

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณค่าความดันสูญเสียของ
ของไหลผสมในท่อลาดชัน

PRESSURE LOSS COMPUTER PROGRAM DEVELOPMENT OF
SOLID-LIQUID MIXTURE FLOW IN INCLINED PIPE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL 2017-EN-M-030-023

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณค่าความดันสูญเสียของ
ของไหลผสมในท่อลาดชัน

PRESSURE LOSS COMPUTER PROGRAM DEVELOPMENT OF
SOLID-LIQUID MIXTURE FLOW IN INCLINED PIPE



ณัฐ ธนัญญาพร
NATAN TANA-ANYAPORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL 2017-EN-M-030-023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRESSURE LOSS COMPUTER PROGRAM DEVELOPMENT OF
SOLID-LIQUID MIXTURE FLOW IN INCLINED PIPE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMUTL-2017-EN-M-030-023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมในท่อลาดชัน
Thesis Title Pressure Loss Computer Program Development of Solid-Liquid Mixture Flow in Inclined Pipe
นักศึกษา นายณัฐ ชนอัญญาพร
รหัสประจำตัว 56601419
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-030-023

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.พรชัย	นิเวศน์รังสรรค์	พศ. นพรัตน์
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	อ.ดร.จำลอง
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ	เตไปวา	อ.ดร.จำลอง
รศ.ดร.จำลอง	ปราบแก้ว	อ.ดร.จำลอง

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมในท่อลาดชัน
นักศึกษา	นายณัฐ ธนัญญาพร
รหัสนักศึกษา	56601419
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสมที่ไหลในท่อลาดชัน ด้วยโปรแกรม MATLAB และวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยการจำลองการไหลในโปรแกรม ANSYS Fluent คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วการไหล ขนาดมุมลาดชันของท่อเทียบกับค่าความดันสูญเสีย เพื่อเป็นข้อมูลในการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการส่งของไหลผสมระหว่างน้ำกับของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ในการศึกษาจะใช้ของไหลผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 2.19 และ 2.91 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนผสม 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ของไหลไหลผ่านท่อลาดชันมุม 0 30 60 และ 90 องศาจากแนวระดับ โดยการเขียนโปรแกรม MATLAB คำนวณหาค่าความดันที่สูญเสียในระหว่างการไหลที่อัตราส่วนการผสมและมุมลาดชันของท่อต่างกัน และคำนวณด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent นำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทั้งสองรูปแบบมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน จากผลการคำนวณพบว่า ค่าความดันสูญเสียที่หาได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน การเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ความเร็วของการไหลมุมเอียงของท่อ และขนาดของอนุภาค จะส่งผลทำให้ค่าความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น และจากการนำผลการคำนวณทั้งสองวิธีไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า พบว่า ผลการคำนวณและผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

Thesis Title	Pressure Loss Computer program development of Solid-Liquid Mixture Flow in Inclined Pipe
Student	Mr.Natan Tana-anyaporn
Student ID	56601419
Degree	Master of Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Chamlong Prabkeao

ABSTRACT

This thesis presents a computer program development used to calculate the coefficient loss of slurry flow in inclined pipes. The MATLAB program and Computational fluid dynamics simulation of flow by using ANSYS Fluent program are used to calculate the correlation between the velocity and angles of the inclination pipes, the pressure drop and the coefficient friction, which will be employed for the calculation of the energy used in the transport of slurry fluid. Considering that the concentration of water and the plastic size of 1.1 2.19 and 2.91 mm in the ratio of 10 20 30 and 40 percent per weight are flowing through the pipes with inclined angles of 0 30 60 and 90 degrees. The MATLAB and Computation fluid dynamics program calculate the pressure drop that flows with different concentration and angles of inclination. From the comparative of the studying two methods, the results show that the pressure drop is similar. The increase in concentration, velocities, angles of inclination and size of the particles will result in pressure drop increment. The results from the two methods are compared with previous research. It is found that the calculated and experimental results are in the same trend.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยคำสั่งสอน คำปรึกษาแนะนำ และความกรุณาจาก ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร และอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยสอนสั่ง ให้คำปรึกษาแนะนำช่วยแก้ปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ รวมถึงผลักดันการดำเนินการต่างๆ ให้ประสบผลสำเร็จด้วยดีโดยตลอดมา

ขอบคุณเพื่อน พี่ น้องสำหรับความช่วยเหลือทุกๆด้านที่ทำให้การทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอบคุณพ่อ แม่ และญาติพี่น้อง ที่ได้ดูแลผู้วิจัยเป็นอย่างดี พร้อมให้โอกาสการศึกษาอย่างเต็มที่ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และเป็นกำลังใจให้ต่อสู้พริกเพียรและผ่านอุปสรรคต่างๆ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นอกจากนี้แล้ว ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เปิดโอกาสให้ข้าพเจ้าเข้ามาศึกษาต่อและทำงานวิจัยขึ้นนี้ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ณัฐ ธนัญญาพร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ.....	14
บทที่ 3 ทฤษฎีการไหลของของไหลผสม.....	17
3.1 นิยามของของไหล.....	17
3.2 การแบ่งประเภทพฤติกรรมการไหล.....	17
3.3 ของไหลผสม.....	18
3.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหลผสม.....	18
3.3.2 ความหนาแน่นของของไหลผสม.....	19
3.3.3 ความหนืดของของไหลผสม.....	20
3.3.3.1 ค่าความหนืดกรณีอัตราส่วนผสมของของแข็งน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์.....	21
3.3.3.2 ค่าความหนืดกรณีอัตราส่วนผสมของของแข็งน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์.....	21
3.3.3.3 ค่าความหนืดกรณีอัตราส่วนผสมของของแข็งสูงๆ.....	21
3.3.4 รูปแบบการไหลของของไหลผสมภายในท่อ.....	22
3.4 การวิเคราะห์สมการการไหลในท่อของของไหลผสม.....	23
3.4.1 การสูญเสียความดันเมื่อวางท่อในแนวนอน.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2 การสูญเสียความดันเมื่อวางท่อลาดชันมุม θ	25
บทที่ 4 การคำนวณค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมด้วยโปรแกรม MATLAB	31
4.1 โปรแกรม MATLAB.....	31
4.2 วิธีการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB.....	33
4.3 การทดสอบโปรแกรมคำนวณค่าการสูญเสียพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB	39
4.4 ผลการคำนวณการสูญเสียความดันการไหลของของไหลผสมที่ไหลในท่อลาดชันที่ มีความยาว 1 เมตร	44
4.4.1 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm ท่อลาดชันขึ้น.....	44
4.4.2 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.19 mm ท่อลาดชันขึ้น	47
4.4.3 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.91 mm ท่อลาดชันขึ้น	50
4.4.4 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm ท่อลาดชันลง	53
4.4.5 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.19 mm ท่อลาดชันลง	56
4.4.6 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.19 mm ท่อลาดชันลง	59
4.5 การศึกษาเชิงพาราเมตริกจากสมการแนวโน้ม.....	61
บทที่ 5 การคำนวณค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent.....	66
5.1 โปรแกรม ANSYS Fluent.....	66
5.2 วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	67
5.2.1 หลักการทำงานและสมการควบคุม	68
5.2.1.1 แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ	69
5.2.1.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน	70
5.2.2 การจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 16.0.....	73
5.2.2.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-processing).....	74
5.2.2.2 ขั้นตอนการคำนวณ (Solving-processing)	75
5.2.2.3 ขั้นตอนการแสดงผลและวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post-processing).....	79
5.3 การทดสอบโมเดลรูปแบบการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent.....	81
5.4 ผลการคำนวณการสูญเสียความดันการไหลของของไหลผสมที่ไหลในท่อลาดชันที่ มีความยาว 1 เมตร.....	83
5.4.1 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm	83
5.4.2 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.91 mm	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และวางอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	90
บรรณานุกรม.....	92
ภาคผนวก.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	103



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ **VI** อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงค่า Re_s ที่มีผลต่อค่าและค่า k และค่า ε	27
4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากตารางการออกแบบระบบท่อภายในอาคาร กับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การขนส่งของไหลผสมเป็นระยะทางไกลผ่านพื้นที่ลาดชัน.....	2
2.1 แผนผังชุดทดลองเพื่อหาค่าความดันสูญเสีย Doron [1].....	4
2.2 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียกับความเร็วแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของมุมลาดชันของท่อที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียที่มุมลาดชันต่างๆ	5
2.3 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียกับความเร็วแสดงถึงผลกระทบของอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียที่มุมลาดชัน 7 และ -7 องศา.....	5
2.4 ชุดทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากขนาดของอนุภาคและความเข้มข้นของอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสีย.....	6
2.5 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียกับความเร็วที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน กรณี $d_s = 125 \mu m$	6
2.6 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียกับความเร็วที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน กรณี $d_s = 400 \mu m$	7
2.7 ชุดการทดลองของ Matousek [3].....	7
2.8 กราฟค่าไฮดรอลิกเกรเดียนต์เทียบกับความเร็วที่ได้จากการทดลองและการคำนวณของการไหลในท่อแนวตั้ง	9
2.9 กราฟค่าไฮดรอลิกเกรเดียนต์เทียบกับความเร็วที่ได้จากการทดลองและการคำนวณของการไหลในท่อแนวอนที่อัตราส่วนผสมมาก	9
2.10 กราฟค่าไฮดรอลิกเกรเดียนต์เทียบกับความเร็วที่ได้จากการทดลองและการคำนวณของการไหลในท่อแนวอนที่อัตราส่วนผสมน้อย.....	10
2.11 แผนผังรูปแบบชุดการทดลองของ Doron และ Barnea [5].....	10
2.12 รูปแบบการไหลและการกระจายของอนุภาคของแข็งในทิศทางตั้งฉากกับแกนท่อ	11
2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็ว โดยเปรียบเทียบที่ความโตของอนุภาคของแข็งที่ขนาดต่างๆ	12
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็ว โดยเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมของอนุภาคของแข็งที่ขนาดต่างๆ	13
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วของของไหลผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	13
2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลนอนิวโทเนียน.....	14

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของ ของไหลนอนนิวโทเนียน.....	15
2.18 การติดตั้งชุดทดลองของ Prabkeao และ Jaikuson [7]	16
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง τ กับ $\dot{\gamma}$ สำหรับของไหลประเภทนิวโตเนียนและนอน-นิวโตเนียน	18
3.2 ตัวอย่างของผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous).....	19
3.3 ของผสมที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous).....	19
3.4 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในท่อแนวนอน.....	23
3.5 ความดันสูญเสียที่เกิดในท่อลาดชันทำมุม	25
4.1 ตัวอย่างการแสดงผลในรูปแบบต่างๆด้วยโปรแกรม MATLAB.....	31
4.2 ภาพการคำนวณเชิงเทคนิคด้วยโปรแกรม MATLAB	32
4.3 MATLAB สามารถแยกหมวดหมู่ตามลักษณะการใช้งานเพื่อการคำนวณเชิงเทคนิค	32
4.4 หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม	33
4.5 แผนผังขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม	34
4.6 แผนผังหมายเลขขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม	36
4.7 หน้าต่างโปรแกรมที่สามารถกรอกค่าตัวแปรต่างๆผ่านทางหน้าจอพร้อมนำค่าที่ ได้ไปคำนวณ	37
4.8 หน้าต่างโปรแกรมสามารถเลือกชนิดของท่อ.....	37
4.9 หน้าต่างโปรแกรมสามารถเลือกลักษณะความสัมพันธ์ของกราฟในการแสดงผล.....	37
4.10 หน้าต่างโปรแกรมสามารถกรอกค่าตัวแปรต่างๆพร้อมทั้งแสดงผลการคำนวณและ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วเฉลี่ย	38
4.11 หน้าต่างโปรแกรมสามารถกดเข้าไปอ่านค่าแบบละเอียดได้	38
4.12 หน้าต่างโปรแกรมสามารถกรอกค่าตัวแปรต่างๆพร้อมทั้งแสดงผลการคำนวณและกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์.....	39
4.13 หน้าต่างโปรแกรมสามารถกดเข้าไปอ่านค่าแบบละเอียดได้	39
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วของน้ำ.....	40
4.15 ตัวอย่างการอ่านค่าจากตารางการออกแบบระบบท่อภายในอาคาร	41
4.16 ตัวอย่างผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา.....	41
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วของน้ำ.....	42
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมชันของท่อของของไหลผสม ที่ความเร็ว 3 m/s	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อลาดชันลง 60 องศา....	59
4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อลาดชันลง 90 องศา....	60
4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมลาดชันลงของท่อ ที่ความเร็ว 2 m/s.....	61
4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมลาดชันลงของท่อ ที่ความเร็ว 4 m/s.....	61
4.53 แสดงสมการความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียในกรณีที่ขนาดของอนุภาคเม็ดพลาสติก มีค่าต่างกันออกไปและแสดงถึงสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการ.....	62
4.54 แสดงสมการความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียในกรณีที่ขนาดมุมลาดชันมีค่าต่างกัน ออกไปและแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการ.....	63
4.55 แสดงสมการความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียในกรณีที่อัตราส่วนผสมมีค่าต่างกัน ออกไปและแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการ.....	64
4.56 แสดงสมการความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียในกรณีที่ความเร็วมีค่าต่างกันออกไป และแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการ.....	65
5.1 เส้นชั้นแสดงลักษณะการกระจายของความดันของอากาศรอบยานอวกาศความเร็วสูง.....	67
5.2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกนเทียบกับเวลาของการไหลแบบราบเรียบและ การไหลแบบปั่นป่วน.....	70
5.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ANSYS Fluent.....	74
5.4 ขั้นตอนการกำหนดขนาดเมช.....	75
5.5 การกำหนดชนิดของของไหล.....	76
5.6 การกำหนดขอบเขตของการไหล.....	76
5.7 ตัวอย่างการกำหนดเงื่อนไขที่ทางเข้า.....	77
5.8 ตัวอย่างการกำหนดเงื่อนไขที่ทางออก.....	78
5.9 การกำหนดรูปแบบของการหาค่าตอบสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน.....	78
5.10 ตัวอย่างการกำหนดค่า Criteria สำหรับการหาค่าตอบ.....	79
5.11 การคำนวณของโปรแกรม ANSYS Fluent.....	79
5.12 การเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวล.....	80
5.13 กราฟการเปรียบเทียบผลของจำนวนกริดเซลล์.....	80
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วของของไหลผสม ที่ท่อลาดชัน 90 องศา.....	81
5.15 ผลของค่าความดันที่เกิดขึ้นโดยจำลองเทียบกับการงานวิจัยของ Krampa [9].....	82
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อลาดชัน 0 องศา.....	83
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชัน 30 องศา.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในชั้นเรียนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ Xing อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชั้น 60 องศา.....	84
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชั้น 90 องศา.....	85
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมลาดชันของท่อ ที่ความเร็ว 2 m/s.....	85
5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมลาดชันของท่อ ที่ความเร็ว 4 m/s.....	86
5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อลาดชัน 0 องศา.....	86
5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชั้น 30 องศา.....	87
5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชั้น 60 องศา.....	87
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชั้น 90 องศา.....	88
5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมลาดชันของท่อ ที่ความเร็ว 2 m/s.....	88
5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมลาดชันของท่อ ที่ความเร็ว 4 m/s.....	89



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดท่อ (m^2)
C	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอนุภาค
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
d_s	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (m)
f_s	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างของแข็งและของเหลว ($kg.f$)
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
ΔL	ผลต่างของความยาวท่อ (m)
n	จำนวนอนุภาคของของแข็งที่ผสมน้ำ
ΔP	ค่าการสูญเสียความดัน (Pa)
ΔP_w	ค่าการสูญเสียความดันของน้ำ (Pa)
ΔP_s	ค่าการสูญเสียความดันของของแข็ง (Pa)
Re	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
Re_s	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของอนุภาค
U_m	ความเร็วเฉลี่ย (m/s)
U_s	ค่าความเร็วของของแข็ง (m/s)
U_t	ค่าความเร็วสุดท้ายของของแข็ง (m/s)
α	ค่าความดันสูญเสียของไหลผสมต่อค่าความดันสูญเสียของน้ำ
γ_{sw}	น้ำหนักจำเพาะของของผสม (N/m^3)
γ_w	น้ำหนักจำเพาะของของน้ำ (N/m^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **xxiii** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

γ_s	น้ำหนักจำเพาะของของแข็ง (N / m^3)
λ	สัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสม
λ_w	สัมประสิทธิ์การสูญเสียของของน้ำ
λ_s	สัมประสิทธิ์การสูญเสียของของแข็ง
μ_s	อัตราส่วนของน้ำหนักของของแข็งต่อน้ำหนักของน้ำ
f	ค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อ
ϕ	อัตราส่วนความเร็ว
η	ค่าประสิทธิภาพ
W_w	น้ำหนักของน้ำ (N)
W_s	น้ำหนักของของแข็ง (N)
θ	มุมเอียงของท่อ
ε	ค่าความหยาบผิวของผนังท่อ
ν	ความหนืดจลน์ของของไหล (m^2/s)
μ	ความหนืดพลวัตของของไหล (Pa.s)
C_s	อัตราส่วนผสมของของแข็งต่อของผสมโดยน้ำหนัก



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหาและความสำคัญของปัญหา

ระบบท่อส่งของเหลวเป็นส่วนประกอบสำคัญในระบบงานทางวิศวกรรม พบได้ตั้งแต่ในเครื่องจักรต่างๆ ไปจนถึงในอาคารและในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีมูลค่าประมาณ 7 – 8 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่าการก่อสร้างโรงงานทั่วไป และอาจมีมูลค่ามากถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ในกรณี โรงงานปิโตรเคมี โรงไฟฟ้า เรือเดินสมุทรบางชนิด หรือตัวอย่างที่เห็นได้ชัดในธรรมชาติ เช่น น้ำท่วมตามฤดูกาลในแม่น้ำไนล์ที่พัดพาตะกอนและก้อนกรวดไหลไปตามแม่น้ำทุกๆปีในช่วงฤดูน้ำท่วม แม่น้ำไนล์จะลำเลียงตะกอนจำนวนมากไหลผ่านไปไกลกว่าพันไมล์ไปยังทะเลทรายซาฮารา การขุดลอกคลองหรือแม่น้ำก็เป็นหนึ่งในกระบวนการที่เก่าแก่และพบมากที่สุดที่เกี่ยวข้องกับของไหลผสม อนุภาคที่ผสมกับน้ำมีความหลากหลายมากตั้งแต่ขนาดของอนุภาคเล็กๆไปจนถึงมีขนาดอนุภาคใหญ่ๆเช่น กรวด หิน ฯลฯ ในอุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่เดิมนั้นการขนส่งแร่จะทำการขนส่งโดยรรางและได้มีแนวคิดเรื่องของการขนส่งของไหลผสมในท่อตั้งแต่ช่วงกลางศตวรรษที่ 19 โดยมีการขนส่งทองคำผ่านท่อขนส่งจากรัฐแคลิฟอร์เนีย การขนส่งของไหลผสมเป็นระยะทางไกลภายในท่อลำเลียงได้มีการพัฒนาในทุกทศวรรษตั้งแต่ช่วงกลางทศวรรษที่ 19 (1950) โดยส่วนผสมของของไหลผสมประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆที่อัตราส่วนผสมสูงๆ เช่น ทองแดง ไปจนถึงที่ขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งอาจมีขนาดถึง 150 mm เช่น ฟอสเฟต ธรรมชาติของของไหลผสมแม้จะปริมาณส่วนผสมของของแข็งที่เบาบางมากเมื่อเทียบกับของเหลวแต่สามารถมีผลกระทบต่อท่อหรือสิ่งแวดล้อมหากไม่มีการจัดการอย่างถูกวิธี ยกตัวอย่าง เช่น หลายๆเขื่อนที่มีชื่อเสียงของโลกที่สร้างขึ้นในศตวรรษที่ 20 เริ่มที่จะตื้นเขินเนื่องจากจากการทับถมของตะกอนบ่อยครั้งที่การสร้างเขื่อนกลายเป็นทะเลสาบขนาดใหญ่ การไหลของแม่น้ำที่ความเร็วไม่มากพอก็เพียงพอที่จะทำให้เกิดการทับถมของตะกอนบริเวณส่วนที่มีความลึกมากที่สุด

วิศวกรในศตวรรษที่ 20 จึงจำเป็นต้องเรียนรู้ในการจัดการเรื่องเหล่านี้โดยใช้หลักวิศวกรรมในการวางระบบการไหลของของไหลผสม หลักการพื้นฐานของคุณสมบัติของของไหลผสมและพฤติกรรมของการไหลจึงมีความสำคัญ การคำนึงถึงคุณสมบัติของของไหลผสม ขนาดของอนุภาค ความหนาแน่น อัตราส่วนผสม มีความสำคัญต่อการเลือกอุปกรณ์สำหรับการขนส่งของไหลผสม นอกจากนี้ การศึกษาเกี่ยวกับความเร็วการไหลที่เหมาะสมก็มีความจำเป็นต่อการเลือกขนาดของท่อที่เหมาะสม จุดมุ่งหมายเพื่อมุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้สำหรับการขนส่งของไหลผสมในทางวิศวกรรม

ระบบท่อจึงมีผลอย่างมากต่อการใช้พลังงานของระบบขนส่งต่างๆเช่น ระบบท่อในอาคารและโรงงานซึ่งจะเป็นค่าใช้จ่ายสะสมตลอดอายุการใช้งาน หากมีการวางระบบหรือออกแบบท่อไม่มีประสิทธิภาพแล้วก็จะเกิดผลกระทบต่อระบบนั้นๆ นำไปสู่การสูญเสียค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้นได้

ระบบท่อส่งของเหลวทำหน้าที่ส่งของเหลวจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ซึ่งนอกจากจะมีการส่งของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวแล้ว ยังมีงานหลายประเภทที่มีการขนถ่ายของไหลผสมทั้งที่เป็นเนื้อเดียวกันและเป็นเนื้อผสม ซึ่งในการขนถ่ายของไหลผสมผ่านระบบนั้น จะเกิดการสูญเสียความดันเนื่องจากความฝืดระหว่างผิวด้านในของท่อ กับของไหลผสมที่ไหลผ่านซึ่งถือเป็น การสูญเสียหลัก นอกจากนี้หากระบบท่อมีการเชื่อมต่อด้วยข้อต่อต่างๆ หรือมีการเปลี่ยนขนาดของท่อหรือมีการวางท่อลาดชันทำมุมองศาต่างๆดังรูปที่ 1.1 ก็จะมีการสูญเสียความดันเกิดขึ้นอีกเช่นกัน ดังนั้น การออกแบบระบบท่ออย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การหาค่าการสูญเสียพลังงานเป็นหนึ่งในเทคนิคที่สำคัญที่สุด ที่จะได้รับการประเมินโดยนักออกแบบสำหรับการออกแบบระบบการขนส่งของไหลผ่านท่อ และเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการเลือกกำลังของปั๊มที่ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของไหลให้เหมาะสม



รูปที่ 1.1 การขนส่งของไหลผสมเป็นระยะทางไกลผ่านพื้นที่ลาดชัน [17]

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ทำการศึกษาทฤษฎีเพื่อพิจารณาถึงผลของค่าตัวแปรได้แก่ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ความเร็ว มุมลาดชัน ขนาดของอนุภาคและอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมที่ไหลผ่านท่อลาดชัน
- 1.2.2 สามารถเขียนโปรแกรมการคำนวณและแสดงผลการวิเคราะห์ค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมที่ไหลผ่านท่อลาดชันด้วยโปรแกรม MATLAB
- 1.2.3 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ความเร็ว มุมลาดชัน ขนาดของอนุภาคและอัตราส่วนผสม ที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียและศึกษาว่าตัวแปรไหนมีผลต่อค่าความดันสูญเสียมากที่สุดและรองลงมา
- 1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบค่าความความดันสูญเสียของของไหลผสมที่ไหลผ่านท่อลาดชันด้วยวิธีคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาและวิธีคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาขั้นตอนและออกแบบโปรแกรมการคำนวณค่าความดันสูญเสียเมื่อของไหลผสมไหลผ่านท่อลาดชันโดยใช้โปรแกรม MATLAB และโปรแกรม ANSYS Fluent ในการคำนวณและแสดงผลการวิเคราะห์
- 1.3.2 ท่อมีขนาดมุมลาดชัน (θ) ตั้งแต่ 0 30 60 และ 90 องศา
- 1.3.3 ของไหลผสมคือน้ำกับเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 2.19 และ 2.91 mm ที่อัตราส่วนผสม 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์
- 1.3.4 ความเร็วของของไหลผสมตั้งแต่ 1 – 5 m/s

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา และ ANSYS Fluent ในการวิเคราะห์ค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมได้
- 1.4.2 สามารถนำไปใช้คำนวณการออกแบบระบบที่เหมาะสมกับการใช้งานได้
- 1.4.3 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาระบบขนส่งของของไหลผสม (Slurry) ในระบบท่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
- 1.4.4 สามารถนำโปรแกรมไปพัฒนาเพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับของไหลผสมในอุตสาหกรรมได้และเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆได้

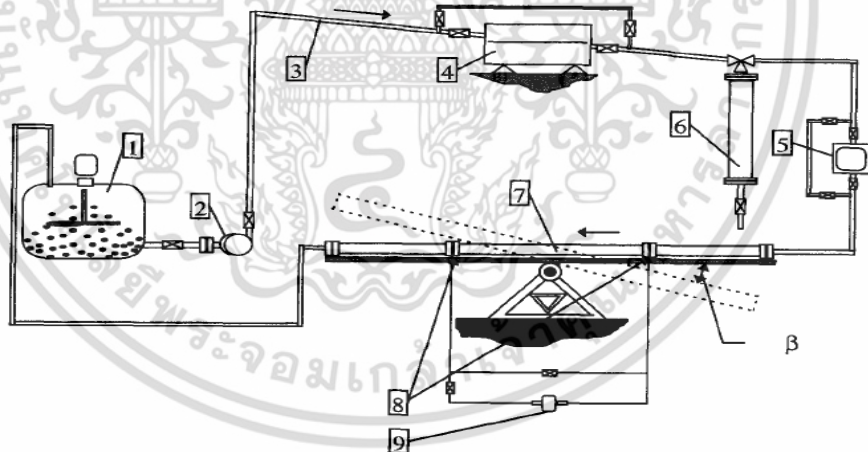
บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการรวบรวมผลงานวิจัยทางการศึกษาการไหลของของไหลของของไหลนอน-นิวโทเนียน ที่ไหลในท่อลักษณะต่างๆ และการเก็บข้อมูลเพื่อทำการศึกษาค่าความดันสูญเสีย ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสีย รวมถึงพฤติกรรมและแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในรูปแบบการไหลในลักษณะต่างๆ ซึ่งได้รวบรวมจากผลงานของนักวิจัยทั้งในและต่างประเทศหลายท่านตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ

Doron [1] ได้ทดลองเพื่อศึกษาลักษณะของการไหลของของไหลผสมระหว่างของแข็ง - ของเหลว ในท่อลาดชันทำมุมระหว่าง -7° ถึง 7° องศา โดยชุดทดลองมีแผนผังดังรูปที่ 2.1 ตรงชุดทดสอบหมายเลข 7 สามารถปรับมุมลาดชันได้ระหว่าง -7° ถึง 7° องศา จากแนวระดับ ความเข้มข้นของส่วนผสมที่ใช้คือ 7 10 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของของแข็ง 3 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 50 mm โดยของแข็งที่ใช้มีความหนาแน่น $1,240 \text{ kg/m}^3$

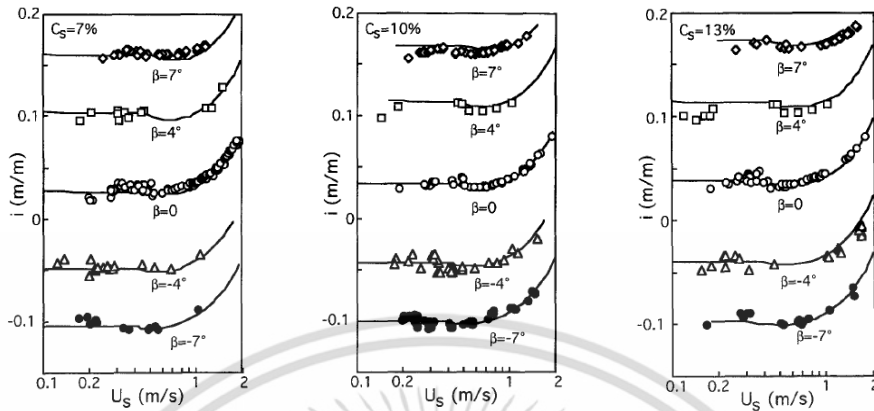


Layout of experimental system; (1) feed tank and mixer, (2) pump, (3) feed pipe, (4) mass flow meter, (5) volumetric flow meter, (6) sampling device, (7) test section, (8) pressure taps, (9) pressure transducer.

