314	4.0594	11.1	1.3994	$1.6533(10^5)$	1.6533
26	2	25	2.8527	0.7160	0.7814	2.0554	3.6	0.4460	$1.6000(10^5)$	1.6000
27	4	25	4.3559	1.0933	0.9309	3.5057	8.9	1.1018	$1.6342(10^5)$	1.6342
28	6	25	4.6085	1.1567	1.0808	3.5746	9.5	1.1788	$1.6559(10^5)$	1.6559
29	8	25	4.8550	1.2186	1.1787	3.7097	10.2	1.2665	$1.6827(10^5)$	1.6827
30	10	25	5.0433	1.2659	1.2781	3.7785	11.5	1.4225	$1.7124(10^5)$	1.7124

ตารางที่ ข-5 การคำนวณที่มุมท่อขยาย 180 องศา

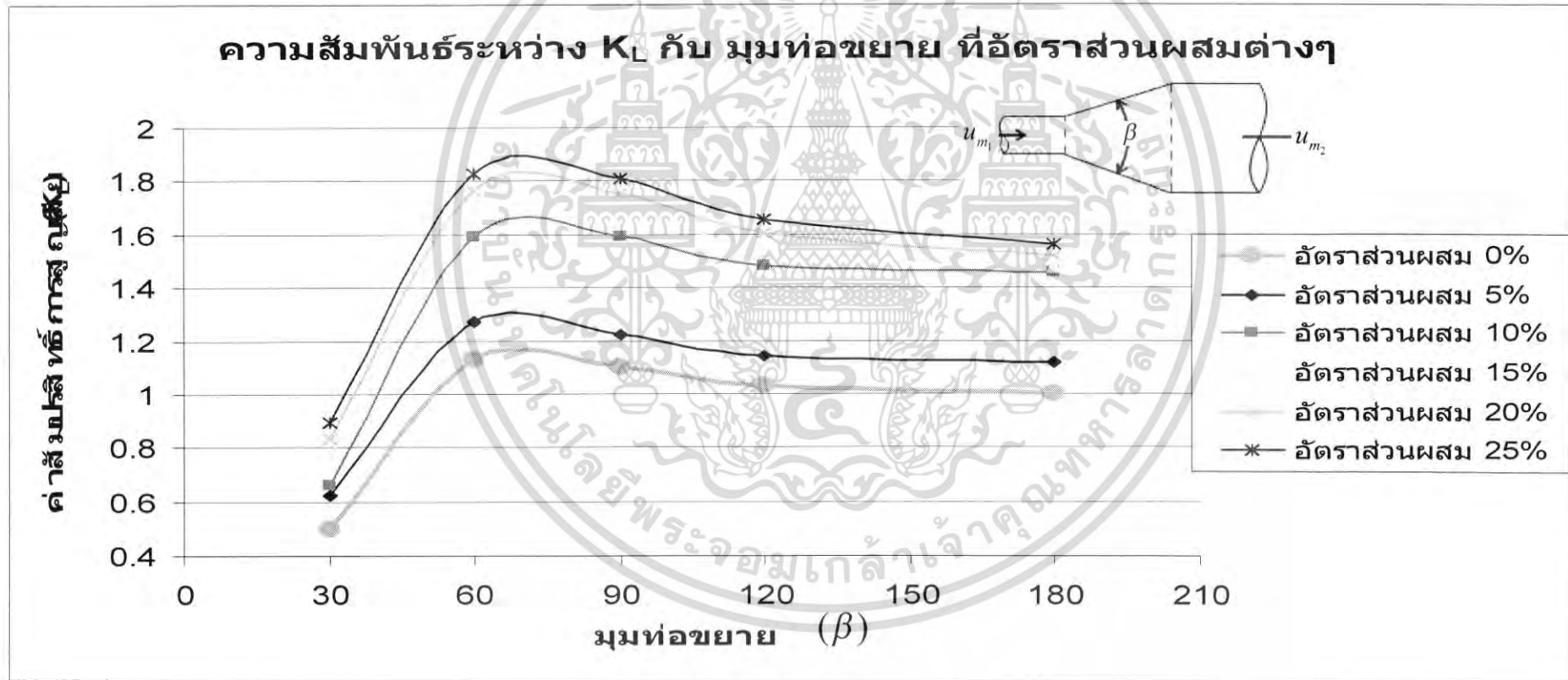
ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผลสม (เปอร์เซ็นต์)	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$	$h_L (m)$	$Re_m$	$K_L$
1	2	0	3.443	0.8612	-	-	2.0	0.2775	1.3219	0.8167
2	4	0	4.752	1.1885	-	-	4.2	0.5738	1.8244	0.8865
3	6	0	5.482	1.371	-	-	7.0	0.9492	2.1047	1.1019
4	8	0	5.716	1.4296	-	-	7.7	1.0468	2.1945	1.1178
5	10	0	5.957	1.4899	-	-	8.5	1.1627	2.2871	1.1432
6	2	5	3.2231	0.8053	0.2214	2.9745	2.3	0.3014	1.0117(10 <sup>5</sup> )	1.0117
7	4	5	4.9724	1.2424	0.3198	4.6193	5.5	0.7342	1.0354(10 <sup>5</sup> )	1.0354
8	6	5	5.3788	1.3439	0.3444	4.9989	7.2	0.9561	1.1522(10 <sup>5</sup> )	1.1522
9	8	5	5.9091	1.4764	0.3935	5.4704	8.9	1.1900	1.1880(10 <sup>5</sup> )	1.1880
10	10	5	6.1777	1.5435	0.4181	5.7097	9.8	1.3055	1.1927(10 <sup>5</sup> )	1.1927
11	2	10	3.1296	0.7812	0.2952	2.8353	3	0.3924	1.3961(10 <sup>5</sup> )	1.3961
12	4	10	4.8170	1.2024	0.3935	4.4490	7.2	0.9473	1.4226(10 <sup>5</sup> )	1.4226
13	6	10	5.0824	1.2686	0.4231	4.6832	8.2	1.0744	1.4493(10 <sup>5</sup> )	1.4493
14	8	10	5.2416	1.3084	0.4427	4.8209	9.0	1.1830	1.5004(10 <sup>5</sup> )	1.5004
15	10	10	5.5468	1.3845	0.4723	5.0964	10.2	1.3322	1.5087(10 <sup>5</sup> )	1.5087