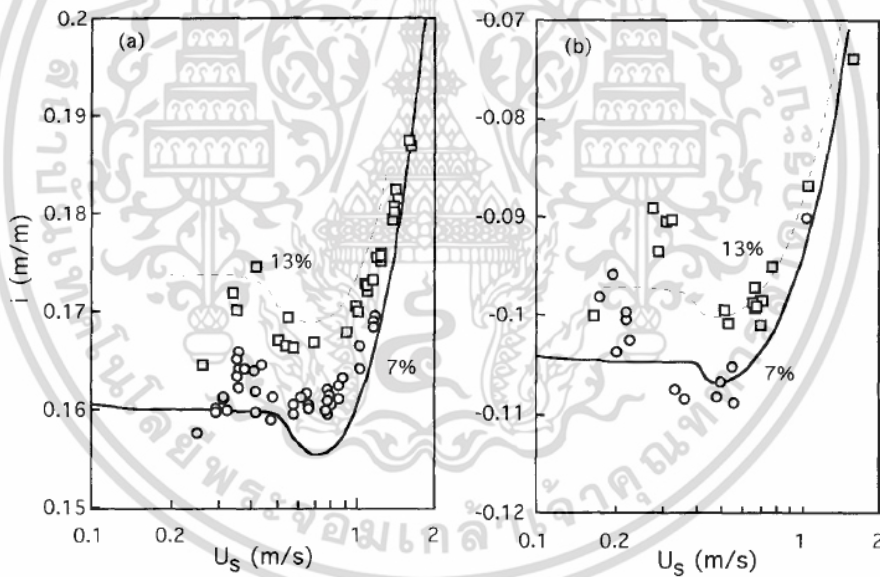
รูปที่ 2.1 แผนผังชุดทดลองเพื่อหาค่าความดันสูญเสียของ P.Doron [1]

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมุมลาดชันของท่อเพิ่มขึ้นจากแนวระดับจะส่งผลให้ค่าความดันสูญเสียเพิ่มมากยิ่งขึ้น สำหรับที่ค่าอัตราการไหลที่น้อยมากค่าความดันสูญเสียจะไม่มีเปลี่ยนแปลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงโน้มถ่วงยังไม่มีผลต่อการไหลมากนัก แต่เมื่อค่าอัตราการไหลมากขึ้น ความเร็วก็จะมีผลทำให้ค่าความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของมุม

ลาดชันของท่อและปริมาณส่วนผสม แต่เมื่อมุมลาดชันของท่อลดลงจากแนวระดับ ค่ามุมลาดชันของท่อที่ลดลงจะส่งผลให้ค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นลดลง



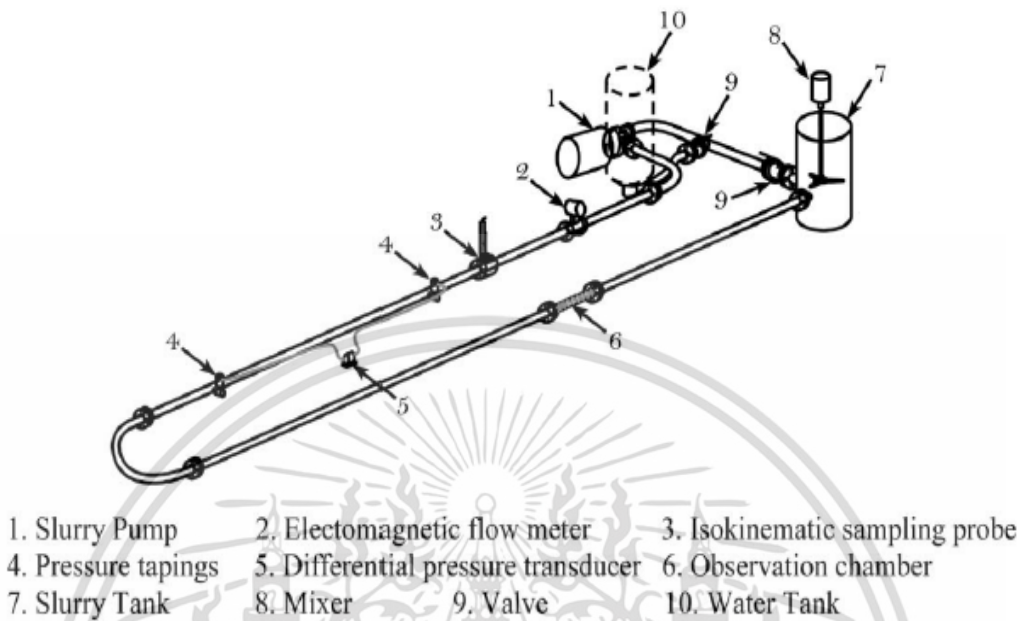
รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสีย (i , m/m) กับความเร็ว (U_s , m/s) แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของมุมลาดชันของท่อที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสีย $\rho_s = 1,240 \text{ kg/m}^3$, $d_p = 3 \text{ mm}$, $D = 50 \text{ mm}$ [1]



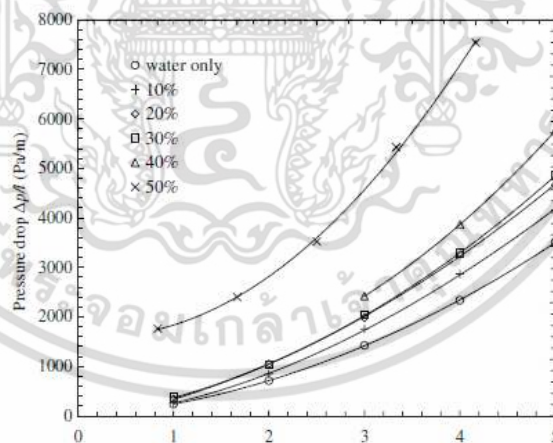
รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียกับความเร็วแสดงถึงผลกระทบของอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสีย (a) $\beta = 7^\circ$ (b) $\beta = -7^\circ$; $C = 7\%$: สัญลักษณ์รูปวงกลม-เส้นทึบ $C = 13\%$: สัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยม-เส้นประ $\rho_s = 1240 \text{ kg/m}^3$, $d_p = 3 \text{ mm}$, $D = 50 \text{ mm}$ [1]

Kaushal [2] ได้ศึกษาผลกระทบจากขนาดของอนุภาคและความเข้มข้นของอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อความดันสูญเสียโดยมีชุดทดลองดังรูปที่ 2.4 โดยได้ทำการทดลองในท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54.9 mm ใช้ลูกแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $440 \mu\text{m}$ $125 \mu\text{m}$ และเม็ดลูกแก้วขนาดผสม $440 \mu\text{m}$ กับ $125 \mu\text{m}$ ความเร็วของการไหลตั้งแต่ 0 – 5 m/s และความเข้มข้นของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสม 0 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากการศึกษพบว่า ที่ขนาดส่วนผสม $125 \mu m$ ค่าความดันสูญเสียจะเพิ่มขึ้นตามขนาดความโตเม็ดลูกแก้ว อัตราส่วนผสมและความเร็วที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.5



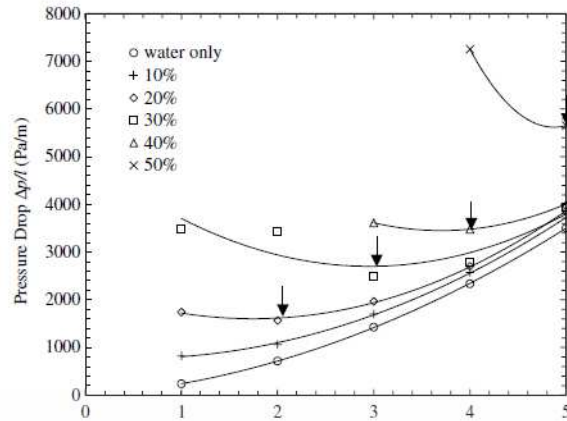
รูปที่ 2.4 ชุดทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากขนาดของอนุภาคและความเข้มข้นของอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสีย [2]



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียกับความเร็วที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน กรณี $d_s = 125 \mu m$ [2]

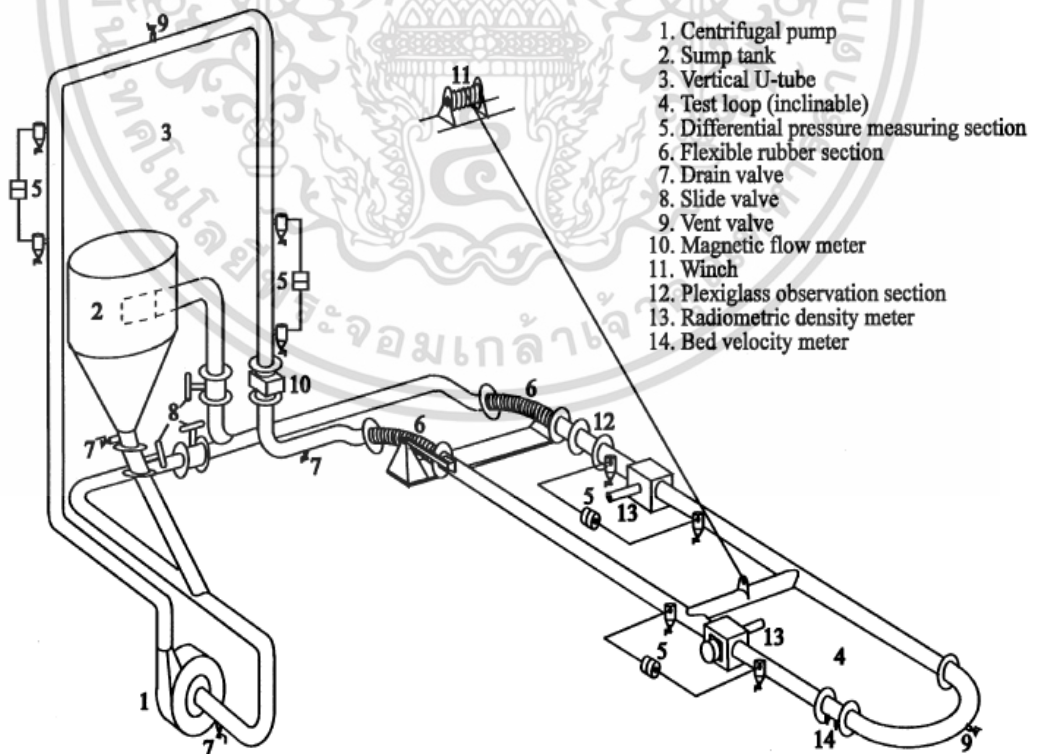
ในขณะที่ขนาดส่วนผสม $440 \mu m$ รูปที่ 2.6 พบว่า ค่าความดันสูญเสียจะลดลงแล้วเพิ่มขึ้นแต่น้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วและ อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่ความเร็วที่ต่ำและอัตราส่วนผสมน้อยค่าความดันสูญเสียจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เมื่อความเร็วของการไหลมีค่า 5 m/s และมีค่าความเข้มข้นของอัตราส่วนผสม 50 เปอร์เซ็นต์ ค่าความดันสูญเสียจะมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียกับความเร็วที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน กรณี $d_s = 440 \mu\text{m}$ [2]

Matousek [3] ได้ศึกษารูปแบบการไหลในท่อของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายที่มีผลต่อค่าไฮดรอลิกเกรเดียนดั่งรูปที่ 2.7 โดยได้ทำการทดลองในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ใช้เม็ดทราย 3 ขนาด คือขนาดละเอียด (0.1-0.2 mm) ขนาดปานกลาง (0.2-0.5 mm) และขนาดหยาบ (1.6-2.7 mm) ความเร็วของการไหลได้ตั้งแต่ 0 – 10 m/s และความเข้มข้นของส่วนผสม 0 – 45 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร



รูปที่ 2.7 ชุดการทดลองของ V. Matousek [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Matousek ได้นำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณจากสมการของ Shook และ Bartosik ซึ่งได้ศึกษาการหาค่าเฮดการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในท่อที่ได้รับจากความเค้นเฉือนที่กระทำโดยของเหลว ($\tau_{w,l}$) และของแข็ง ($\tau_{w,s}$) ที่ผนังท่อและได้เสนอสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียสำหรับการไหลในท่อ

$$I_m \rho_1 g = \frac{4(\tau_{w,l} + \tau_{w,s})}{D} \quad (2.1)$$

เมื่อ I_m คือ ค่าไฮดรอลิกเกรเดียน (Frictional head loss)

$\tau_{w,l}$ คือ ความเค้นเฉือนของอนุภาคของเหลว (Pa)

$\tau_{w,s}$ คือ ความเค้นเฉือนของอนุภาคของแข็ง (Pa)

โดยที่ $\tau_{w,s}$ สามารถหาได้จากสมการ

$$\tau_{w,s} = \frac{8.3018 \times 10^7}{Re^{2.317}} D^2 \rho_s d^2 \lambda_d^{1.5} \left(\frac{\tau_{w,l}}{\mu_1} \right)^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ Re คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของเหลว

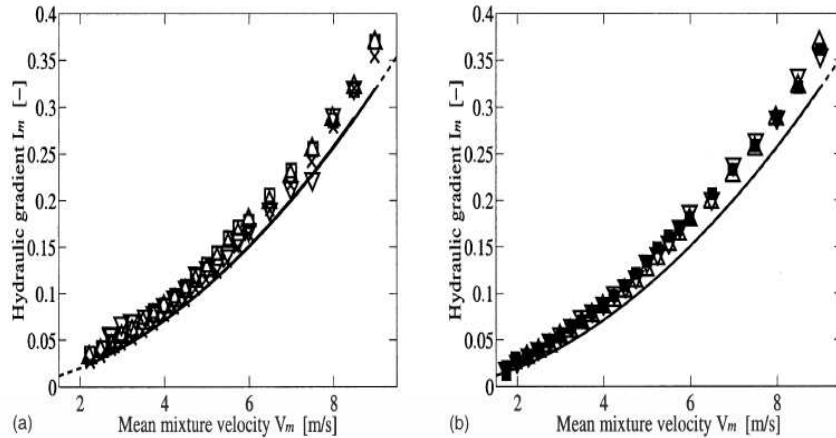
λ_d คือ ค่าความเข้มข้นของอนุภาค

μ_1 คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (Pa.s)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของของแข็ง (kg/m^3)

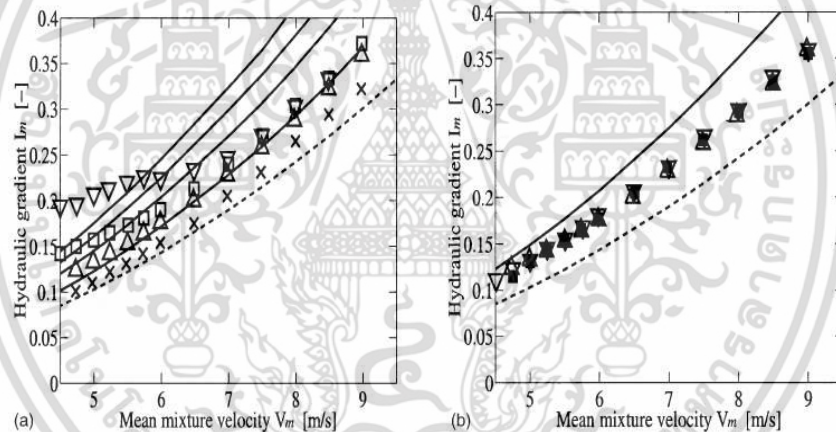
D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (m)



(a, b) Frictional head loss measured and predicted in vertical flow. (---): water, (\times): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.12-0.13$, (Δ): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.26$, (\square): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.35$, (∇): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.43$, (—): Bartosik and Shook model (Eqs. (5) and (6)), (---): water, (Δ): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.26$, (∇): fine-sand mixture $C_{vd} = 0.27-0.28$, (\blacksquare): medium sand $C_{vd} = 0.12$ + fine sand $C_{vd} = 0.15$, (—): Bartosik and Shook model (Eqs. (5) and (6)).

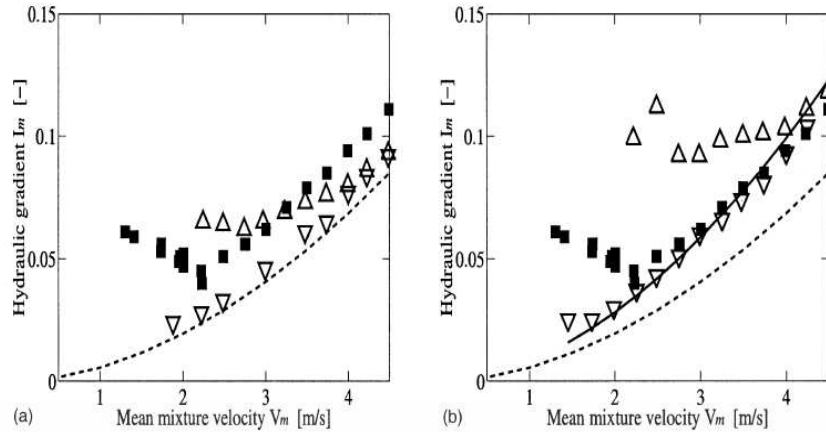
รูปที่ 2.8 กราฟค่าไฮดรอลิกเกรเดียนเทียบกับความเร็วที่ได้จากการทดลองและการคำนวณของการไหลในท่อแนวตั้ง [3]



(a, b) Frictional head loss measured and predicted in horizontal flow at high mixture velocities. (—): water, (\times): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.12-0.13$, (Δ): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.26$, (\square): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.35$, (∇): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.43$, (---): equivalent-liquid model for $C_{vd} = 0.12, 0.26, 0.35, 0.43$, (—): water, (Δ): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.26$, (∇): fine-sand mixture $C_{vd} = 0.27-0.28$, (\blacksquare): medium sand $C_{vd} = 0.12$ + fine sand $C_{vd} = 0.15$, (---): equivalent-liquid model for $C_{vd} = 0.27$.

รูปที่ 2.9 กราฟค่าไฮดรอลิกเกรเดียนเทียบกับความเร็วที่ได้จากการทดลองและการคำนวณของการไหลในท่อแนวนอนที่อัตราส่วนผสมมาก [3]

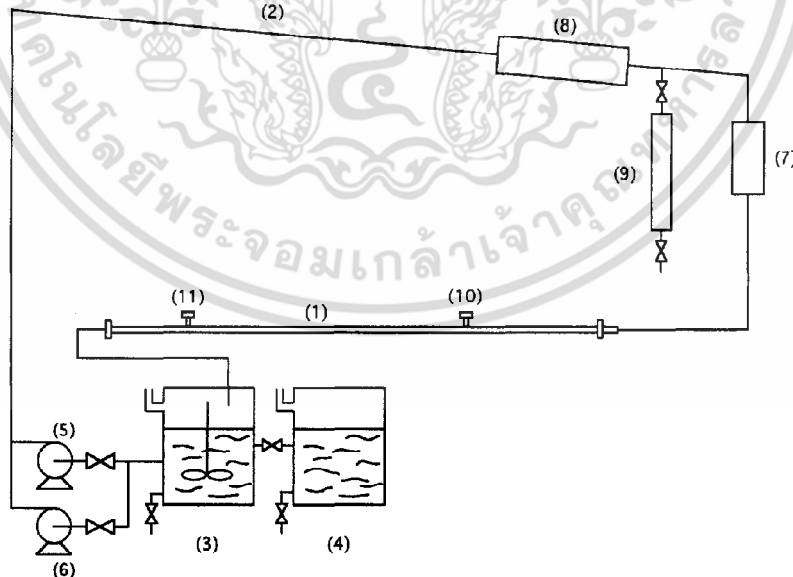
จากการทดลองพบว่า ในท่อแนวตั้งค่าความไฮดรอลิกเกรเดียน (I_m) จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้นแต่อัตราส่วนผสมน้ำกับทรายจะไม่มีผลต่อค่าไฮดรอลิกเกรเดียนมากนัก สำหรับท่อแนวนอนค่าไฮดรอลิกเกรเดียนจะลดลงเล็กน้อยในช่วงความเร็วต่ำ (2-4 m/s) และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น (4-10m/s) เช่นเดียวกับอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น



(a, b) Frictional head loss in horizontal flow at low mixture velocities. (-): water, (Δ): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.11-0.12$, (∇): fine-sand mixture $C_{vd} = 0.14$, (—): equivalent-liquid model (ELM) for $C_{vd} = 0.27$, (Δ): medium-sand mixture $C_{vd} = 0.26$, (∇): fine-sand mixture $C_{vd} = 0.26-0.27$, (\blacksquare): mixed-sand mixture $C_{vd} = 0.27$ (medium sand $C_{vd} = 0.12$ + fine sand $C_{vd} = 0.15$).

รูปที่ 2.10 กราฟค่าไฮดรอลิกเกรเดียนเทียบกับความเร็วที่ได้จากการทดลองและการคำนวณของการไหลในท่อแนวนอนที่อัตราส่วนผสมน้อย [3]

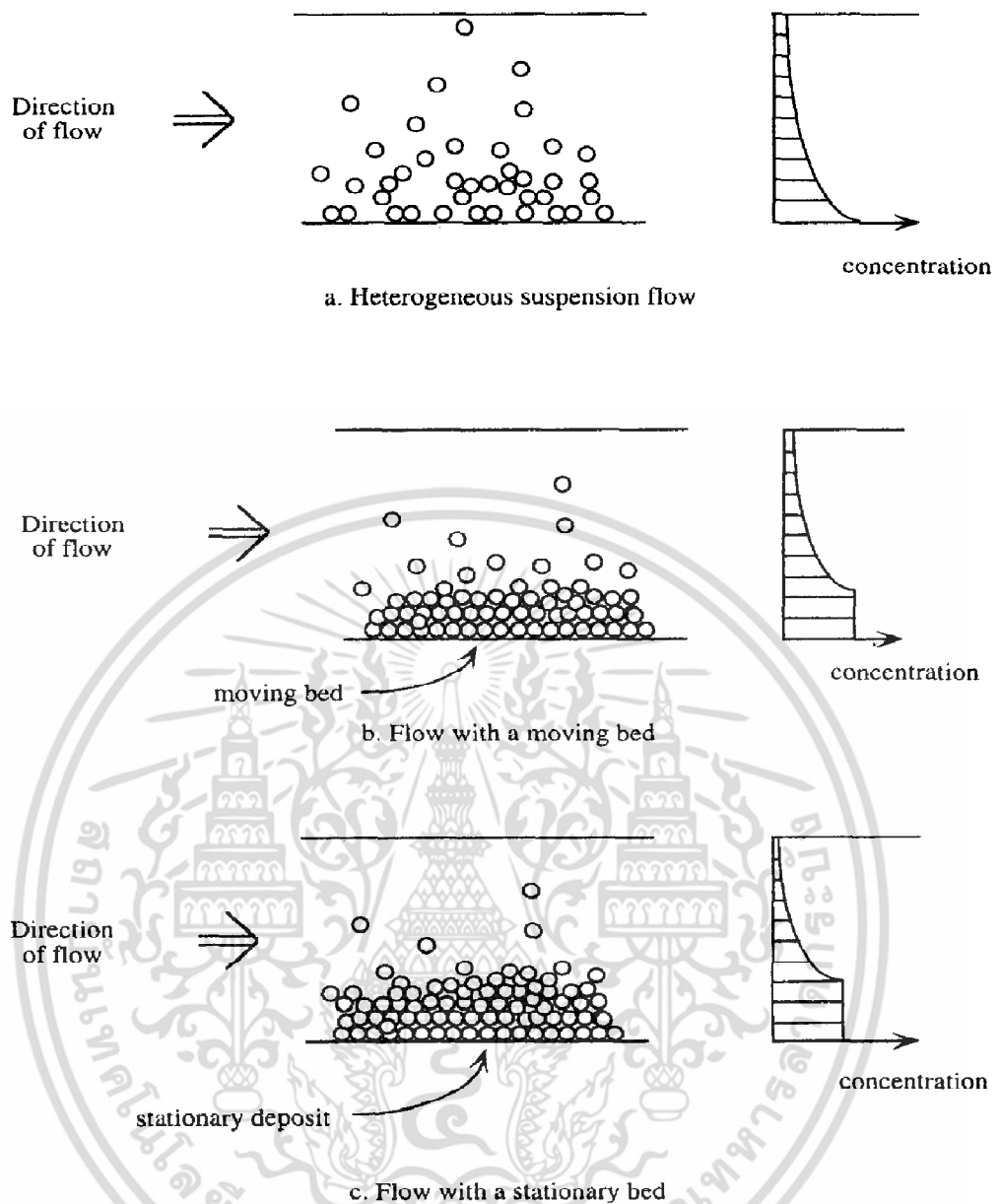
Doron และ Barnea [4] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการไหลในท่อของของไหลผสมระหว่างของแข็ง-ของเหลวที่อัตราการไหลต่ำ (0-1 m/s) โดยมีชุดทดลองดังรูปที่ 2.11 พบว่า รูปแบบการไหลของของไหลผสมจะมี 3 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.12 คือ การไหลแบบแยกชั้นโดยชั้นล่างสุดไม่มีการเคลื่อนที่ การไหลแบบแยกชั้นและการไหลแบบเฮเทอโรจีเนียส



(1)Test pipe (2)Feed pipe (3)Feed tank (4)Water tank (5,6)Centrifugal pump (7)Electromagnetic flow meter (8)Mass flow meter (9)Vertical sampling device (10,11)Pressure transducers

รูปที่ 2.11 แผนผังรูปแบบชุดการทดลองของ Doron และ Barnea [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 รูปแบบการไหลและการกระจายของอนุภาคของแข็งในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนท่อ [4]

รูปแบบการไหลจะมี 3 รูปแบบคือ ในช่วงแรกที่อัตราการไหลต่ำการไหลจะเป็นการไหลแบบแยกชั้นโดยชั้นล่างสุดไม่มีการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.12(a) เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ลักษณะการไหลจะกลายเป็นการไหลแบบแยกชั้น รูปที่ 2.12(b) และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 m/s การไหลจะกลายเป็นการไหลแบบเซทเทอโรจีเนียสหรือการไหลแบบกระจายตัวโดยอนุภาคของแข็งจะกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอทั่วอนุภาคของเหลว รูปที่ 2.12(c) ระดับความสูงของกองอนุภาคของแข็งจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

Doron และ Barnea [5] ได้ทำการศึกษารูปแบบการไหลในท่อของของไหลผสมระหว่างของแข็ง-ของเหลว และได้เสนอสมการสำหรับการหาความเร็วการไหลขั้นต่ำที่จะทำให้เกิดการกองของอนุภาคที่ผิวท่อ (bed) ซึ่ง ความเร็วเบด (U_{bc}) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.3

$$U_{bc} = \sqrt{\frac{1.56(\rho_s - \rho_l) g d_p \left[\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{2} C_{mb} \left(\frac{y_{mb}}{d_p} - 1\right) \right]}{\rho_l C_D}} \tag{2.3}$$

เมื่อ ρ_s คือ ความหนาแน่นของของแข็ง

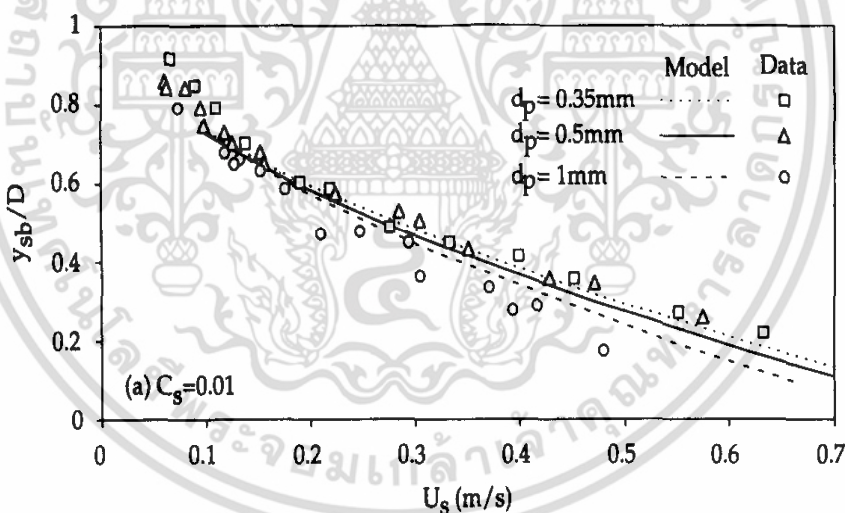
ρ_l คือ ความหนาแน่นของของเหลว

d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

C_{mb} คือ อัตราส่วนผสมของของแข็ง

y_{mb} คือ ความสูงของเบด

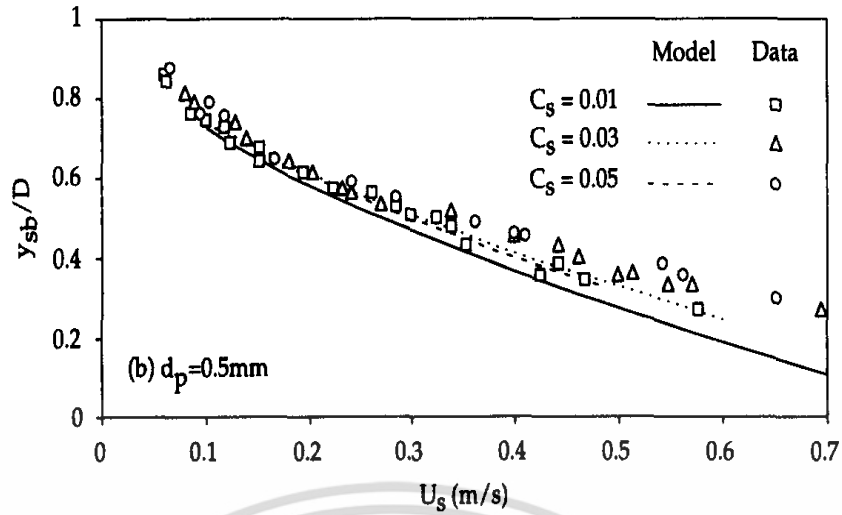
C_D คือ สัมประสิทธิ์ของแรงฉุด



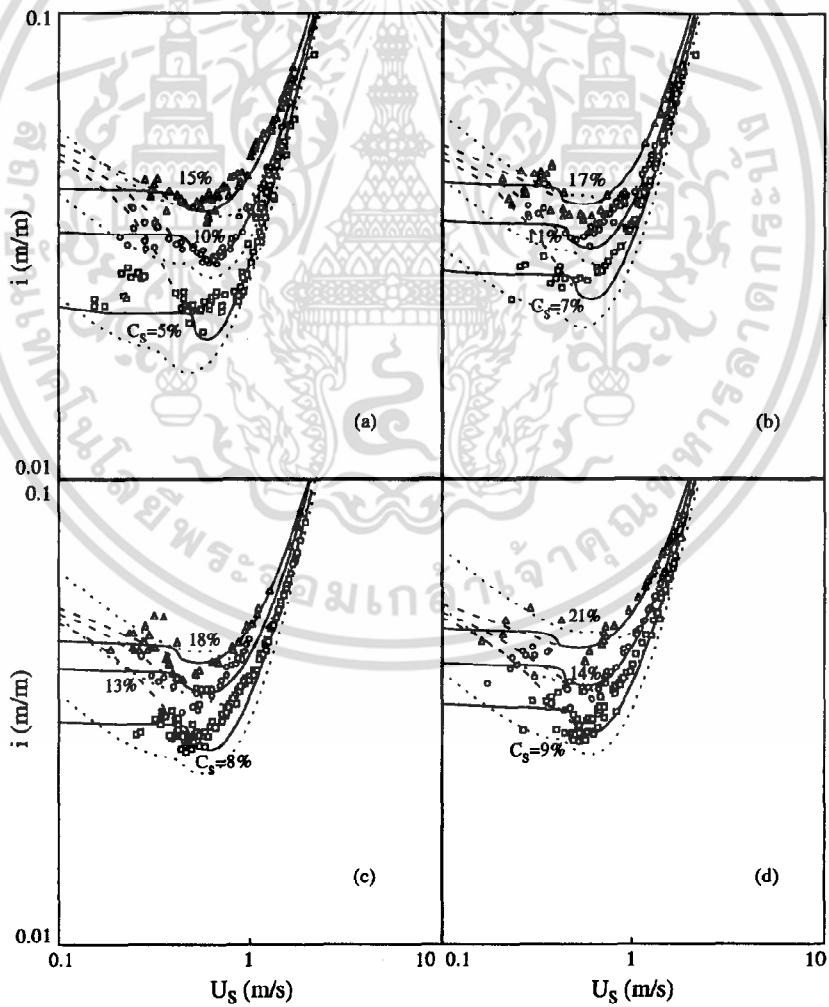
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็ว โดยเปรียบเทียบที่ขนาดของอนุภาคของแข็งที่ขนาดต่างๆ [5]

รูปที่ 2.13 และ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของขนาดอนุภาค (d_p) และอัตราส่วนผสม (C_s) ที่มีผลต่อชั้นความสูงของการกองของอนุภาคที่ผิวท่อ (bed height, y_{sb}) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D) พบว่า ระดับความสูงของเบดจะลดลงเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เล็กจะทำให้ก่อตัวเป็นชั้นเบดได้สูงกว่าขนาดอนุภาคของแข็งที่มี

ขนาดใหญ่และอัตราส่วนผสมของของแข็งที่มากก็จะยิ่งทำให้ความสูงเบดเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็ว โดยเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมของอนุภาคของแข็งที่ขนาดต่างๆ [5]



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วของของไหลผสมที่

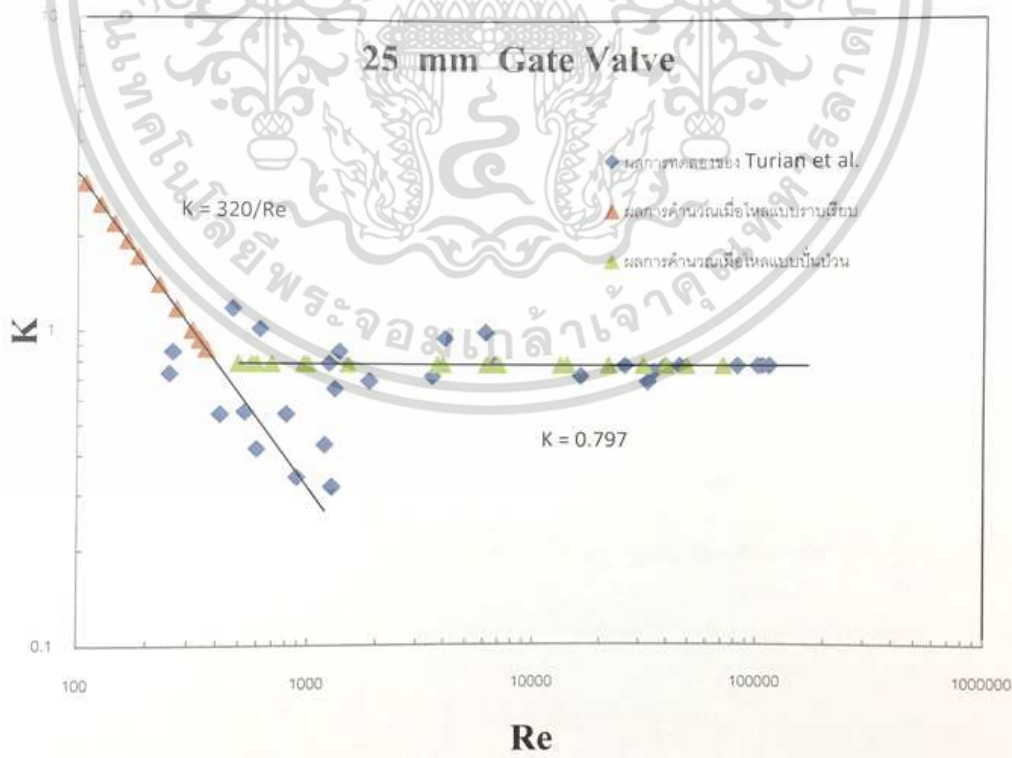
อัตราส่วนผสมต่างๆ ($\rho_s = 1240\text{kg/m}^3, D = 50\text{mm}, d_p = 3\text{mm}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.15 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบบทของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสีย รูป 2.15a เปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสม 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ รูป 2.15b เปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสม 7 11 และ 17 เปอร์เซ็นต์ รูป 2.15c เปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสม 8 13 และ 18 เปอร์เซ็นต์ รูป 2.15d เปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสม 9 14 และ 21 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าความดันสูญเสีย [5] จะคงที่ในช่วงแรกและลดลงเล็กน้อยในช่วงความเร็วต่ำ (น้อยกว่า 1 m/s) หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความเร็วมากกว่า 1 m/s

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ

Nuampiem [6] ได้นำเสนอผลการทดสอบคุณสมบัติของของไหลนอนนิวโทเนียน และคำนวณหาค่าตัวประกอบเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสียผ่านท่อวาล์วชนิดต่างๆ โดยการทดสอบของไหลนอนนิวโทเนียน 3 ชนิด ได้แก่ นมข้นหวาน ซอสมะเขือเทศ และโคลนหมักผงงาดำ เมื่อของไหลไหลผ่านท่อและวาล์ว โดยคำนวณด้วยวิธีการเขียนโปรแกรมแมทแลบคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเสียดทาน ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียและค่าความเร็วการไหลเทียบกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ จากผลการคำนวณพบว่าเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าลดลง โดยของไหลที่มีค่าตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุดคือ นมข้นหวาน เนื่องจากมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลมากที่สุด

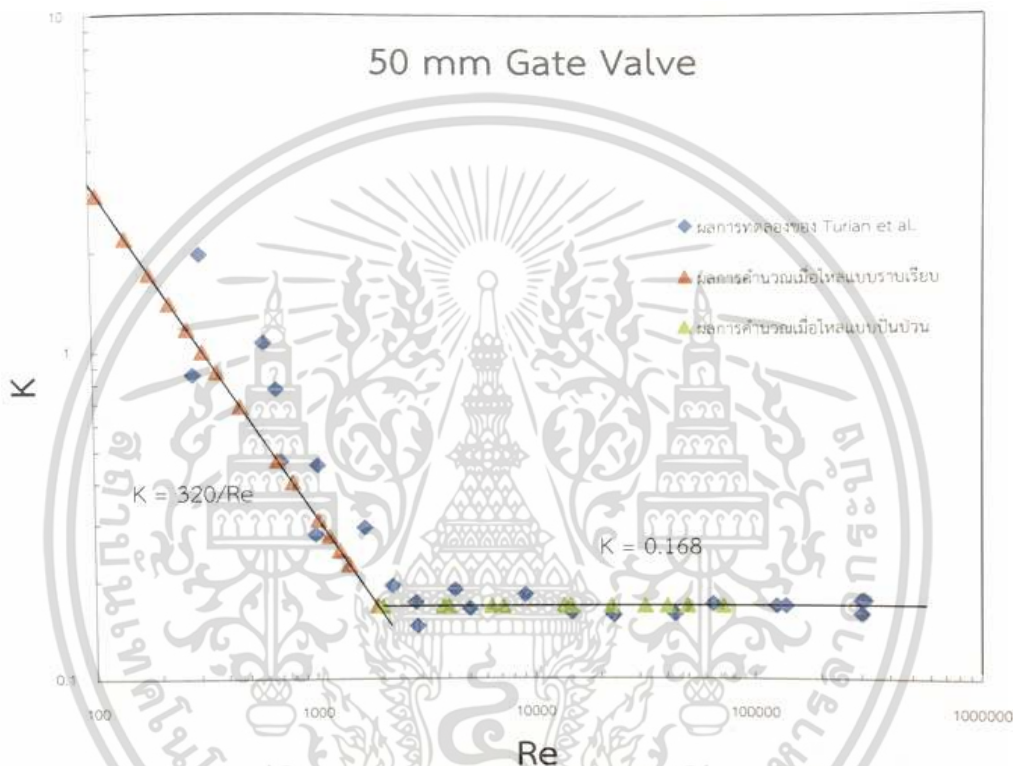


รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของ

ของไหลนอนนิวโทเนียนที่ไหลผ่านประตูน้ำขนาด 25 mm [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวันเวสสำหรับกิจกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

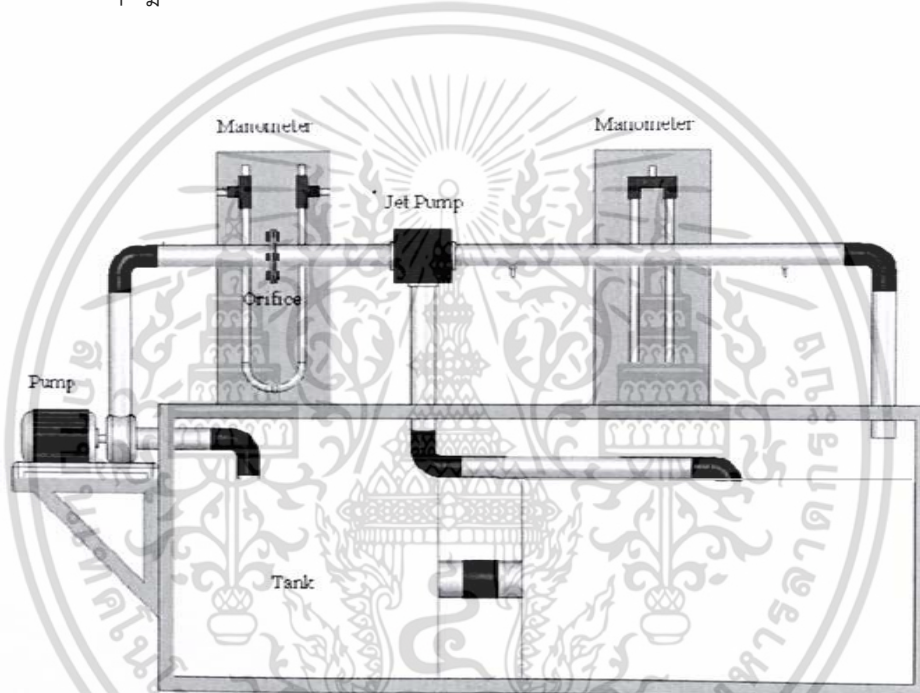
ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลนอนนิวโทเนียนทั้ง 3 ชนิดเมื่อไหลผ่านประตูน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ดังรูปที่ 2.16 พบว่า เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าลดลงจนถึงค่าเลขเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 402 ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานจะมีค่าคงที่และเมื่อเปลี่ยนประตูน้ำเป็นขนาด 50 mm ดังรูปที่ 2.17 เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าลดลงเช่นกัน แต่เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 1905 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าคงที่



รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลนอนนิวโทเนียนที่ไหลผ่านประตูน้ำขนาด 50 mm [6]

Prabkeao และ Jaikuson [7] ได้ทำการศึกษาการไหลของไหลผสมระหว่างน้ำกับเม็ดทรายที่ไหลในท่อกลมวางในแนวราบดังรูปที่ 2.18 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการทางทฤษฎี โดยศึกษาผลของการเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำและทรายที่อัตราส่วนผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดทรายที่ 0.15 0.45 0.90 และ 1.80 mm จากผลการทดลองพบว่าทุกการเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดทรายและอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดทรายจะส่งผลให้ค่าความดันสูญเสียและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในท่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 100,000 เมื่อของไหลผสมไหลผ่านท่อที่อัตราส่วนผสม 5 เปอร์เซ็นต์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดทรายขนาดเล็ก สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียได้ 0.89 จากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียได้ 1.43 เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดทรายให้ใหญ่ขึ้น ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 484,000 โดยใช้ อัตราส่วนผสม 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียได้เป็น 0.641 และ หากเพิ่มอัตราส่วนผสมเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็น 0.72 ในส่วนของผลการคำนวณ จากทฤษฎี พบว่าที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 148,000 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดทรายขนาดเล็ก อัตราส่วนผสม 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียได้เท่ากับ 1.04 ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการทดลอง



รูปที่ 2.18 การติดตั้งชุดทดลองของ Prabkeao และ Jaikuson [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีการไหลของของไหลผสม

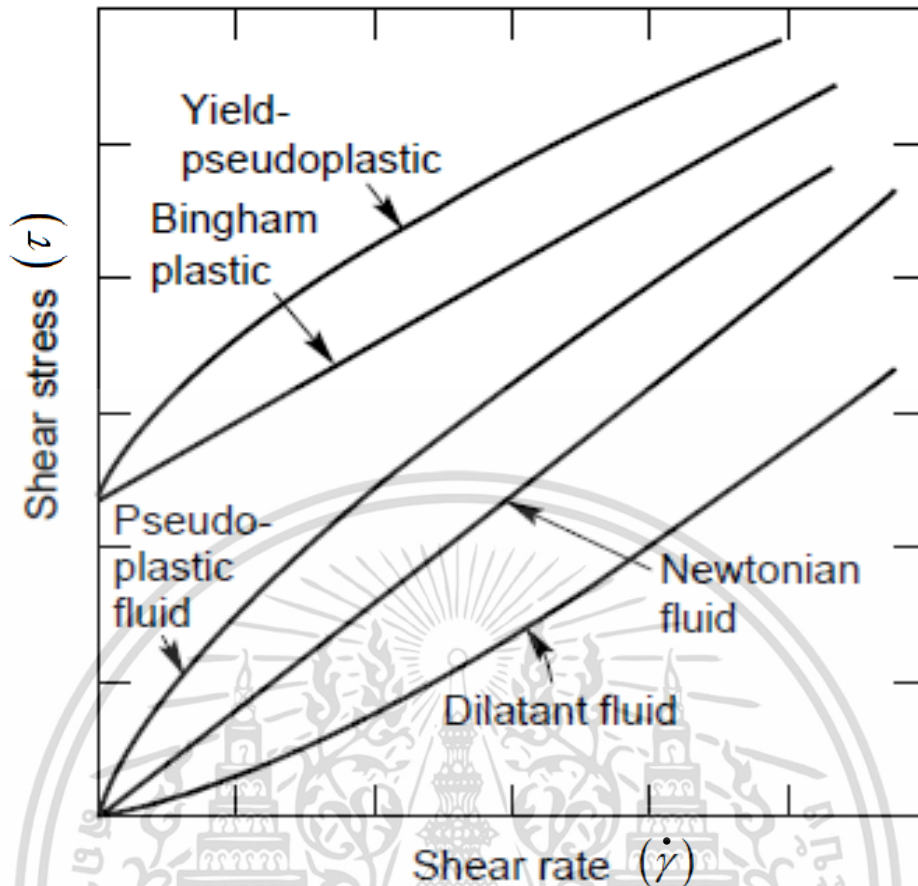
บทนี้เป็นเนื้อหาของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งสามารถแบ่งเนื้อหาออกได้เป็นสองส่วนดังนี้ ส่วนแรกเป็นเนื้อหาเกี่ยวกับคำจำกัดความของสสารและการจำแนก นิยามของของไหลและนิยามของของไหลผสม ส่วนต่อมาแสดงทฤษฎีของการไหลภายในท่อ ทฤษฎีการสูญเสียพลังงานของของไหลเมื่อมีการไหลผ่านท่อที่วางในรูปแบบลักษณะต่างๆซึ่งรายละเอียดต่างๆของทฤษฎีจะกล่าวในลำดับถัดไป

3.1 นิยามของของไหล

ของไหล (Fluids) คือ สสารที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างต่อเนื่องเมื่อถูกกระทำด้วยแรงเค้นเฉือน เมื่อใดที่มีแรงเค้นเฉือนมากกระทำของไหลจะเกิดการขยับตัวและเปลี่ยนรูปร่างไป ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปร่างมวลของของไหลจะมีผลต่อชั้นของของไหลที่เลื่อนไหลไปบนของไหลชั้นอื่น จนได้รูปร่างใหม่ ของไหลสามารถเกิดการเปลี่ยนรูปร่างได้โดยจะเกิดความเค้นเฉือน (Shear Stress, τ) ขึ้นระหว่างชั้นของของไหล ขนาดความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นอยู่กับความหนืด (Viscosity, μ) ของของไหลและอัตราของการเลื่อนไหลหรืออัตราการเฉือน (Shear rate, $\dot{\gamma}$) แต่เมื่อของไหลหยุดการเปลี่ยนรูปร่างแล้วความเค้นเฉือนทั้งหมดจะหายไป ดังนั้น ของไหลเมื่ออยู่ในสมดุลจึงปราศจากความเค้นเฉือน ที่อุณหภูมิ และความดันใดๆ ของไหลมีความหนาแน่นไม่คงตัว

3.2 การแบ่งประเภทพฤติกรรมของการไหล

การจำแนกลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ใหญ่ ๆ ในกรณีที่ความหนืดมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการเฉือนเราเรียกของไหลชนิดนี้ว่าเป็นของไหลนิวโตเนียน (Newtonian) ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งอัตราการเฉือนมีค่าคงที่ ส่วนกรณีที่ความหนืดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอัตราการเฉือน เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่าเป็นของไหลชนิดนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluids) ซึ่งมีอยู่หลายชนิด หากความหนืดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่า “เชียร์-ทินนิง” (Shear-thinning) หรือ “ซูโดพลาสติก” (Pseudoplastic) และ ถ้าของไหลชนิดนี้มีค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น (Yield stress) เราจะเรียกว่า “ยิวซูโดพลาสติก” (Yield Pseudoplastic) หรือ “พลาสติก” (Plastic) ส่วนของไหลที่ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่า “เชียร์-ทิกเคนนิง” (Shear-thickening) หรือ “ดิลาแทนต์” (Dilatant) นอกจากนี้ยังมีของไหลที่มีลักษณะคล้ายของไหลนิวโตเนียน (Newtonian) แต่จะต้องมีค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น (Yield stress) เรียกว่า “บิงแฮมพลาสติก” (Bingham Plastic) ดังแสดงในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) กับ อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนเทียบกับเวลา ($\dot{\gamma}$) สำหรับของไหลประเภทนิวโตเนียนและนอน-นิวโตเนียน [10]

3.3 ของไหลผสม

ของไหลผสมหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สเลอรี (Slurry) คือ ของเหลวที่มีอนุภาคของของแข็งขนาดเล็กผสมอยู่ ซึ่งเป็นสารเนื้อผสมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้สามารถมองเห็นส่วนผสมได้ชัดเจนง่ายต่อการแยกออก เมื่อทิ้งไว้จะตกตะกอนและสามารถแยกสารเนื้อผสมออกมาได้โดยการกรอง สารเนื้อผสมบางชนิดจะมองเห็นอนุภาคของแข็งชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดลอยกระจายอยู่ในของเหลวเป็นตุ่มกลาง ตัวอย่างเช่น น้ำแป้ง น้ำโคลน ซีเมนต์ผสมน้ำ ซึ่งมีลักษณะเหลวข้น สเลอรีพบในงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมก่อสร้าง ฯลฯ

3.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหลผสม

คุณลักษณะเฉพาะของของไหลผสม ที่สังเกตได้จากลักษณะภายนอกที่ผสมของของแข็งและของเหลวที่ผสมกัน จะแบ่งลักษณะเฉพาะได้คือ

1. ของผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) คือ ส่วนผสมของอนุภาคของของแข็งและของเหลวซึ่งของแข็งจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในของเหลวแสดงดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) [18]

2. ของผสมที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) คือส่วนผสมของอนุภาคของของแข็งและของเหลวซึ่งของแข็งจะกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอภายในของเหลวและมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนที่ส่วนล่างของท่อส่งถ่ายของไหลผสมเมื่อความเร็วมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าความเร็ววิกฤตแสดงดังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ของผสมที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) [19]

และยังมีสมบัติทางกายภาพของของแข็งและของเหลวเมื่อผสมกัน ได้แก่ ความหนาแน่นและค่าความหนืดของของไหลผสม ซึ่งถือเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบที่ใช้ในการส่งถ่ายของไหลผสม

3.3.2 ความหนาแน่นของของไหลผสม

ความหนาแน่นของของไหลผสมประกอบด้วยฟังก์ชันของความหนาแน่นของของไหล ความหนาแน่นของของแข็ง อัตราส่วนผสมโดยปริมาตรของของแข็ง โดยที่ความหนาแน่นสามารถหาได้จากวิธีการทดลองเพื่อความแม่นยำที่มากยิ่งขึ้น อนุภาคของของแข็งที่มีขนาดเล็กมากมักจะมีอากาศจับอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์หรือเนื้อหาในเว็บไซต์นี้ถูกใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อผสมในของเหลว ในการทดลองหาค่าความหนาแน่นจึงต้องนำส่วนของอากาศที่จับอยู่ออกหรือมีการเพิ่มจำนวนของอนุภาคที่เปียกเข้าไปเพื่อความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ขนาดและรูปร่างของอนุภาคของแข็งก็มีผลต่อความหนาแน่นเช่นกัน ในกรณีของผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียว ค่าความหนาแน่นที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากส่วนผสมที่เป็นของแข็งมีการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอและอาจมีแยกกองอยู่ที่บริเวณฐานของท่อ (Bed) การหาความหนาแน่นที่เหมาะสมแก่การใช้งานจึงมีการตรวจสอบกลับด้วยสมการที่ 3.1 [11]

$$\rho_m = \frac{100}{C_w / \rho_s + (100 - C_w) / \rho_l} \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ_m คือ ค่าความหนาแน่นของของไหลผสม

ρ_l คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว

ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของของแข็ง

C_w คือ เปอร์เซ็นต์ของของแข็งโดยน้ำหนัก

โดยทั่วไปการไหลในท่อมักเกี่ยวข้องกับการไหลเชิงปริมาตร ดังนั้น อัตราส่วนผสมเชิงปริมาตรสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของของแข็งโดยน้ำหนัก [11] โดยที่เปอร์เซ็นต์ของของแข็งเชิงปริมาตร (C_v) สามารถหาได้จากสมการ 3.2

$$C_v = \frac{C_w \rho_m}{\rho_s} = \frac{100 C_w / \rho_s}{C_w / \rho_s + (100 - C_w) / \rho_l} \quad (3.2)$$

เปอร์เซ็นต์ของแข็งโดยน้ำหนัก (C_w) สามารถหาได้จากสมการ 3.3

$$C_w = \frac{C_v \rho_s}{\rho_m} = \frac{C_v \rho_s}{C_v \rho_s + (100 - C_v)} \quad (3.3)$$

3.3.3 ความหนืดของของไหลผสม

ของไหลเมื่อมีการเคลื่อนที่ แต่ละโมเลกุลของของไหลจะมีการเคลื่อนที่ชนกันไปมาตลอดเวลาด้วยทิศทางที่ไม่แน่นอน ซึ่งจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของของไหล หรือการเคลื่อนที่ของวัตถุในของไหลทั้งระบบช้าลง เกิดความหนืดขึ้นในของไหล ซึ่งค่าที่บ่งชี้ถึงคุณสมบัติต้านทานการไหลในตัว ของไหล ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากการกระทำของความเค้นเฉือนหรือความเค้นภายนอก ความหนืดนี้อธิบายถึงความสามารถในการต้านทานการไหลภายในตัวของไหล และอาจจะถูกพิจารณาให้เป็นตัวชี้วัดความเสียดทานของของไหลได้

และในกรณีการไหลของของไหลผสม ผลกระทบที่สำคัญของการที่อนุภาคของแข็งที่ผสมของเหลวก็คือความหนืดที่เปลี่ยนไป จะพิจารณาความหนืดพลวัตของของไหล (Dynamic

Viscosity) หรือ ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity) ที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากเปอร์เซ็นต์ของของแข็งโดยปริมาตร

3.3.3.1 ค่าความหนืดกรณีอัตราส่วนผสมของของแข็งน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์

$$\mu_m = \mu_l [1 + 2.5c_v] \quad (3.4)$$

เมื่อ μ_m คือ ค่าความหนืดของของไหลผสม

μ_l คือ ค่าความหนืดของของเหลว

3.3.3.2 ค่าความหนืดกรณีอัตราส่วนผสมของของแข็งน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

ในปี ค.ศ. 1965 Thomas [11] ได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ที่ 3.5 ดังต่อไปนี้

$$\mu_m = \mu_l [1 + K_1c_v + K_2c_v^2 + K_3c_v^3 + K_4c_v^4 + \dots] \quad (3.5)$$

โดยที่ K_1, K_2, K_3, K_4 คือค่าคงที่

$K_1=2.5$ K_2 มีค่าระหว่าง 10.05-14.1 ตาม Guth and Simha [11] สำหรับ K_3 และ K_4 เป็นเรื่องยุ่งยากที่จะคาดการณ์และมีค่าน้อยมากจึงทำให้ไม่มีผลมากนักต่อค่าความหนืดที่อัตราส่วนผสมน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณจึงไม่นำมาคิดในกรณีที่อัตราส่วนผสมน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ สมการ 3.5 จะลดรูปเหลือดังสมการ 3.6

$$\mu_m = \mu_l [1 + K_1c_v + K_2c_v^2] \quad (3.6)$$

3.3.3.3 ค่าความหนืดกรณีอัตราส่วนผสมของของแข็งสูงๆ

ที่อัตราส่วนผสมของของแข็งสูง Thomas [11] ได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์สำหรับหาค่าความหนืดดังสมการที่ 3.7

$$\mu_m = \mu_l [1 + 2.5c_v + 10.05c_v^2 + 0.00273e^{(16.6c_v)}] \quad (3.7)$$

สมการความสัมพันธ์ค่าความหนืดของของไหลผสมนี้ได้ถูกนำไปใช้กับของไหลผสมและเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์กรณีการทดลองของนักวิจัยอีกหลายท่าน เช่น ในงานของ Chong [12] มีการทดสอบค่าความหนืดของของไหลผสมที่มีส่วนผสมของอนุภาคของแข็งส่วนใหญ่ที่เป็นทรงกลม ได้เสนอดังสมการที่ 3.8 สำหรับที่เปอร์เซ็นต์อัตราส่วนผสมของของแข็งมากกว่า 0.4

$$\mu_m = \mu_l \left[1 + 0.75 \frac{C_v / C_{v_{\max}}}{(1 - C_v / C_{v_{\max}})} \right] \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 รูปแบบการไหลของของไหลผสมภายในท่อ

การไหลของของไหลผสมในท่อขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพระหว่างของแข็งกับของเหลว รวมทั้งคุณสมบัติทางกายภาพระหว่างของไหลผสมกับท่อ รูปแบบการไหลของของไหลผสมจะเป็นรูปแบบใดนั้น ขึ้นอยู่กับ ความเร็วการไหล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ขนาดของอนุภาคกับการกระจายตัวของของแข็ง รูปทรงของของแข็ง อัตราส่วนผสมและคุณสมบัติของของเหลวกับของแข็ง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ซึ่งสามารถพบได้สำหรับการไหลในท่อที่วางในแนวระดับ หรือ ใกล้เคียงกับแนวระดับ [12]

1. การไหลแบบโฮโมจีเนียส (Homogeneous flow)

การไหลแบบโฮโมจีเนียส สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ส่วนผสมของอนุภาคของของแข็งมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในของเหลวภายในท่อ มักพบในของไหลผสมที่มีอัตราส่วนผสมสูงและมีขนาดของอนุภาคขนาดเล็กมาก ของไหลผสมที่มีคุณสมบัติการไหลที่เป็นเนื้อเดียวกันจะไม่มีกองที่ผิวท่อในแนวระดับเมื่อมีการไหล มักพบในของไหลผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน ตัวอย่างเช่น ทอริยมออกไซด์ น้ำแป้งข้าว น้ำโคลน ซอสมะเขือเทศ ฯลฯ

2. การไหลแบบเฮเทอโรจีเนียส (Heterogeneous flow)

การไหลแบบเฮเทอโรจีเนียส เกิดขึ้นเมื่อของแข็งและของเหลวที่ผสมไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) คือส่วนผสมของอนุภาคของของแข็งและของเหลวซึ่งของแข็งจะกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอภายในของเหลวภายในท่อ เนื่องจากมีอนุภาคของของแข็งขนาดใหญ่ หรือมีความถ่วงจำเพาะสูง เมื่อมีความเร็วการไหลน้อยมากจะมีการตกตะกอนที่ส่วนล่างของท่อส่งถ่ายของไหลผสม ตัวอย่างเช่น น้ำผสมทราย น้ำผสมถ่านหิน ฯลฯ

3. การไหลแบบแยกชั้น (Flow with a moving bed)

พฤติกรรมของการไหลลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของการไหลอยู่ในระดับต่ำหรือเท่ากับค่าความเร็ววิกฤต และ อนุภาคของแข็งที่ผสมมีขนาดโต ทำให้เกิดเป็นชั้นการไหล อนุภาคที่อยู่ด้านบนจะไหลก่อนบริเวณชั้นล่าง ดังนั้นบริเวณชั้นบนของชั้นอนุภาคจึงมีการเคลื่อนตัวได้เร็วกว่าชั้นล่างในท่อแนวนอน ถ้าส่วนผสมประกอบด้วยขนาดของอนุภาคที่หลากหลายขนาดที่แตกต่างกันและค่าความเร็วการไหลที่เหมาะสมแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคของแข็ง อนุภาคขนาดใหญ่ที่มีค่าความเร็ววิกฤตสูงที่สุดจะตกตะกอนอยู่ที่ชั้นล่างสุด อนุภาคที่มีค่าความเร็ววิกฤตในระดับปานกลางจะอยู่ชั้นถัดไปในครึ่งล่างของท่อและเคลื่อนที่ไป ในขณะที่อนุภาคที่มีค่าความเร็ววิกฤตต่ำสุดจะเคลื่อนที่ไปก่อนโดยกระจายอยู่ในชั้นบนสุดภายในท่อ

4. การไหลแบบแยกชั้นโดยชั้นล่างสุดไม่มีการเคลื่อนที่ (Flow with a stationary bed)

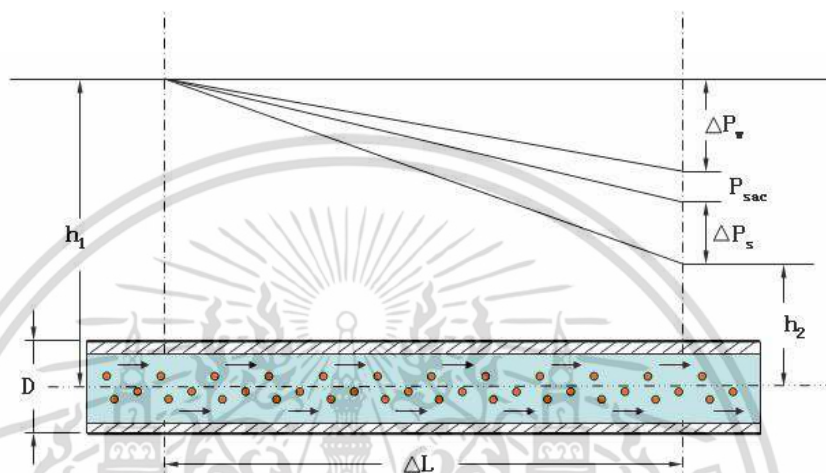
พฤติกรรมของการไหลลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อความเร็วการไหลอยู่ในระดับที่ต่ำมาก อนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่จะกองอยู่ที่ผิวท่อชั้นล่างและไม่มีการเคลื่อนที่ทำให้ความเร็วการไหลและพื้นที่การไหลลดน้อยลงเนื่องจากการกองของอนุภาคของแข็งทำให้ต้องใช้แรงดันที่สูงขึ้นในการขนส่งของไหลผสม

พฤติกรรมของการไหลลักษณะนี้เป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบระบบท่อขนส่งของไหลผสมไม่ยากให้เกิดขึ้น ดังนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงต้องมีการกำหนดความเร็วการไหลให้เหมาะสมกับระบบการขนส่งของไหลผสมชนิดนั้น ตามคุณสมบัติของของไหลผสม

3.4 การวิเคราะห์สมการการไหลในท่อของของไหลผสม

3.4.1 การสูญเสียความดันเมื่อวางท่อในแนวนอน



รูปที่ 3.4 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในท่อแนวนอน

ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในท่อตรงวางในแนวระนาบ โดยปกติถ้าเป็นของเหลวเพียงอย่างเดียว ค่าความดันสูญเสียจะเป็น ΔP_w ตามรูป แต่เมื่อเป็นส่วนผสมระหว่างของแข็งกับของเหลว ค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมจะต้องรวมค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นจากของแข็งไปด้วย (ΔP_s)

$$\Delta P = \Delta P_w + \Delta P_{sac} + \Delta P_s \quad (3.9)$$

สมมติให้ส่วนผสมไหลด้วยความเร็วคงที่ ในช่วงความยาวท่อ ΔL การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมมีค่าน้อยมาก ΔP_{sac} เป็นความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่งซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเฮดระดับมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเฮดอื่นจึงประมาณค่าให้เป็นศูนย์เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณ

$$\Delta P = \Delta P_w + \Delta P_s \quad (3.10)$$

$$h_w = \lambda_w \frac{\Delta L U_m^2}{D 2g}$$

ความดันสูญเสียของของเหลวสามารถหาได้จาก

$$\Delta P_w = \gamma_w h_w = \lambda_w \frac{\Delta L}{D} \frac{\gamma_w}{2g} U_m^2 \quad (3.11)$$

ความดันสูญเสียของของแข็งสามารถหาได้จาก

$$\Delta P_s = \lambda_s \frac{\Delta L}{D} \frac{\gamma_w}{2g} U_m^2 \quad (3.12)$$

เมื่อพิจารณาการสูญเสียความดันของการไหลของของไหลผสม ค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมสามารถหาได้จากค่าความดันสูญเสียของของเหลวรวมกับของแข็ง

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

เมื่อ λ_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของแข็ง

λ_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของน้ำ

ΔL คือ ผลต่างของความยาวท่อ (m)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)

U_m คือ ความเร็วเฉลี่ย (m/s)