ตารางที่ ข-5 ต่อ

ลำดับ	การปรับวาล์ว (รอบการเปิด)	อัตราส่วนของผสม (เปอร์เซ็นต์)	$u_{m_1} (m/s)$	$u_{m_2} (m/s)$	$u_s (m/s)$	$u_w (m/s)$	$\Delta h (cm)$	$h_L (m)$	$Re_m$	$K_L$
16	2	15	3.0572	0.7646	0.4329	2.6345	3.2	0.4115	$1.4159(10^5)$	1.4159
17	4	15	4.6780	1.1699	0.5903	4.1322	7.5	0.9662	$1.4435(10^5)$	1.4435
18	6	15	4.8950	1.2242	0.6887	4.2245	8.8	1.1269	$1.4871(10^5)$	1.4871
19	8	15	5.0733	1.2688	0.7379	4.3446	9.4	1.2108	$1.5070(10^5)$	1.5070
20	10	15	5.4149	1.3542	0.8068	4.6103	10.7	1.3668	$1.5306(10^5)$	1.5306
21	2	20	2.9152	0.7318	0.6367	2.2687	3.3	0.4196	$1.4495(10^5)$	1.4495
22	4	20	4.4793	1.1244	0.7852	3.7879	7.8	0.9879	$1.4756(10^5)$	1.4756
23	6	20	4.6941	1.1783	0.8855	3.8488	9	1.1336	$1.5208(10^5)$	1.5208
24	8	20	4.9507	1.2427	0.9820	3.9918	9.8	1.2315	$1.5570(10^5)$	1.5570
25	10	20	5.2061	1.3068	1.1314	4.0594	11.1	1.3955	$1.5864(10^5)$	1.5864
26	2	25	2.8527	0.7160	0.7814	2.0554	3.5	0.4386	$1.4930(10^5)$	1.4930
27	4	25	4.3559	1.0933	0.9309	3.5057	8.5	1.0508	$1.5278(10^5)$	1.5278
28	6	25	4.6085	1.1567	1.0808	3.5746	9.1	1.1158	$1.5570(10^5)$	1.5570
29	8	25	4.8550	1.2186	1.1787	3.7097	10.2	1.2593	$1.6081(10^5)$	1.6081
30	10	25	5.0433	1.2659	1.2781	3.7785	11.3	1.3966	$1.6312(10^5)$	1.6312

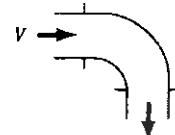
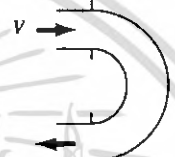
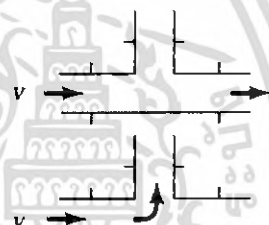
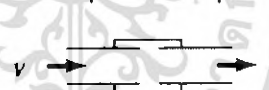

ภาคผนวก ค

รูปที่ ค-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย  $K_L$  กับ มุมท่อขยาย ( $\beta$ ) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ( $Re_m = 1.1000(10^5) - 2.4000(10^5)$ )