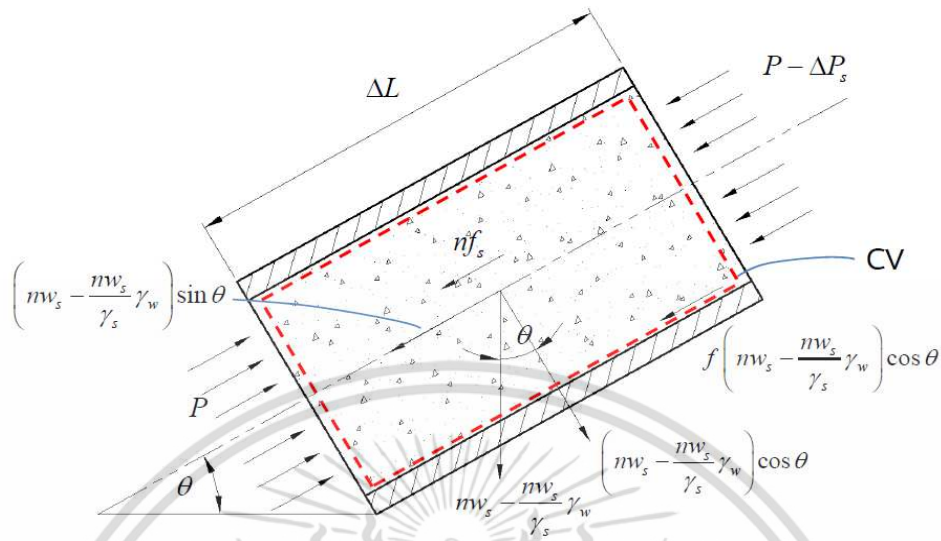
γ_w คือ น้ำหนักจำเพาะของของน้ำ (N/m^3)

$$\Delta P = \lambda \frac{\Delta L}{D} \frac{\gamma_w}{2g} U_m^2 \quad (3.13)$$

อัตราส่วนระหว่างค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมต่อค่าความดันสูญเสียของน้ำ (Pressure drop ratio) หาได้ดังสมการที่ 3.14

$$\alpha = \frac{\Delta P}{\Delta P_w} = \frac{\lambda}{\lambda_w} = 1 + \frac{\lambda_s}{\lambda_w} \quad (3.14)$$

3.4.2 การสูญเสียความดันเมื่อวางท่อลาดชันมุม θ



รูปที่ 3.5 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในท่อลาดชัน

ในกรณีที่ท่อลาดชันมุม θ กับแนวระดับ เพื่อหาค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยจะทำการศึกษาจากการไหลในท่อที่มีความยาวควบคุม จากรูปพิจารณาภาคตัดของท่อที่บริเวณส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ตามความยาว (ΔL) เมื่อ U_m คือความเร็วเฉลี่ย A คือพื้นที่หน้าตัดท่อ f_s คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างของแข็งและของเหลว n คือจำนวนอนุภาคของของแข็งที่ผสมน้ำ พิจารณาแรงกระทำกับปริมาตรควบคุมตามแนวแกนท่อได้

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

$$PA = nf_s + PA - \Delta P_s A$$

$$PA - PA = nf_s - \Delta P_s A$$

$$nf_s - \Delta P_s A = 0$$

$$\Delta P_s = n \frac{f_s}{A} \quad (3.15)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างของแข็งและของเหลว (f_s) หาได้จากสมการ

$$f_s = C \frac{\gamma_s}{2g} (U_m - U_s)^2 a \quad (3.16)$$

เมื่อ a คือ พื้นที่หน้าตัดของอนุภาคของแข็ง (m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอนุภาค

$$C = \frac{k}{Re_s^\varepsilon} \quad (3.17)$$

นำสมการ 3.17 แทนลงในสมการ 3.16 จะได้

$$f_s = \frac{k}{Re_s^\varepsilon} \frac{\gamma_s}{2g} (U_m - U_s)^2 a \quad (3.18)$$

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

$$Re = \frac{U_m D}{\nu}$$

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของอนุภาค

$$Re_s = (U_m - U_s) \frac{d_s \gamma_w}{\mu_s g} = \frac{U_m - U_s}{U_m} \frac{d_s}{D} Re$$

$$Re_s = (1 - \phi) \frac{d_s}{D} Re \quad (3.19)$$

และค่า Re_s จะมีผลต่อค่า k และค่า ε โดยค่า k และ ε สามารถหาได้จากการพิจารณาค่า Re_s โดยค่า k และ ε สามารถหาได้จากการพิจารณาค่า Re_s

เมื่อ $0 < Re_s < 1$

กฎของสโตกส์

$$k = 24, \varepsilon = 1$$

เมื่อ $1 < Re_s < 500$

กฎของอัลเลน

$$k = 10, \varepsilon = \frac{1}{2}$$

เมื่อ $500 < Re_s < 2 \times 10^5$

กฎของนิวตัน

$$k = 0.44, \varepsilon = 0$$

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า Re_s ที่มีผลต่อค่าและค่า k และค่า ε

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

เมื่อพิจารณาสมการของน้ำหนักจะได้ น้ำหนักของเม็ดพลาสติกรวมกับน้ำหนักของน้ำเท่ากับน้ำหนักของทั้งหมด

$$\begin{aligned} \gamma A \Delta L &= n w_s + A \Delta L \gamma_w \\ n w_s + (A \Delta L - \frac{n w_s}{\gamma_s}) \gamma_w &= \gamma A \Delta L \\ n &= (\gamma - \gamma_w) \frac{A \Delta L}{w_s (1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s})} = \frac{\mu_s \gamma_w A \Delta L}{w_s \phi (1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s})} \end{aligned} \quad (3.20)$$

จากสมการที่ 3.15 ค่า ΔP_s จะคลาดเคลื่อนเนื่องจากความเร็วของของไหลที่ส่ง เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค และความเข้มข้นของของแข็งที่ผสม ค่า η จะเป็นตัวคำนวณปรับค่าดังในสมการที่ 3.21

$$\Delta P_s = \eta \cdot n \frac{f_s}{A} \quad (3.21)$$

แทนค่าสมการ 3.18 และ 3.20 ลงในสมการ 3.21 แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\Delta P_s = \left\{ \eta \frac{3k \mu_s (1-\phi)^{2-\varepsilon}}{2R_e^\varepsilon \phi} \left(\frac{D}{d_s} \right)^{1+\varepsilon} \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{1}{\left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)} \right\} \frac{\Delta L}{D} \frac{\gamma_w}{2g} U_m^2 \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความดันสูญเสียที่ได้จากสมการ 3.22 เป็นค่าความดันสูญเสียของของแข็ง (ΔP_s) ในการหาค่าความดันสูญเสียของของไหลผสม (ΔP) เราจะนำค่าความดันสูญเสียของของแข็ง (ΔP_s) แทนลงในสมการ 3.13

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

จะได้

$$\Delta P = \left[\lambda_w + \left\{ \eta \frac{3k\mu_s (1-\phi)^{2-\varepsilon}}{2R_e^\varepsilon} \frac{(D/d_s)^{1+\varepsilon}}{\phi} \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{1}{\left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}\right)} \right\} \right] \frac{\Delta L}{D} \frac{\gamma_w}{2g} U_m^2 \quad (3.23)$$

สัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสม (λ)

$$\lambda = \lambda_w + \left\{ \eta \frac{3k\mu_s (1-\phi)^{2-\varepsilon}}{2R_e^\varepsilon} \frac{(D/d_s)^{1+\varepsilon}}{\phi} \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{1}{\left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}\right)} \right\} \quad (3.24)$$

ค่าอัตราส่วนค่าความดันสูญเสีย ($\frac{\Delta P}{\Delta P_w}$)

$$\alpha = 1 + \eta \frac{3k\mu_s (1-\phi)^{2-\varepsilon}}{2\lambda_w R_e^\varepsilon} \frac{(D/d_s)^{1+\varepsilon}}{\phi} \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{1}{\left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}\right)} \quad (3.25)$$

หาอัตราส่วนระหว่างความเร็วของอนุภาคและความเร็วเฉลี่ยภายใน โดยพิจารณาแรงภายในปริมาตรควบคุมที่เกิดจากส่วนผสมที่เป็นของแข็ง ดังรูปที่ 3.5

แรงที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จาก

$$nf_s = n \frac{w_s (U_m - U_s)^2}{U_t^2} \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right) \quad (3.26)$$

แรงเสียดทานระหว่างผนังท่อและอนุภาคของแข็ง

$$f \left(nw_s - \frac{nw_s}{\gamma_s} \gamma_w \right) \cos \theta \quad (3.27)$$

แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

$$\left(nw_s - \frac{nw_s}{\gamma_s} \gamma_w \right) \sin \theta \quad (3.28)$$

จากรูปที่ 3.5 หาอัตราส่วนระหว่างความเร็วของอนุภาคและความเร็วเฉลี่ยภายใน โดยพิจารณาแรงภายในปริมาตรควบคุมที่เกิดจากส่วนผสมที่เป็นของแข็ง จากสมการที่ 3.26 3.27 และ 3.28 นำมาคิดสมดุลแรงจะได้

$$n \frac{w_s}{g} \frac{dU_s}{dt} = n \frac{w_s (U_m - U_s)^2}{U_t^2} \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right) - f \left(nw_s - \frac{nw_s}{\gamma_s} \gamma_w \right) \cos \theta - \left(nw_s - \frac{nw_s}{\gamma_s} \gamma_w \right) \sin \theta \quad (3.29)$$

เมื่อ $\phi = \frac{U_s}{U_m}$ นำไปแทนค่าในสมการ 3.29 จะได้

$$\frac{1}{\left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)} \frac{U_m}{g} \frac{d\phi}{dt} = (1 - \phi)^2 \left(\frac{U_m}{U_t} \right)^2 - (f \cos \theta + \sin \theta) \quad (3.30)$$

พิจารณาเป็น Steady flow ($\frac{d\phi}{dt} = 0$)

$$(1 - \phi)^2 \left(\frac{U_m}{U_t} \right)^2 - (f \cos \theta + \sin \theta) = 0$$

$$\phi = 1 - \frac{U_t}{U_m} \sqrt{f \cos \theta + \sin \theta} \quad (3.31)$$

ค่าความเร็วสุดท้ายของของแข็ง

$$U_t = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{gd_s}{C} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)} \quad (3.32)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถหาได้จากสมการ

$$f = \left[\frac{0.25}{\left[\log_{10} \left\{ \frac{\varepsilon / D}{3.7} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}} \right\} \right]^2} \right] \quad (3.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาอัตราส่วนน้ำหนัก (Weight ratio)

$$\mu_s = \frac{w_s}{w_w}$$

เมื่อ $C_g = \frac{w_s}{w_s + w_w}$ (C_g เป็นอัตราส่วนผสมของของแข็งต่อของผสมโดยน้ำหนัก)

ดังนั้น
$$\mu_s = \frac{C_g}{1 - C_g} \quad (3.34)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของน้ำหาได้จาก

$$\lambda_w = \frac{1.12}{R_e^{0.35}} \quad (3.35)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การคำนวณค่าความดันสูญเสีย

ของของไหลผสมในท่อด้วยโปรแกรม MATLAB

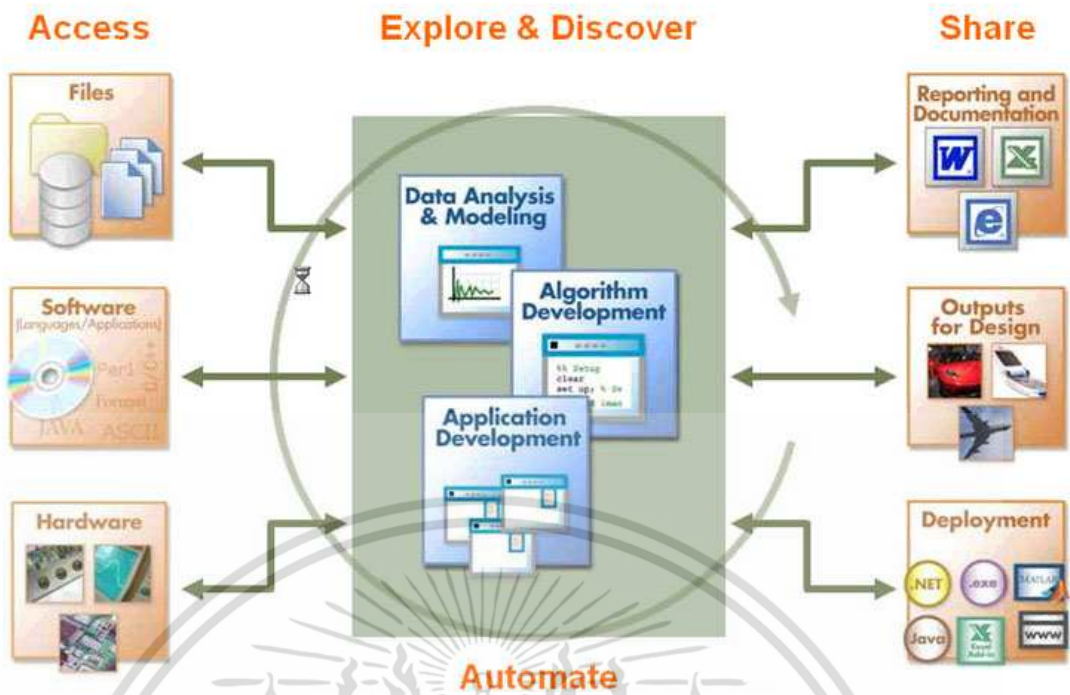
4.1 โปรแกรม MATLAB

MATLAB เป็นโปรแกรมสมรรถนะสูงเพื่อใช้งานทางเทคนิค โปรแกรมนี้ได้รวบรวมการเขียนโปรแกรมและการแสดงผลรวมกันในตัวเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ อยู่ในลักษณะที่ง่ายต่อการใช้งาน ลักษณะของการเขียนสมการในโปรแกรมก็เหมือนสมการคณิตศาสตร์ที่คุ้นเคยกันดีอยู่แล้ว งานที่ใช้ใน MATLAB เช่น การคำนวณทั่วไป การวิเคราะห์ข้อมูลการแสดงผลในรูปแบบกราฟแบบทั่วไป แบบคณิตศาสตร์ วิศวกรรม การนำ MATLAB ไปประยุกต์ใช้งานทำการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) การสื่อสาร (Communication) การประมวลผลภาพและวิดีโอ (Image and Video Processing) ระบบควบคุม (Control System) การวัดและควบคุม (Instruments and Control) การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ (Economic) การคำนวณทางชีววิทยา (Biology) และอื่นๆ MATLAB สามารถสร้างโปรแกรมในลักษณะที่ติดต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิก (GUI) การทำงานสามารถทำได้ทั้งแบบติดต่อดirect (Interactive) คือการเขียนคำสั่งเข้าไปทีละคำสั่ง เพื่อให้ MATLAB ประมวลผลไปเรื่อยๆ หรือสามารถรวมชุดคำสั่งเป็นโปรแกรม (M-file) โดยการรับคำสั่งไปทำการคำนวณและแสดงผลออกมาในรูปแบบต่างๆตามความต้องการของผู้ใช้ได้ สำหรับในมุมมองของการศึกษานั้น MATLAB ถือได้ว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญอันหนึ่งสำหรับนักศึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณ นอกเหนือจากเพื่อการเรียนการสอนในสถาบันการศึกษาแล้ว MATLAB ยังเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในงานวิจัย งานพัฒนาและการวิเคราะห์ของหน่วยงานมากมาย

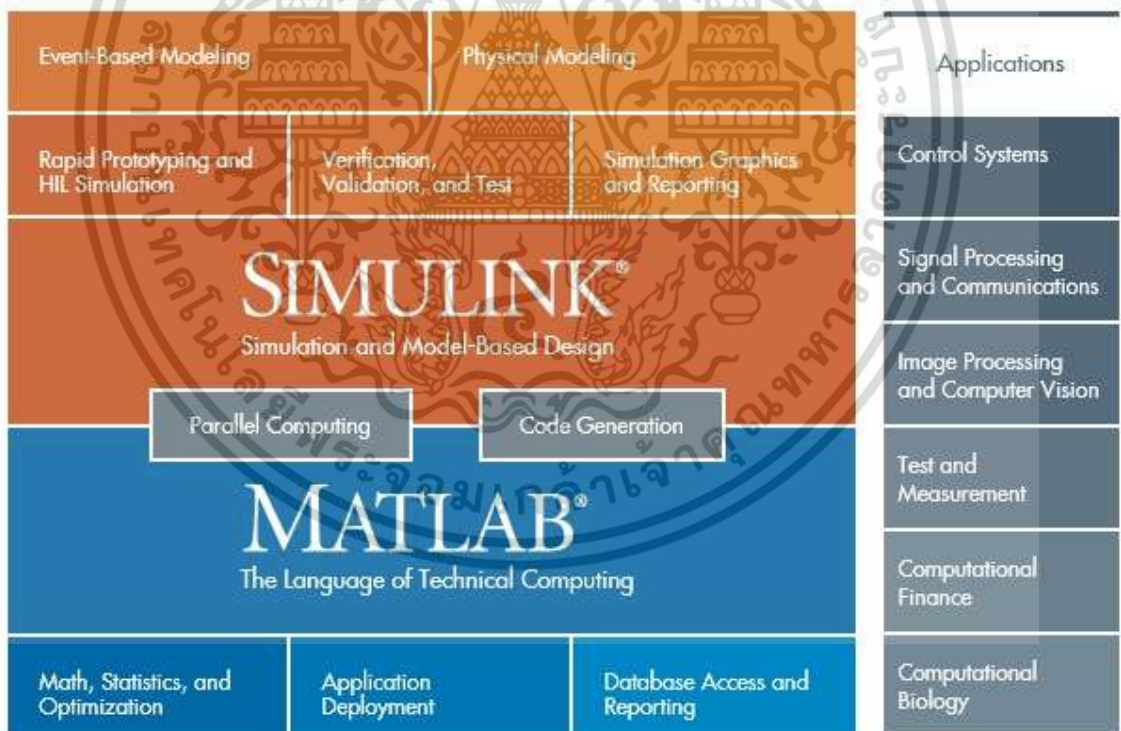


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการแสดงผลในรูปแบบต่างๆด้วยโปรแกรม MATLAB

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

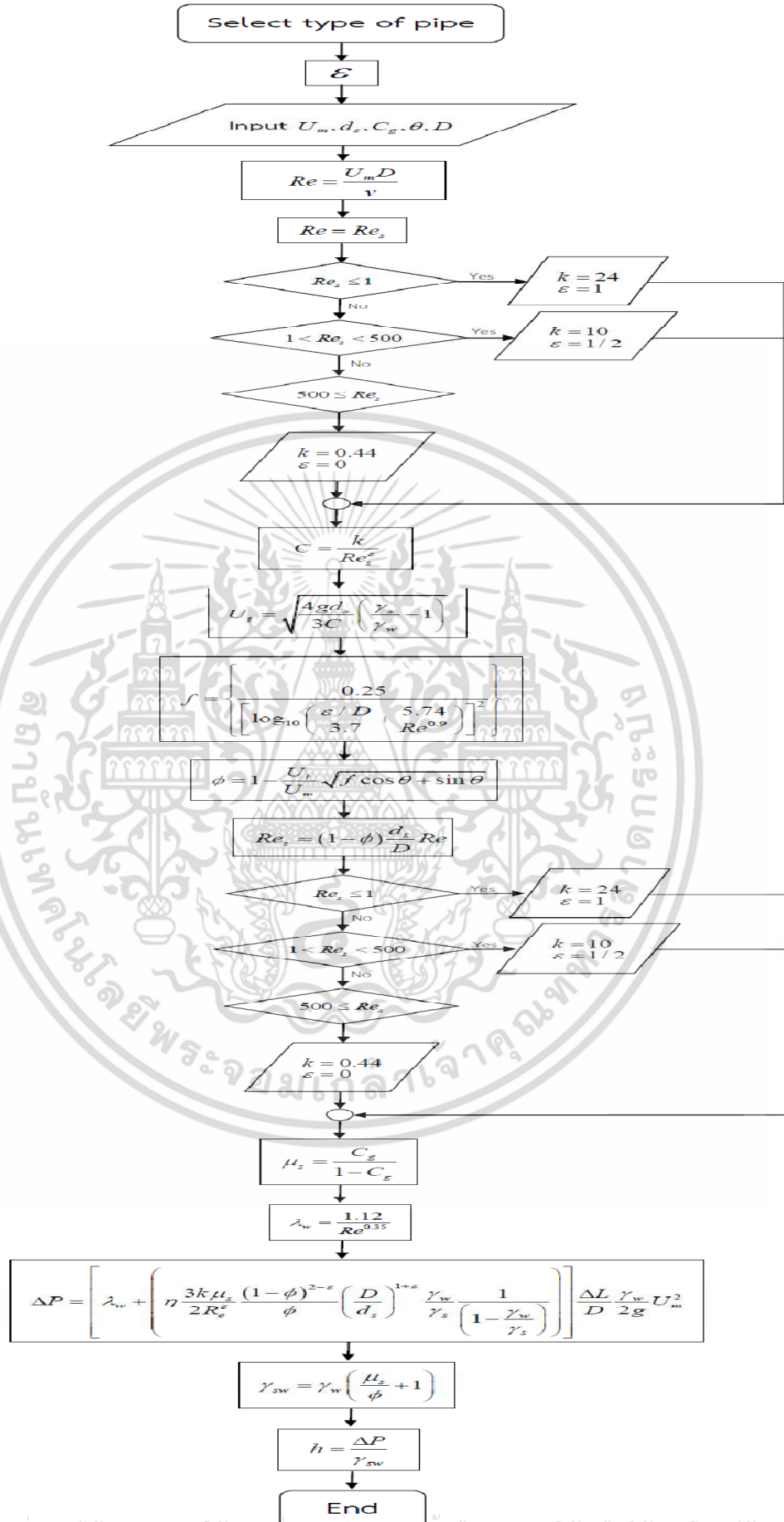


รูปที่ 4.2 ภาพแสดงการคำนวณเชิงเทคนิคด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 4.3 MATLAB สามารถแยกหมวดหมู่ตามลักษณะการใช้งานเพื่อการคำนวณเชิงเทคนิค

รูปที่ 4.1 เป็นรูปตัวอย่างการแสดงผลแบบพื้นฐานของโปรแกรม MATLAB แสดงเป็นรูปภาพ 2 มิติ 3 มิติ รูปที่ 4.2 เป็นแผนผังแสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรม MATLAB เป็นตัวกลางในการรับข้อมูลจาก (Hardware) เครื่องมือวัด หรืออุปกรณ์รับค่า เพื่อนำข้อมูลที่ได้อามาวิเคราะห์และประมวลผลเพื่อนำไปเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

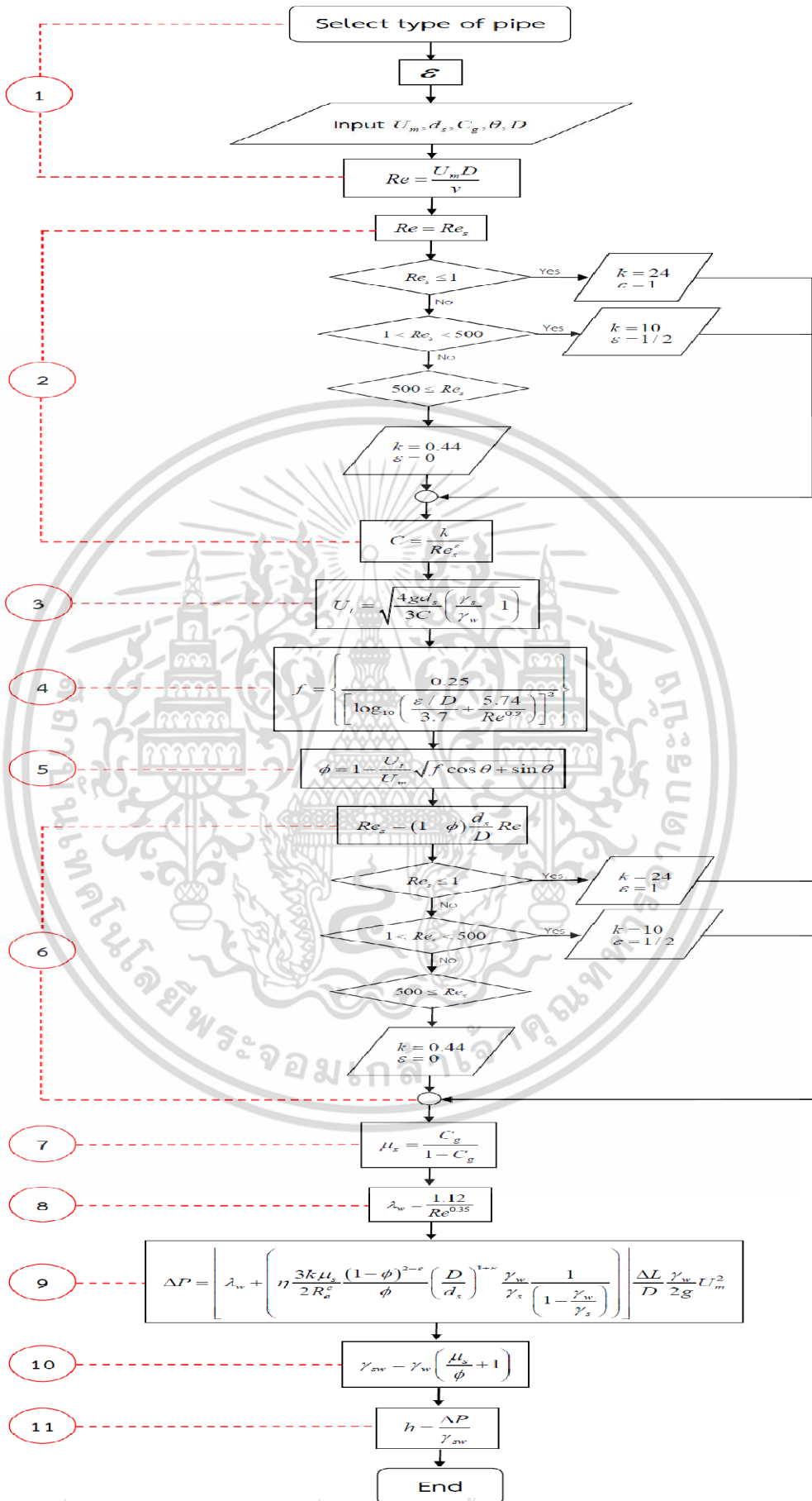


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.5 แผนผังขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

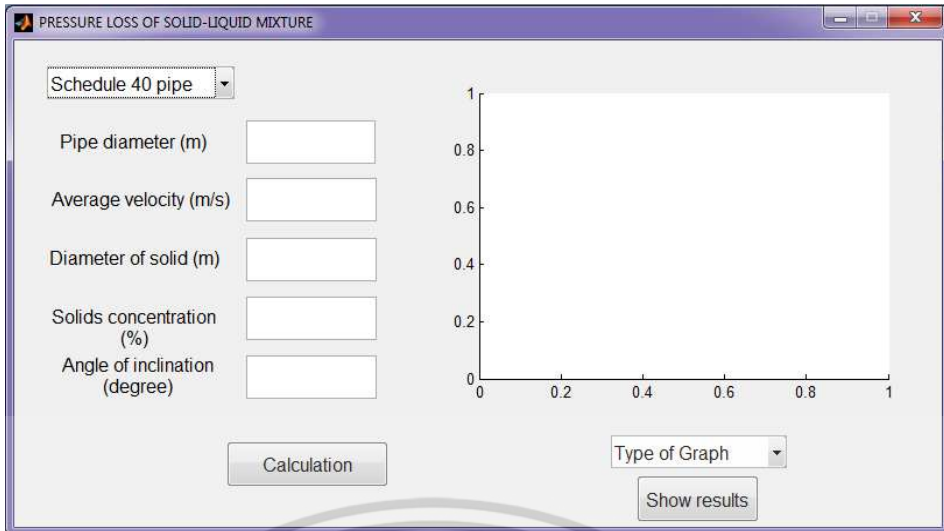
รูปที่ 4.5 เป็นแผนผังขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม และรูปที่ 4.6 เป็นแผนผังหมายเลขขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม โดยมีวิธีการคำนวณ ดังนี้

1. ผู้ใช้งานจะต้องเลือกชนิดของท่อเพื่อกำหนดค่าความหยาบของผิวท่อ (ε) และกรอกค่าตัวแปรหลัก 5 ตัว คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) ความเร็วเฉลี่ย (U_m) ขนาดของอนุภาคของแข็ง (d_s) อัตราส่วนผสม (C_g) และ มุมลาดชันของท่อ (θ) ซึ่งโปรแกรมจะรับค่าตัวแปรและเก็บค่าไว้เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความดันสูญเสียหรือค่าเฮดสูญเสีย ซึ่งในขั้นตอนหมายเลข 1 จะนำไปคำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)
2. ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) ที่ได้จากการคำนวณจะนำไปใช้เลือกค่า k และ ε เพื่อนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอนุภาค (C) ตามขั้นตอนหมายเลข 2
3. เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอนุภาค (C) ก็จะไปคำนวณหาค่าความเร็วสุดท้ายของของแข็ง (U_t) ในขั้นตอนหมายเลข 3
4. ในขั้นตอนหมายเลข 4 จะนำค่าความหยาบของผิวท่อ (ε) ที่ได้จากการเลือกชนิดของท่อ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) มาคำนวณหาค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อ (f)
5. นำค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อ (f) และค่าความเร็วสุดท้ายของของแข็ง (U_t) ที่คำนวณในขั้นตอนหมายเลข 3 และ 4 มาคำนวณหาค่าอัตราส่วนความเร็ว (ϕ)
6. ค่าอัตราส่วนความเร็วที่ได้จากขั้นตอนหมายเลข 5 จะนำไปคำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของแข็ง (Re_s) ในขั้นตอนหมายเลข 6 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของแข็ง (Re_s) ที่ได้จะนำไปเลือกค่า k และ ε ใหม่ และเก็บค่าตัวแปรไว้
7. ขั้นตอนหมายเลข 7 เป็นการคำนวณหาอัตราส่วนน้ำหนัก (μ_s) จากค่าอัตราส่วนผสมระหว่างของแข็งและของเหลว (C_g) ที่ได้จากการกรอกค่าไว้ในขั้นตอนหมายเลข 1 เมื่อได้ค่าอัตราส่วนน้ำหนัก (μ_s) ตัวโปรแกรมจะเก็บค่าผลลัพธ์ที่คำนวณได้ไว้
8. ขั้นตอนหมายเลข 8 เป็นการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของน้ำ (λ_w) โดยคำนวณจากค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) โดยโปรแกรมจะเก็บค่าผลลัพธ์ที่ได้ไว้
9. ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณและเก็บค่าไว้ในขั้นตอนที่ 5 6 7 และ 8 จะนำมาคำนวณในขั้นตอนหมายเลข 9 เพื่อหาค่าความดันสูญเสีย (ΔP)
10. ค่าน้ำหนักจำเพาะของของไหลผสมจะคำนวณได้จากสมการในขั้นตอนหมายเลข 9 โดยคำนวณหาได้จากอัตราส่วนน้ำหนัก (μ_s) ที่ได้จากขั้นตอนหมายเลข 7 และ ค่าอัตราส่วนความเร็ว (ϕ) ที่ได้จากขั้นตอนหมายเลข 5 เพื่อนำไปใช้หาค่าเฮดสูญเสียในขั้นตอนสุดท้าย
11. ในขั้นตอนหมายเลข 11 นำค่าความดันสูญเสียและค่าน้ำหนักจำเพาะของของไหลผสมที่ได้จากขั้นตอนหมายเลข 9 และ 10 มาใช้ในการคำนวณ เมื่อได้ผลลัพธ์เป็นค่าเฮดสูญเสียตัวโปรแกรมจะทำการเก็บค่าที่ได้จากการคำนวณไปแสดงผลในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ค่าความดันสูญเสียกับมุมลาดชันของท่อ และค่าเฮดสูญเสียกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ตามรูปแบบที่ผู้ใช้งานได้เลือกไว้

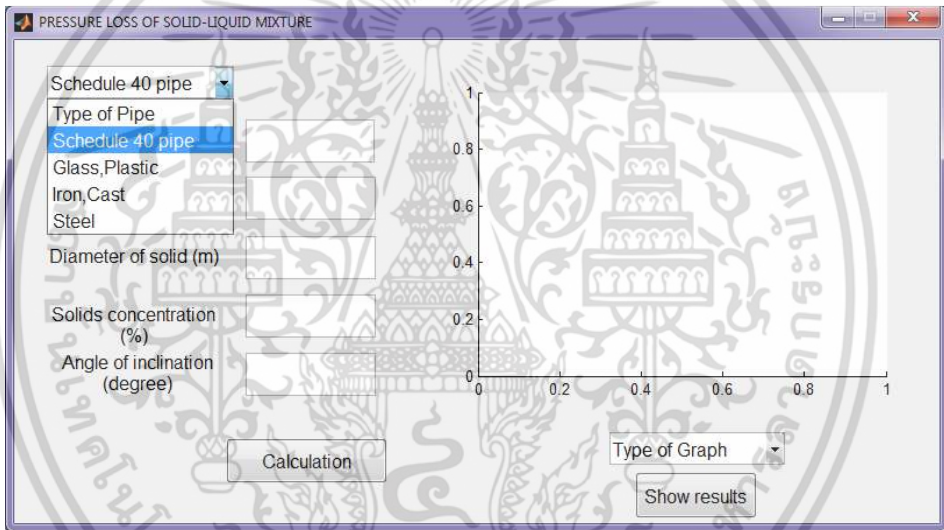
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกวีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



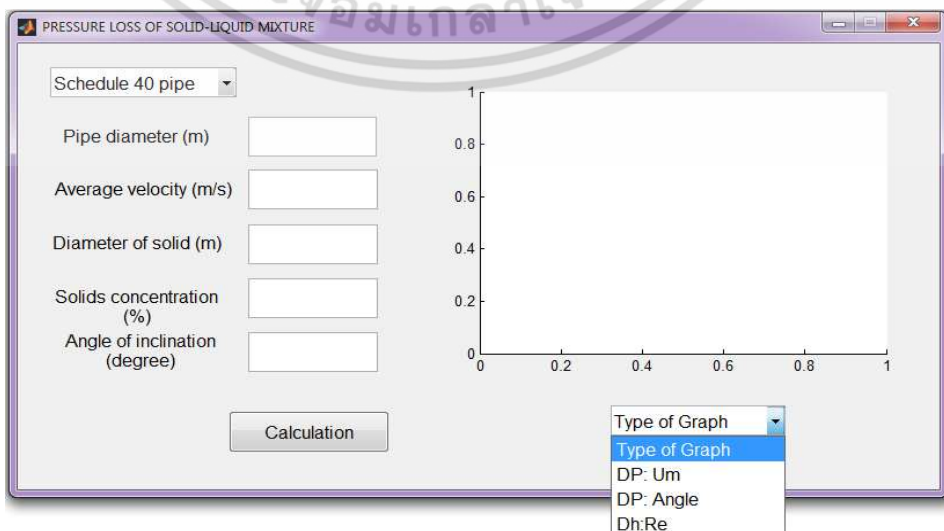
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะที่ออกฤทธิ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.6 แผนผังหมายเลขขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 หน้าต่างโปรแกรมที่สามารถกรอกค่าตัวแปรต่างๆผ่านทางหน้าจอพร้อมนำค่าที่ได้ไปคำนวณ

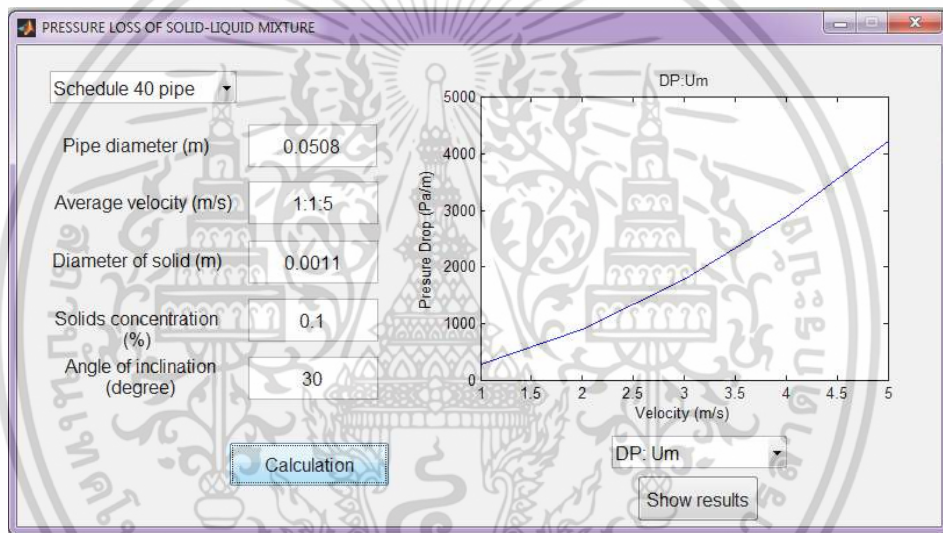


รูปที่ 4.8 หน้าต่างโปรแกรมสามารถเลือกชนิดของท่อ

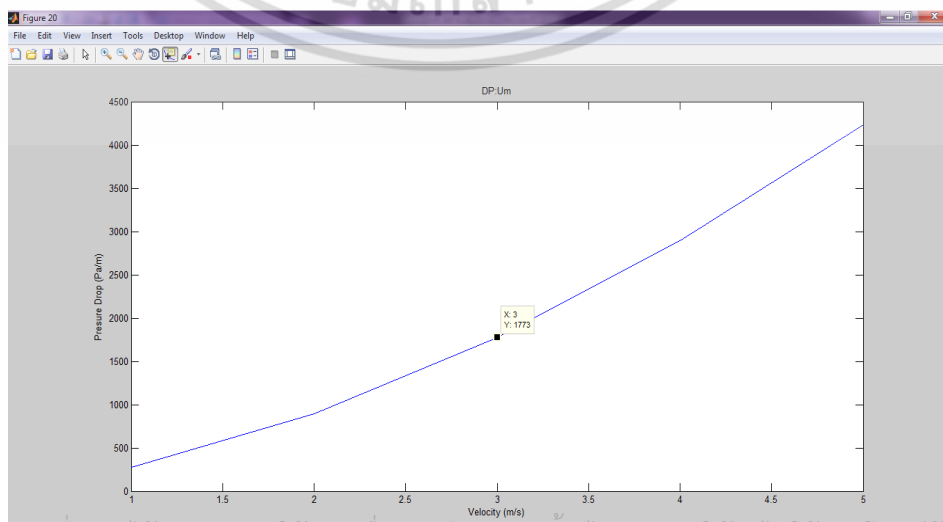


รูปที่ 4.9 หน้าต่างโปรแกรมสามารถเลือกลักษณะความสัมพันธ์ของกราฟในการแสดงผล
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
นอกจากนี้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 เป็นหน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม MATLAB สำหรับเปิดโปรแกรมวิเคราะห์ค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมที่ไหลในท่อลาดชัน จากรูปที่ 4.7 - 4.13 เราสามารถกรอกค่าผ่านทางหน้าจอ โดยเริ่มต้นด้วยการกดลูกศรลงตรงคำว่า Type of pipe เพื่อเลือกชนิดของท่อ และ กดลูกศรลงตรงคำว่า Type of graph เพื่อเลือกชนิดของความสัมพันธ์ของกราฟในการแสดงผล ซึ่งจะมีสามรูปแบบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับความเร็วเฉลี่ย กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับมุมลาดชันของท่อ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฮดสูญเสียกับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำ จากนั้นทำการกรอกค่าขนาดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความเร็วเฉลี่ย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค อัตราส่วนผสมระหว่างของเหลวกับของแข็ง และมุมลาดชันของท่อ หลังจากกรอกค่าตัวแปรต่างๆครบถ้วนให้ทำการกดปุ่ม Calculation หน้าต่างโปรแกรมก็จะทำการแสดงผลการคำนวณ และสามารถกดปุ่ม Show results เพื่อเข้าไปอ่านค่าแบบละเอียดได้

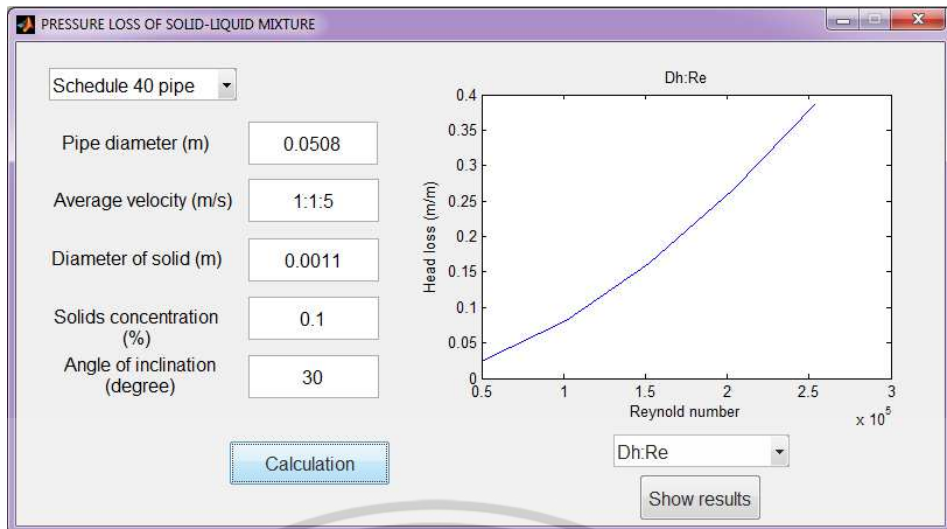


รูปที่ 4.10 หน้าต่างโปรแกรมสามารถกรอกค่าตัวแปรต่างๆพร้อมทั้งแสดงผลการคำนวณและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วเฉลี่ย

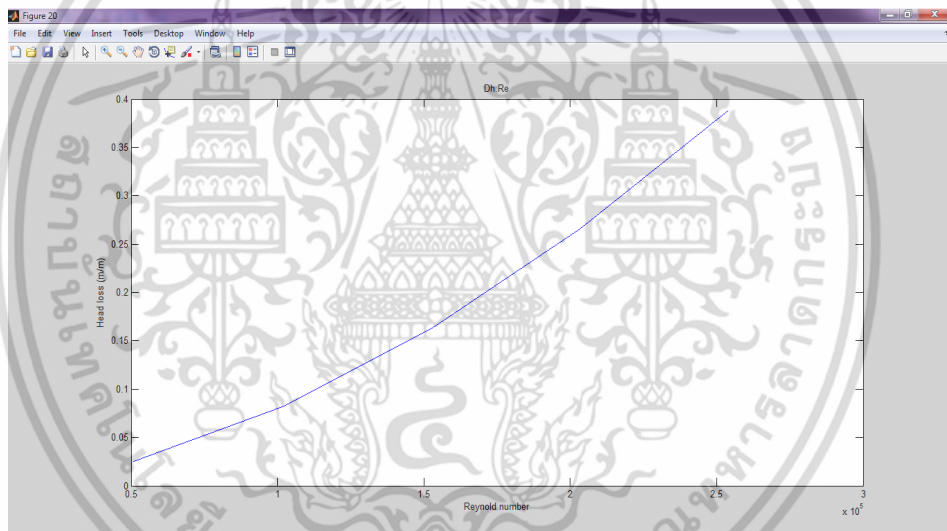


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 4.11 หน้าต่างโปรแกรมสามารถกดเข้าไปอ่านค่าแบบละเอียดได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 หน้าต่างโปรแกรมสามารถกรอกค่าตัวแปรต่างๆพร้อมทั้งแสดงผลการคำนวณและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์



รูปที่ 4.13 หน้าต่างโปรแกรมสามารถกดเข้าไปอ่านค่าแบบละเอียดได้

4.3 การทดสอบโปรแกรมคำนวณค่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลของของไหลผสมในท่อลาดชันด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา

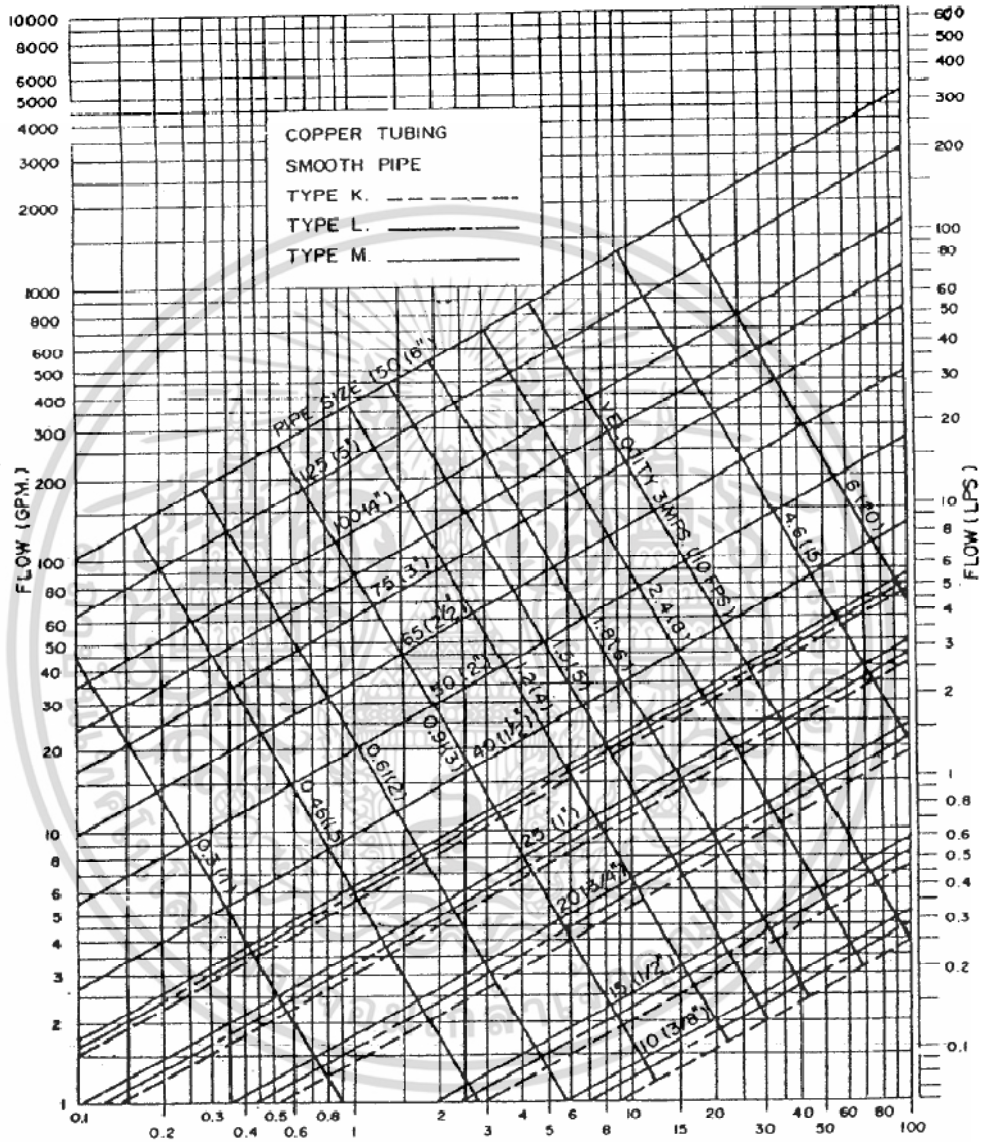
รูปที่ 4.14 เป็นตารางสำหรับการออกแบบระบบท่อจากหนังสือการออกแบบระบบท่อภายในอาคาร [13] ที่ใช้สำหรับหาค่าเฮดความดันสูญเสียสำหรับท่อขนาดต่างๆ ที่อัตราการไหลหน่วยแกลลอนต่อนาทีลิตรต่อวินาที และความเร็วการไหลหน่วยเมตรต่อวินาที ฟุตต่อวินาที โดยมีวิธีหาค่าเฮดสูญเสียดังรูปที่ 4.15 ตัวอย่างการอ่านค่าจากตารางการออกแบบระบบท่อภายในอาคาร โดยมีวิธีการดังนี้

1. เลือกขนาดท่อที่จะใช้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ท่อขนาด 50 mm (เส้นสีเขียว)
2. เลือกความเร็วในการไหล หน่วยเมตรต่อวินาที (เส้นสีฟ้า) ลากตัดกับเส้นสีเขียว

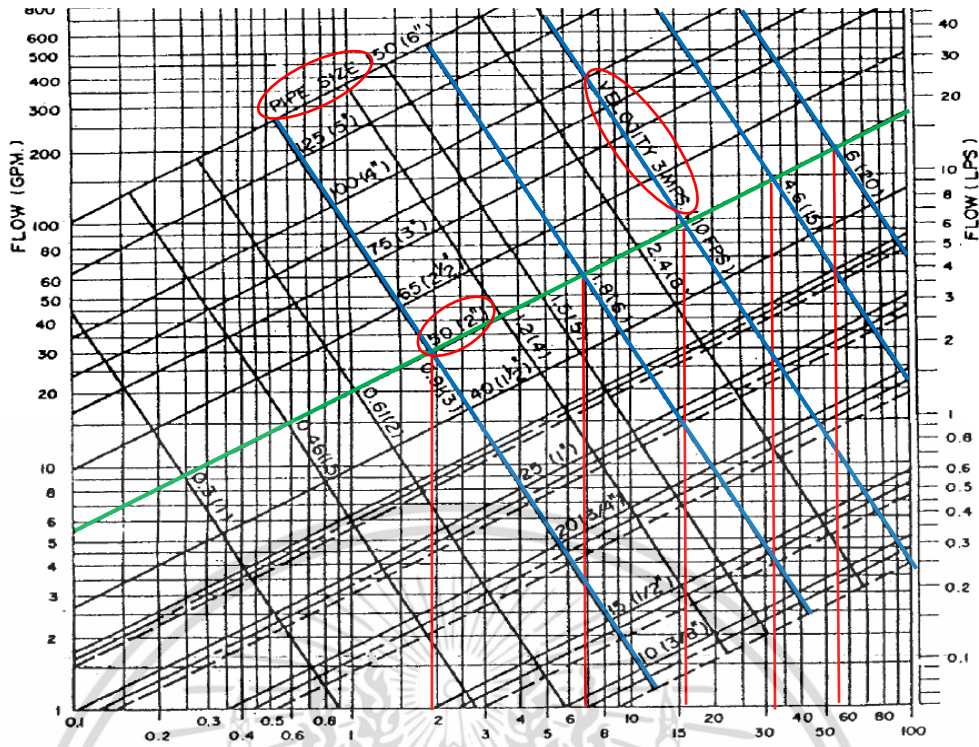
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ลากเส้นจากจุดตัดลงมา (เส้นสีแดง) เพื่ออ่านค่าเฮดความดันสูญเสียโดยมีหน่วยเป็นเมตรต่อความยาวท่อ 100 เมตร

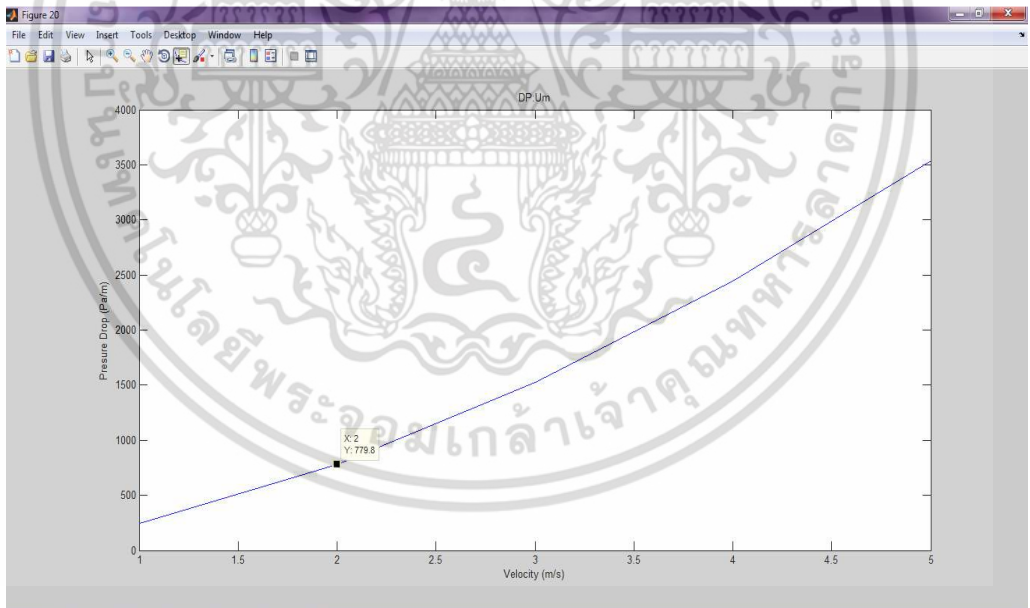
ค่าเฮดสูญเสีย (Δh) ที่ได้สามารถนำมาหาค่าความดันสูญเสีย (ΔP) ได้จากสมการ $\Delta P = \rho_w g \Delta h$ ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วของน้ำ (เมตร ต่อ 100 เมตร หรือ ฟุต ต่อ 100 ฟุต)



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างการอ่านค่าจากตารางการออกแบบระบบท่อภายในอาคาร



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา

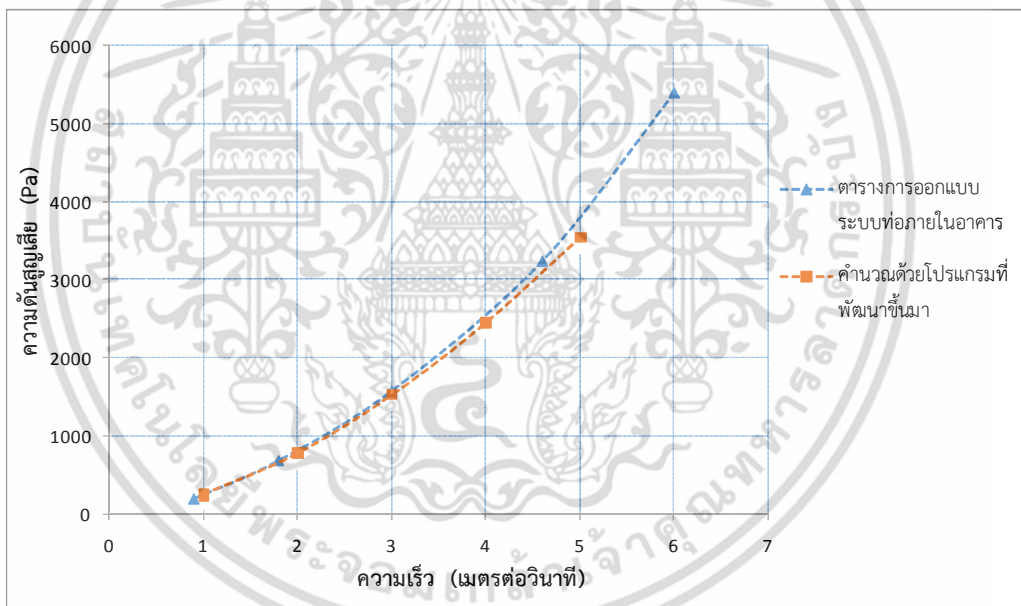
รูปที่ 4.16 เป็นตัวอย่างผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา ซึ่งจะนำผลที่ได้จากทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากตารางการออกแบบระบบท่อภายในอาคารกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา

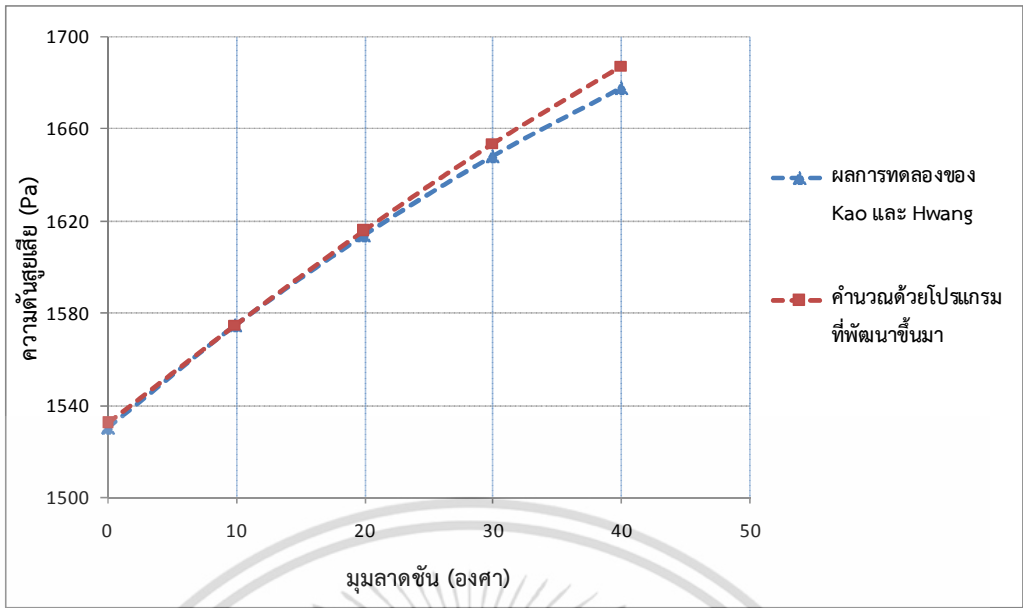
เปรียบเทียบผลที่ได้จากตารางการออกแบบระบบท่อภายในอาคารกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา				
ตารางการออกแบบระบบท่อภายในอาคาร			คำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา	
ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ค่าเสถียร (เมตร/100 เมตร)	ค่าความดันสูญเสีย (ปาสคาล)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ค่าความดันสูญเสีย (ปาสคาล)
0.9	1.9	$(9810 \times 1.9) / 100 = 186.39$	1	248
1.8	6.9	$(9810 \times 6.9) / 100 = 676.89$	2	779.8
3	16	$(9810 \times 16) / 100 = 1569.6$	3	1522
4.6	33	$(9810 \times 33) / 100 = 3237.3$	4	2447
6	55	$(9810 \times 55) / 100 = 5395.5$	5	3536

รูปที่ 4.17 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมากับทฤษฎีการออกแบบระบบท่อภายในอาคาร กรณีของไหลเป็นน้ำที่ไหลในท่อผิวเรียบ จากกราฟแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากตารางทฤษฎีการออกแบบระบบท่อภายในอาคาร



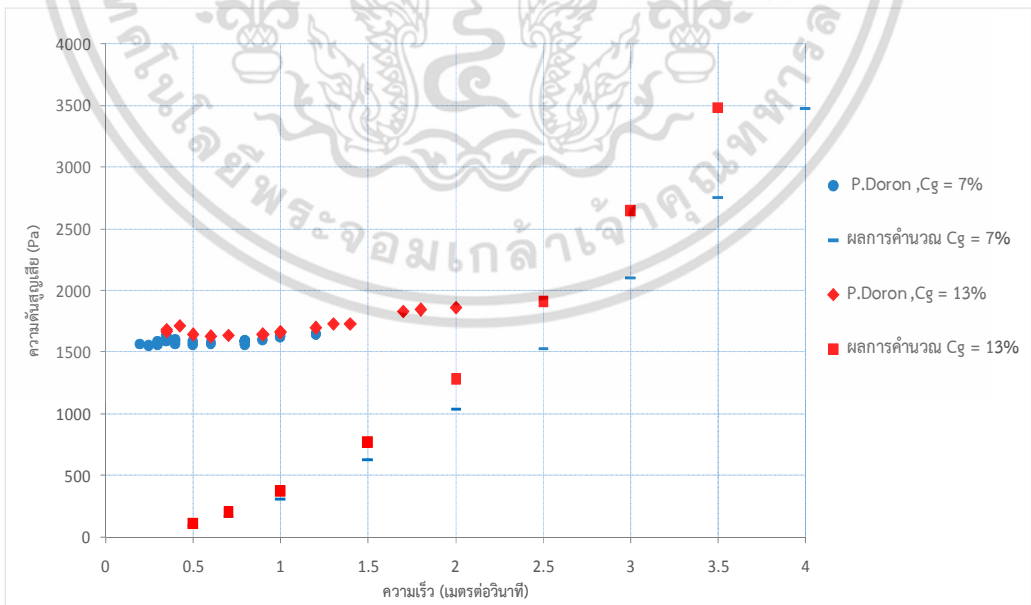
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุลาดชั้นของท่อของของไหลผสม ที่ความเร็ว 3 m/s, $\rho_s = 2475 \text{ kg/m}^3$, $d_s = 0.66 \text{ mm}$, $D = 51 \text{ mm}$, $C_g = 5.8 \%$

รูปที่ 4.18 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมากับผลการทดลองของ Kao และ Hwang [8] กรณีของไหลเป็นของไหลผสมระหว่างน้ำกับยางมะตอยที่ไหลในท่อชั้นทำมุม 0 10 20 30 และ 40 องศา จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ผลการคำนวณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองของ Kao และ Hwang โดยมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วของของไหลผสม ท่อชั้น 7 องศา $\rho_s = 1240 \text{ kg/m}^3$, $d_s = 3 \text{ mm}$, $D = 50 \text{ mm}$, $C_g = 7 \%$ และ 13%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

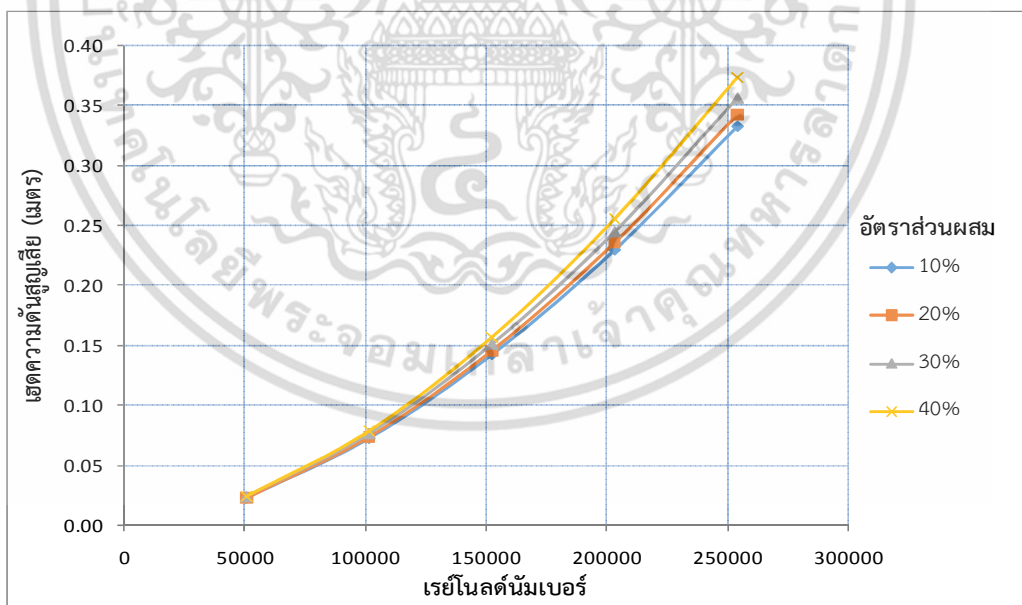
รูปที่ 4.16 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา กับผลการทดลองของ Doron [5] กรณีของไหลเป็นของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายที่ไหลในท่อผิวเรียบมุมชั้น 7 องศา ที่อัตราส่วนผสม 7 และ 13 เปอร์เซ็นต์ จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ในช่วงความเร็วต่ำ 0.2 - 2 m/s ค่าผลการคำนวณที่ได้มีความคลาดเคลื่อนกับค่าที่ได้จากผลการทดลอง สาเหตุเนื่องมาจากลักษณะการไหลที่เปลี่ยนไปในช่วงความเร็วต่ำ ซึ่งการไหลจะเป็นแบบแยกชั้นโดยชั้นล่างสุดไม่มีการเคลื่อนที่ แต่เมื่อความเร็วการไหลมากกว่า 2 m/s ค่าความดันสูญเสียที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