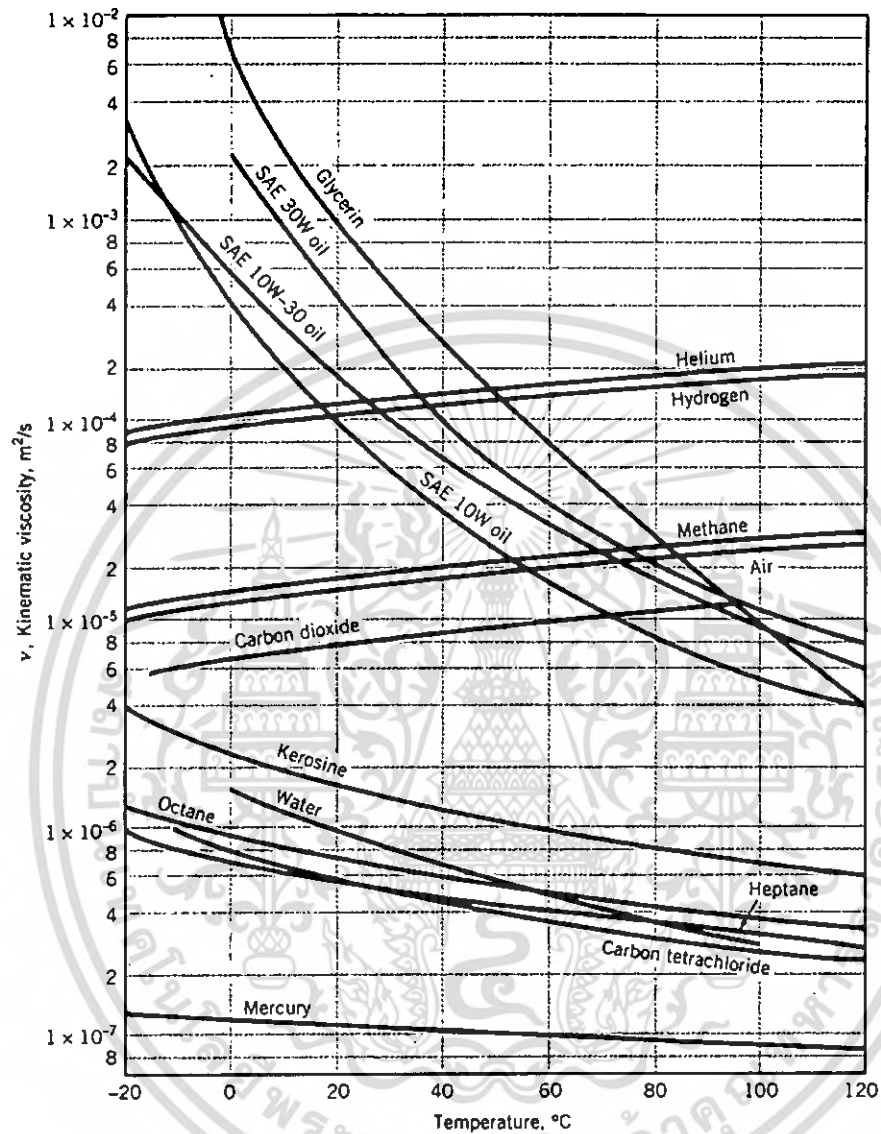
## รูปที่ ค-2 ค่าการสูญเสียของการไหลแบบ Single phase

Loss Coefficients for Pipe Components ( $h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$ ) (Data from Refs. 5, 10, 27)

Component	$K_L$	
<b>a. Elbows</b>		
Regular 90°, flanged	0.3	
Regular 90°, threaded	1.5	
Long radius 90°, flanged	0.2	
Long radius 90°, threaded	0.7	
Long radius 45°, flanged	0.2	
Regular 45°, threaded	0.4	
<b>b. 180° return bends</b>		
180° return bend, flanged	0.2	
180° return bend, threaded	1.5	
<b>c. Tees</b>		
Line flow, flanged	0.2	
Line flow, threaded	0.9	
Branch flow, flanged	1.0	
Branch flow, threaded	2.0	
<b>d. Union, threaded</b>		
	0.08	
<b>e. Valves</b>		
Globe, fully open	10	
Angle, fully open	2	
Gate, fully open	0.15	
Gate, 1/4 closed	0.26	
Gate, 1/2 closed	2.1	
Gate, 3/4 closed	17	
Swing check, forward flow	2	
Swing check, backward flow	∞	
Ball valve, fully open	0.05	
Ball valve, 1/3 closed	5.5	
Ball valve, 2/3 closed	210	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปที่ ค-3 ค่าความหนืดของสารชนิดต่างๆ



■ FIGURE B.2 Kinematic viscosity of common fluids (at atmospheric pressure) as a function of temperature. To convert to BG units of  $\text{ft}^2/\text{s}$  multiply  $\text{m}^2/\text{s}$  by 10.76. (Curves from R. W. Fox and A. T. McDonald, *Introduction to Fluid Mechanics*, 3rd Ed., Wiley, New York, 1985. Used by permission.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## การหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสมเมื่อไหลผ่านท่อขยาย<sup>1</sup>