4.4 ผลการคำนวณการสูญเสียความดันการไหลของของไหลผสมที่ไหลในท่อลาดชันที่มี

ความยาว 1 เมตร

วิธีการคำนวณจะพิจารณาค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมระหว่างของแข็งกับของเหลวที่เกิดขึ้นภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 mm ที่วางทำมุมลาดชันต่างกันตั้งแต่ 0 30 60 90 องศา จากแนวระดับ ในอัตราส่วนผสม 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีขนาดของส่วนผสมที่เป็นของแข็งที่ผสมในน้ำ คือ เม็ดพลาสติกขนาด 1.1 2.19 และ 2.91 mm ($\rho_s = 1172 \text{ kg/m}^3$) โดยใช้สมการที่ได้ศึกษามาใช้ในการเขียนโปรแกรมคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าความดันสูญเสียและนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบความแตกต่างในสภาวะที่แตกต่างกัน

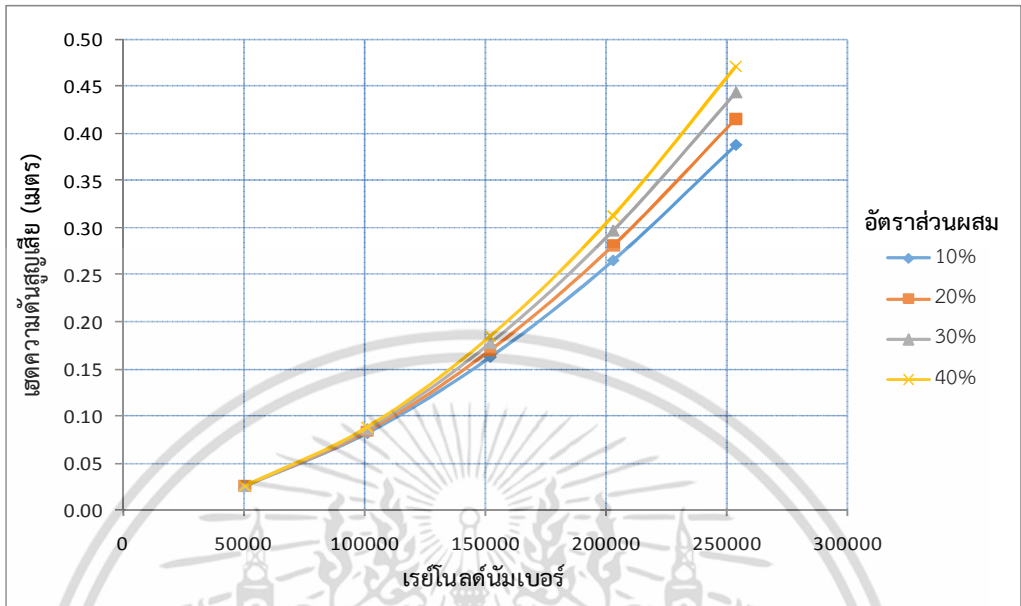
4.4.1 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm ท่อลาดชันขึ้น



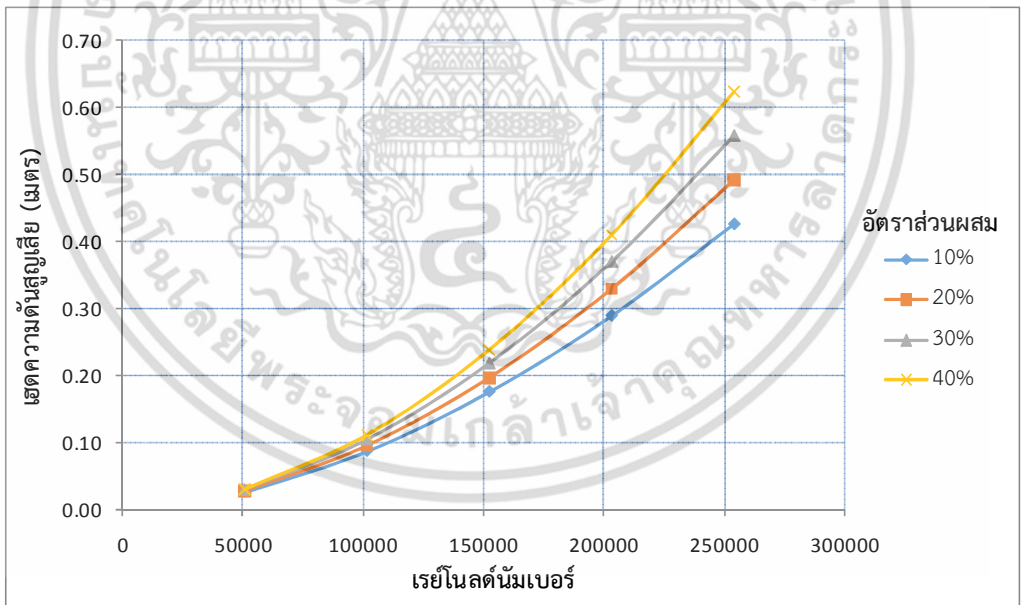
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อลาดชัน 0 องศา

เมื่อวางท่อลาดชัน 0 และท่อชัน 30 องศา คำนวณหาค่าเฮดความดันสูญเสียที่ได้ พบว่า ค่าเฮดความดันสูญเสียจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยกว่า 101,600 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าเฮดความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าเฮดความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 150,000 ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21

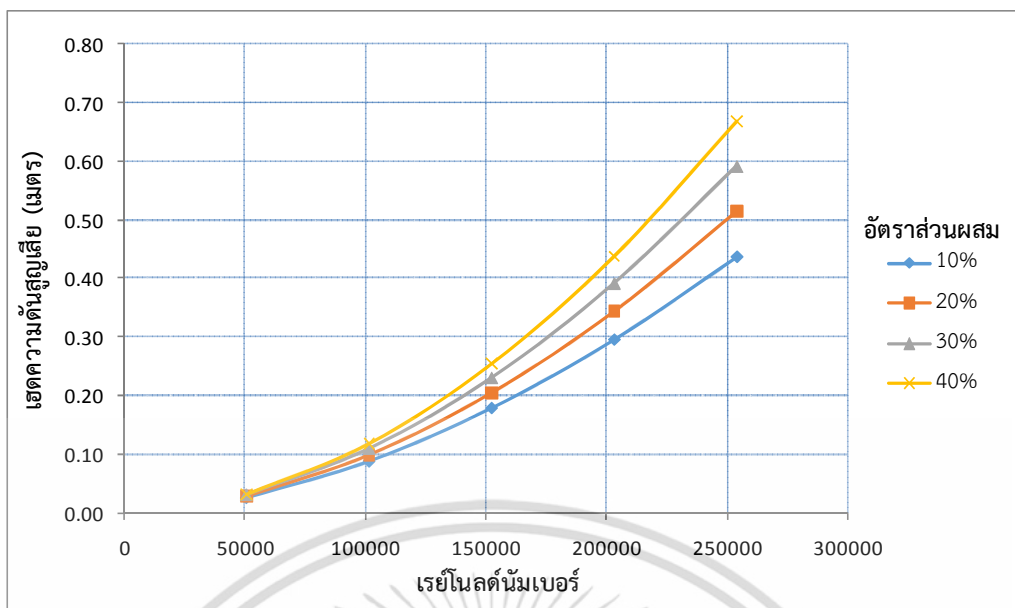


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อชั้น 30 องศา



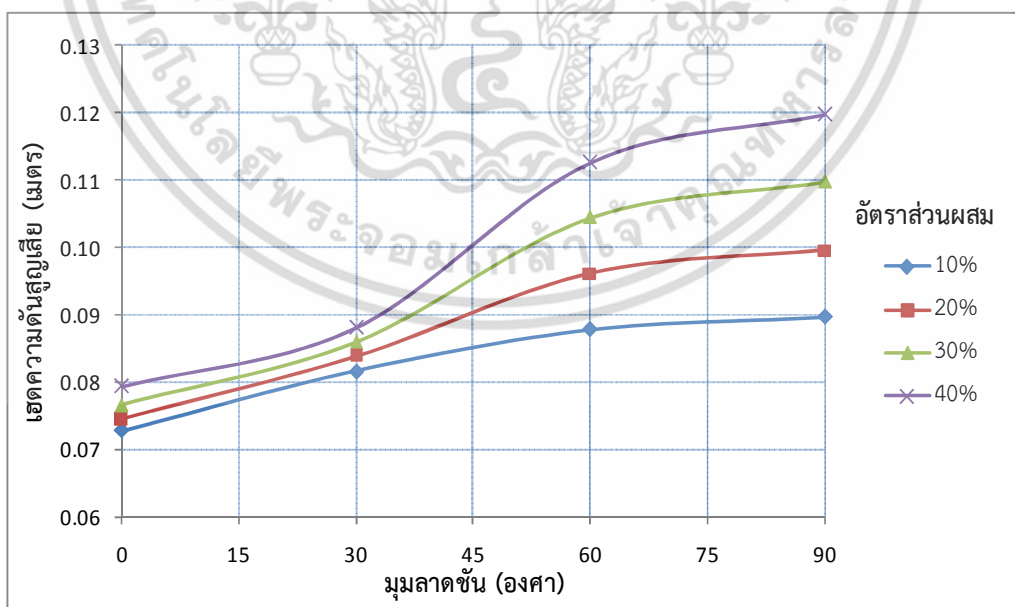
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อชั้น 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



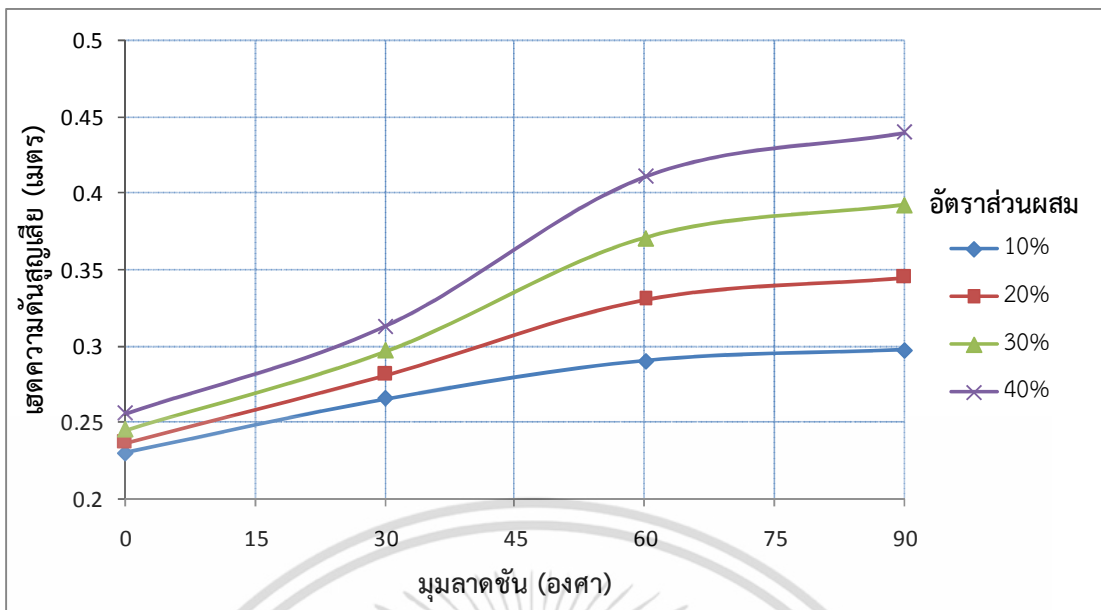
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อชั้น 90 องศา

เมื่อวางท่อชั้น 60 และ 90 องศา พบว่า ค่าเสดความดันสูญเสียจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้ค่าเสดความดันสูญเสียมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 50,800 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าเสดความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 100,000 ดังรูปที่ 4.22 - 4.23



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดความดันสูญเสียกับมุมลาดชันของท่อ ที่ความเร็ว 2 m/s

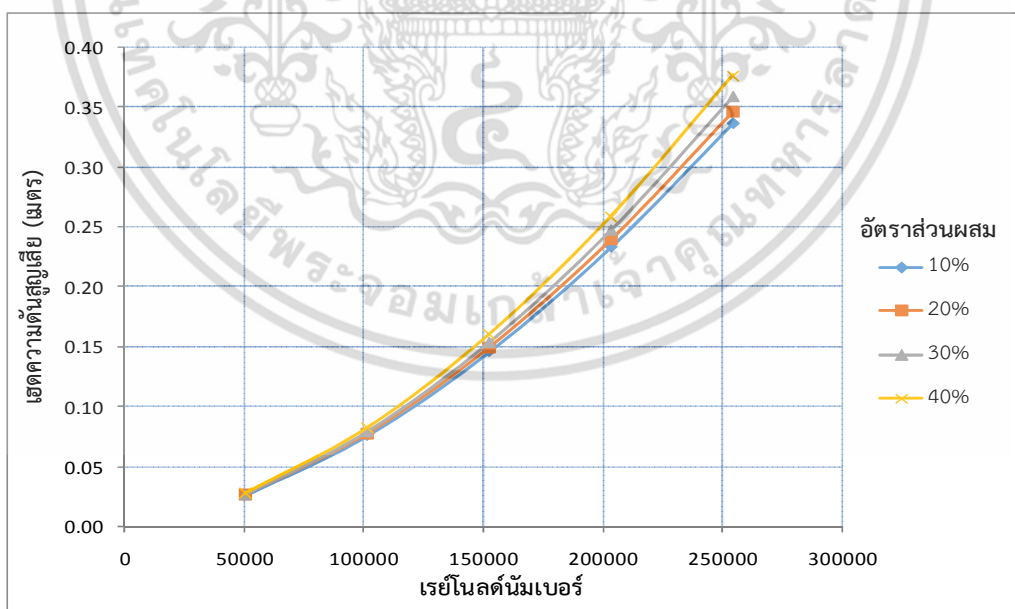
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับมุมลาดชันของท่อ ที่ความเร็ว 4 m/s

ในส่วนของการวางมุมชันของท่อ รูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงให้เห็นว่ามุมชันของท่อที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มของอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก

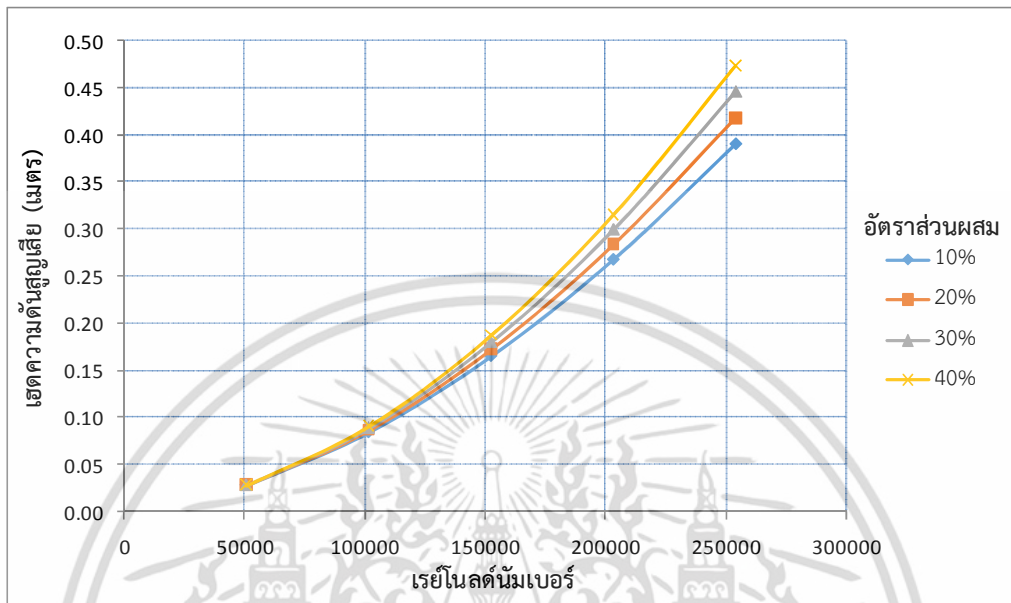
4.4.2 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.19 mm ท่อลาดชันขึ้น



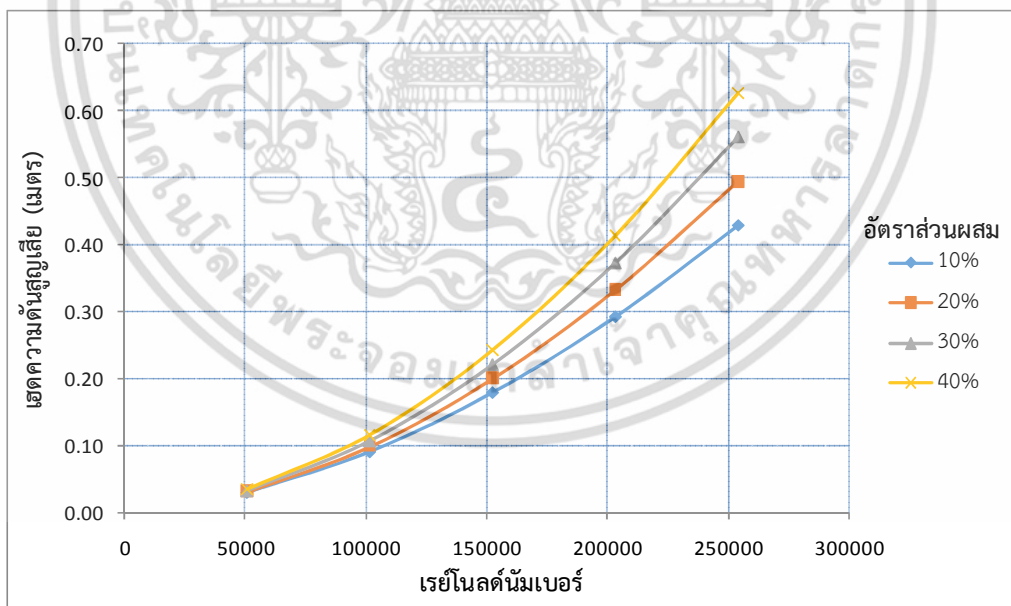
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อลาดชัน 0 องศา

เมื่อวางท่อลาดชัน 0 และท่อชัน 30 องศา พบว่า ค่าเฮดความดันสูญเสียจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเสดความดันสูญเสียมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์น้อยกว่า 100,000 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าเสดความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าเสดความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์มากกว่า 150,000 ดังรูปที่ 4.26 และ 4.27

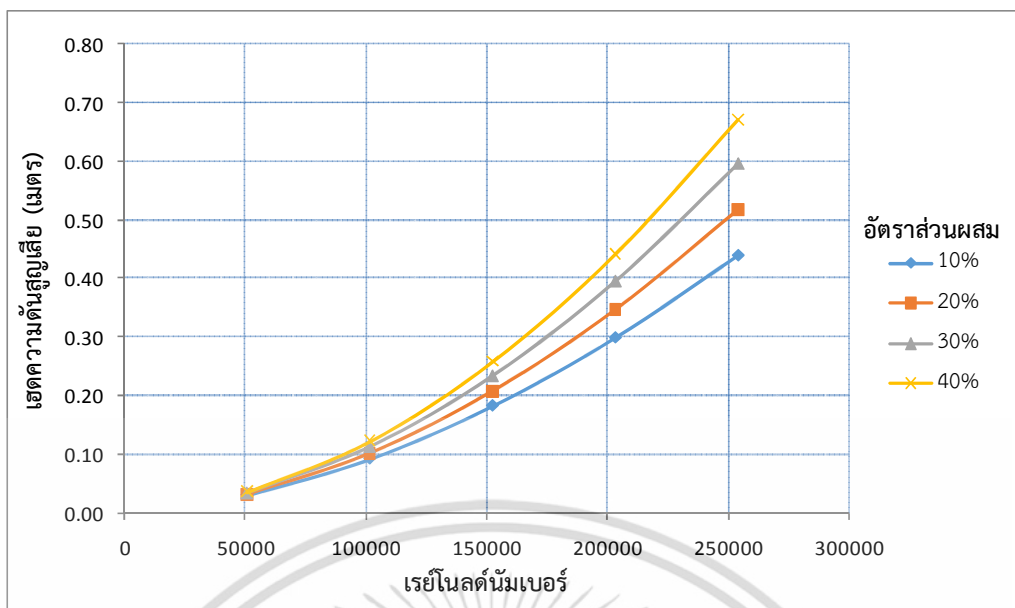


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ท่อชั้น 30 องศา



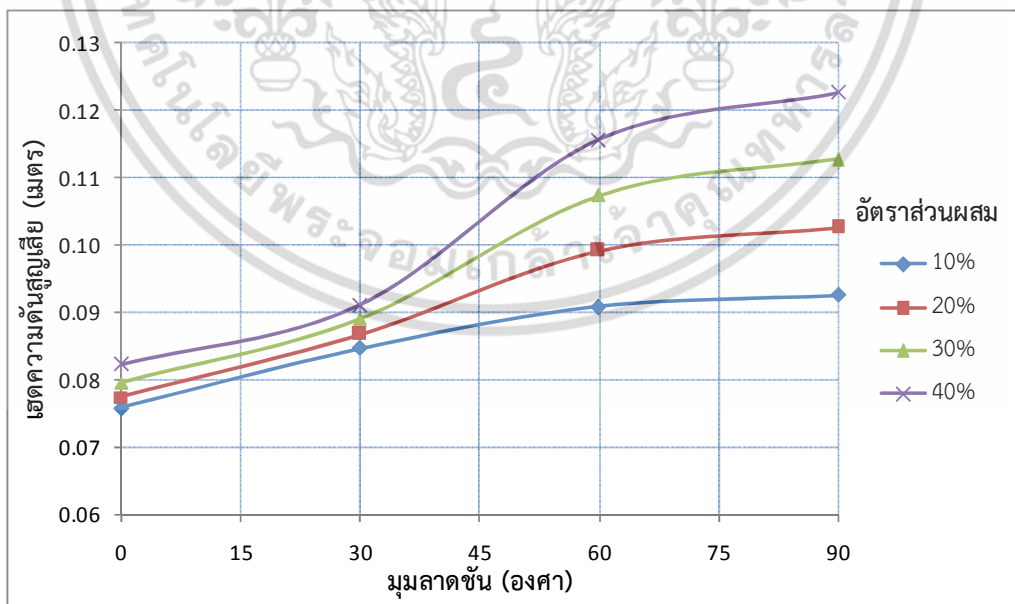
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ท่อชั้น 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



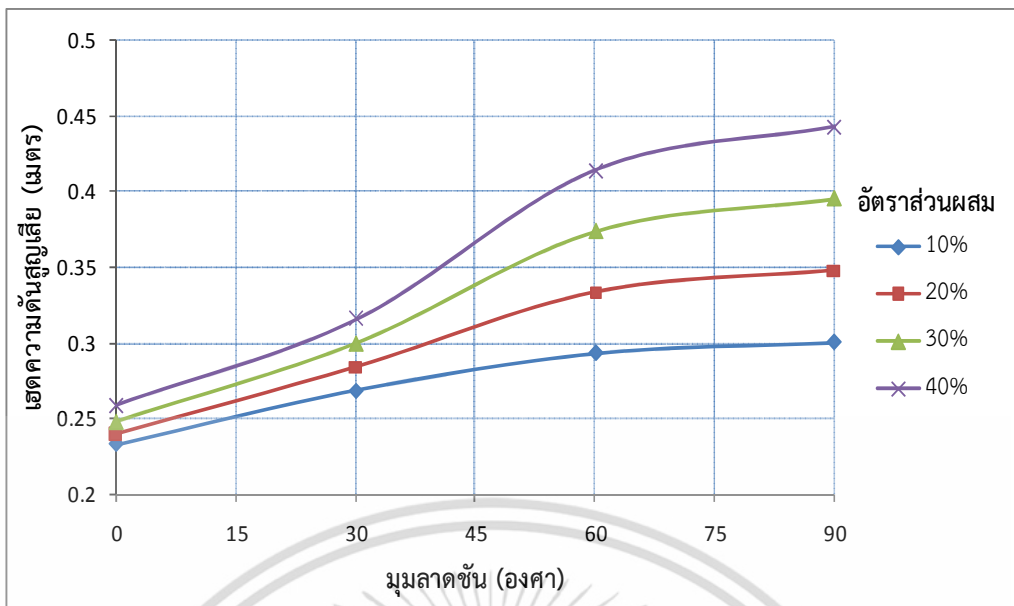
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อชั้น 90 องศา

เมื่อวางท่อชั้น 60 และ 90 องศา พบว่า ค่าเฮดความดันสูญเสียจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 50,800 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าเฮดความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 100,000 ดังรูปที่ 4.28 - 4.29



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับมุลลาดชั้นของท่อ ที่ความเร็ว 2 m/s

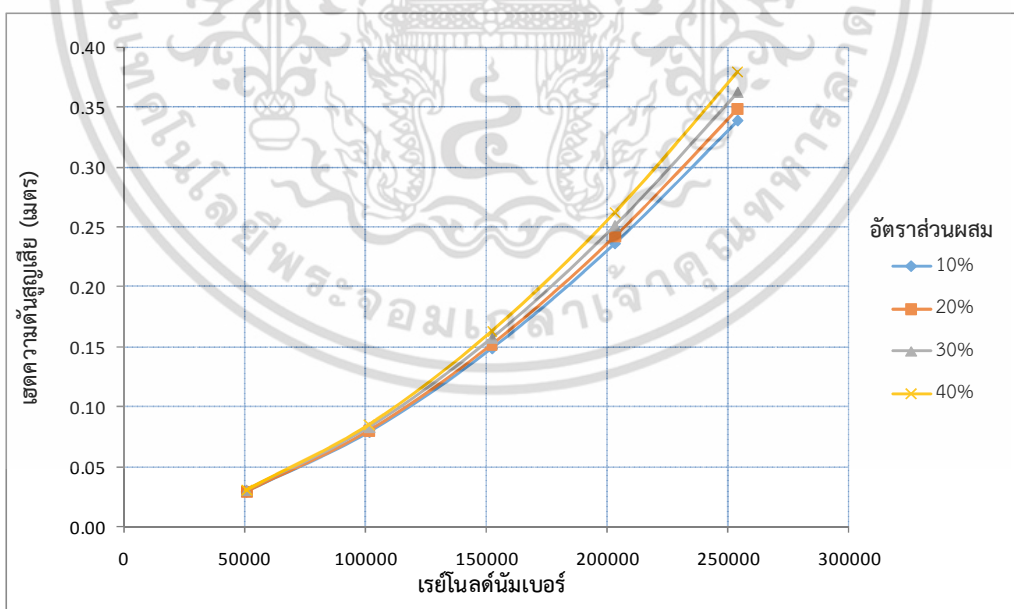
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับมุลาดชั้นของท่อ ที่ความเร็ว 4 m/s

ในส่วนของการวางมุลาดชั้นของท่อ รูปที่ 4.30 และ 4.31 แสดงให้เห็นว่ามุลาดชั้นของท่อที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มของอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก

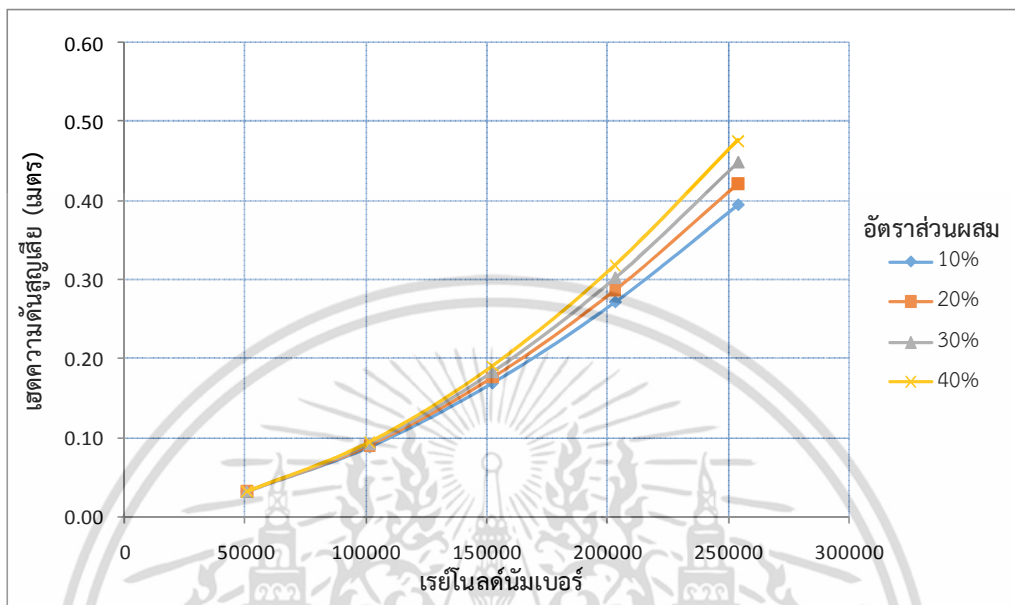
4.4.3 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.91 mm ท่อลาดชั้นขึ้น



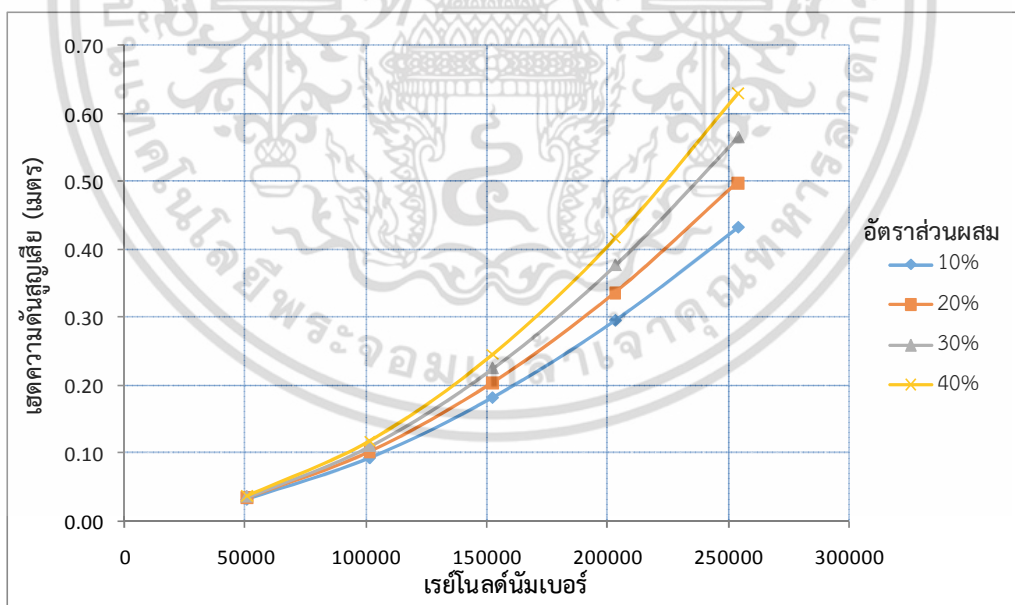
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อลาดชั้น 0 องศา

เมื่อวางท่อลาดชั้น 0 และท่อชัน 30 องศา พบว่า ค่าความดันสูญเสียจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันสูญเสียมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์น้อยกว่า 100,000 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 150,000 ดังรูปที่ 4.32 และ 4.33



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮตความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อชั้น 30 องศา