นิธิวัฒน์ มิ่งโมฬี<sup>2</sup>, วีระชัย รอดรักษา<sup>2</sup>, วีระพงศ์ พรหมแพง<sup>2</sup>, จำลอง ปราบแก้ว<sup>3</sup>, มณฑล ใจกุลศล<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำเสน่วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายเมื่อมีการไหลผ่านท่อขยายโดยวิธีการทดลอง การทดลองจะพิจารณาถึงผลของอัตราส่วนผสมของทรายที่ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และขนาดของมุมท่อขยายที่ 30, 60, 90, 120 และ 180 องศา จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างการสูญเสียความดันกับความเร็วเฉลี่ยในท่อ กราฟดังกล่าวสามารถใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายได้ จากการศึกษาพบว่าที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากัน คือ  $2.4041(10^5)$  โดยที่ขนาดของมุมกรวยเท่ากับ 30 องศา ที่อัตราส่วนผสม 5% จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) = 0.6988 และที่อัตราส่วนผสม 25% จะมีค่า ( $K_L$ ) = 0.9470 เมื่อขนาดมุมกรวยเท่ากับ 90 องศา ที่อัตราส่วนผสม 5% จะมีค่า ( $K_L$ ) = 1.2930 และที่อัตราส่วนผสม 25% จะมีค่า ( $K_L$ ) = 1.8693 ในขณะที่ขนาดของมุมกรวยเท่ากับ 180 องศา ที่อัตราส่วนผสม 5% จะมีค่า ( $K_L$ ) = 1.3961 และที่อัตราส่วนผสม 25% จะมีค่า ( $K_L$ ) = 1.6312 จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่า  $K_L$  เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มขนาดมุมกรวยจาก 30 ถึง 90 องศา มีผลให้ค่า  $K_L$  เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มขนาดของมุมกรวยจาก 90 ถึง 180 องศา มีผลทำให้ค่า  $K_L$  ลดลง

### Abstract

This project present about loss coefficient of flow through a conical diffuser in pipeline that combine with water and sand by searching an equation from result of the experiment. The study consider about volume of sand result at 0,5,10,15,20 and 25 percent and mean of angle 's size that 30,60,90,120 and 180 degree. After that using the result to plot graph show the relation between head loss with flow speed in the pipe this graph can use for measuring loss coefficient. From result of studying is found that average Reynolds number is the same at  $2.4041(10^5)$  by angle's size 30 degree and volume of sand at 5 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 0.6988 and volume of sand at 25 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 0.9470 for angle's size 90 degree at volume of sand 5 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 1.2930 and volume of sand 25 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 1.8693 in the other of 180 degree angle at volume of sand 5 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 1.3961 and volume of sand at 25 percent loss coefficient ( $K_L$ ) = 1.6312. From result of studying it can determine that increasing volume of sand cause the loss coefficient ( $K_L$ ) also increased. Increasing degree of angle from 30 to 90 make the loss coefficient ( $K_L$ ) increased. However, if degree of angle is increased from 90 to 180, the result of the loss coefficient is decreased.

© 2007 Department of Mechanical Engineering, KMITL. All rights reserved

Keywords: loss coefficient, conical diffuser, fitting, two phase flow

ชื่ออังกฤษ "Study on friction coefficient in the pipe of flow that combine transport "

<sup>2</sup> นักศึกษานิติศาสตร์วิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 4G รหัส 47010387, 47010730 และ 47010732 ตามลำดับ

<sup>3</sup> รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197, อีเมล [Kpchamlo@kmitl.ac.th](mailto:Kpchamlo@kmitl.ac.th)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**1. บทนำ**

เนื่องจากในปัจจุบันการขนถ่ายของไหลผ่านระบบท่อนั้นนอกจากจะมีการส่งผ่านของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวแล้ว ยังมีงานบางประเภทที่มีการขนถ่ายของไหลผสมระหว่างของเหลวกับของแข็งที่มีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ เช่น ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน, เหมืองถ่านหิน, อุตสาหกรรมก่อสร้าง, การดูทรายหรือโคลนขึ้นจากแม่น้ำลำคลอง ในกรณีที่เป็นการดูทรายการไหลของของไหลในท่อจะเป็นของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายหรือโคลน ซึ่งการขนถ่ายของไหลผ่านระบบท่อก็จะมีการสูญเสียความดันเนื่องจากความฝืดระหว่างผิวด้านในของท่อกับของไหลที่ไหลผ่านซึ่งเป็นการสูญเสียหลัก นอกจากนี้หากระบบท่อก็มีการเชื่อมต่อข้อต่อต่างๆหรือหากมีการเปลี่ยนขนาดของท่อก็จะมีการสูญเสียความดันเกิดขึ้นอีกเช่นกัน ดังนั้นโครงการนี้จึงได้ศึกษาถึงวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่เกิดจากการไหลของน้ำกับทรายผ่านท่อที่มีการขยายขนาดด้วยวิธีการทดลอง โดยจะศึกษาผลของขนาดมุมของท่อขยาย อัตราส่วนผสม และความเร็วของของไหลผสม ที่ขนาดต่างๆกัน เพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียไปใช้ในการคำนวณหาค่าสิ่งที่ใช้ในการขุดต้นของไหลดังกล่าวต่อไป

**สัญลักษณ์**

$C$	อัตราส่วนผสมของทราย (%)	$D$	ขนาดของท่อ (m)
$g$	$9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$	$h_L$	ค่าการสูญเสียรอง (m)
$K_L$	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ลดขนาด	$P$	ค่าความดันภายในท่อ (kPa)
$u_m$	ค่าความเร็วของของผสม (m/s)	$u_s$	ค่าความเร็วของของแข็ง (m/s)
$u_w$	ค่าความเร็วของน้ำ (m/s)	$w_m$	อัตราการไหลโดยน้ำหนักของของผสม (N/s)
$w_s$	อัตราการไหลโดยน้ำหนักของทราย (N/s)	$w_w$	อัตราการไหลโดยน้ำหนักของน้ำ (N/s)
$\gamma$	ค่าความหน่วงจำเพาะ (N/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$	ค่าความถ่วงจำเพาะของของแข็ง (N/m <sup>3</sup> )
$\gamma_w$	ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ (N/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_w$	ความแตกต่างความดันของน้ำ (kPa)
$\Delta P_{suc}$	ความแตกต่างความดันเนื่องจากความเร่ง (kPa)	$\Delta L$	ช่วงความยาวที่พิจารณา (m)
$\beta$	มุมกรวยของท่อขยาย	$\lambda_w$	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของน้ำ
$\lambda_s$	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของแข็ง	1	ภาคตัดที่ 1
2	ภาคตัดที่ 2		

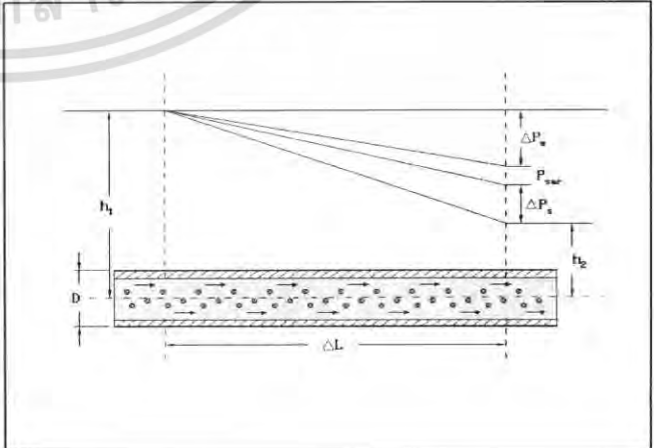
**2. วัตถุประสงค์ของโครงการ**

- 2.1 ออกแบบชุดการทดลองและทำการทดลองเพื่อพิจารณาถึงผลของค่าของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสม
- 2.2 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลอง

**3. ขอบเขตของโครงการ**

โครงการนี้เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสมระหว่างที่ไหลผ่านท่อขยายรูปทรงกรวยจากการทดลอง โดยจะทำการออกแบบชุดการทดลอง และทำการทดลองโดยนำทรายผสมน้ำที่อัตราส่วนผสม 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ นำมาไหลผ่านท่อขยายขนาดที่มุมกรวยของท่อขยาย 30 60 90 120 และ 180 องศา และเปลี่ยนความเร็วของของไหล แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟ

**4. การวิเคราะห์การไหลของของไหลผสมระหว่างทรายกับน้ำในท่อกลมแนวราบ**



รูปที่ 1 แสดง Pressure drop ของการไหลของของไหลผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณา Pressure drop ของการไหลของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายในท่อกลมแนวราบ

$$\Delta P = (\lambda_s + \lambda_w) \frac{\Delta L}{D} \cdot \frac{\gamma_w}{2g} \cdot u_m^2 \quad (1)$$

เมื่อ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  $K = (\lambda_s + \lambda_w) \frac{\Delta L}{D}$

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = h_L = K \frac{u_m^2}{2g} \quad (2)$$

เสดสูญเสียนื่องจากท่อขยายขนาด

$$h_L = \frac{K_L (u_{m1} - u_{m2})^2}{2g} \quad (3)$$



รูปที่ 2 การไหลของของไหลผสมเมื่อไหลผ่านท่อขยายขนาด

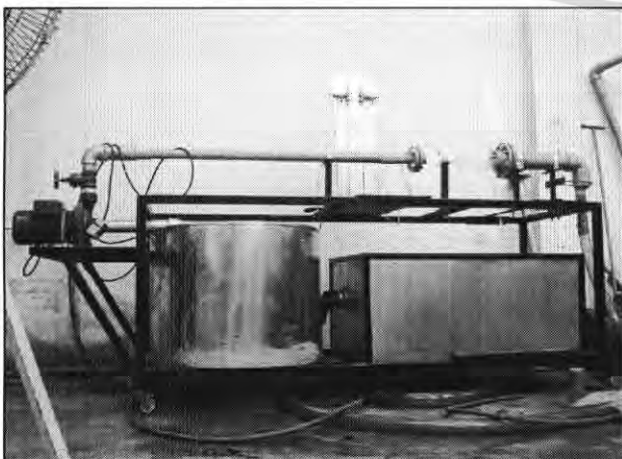
### 5. ชุดทดลอง

ชุดการทดลองที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

5.1 บั้มแบบดูดเหวี่ยงพร้อมด้วยมอเตอร์ 1 ชุด ใช้ในการสูบน้ำของผสมระหว่างน้ำกับทราย

5.2 ถังวัดปริมาตรและเครื่องชั่งน้ำหนัก เพื่อใช้ในการวัดอัตราการไหลของของผสม อัตราการไหลของน้ำ และอัตราการไหลของทราย