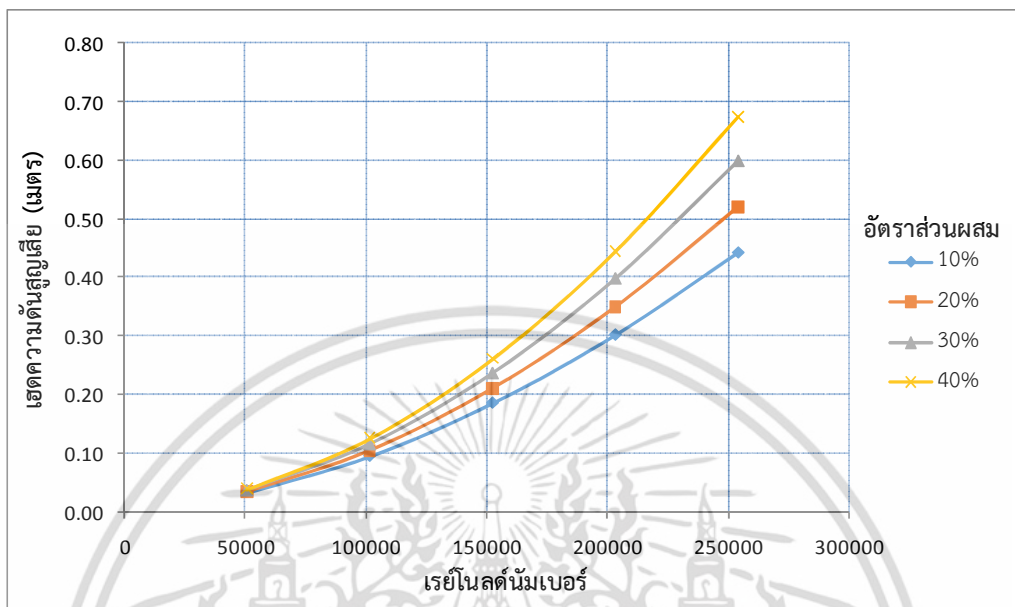


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮตความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อชั้น 60 องศา

เมื่อวางท่อชั้น 60 และ 90 องศา พบว่า ค่าเฮตความดันสูญเสียจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้ค่าเฮตความดันสูญเสียมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์น้อยกว่า 50,800 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะ

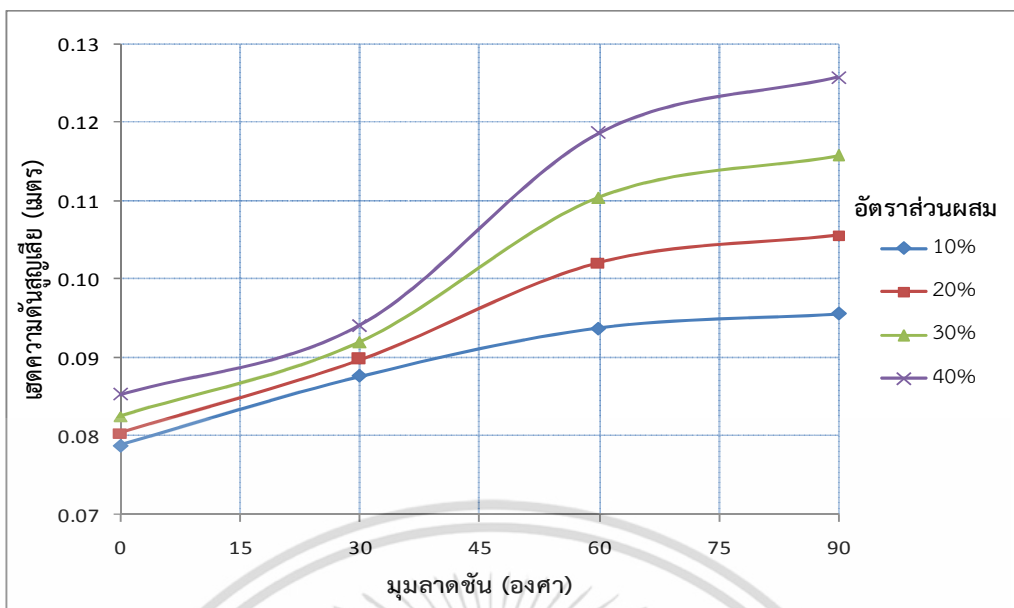
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกวีเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าเฮดความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 100,000 ดังรูปที่ 4.34 - 4.35

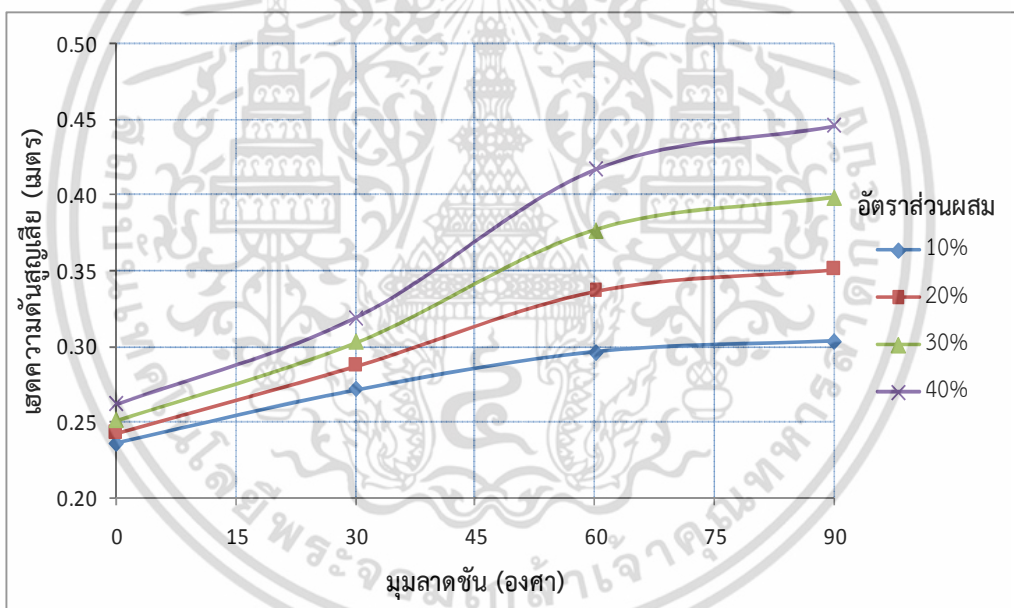


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อชั้น 90 องศา

รูปที่ 4.36 และ 4.37 แสดงให้เห็นว่ามุมลาดชันของท่อที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการเพิ่มของอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก เมื่อพิจารณาขนาดความโตของเม็ดพลาสติกที่ผสมที่มีผลต่อค่าเฮดความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น พบว่า เม็ดพลาสติกขนาด 2.91 mm จะมีผลทำให้เกิดค่าความดันสูญเสียมากที่สุด ขนาดเม็ดพลาสติกขนาด 2.19 mm จะมีผลทำให้เกิดค่าความดันสูญเสียมากรองลงมาและขนาดเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm จะมีผลทำให้เกิดค่าความดันสูญเสียน้อยที่สุด



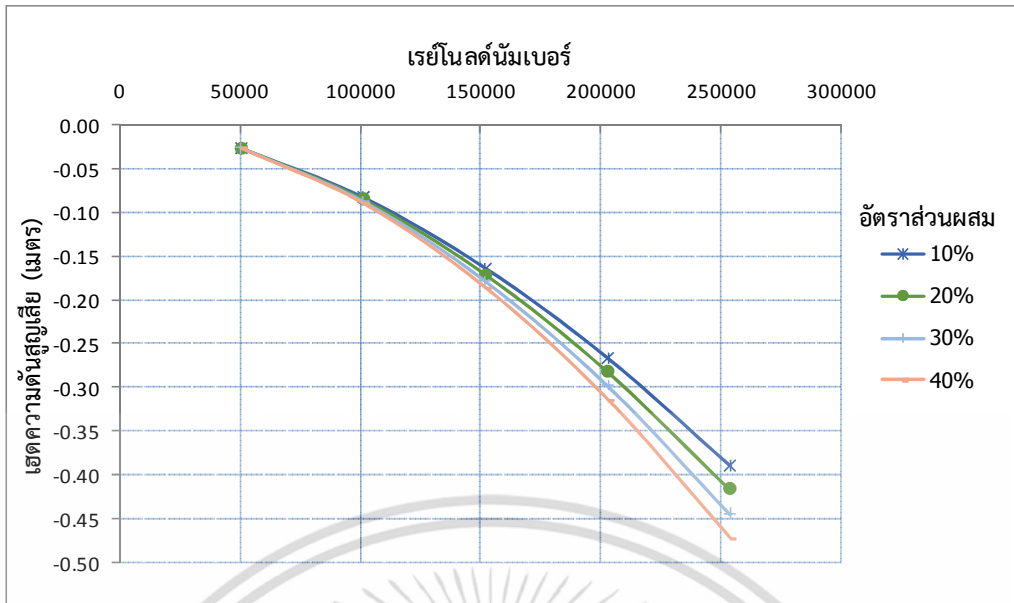
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับมุลาดชั้นของท่อ ที่ความเร็ว 2 m/s



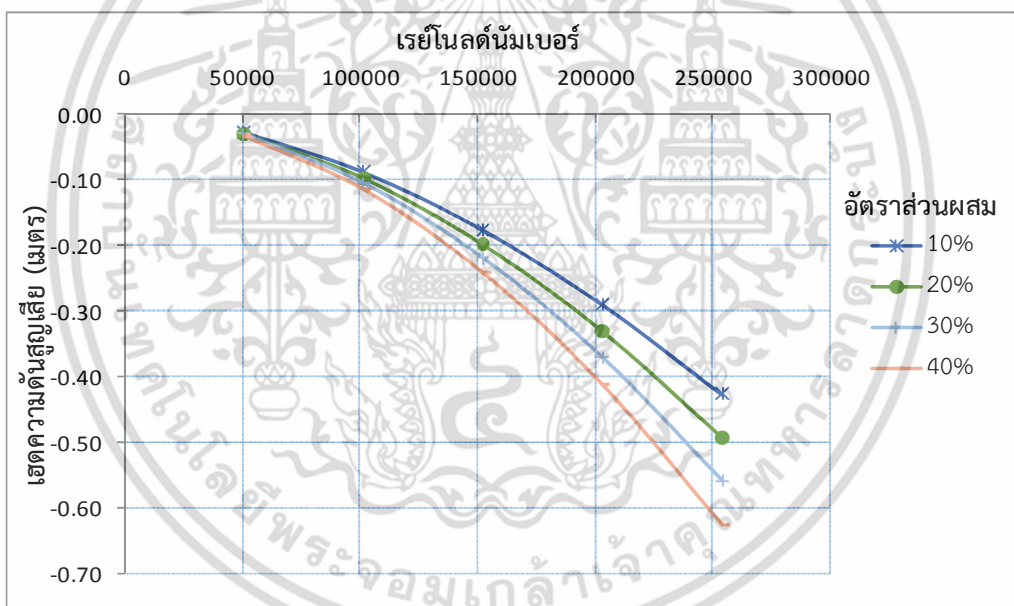
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับมุลาดชั้นของท่อ ที่ความเร็ว 4 m/s

4.4.4 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm ท่อลาดชั้นลง

รูปที่ 4.38 ในกรณีวางท่อลาด 30 องศา พบว่า ค่าเฮดความดันสูญเสียจะลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียมีค่าลดลง โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์น้อยกว่า 100,000 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 150,000

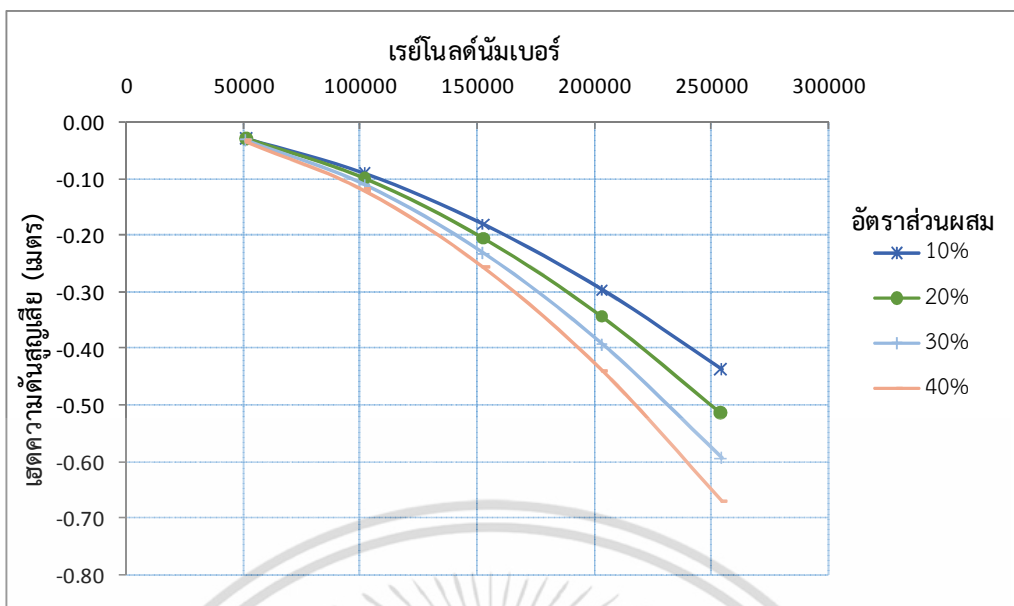


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮตความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่อลาดชั้นลง 30 องศา



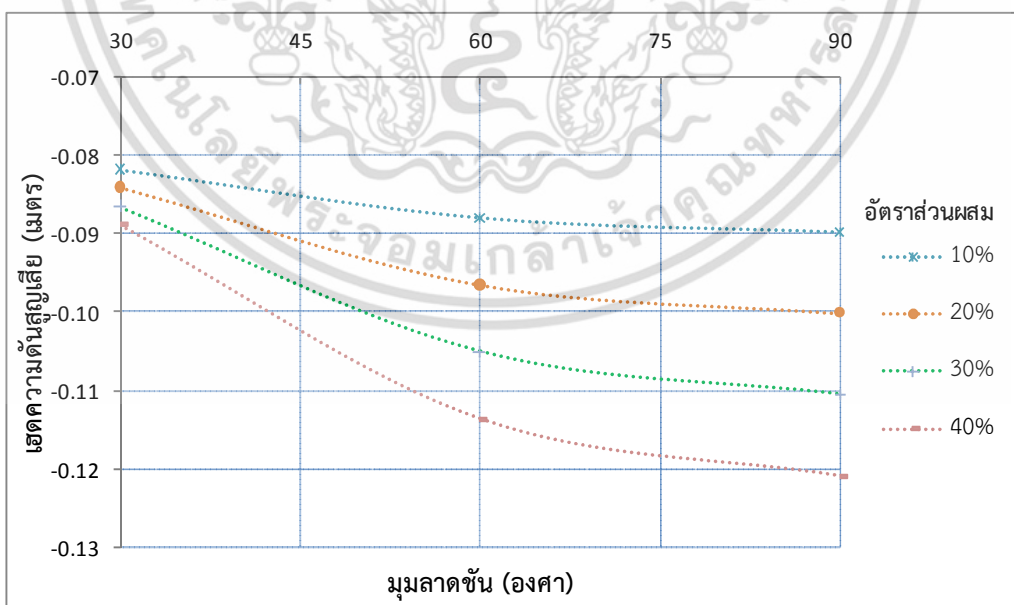
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮตความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่อลาดชั้นลง 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



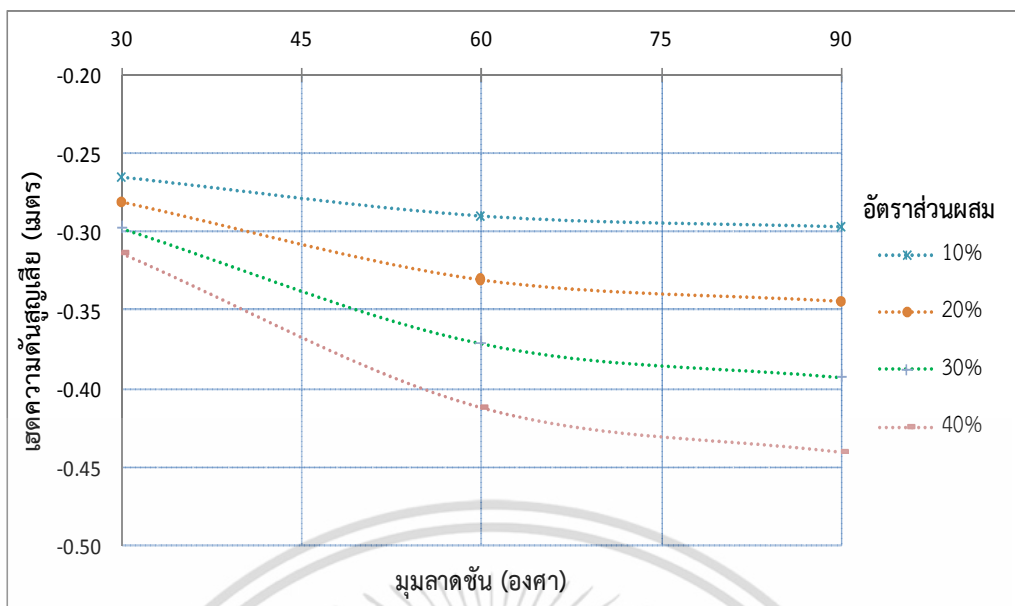
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อลาดชันลง 90 องศา

รูปที่ 4.39 – 4.40 ในกรณีวางท่อลาด 60 และ 90 องศา พบว่า ค่าเฮดความดันสูญเสียจะลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียมีค่าลดลง โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 50,800 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าเฮดความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าเฮดความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 100,000



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับมุมลาดชันลงของท่อ ที่ความเร็ว 2 m/s

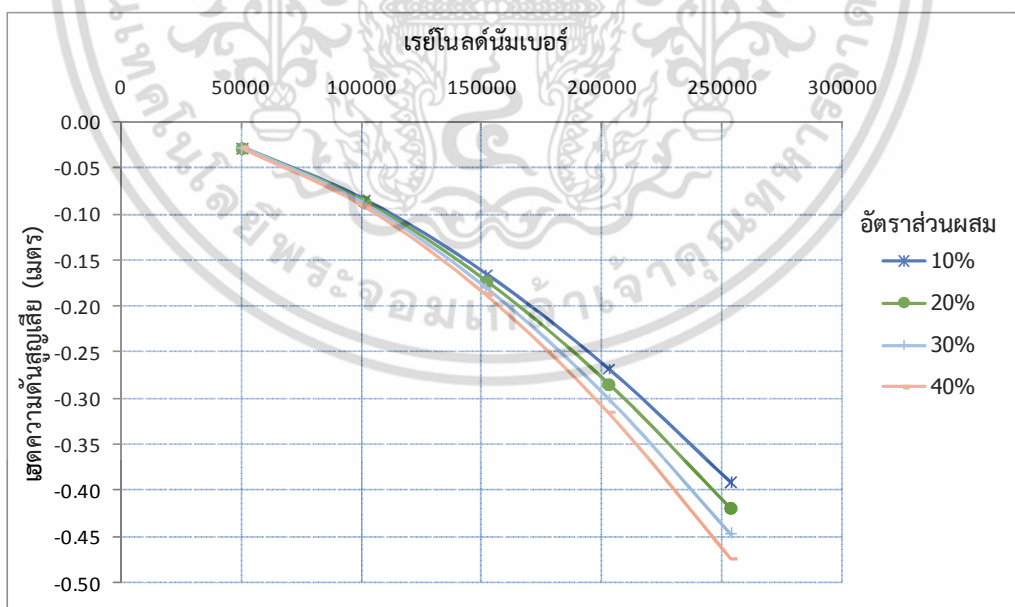
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับมุลาดชั้นลงของท่อ ที่ความเร็ว 4 m/s

จากรูปที่ 4.41 และ 4.42 พบว่ามุลาดชั้นของท่อที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียลดลง เช่นเดียวกับการเพิ่มของอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียลดลงเช่นกัน

4.4.5 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.19 mm ท่อลาดชั้นลง

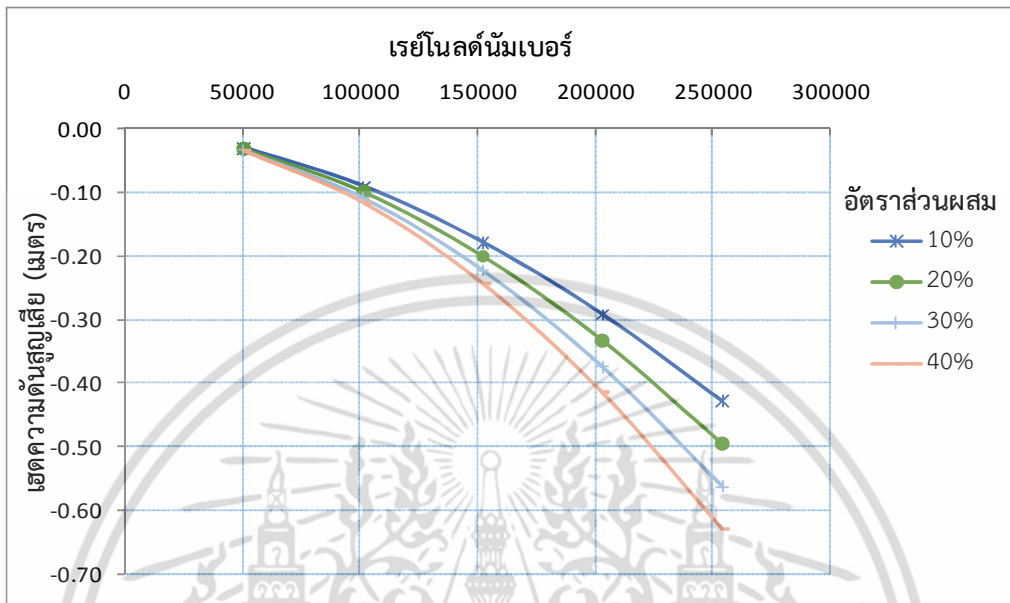


รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อลาดชั้นลง 30 องศา

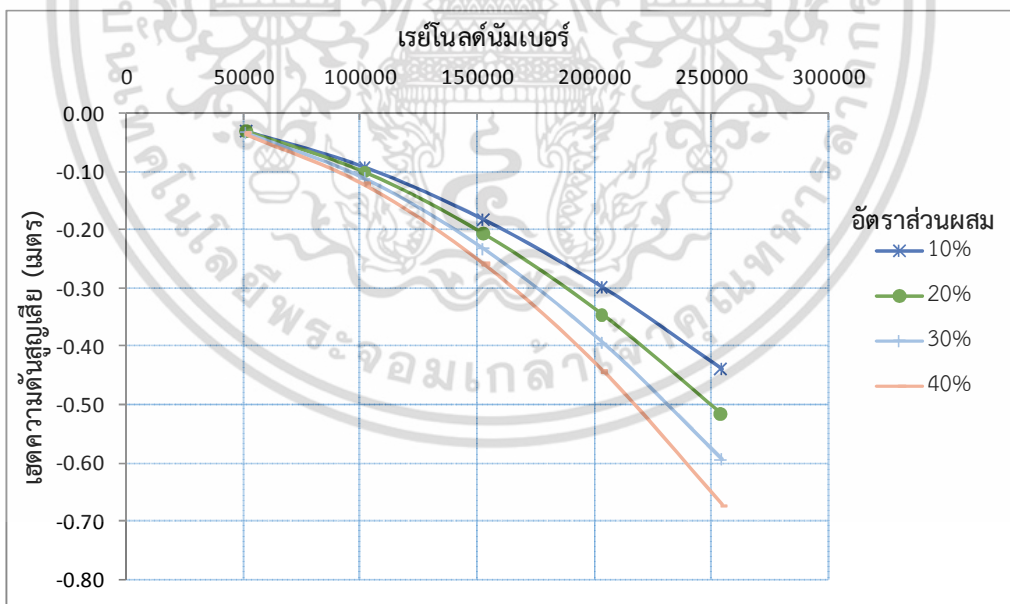
รูปที่ 4.43 ในกรณีวางท่อลาด 30 องศา พบว่า ค่าเฮดความดันสูญเสียจะลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียลดลงเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฮดความดันสูญเสียมีค่าลดลง โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์น้อยกว่า 100,000 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าเฮดความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าเฮดความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์มากกว่า 150,000



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ท่อลาดชันลง 60 องศา

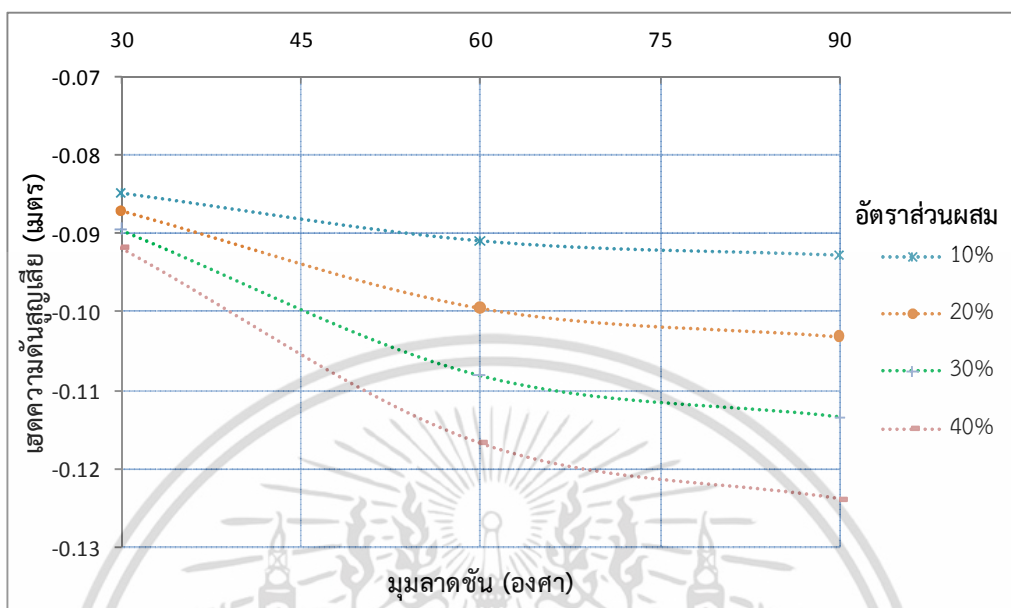


รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ท่อลาดชันลง 90 องศา

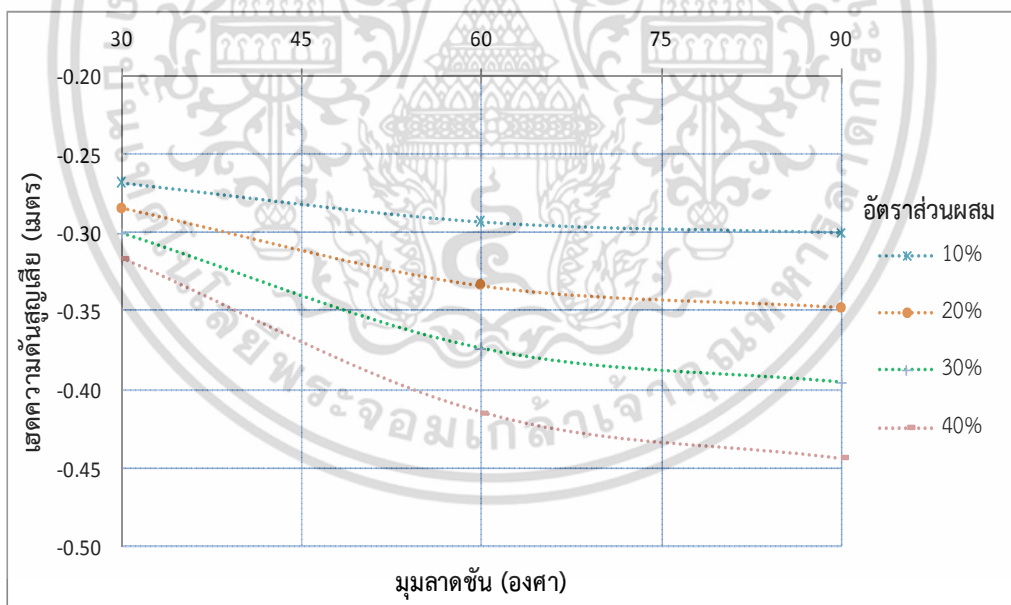
รูปที่ 4.44 – 4.45 ในกรณีวางท่อลาด 60 และ 90 องศา พบว่า ค่าเฮดความดันสูญเสียจะลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียมีค่าลดลง โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ 50,800 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไม่มีผลต่อค่าเฮดความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าเฮดความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 100,000



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับมุมลาดชั้นลงของท่อ ที่ความเร็ว 2 m/s

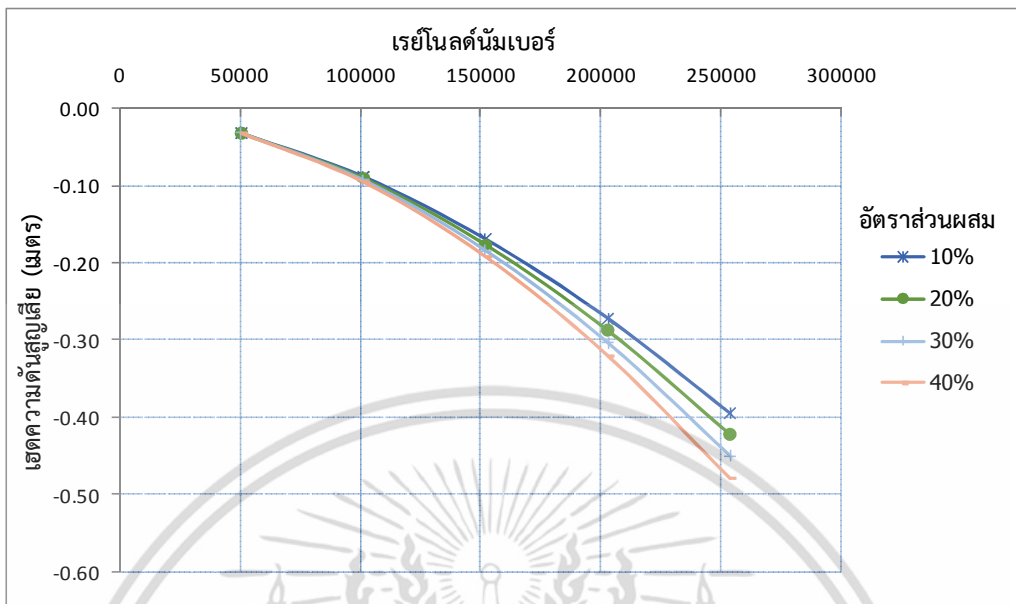


รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับมุมลาดชั้นลงของท่อ ที่ความเร็ว 4 m/s

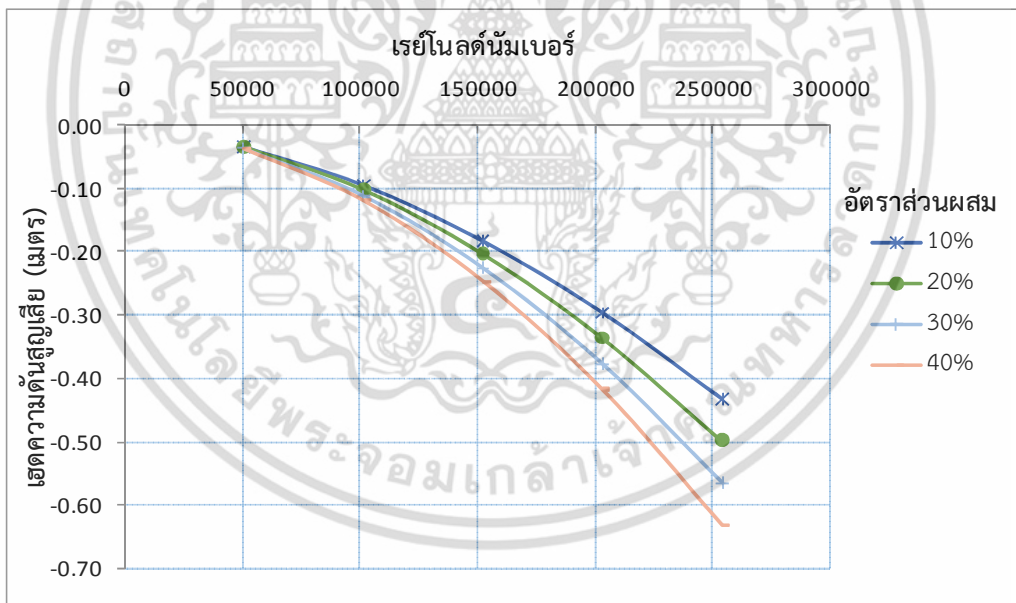
จากรูปที่ 4.46 และ 4.47 พบว่ามุมลาดของท่อที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียลดลง เช่นเดียวกับการเพิ่มของอัตราส่วนผลระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเฮดความดันสูญเสียลดลงเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.91 mm ท่อลาดชันลง