5.3 มานอมิเตอร์ ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงความดัน ( $\Delta h$ ) ระหว่างตำแหน่งเข้าท่อขยายกับตำแหน่งออกจากท่อขยาย



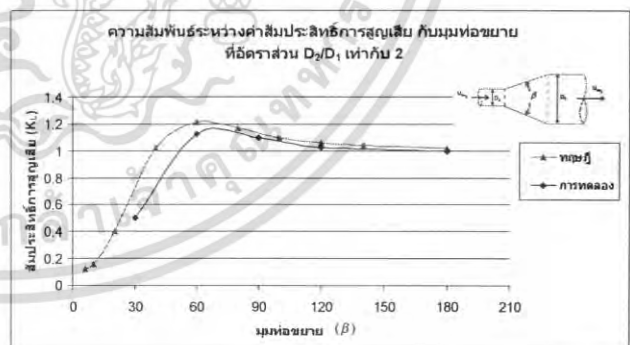
รูปที่ 3 ชุดทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

### 6. วิธีการทดลอง

วิธีในการทดลอง มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

- 6.1 ใช้ทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.45 มิลลิเมตร ทำการผสมกับน้ำในอัตราส่วนทราย 5% โดยปริมาตรลงในถัง จากนั้นเริ่มทำการทดลองโดยใช้ปั้มดูดของผสมให้ไหลผ่านท่อขยายที่มีมุมขนาด 30 องศา โดยกำหนดความเร็วเริ่มต้นด้วยการเปิดวาล์ว 2 รอบจากนั้นบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงความดันที่อ่านได้จากมานอมิเตอร์แบบหลอดรูปตัวยูหลาย โดยระหว่างการทดลองจะต้องกวนของผสมให้ทรายผสมกับน้ำอย่างสม่ำเสมอ
- 6.2 ทำการวัดอัตราการไหลของของผสม อัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลของทราย โดยแยกน้ำและทรายที่ได้นำมาชั่งน้ำหนัก
- 6.3 ทำการทดลองเหมือนข้อ 6.1 และข้อ 6.2 โดยเพิ่มความเร็วของของผสมโดยหมุนวาล์วที่ 4, 6, 8 และ 10 รอบ แล้วบันทึกข้อมูล
- 6.4 ทำการทดลองเหมือนข้อ 6.1, 6.2 และข้อ 6.3 โดยการเปลี่ยนมุมท่อยขยายเป็น 60, 90, 120, 180 องศา แล้วบันทึกข้อมูล
- 6.5 ทำการทดลองเหมือนข้อ 6.1, 6.2, 6.3 และ 6.4 โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของทรายเป็น 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ แล้วบันทึกข้อมูล
- 6.6 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงความดัน ( $h_L$ ) กับค่าต่างๆ

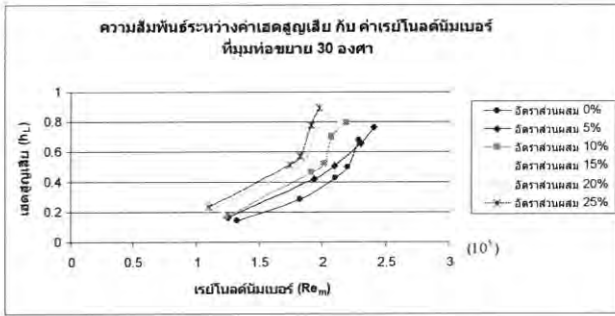
### 7. ผลการทดลอง



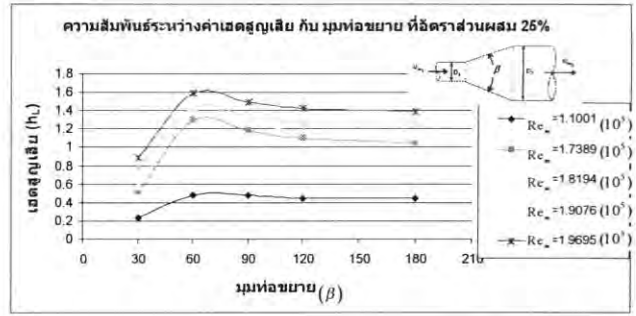
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $K_L$  กับมุมท่อขยาย ที่อัตราส่วน  $D_2 / D_1$  เท่ากับ 2

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ผลการทดลองได้ค่า  $K_L$  มีค่าน้อยกว่าค่าทางทฤษฎีเล็กน้อย

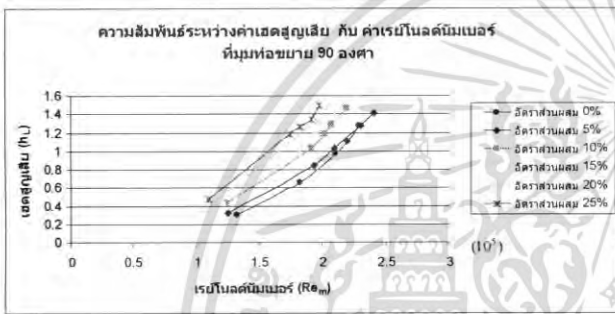
การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่รับผิดชอบต่อผลเสียหายใดๆ ทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสียดสูญเสีย ( $h_L$ ) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_m$ ) ที่มุมท่อขยาย 30 องศา



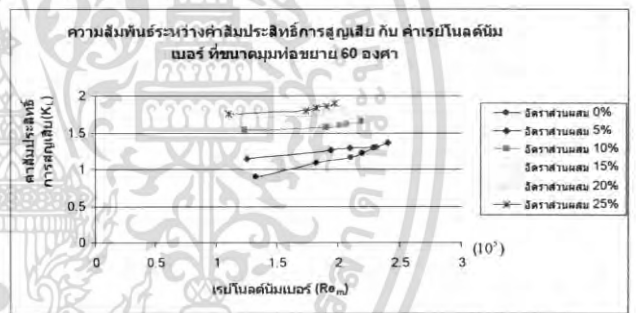
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงความดัน ( $h_L$ ) กับขนาดมุมท่อขยาย ที่อัตราส่วนผสม 25 เปอร์เซ็นต์



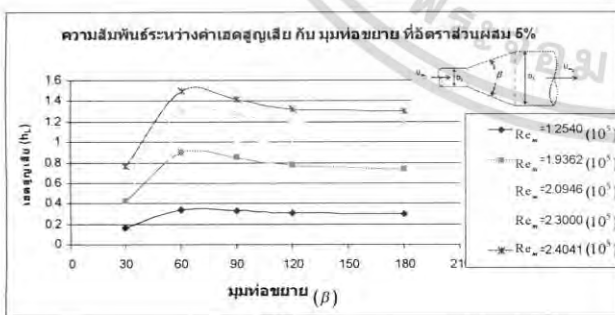
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสียดสูญเสีย ( $h_L$ ) กับ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_m$ ) ที่มุมท่อขยาย 90 องศา

จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ค่าเสียดสูญเสีย ( $h_L$ ) ที่ท่อขยายขนาดมุม 30 กับ 90 องศาจะสังเกตได้ว่าเมื่อส่วนผสมของทรายเพิ่มขึ้นค่าเสียดสูญเสีย ( $h_L$ ) จะเพิ่มขึ้น

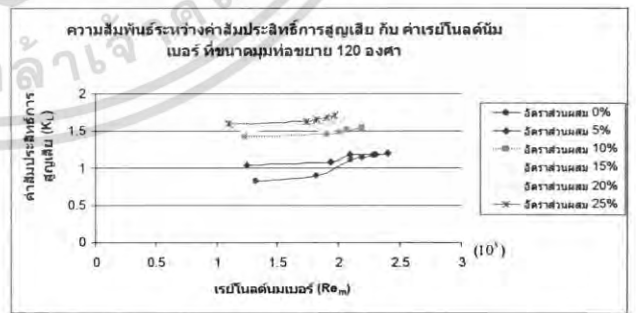
จากรูปที่ 7 และ 8 ค่าเสียดสูญเสีย ( $h_L$ ) กับขนาดมุมท่อขยายที่อัตราส่วนผสม 5 กับ 25 เปอร์เซ็นต์ จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดมุมท่อขยายเพิ่มขึ้นจาก 30 ถึง 90 องศา ค่า  $h_L$  จะเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อขนาดมุมท่อขยายเพิ่มจาก 90 ถึง 180  $h_L$  จะลดลง และจะสังเกตได้ว่าเมื่ออัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้น  $h_L$  ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับ  $Re_m$  ที่ขนาดมุมทวย 60 องศา

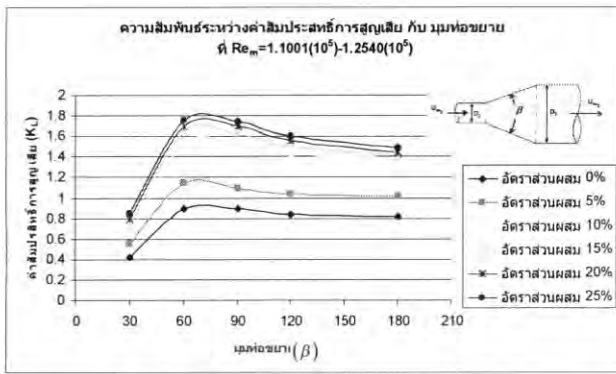


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสียดสูญเสีย ( $h_L$ ) กับขนาดมุมท่อขยาย ที่อัตราส่วนผสม 5 เปอร์เซ็นต์

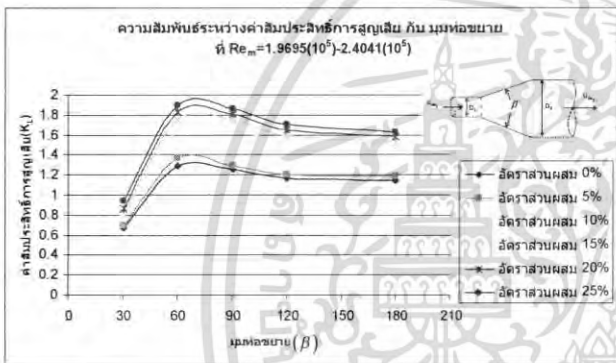


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับ  $Re_m$  ที่ขนาดมุมทวย 120 องศา

จากรูปที่ 9 และ 10 เป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_m$ ) ที่อัตราส่วนผสมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษารายการต่างๆ จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_m$ ) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องเพิ่มข้อความว่า "ค่า  $K_L$  จะเพิ่มขึ้น และจะสังเกตได้ว่าเมื่ออัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้น ค่า  $K_L$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น"



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับ ขนาดมุมท่อขยาย ที่  $Re_m = 1.1001(10^5) - 1.2540(10^5)$

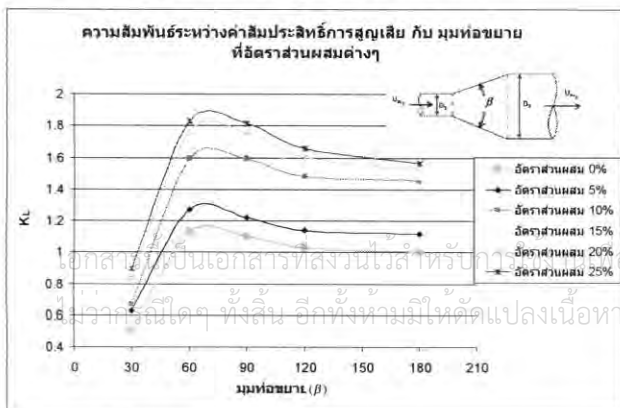


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับ ขนาดมุมทวอย ที่  $Re_m = 1.9695(10^5) - 2.4041(10^5)$

จากรูปที่ 11 และ 12 เป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $K_L$ ) กับขนาดมุมท่อขยาย ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จาก รูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดมุมท่อขยายเพิ่มขึ้น ค่า  $K_L$  จะเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดในช่วงมุม 60 ถึง 90 องศา จากนั้นจะลดลง และเมื่อ อัตราส่วนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า  $K_L$  เพิ่มขึ้นด้วย

8. สรุปผลการทดลอง

จากกราฟข้างต้น สามารถสรุปเป็นกราฟได้ ดังนี้



8.1 เมื่อกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_m$ ) เพิ่มขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงความดัน ค่าเสดสูญเสีย และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย จะเพิ่มขึ้น

8.2 เมื่ออัตราส่วนผสมของของไหล (C) เพิ่มขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงความดัน ค่าเสดสูญเสีย และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย จะเพิ่มขึ้น

8.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย มีค่าสูงสุดในช่วงมุมท่อขยาย ระหว่าง 60 ถึง 90 องศา และจะมีค่าลดลงที่มุมกววยระหว่าง 90 ถึง 180 องศา

9.วิจารณ์การทดลอง

1. ในการหาค่าความเร็วของของผสม ใช้วิธีการการจับเวลา แล้วชั่งน้ำหนัก อาจมีความคลาดเคลื่อนของผลบ้างถึงแม้จะทำการทดลองหลายครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยก็ตาม
2. ในการผสมทรายกับน้ำ การกวนให้ส่วนผสมมีความสม่ำเสมอ ตลอดเวลาการทดลองนั้นเป็นไปได้ยากพอสมควร
3. บางครั้งปั้มสร้างแรงดันไม่สม่ำเสมอทำให้การอ่านค่าผิดพลาดไปจากความจริงได้

10. ข้อเสนอแนะ

1. เปลี่ยนขนาดมุมกววยให้ละเอียดมากกว่านี้ เพื่อให้สามารถดูแนวโน้มของค่า ( $K_L$ ) ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น
2. ใช้ขนาดเม็ดทรายหลายขนาด เพื่อศึกษาผลที่มีต่อค่า ( $K_L$ ) เมื่อขนาดเม็ดทรายเปลี่ยนแปลง
3. ทำการทดลองโดยเปลี่ยนไปใช้ข้ออ้อ ข้อต่อ หรือวาล์วอื่นๆ
4. เปลี่ยนประเภทของแข็งที่ใช้ในของไหลผสม เช่น โคลนผสมกับน้ำ

11. เอกสารอ้างอิง

[1] มนตรี พิรุณเกษตร, "กลศาสตร์ของไหล," ครั้งที่ 2, บริษัท จุฬาลักษณ์จิง จำกัด, กรุงเทพฯ, 2547.

[2] Irfan A. Khan, "Fluid Mechanics", Holt, Rinehart and Wnston, 1987

[3] E. Anthony, "Fluid Mechanics with Applications," Prentice Hall, Inc, 1988.

[4] H. EBARA, "Fundamentals of Pump Technology ," Doc No. EHMf-7D230, 1999

[5] Frank M. White, "Fluid mechanics," McGRAW-HILL Book Co, Inc, 1999

[6] Bruce R. Munson, "Fundamentals of Fluid Mechanics," John Wiley & Sons (ASIA) Pte Ltd 2002