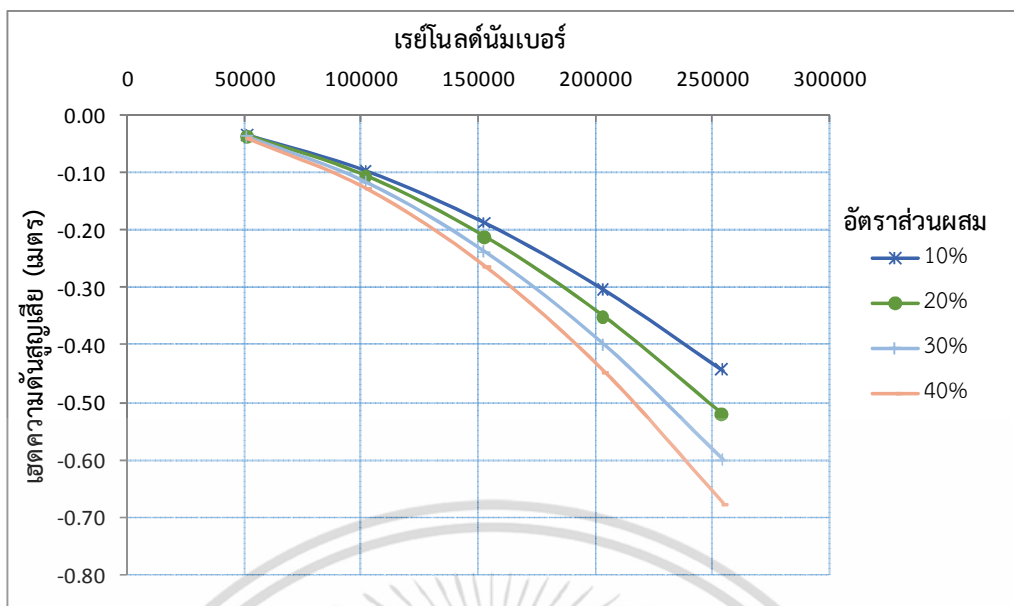


รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อลาดชันลง 30 องศา



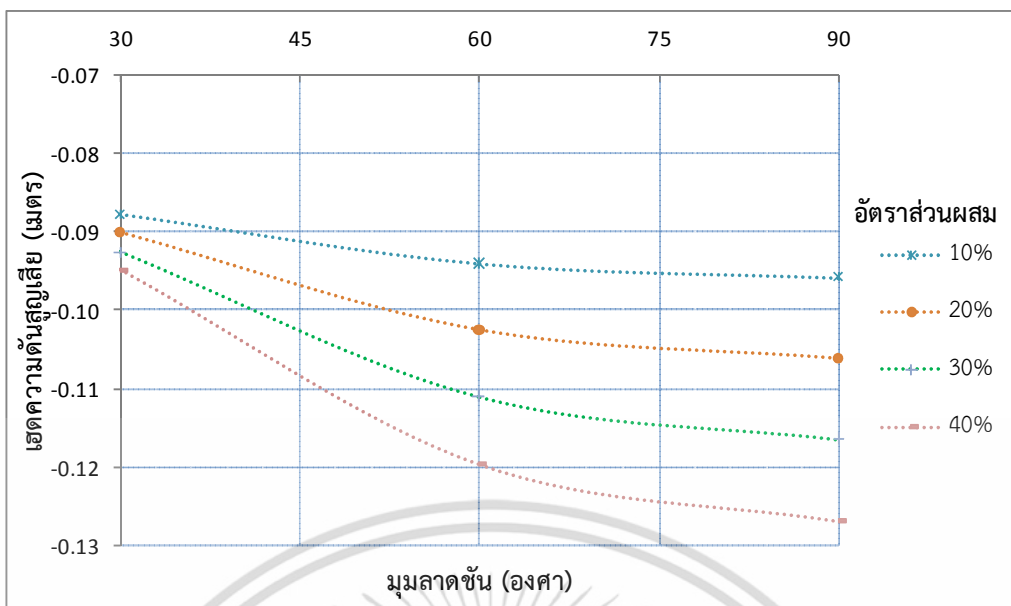
รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อลาดชันลง 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

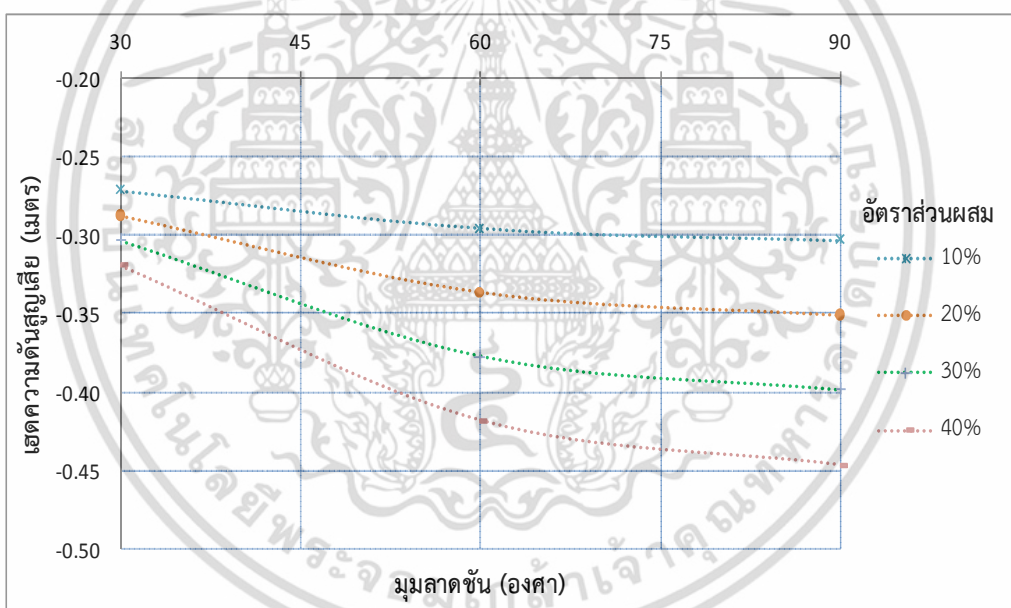


รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮตความดันสูญเสียกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ท่อลาดชันลง 90 องศา

รูปที่ 4.48 ในกรณีวางท่อลาด 30 องศา พบว่า ค่าเฮตความดันสูญเสียจะลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้ค่าเฮตความดันสูญเสียมีค่าลดลง โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์น้อยกว่า 100,000 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 150,000 รูปที่ 4.49 – 4.50 ในกรณีวางท่อลาดชันลง 60 และ 90 องศา พบว่า ค่าเฮตความดันสูญเสียจะลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ก็จะมีผลทำให้ค่าเฮตความดันสูญเสียมีค่าลดลง โดยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 50,800 อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าเฮตความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลต่อค่าเฮตความดันสูญเสียอย่างเห็นได้ชัดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 100,000 จากรูปที่ 4.51 - 4.52 พบว่า มุมลาดชันลงของท่อที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเฮตความดันสูญเสียลดลง เช่นเดียวกับการเพิ่มของอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเฮตความดันสูญเสียลดลงเช่นกัน โดยขนาดเม็ดพลาสติกขนาด 2.91 mm มีผลทำให้ค่าเฮตความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นลดลงมากที่สุด ขนาดเม็ดพลาสติกขนาด 2.19 mm จะมีผลต่อค่าเฮตความดันสูญเสียลดลงมากในลำดับถัดมาและ ขนาดเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm จะมีผลต่อค่าเฮตความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นลดลงน้อยที่สุด



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมลาดชันลงของท่อ ที่ความเร็ว 2 m/s



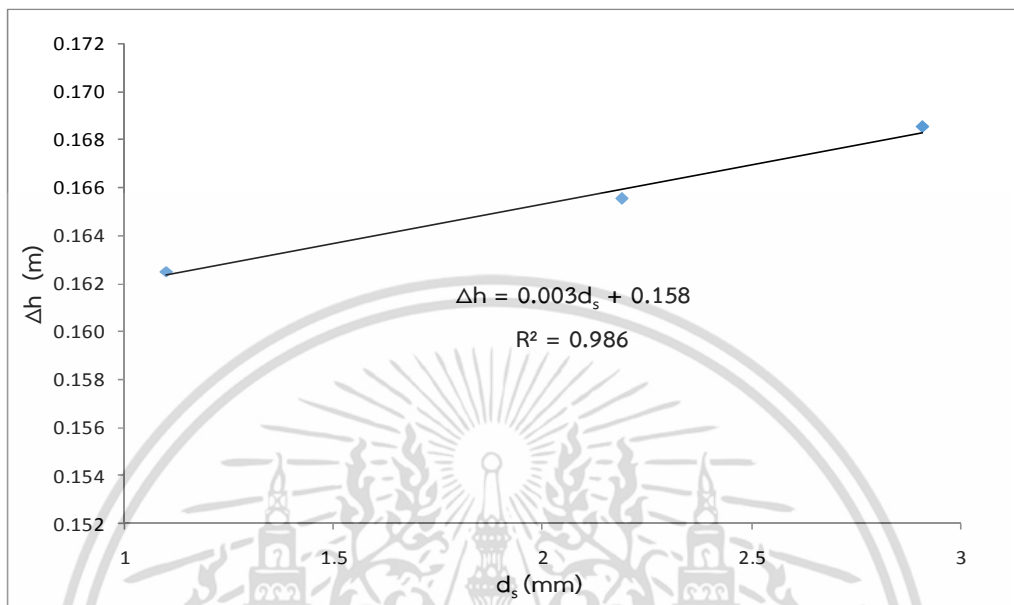
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมลาดชันลงของท่อ ที่ความเร็ว 4 m/s

4.5 การศึกษาเชิงพาราเมตริกจากสมการแนวโน้ม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแนวโน้มของผลลัพธ์ด้านพลังงานที่สูญเสีย ออกมาในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการทำนายถึงค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลองและนำเสนอถึงค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น ซึ่งแสดงถึงสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการที่ได้รับออกมา โดยจะนำเสนอใน 4 หัวข้อดังนี้

4.5.1 ผลของขนาดของอนุภาคต่อความดันสูญเสีย

จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา เมื่อเราทราบถึงค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น จากกรณีการไหลที่ความเร็ว 3 m/s ท่อลาดชัน 30 องศา อัตราส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์

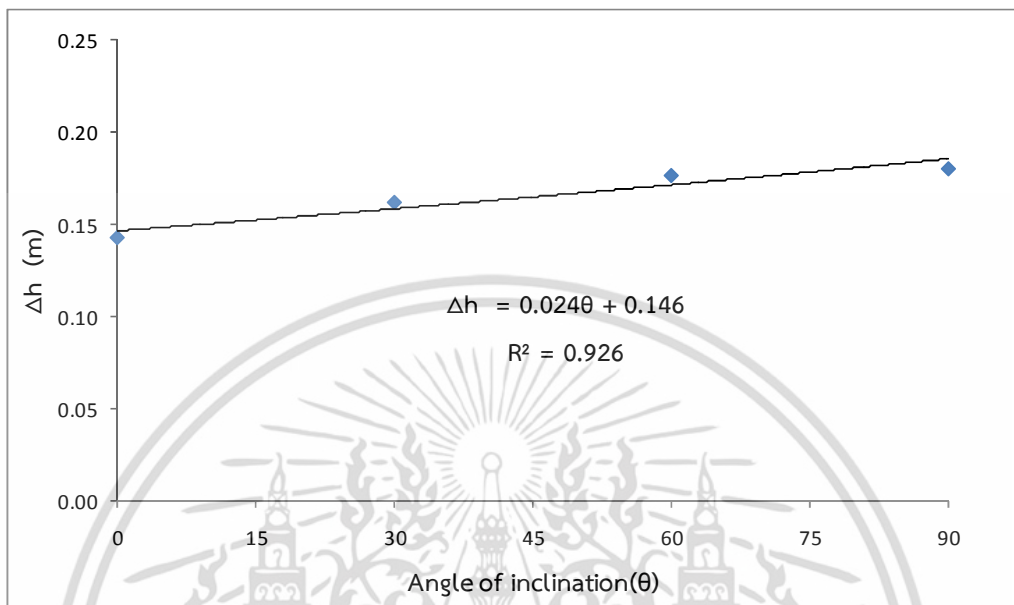


รูปที่ 4.53 แสดงสมการความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียในกรณีที่มีขนาดของอนุภาคเม็ดพลาสติก มีค่าต่างกันออกไปและแสดงถึงสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการ

นำค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมพลอตลงบนกราฟ หลังจากนั้นหาความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียที่ได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งจากการพลอตกราฟและลากเส้นแนวโน้มผ่านจุดที่ทำการพลอตกราฟ สังเกตได้ว่ากราฟที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง และสามารถหาความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเป็นสมการเส้นตรง (Linear equation) โดยแสดงอยู่ในรูปที่ 4.53 จากรูปที่ 4.53 ได้ความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากความแตกต่างของขนาดอนุภาคเป็น $\Delta h = 0.003d_s + 0.158$ โดยสมการที่ได้จากการหาความสัมพันธ์นี้ สามารถนำไปใช้ทำนายผลของค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน ซึ่งจากสมการที่ได้สังเกตได้ว่าค่าความชันที่ได้มานั้นมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าความดันสูญเสียนั้นมีค่าแปรผันตรงกับขนาดของอนุภาคที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่มีการเปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเมื่อนำค่าของขนาดของอนุภาคแทนค่าลงไปค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของอนุภาคที่เพิ่มขึ้น และเมื่อหาสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการที่ได้รับออกมาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการที่ได้นั้นมีค่าเท่ากับ 0.986 ดังแสดงในรูปที่ 4.53 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือที่ได้รับมีค่าใกล้ 1 มากเท่าไร ก็จะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นตามไปด้วย

4.5.2 ผลของมุมลาดชันต่อความดันสูญเสีย

ในส่วนของความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น จากกรณีการไหลที่ความเร็ว 3 m/s อนุภาคของแข็งที่ผสมเป็นเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm อัตราส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์



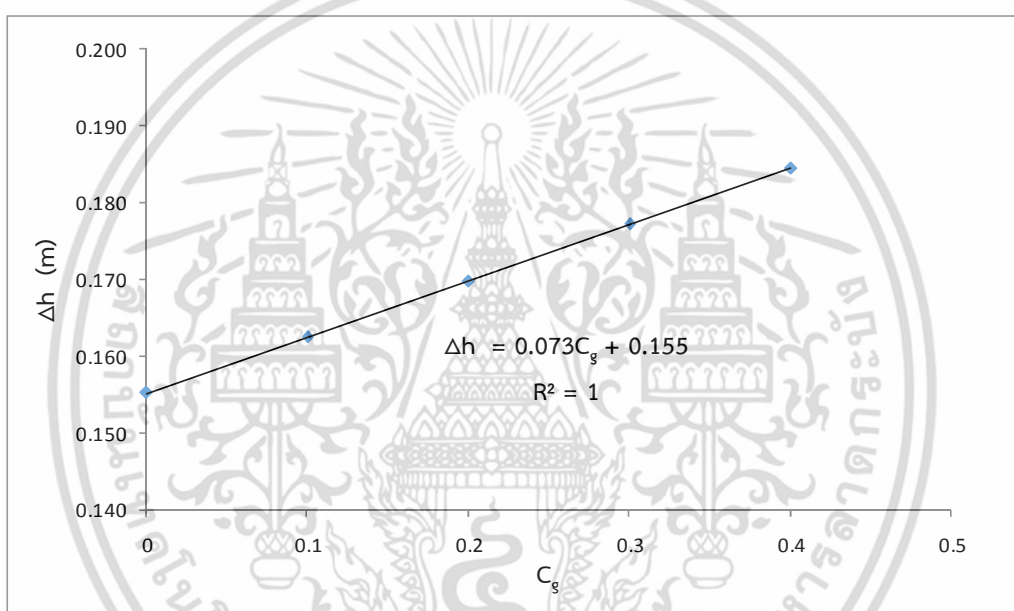
รูปที่ 4.54 แสดงสมการความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียในกรณีที่มีขนาดมุมลาดชันมีค่าต่างกันออกไปและแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการ

นำค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาพลอตลงบนกราฟ หลังจากนั้นลากเส้นแนวโน้มผ่านจุดที่ทำการพลอตลงบนกราฟเพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียในกรณีมุมลาดชันของท่อมีค่าต่างกันออกไป พบว่าลักษณะของความสัมพันธ์ที่ได้มีแนวโน้มเป็นสมการเส้นตรง (Linear equation) โดยได้ความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากความแตกต่างของขนาดมุมลาดชันของท่อเป็น $\Delta h = 0.024\theta + 0.146$ โดยสมการที่ได้จากการหาความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้ทำนายผลของค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากมุมลาดชันของท่อที่แตกต่างกันได้ ซึ่งจากสมการที่ได้สังเกตได้ว่าค่าความดันที่ได้นั้นมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าความดันสูญเสียที่มีค่าแปรผันตรงกับขนาดของมุมลาดชันของท่อที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อนำค่าของขนาดของมุมลาดชันของท่อแทนค่าลงไปค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของมุมลาดชันของท่อที่เพิ่มขึ้น และเมื่อหาสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการพบว่าเท่ากับ 0.926 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของสมการ ดังแสดงในรูปที่ 4.54

4.5.3 ผลของอัตราส่วนผสมต่อความดันสูญเสีย

จากการคำนวณเมื่อเราทราบถึงค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น จากกรณีการไหลที่ความเร็ว 3 m/s ท่อลาดชัน 30 องศา อนุภาคของแข็งที่ผสมเป็นเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาพลอตลงบนกราฟ หลังจากนั้นหาความสัมพันธ์ของค่าความดันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียที่ได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งจากการพลอตกราฟและลากเส้นแนวโน้มผ่านจุดที่ทำการพลอตกราฟ จากการหาความสัมพันธ์พบว่ากราฟที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear equation) โดยมีความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากความแตกต่างของขนาดอนุภาคเป็นดังสมการ $\Delta h = 0.073C_g + 0.155$ ดังแสดงในรูปที่ 4.55 ซึ่งค่าความชันที่ได้มีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นกรณีใช้อัตราส่วนผสมต่างๆ จะมีค่าแปรผันตรงกับอัตราส่วนผสมที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถนำค่าอัตราส่วนผสมแทนค่าลงในสมการ และทำนายค่าความดันสูญเสียที่จะเกิดขึ้นได้ และเมื่อหาสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการที่ได้รับออกมาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการที่ได้นั้นมีค่าเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.55 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของสมการ

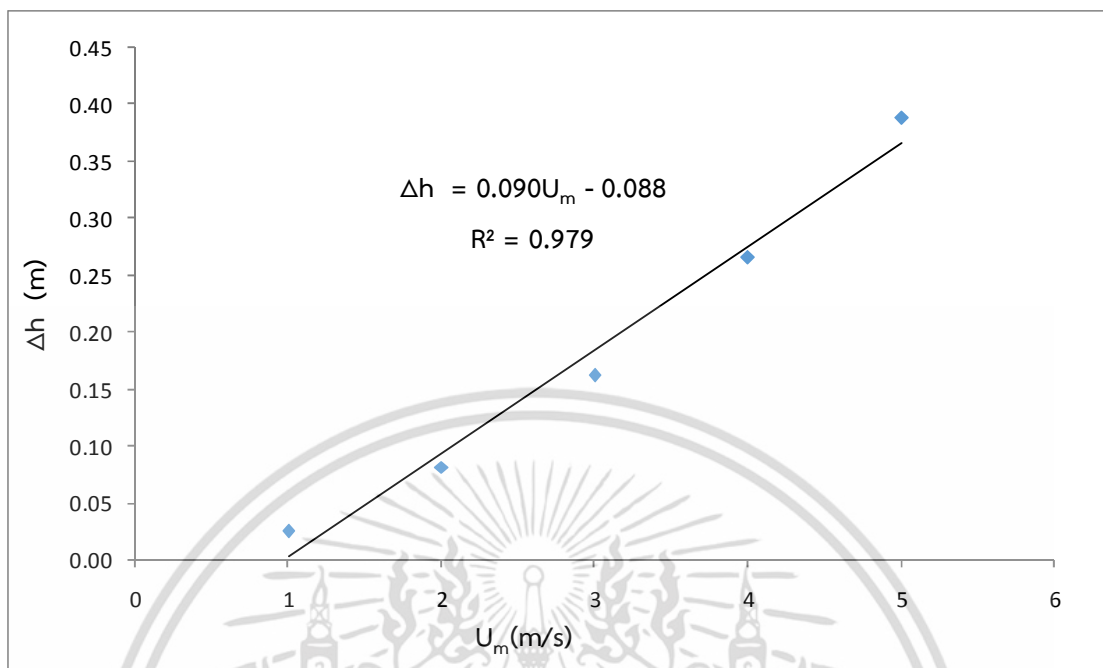


รูปที่ 4.55 แสดงสมการความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียในกรณีใช้อัตราส่วนผสมมีค่าต่างกันออกไปและแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการ

4.5.4 ผลของความเร็วต่อความดันสูญเสีย

ในส่วนของค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น กรณีท่อลาดชัน 30 องศา อัตราส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์ อนุภาคของของแข็งที่ผสมเป็นเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm ในส่วนของค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น กรณีท่อลาดชัน 30 องศา อัตราส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์ อนุภาคของของแข็งที่ผสมเป็นเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm เมื่อนำค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาพลอตลงบนกราฟ และลากเส้นผ่านเพื่อหาแนวโน้มผ่านจุดที่ทำการพลอตลงบนกราฟเพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียในกรณีความเร็วการไหลมีค่าต่างกันออกไป พบว่าลักษณะของความสัมพันธ์ที่ได้มีแนวโน้มเป็นสมการเส้นตรง (Linear equation) โดยได้ความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียที่เกิด

จากความแตกต่างของความเร็วการไหลในท่อเป็นดังสมการ $\Delta h = 0.090U_m - 0.088$ โดยสมการที่ได้จากการหาความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้ทำนายผลของค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากมุลาด



รูปที่ 4.56 แสดงสมการความสัมพันธ์ของค่าความดันสูญเสียในกรณีที่มีความเร็วมีค่าต่างกันออกไป และแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการ

ชั้นของท่อที่แตกต่างกันได้ ซึ่งสังเกตได้ว่าค่าความชันที่ได้มานั้นมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าความดันสูญเสียที่มีค่าแปรผันตรงกับค่าความเร็วการไหลที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อนำค่าของความเร็วการไหลแทนค่าลงไปค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น และสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการมีค่าเท่ากับ 0.979 แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของสมการดังแสดงในรูปที่ 4.56

จากการศึกษาเชิงพารามิเตอร์จากสมการแนวโน้มในหัวข้อที่ 4.5 โดยสังเกตได้จากค่าความชันของกราฟ พบว่า ค่าความเร็วเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนผสมระหว่างของแข็งและของเหลว การเปลี่ยนแปลงมุลลาดชั้นของท่อ และการเปลี่ยนแปลงขนาดความโตของอนุภาคของแข็งตามลำดับโดยค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดความโตของอนุภาคของแข็งจะมีผลต่อค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด

การคำนวณค่าความดันสูญเสีย ของของไหลผสมในท่อด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent

5.1 โปรแกรม ANSYS Fluent

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์ปัญหาคำนวณพลศาสตร์ของไหลผ่านรูปทรงซับซ้อน จัดได้ว่าค่อนข้างเป็นของใหม่เมื่อเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เดียวกันนี้ที่ใช้แก้ปัญหาอื่น ๆ การออกแบบปัญหาสมัยใหม่หลายปัญหาในปัจจุบันนั้นยังไม่สามารถทำการทดลองได้ หรือหากทำได้ก็ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงมาก ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบยานอวกาศความเร็วสูงข้ามทวีป ดังเช่นแสดงในรูปที่ 5.1 ทั้งนี้ เนื่องจากปัญหาพลศาสตร์ของไหลถูกครอบคลุมด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งส่งผลให้ระเบียบวิธีการคำนวณมีความซับซ้อนตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม หากสามารถหาผลลัพธ์ของสมการไหลได้อย่างถูกต้องแล้ว ผู้วิเคราะห์จะพบกับความหลากหลายของผลลัพธ์ซึ่งจะก่อให้เกิดความเข้าใจ ความประทับใจ และความกระตือรือร้นอยากแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นไปอีก

การวิเคราะห์ปัญหาการไหลเพื่อหาความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ ฯลฯ สำหรับใช้ในการออกแบบงานทางวิศวกรรมหรือการศึกษางานทางวิทยาศาสตร์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics ซึ่งเรียกย่อๆโดยทั่วไปว่า CFD) ได้เข้ามามีบทบาทและก่อให้เกิดประโยชน์เป็นอย่างมากในปัจจุบัน พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณผสมผสานกับความรู้ทางด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสมดุลของการไหลนั้น ก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่สามารถแสดงได้ด้วยกราฟิกสี ทำให้นักวิเคราะห์สามารถเข้าใจปรากฏการณ์ของการไหลได้เป็นอย่างดีเป็นผลให้สามารถปรับปรุง ดัดแปลงรูปแบบของการออกแบบ จนได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ก่อนนำไปสร้างจริงหรือทำการทดลองอีกต่อหนึ่งเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการออกแบบนั้น นอกจากนี้ยังช่วยลดค่าใช้จ่าย ต้นทุนการสร้างแบบจำลองจริงขึ้นมาเพื่อทดสอบหรือแก้ไขหลังจากการทดสอบและยังช่วยลดเวลาลงไปเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองแต่เพียงอย่างเดียวที่เคยทำกันมาในอดีตทำให้การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์ปัญหาคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเหมาะแก่การวิเคราะห์ปัญหาการไหลได้หลากหลายรูปแบบทั้งทางด้านการประยุกต์ใช้หรือทางด้านการวิจัยและพัฒนา

สำหรับการไหลของของไหลที่มีความหนืด เป็นการไหลที่รวมผลที่เกิดจากการกระจายตัว และปรากฏการณ์ที่เกิดจากความหนืด โดยสมการควบคุม (Governing Equations) ที่เขียนในรูปแบบอนุรักษ์ (Conservation Form) ของการไหลของของไหลที่มีความหนืด (Viscous flow) ที่ใช้สำหรับกรณีการไหลอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแสดงสมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์ 2 สมการคือ สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และ สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum equation)

ในบทนี้เราจะทำการคำนวณหาความดันสูญเสียของของไหลผสมระหว่างของแข็งกับของเหลวที่เกิดขึ้นภายในท่อลาดชันที่วางทำมุมต่างกัน มีส่วนผสมในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ และมีขนาดของส่วนผสมที่เป็นของแข็งที่แตกต่างกัน ของแข็งที่ผสมในน้ำคือเม็ดพลาสติก และของเหลวที่เราพิจารณาคือน้ำ เราจะศึกษาการหาความดันสูญเสียของของไหลผสมในท่อลาดชันโดยใช้วิธีการคำนวณและจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent ทำการวิเคราะห์ หลังจากนั้นจะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB

วิธีการคำนวณและจำลองการไหลด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เราจะใช้โปรแกรม ANSYS Fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมนำมาวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) โดยทำการสร้างโครงตาข่ายตามรูปแบบที่กำหนดและอาศัยระเบียบวิธีในการแบ่งช่วง โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้สมการควบคุมภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตหลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลและแสดงผลเฉลย



Dryden Flight Research Center ED97 43968-01
 NASA HYPER-X AT MACH 7: This computational fluid dynamic (CFD) image is of the Hyper-X vehicle at the Mach 7 test condition with the engine operating.

รูปที่ 5.1 เส้นชั้นแสดงลักษณะการกระจายของความดันของอากาศรอบยานอวกาศความเร็วสูง

5.2 วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การหาความสัมพันธ์การสูญเสียของของไหลผสมในท่อลาดชันด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 16.0 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 หลักการทำงานและสมการควบคุม

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) เป็นการใช้คอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamics) โดยมีพื้นฐานในการพิจารณาของไหลที่มีความต่อเนื่องให้อยู่ในรูปแบบของลักษณะเป็นช่วงโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ วิธีการส่วนใหญ่ที่จะใช้กันคือ การแบ่งช่วงโดเมนปริภูมิ (Spatial domain) ให้เป็นเซลล์ขนาดเล็กเพื่อก่อให้เกิดโครงข่ายเชิงปริมาตร (Volume mesh) หรือ กริด (grid) แล้วใช้อัลกอริทึม (Algorithm) ที่เหมาะสมในการแก้สมการของการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นสมการออยเลอร์ (Euler Equation) สำหรับการไหลแบบไม่หนืด (Inviscid flow) และสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) สำหรับการไหลแบบหนืด (Viscid flow) นอกจากนี้โครงข่ายอาจจะมีลักษณะรูปแบบโครงสร้างที่ไม่แน่นอน (Unstructured mesh) เช่น มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมใน 2 มิติ หรือมีลักษณะเป็นรูปทรงปริมาตรใน 3 มิติ หรืออาจจะมีลักษณะรูปแบบโครงสร้างแน่นอน (Structured mesh) ก็ได้ หลักการทำงานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. ก่อนการประมวลผล (Pre-Processing)

เป็นขั้นตอนการกำหนดโดเมนการไหลที่ต้องทำการวิเคราะห์ ทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของวัสดุที่ต้องการทำการวิเคราะห์ และทำการแบ่งโดเมนดังกล่าวออกเป็นส่วนย่อย โดยอาจแบ่งเป็นตารางย่อยๆ (Mesh) หรือเอลิเมนต์เล็กๆ (Element) โดยเส้นตารางเหล่านี้จะตัดกันที่จุดต่อ (Node) ที่เป็นตำแหน่งที่เราจะคำนวณหาผลลัพธ์ของการไหลอันได้แก่ ความเร็ว ความดัน และ อุณหภูมิ เป็นต้น การแบ่งโดเมนของการไหลออกเป็นเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กหรือตารางที่มีความถี่มากเกินไปจะทำให้เพิ่มจำนวนจุดต่อที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่ามากขึ้นตามไปด้วย อันจะเป็นผลต่อเนื่องต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณและปริมาณหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้ก็จะมีคามแม่นยำสูงขึ้น ซึ่งผู้วิเคราะห์จะต้องเป็นผู้ตัดสินใจถึงความเหมาะสมก่อนการคำนวณ แล้วจึงกำหนดคุณสมบัติของของไหล คุณสมบัติของเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) สำหรับปัญหานั้นตามลำดับ

2. ขั้นตอนการคำนวณและประมวลผล (Solving-Processing)

เป็นขั้นตอนในการแก้ปัญหาการไหลของของไหล โดยการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งมี 4 แบบ คือ Finite difference method, Finite element method, Finite volume method และ Spectral method โดยรูปแบบพื้นฐานของการแก้ปัญหา มีขั้นตอนดังนี้

2.1 ประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า SIMPLE algorithm (Semi-Implicit Method for Pressure-linked Equations)

2.2 เปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential Equation) ให้เป็นสมการพีชคณิต ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข หรือ เรียกว่าวิธี Discretization methods

2.3 แก้สมการพีชคณิต

3. หลังการประมวลผล (Post-Processing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยความเร็วย่อยในทิศแกนต่างๆ ความดัน และอุณหภูมิที่ตำแหน่งใดๆ ในโดเมนการไหลนั้น ผลลัพธ์ที่คำนวณได้เหล่านี้โดยปกติจะมีจำนวนมากซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนจุดต่อ (Node) และแสดงอยู่ในรูปของตัวเลข ซึ่งไม่สะดวกต่อการแปรข้อมูลที่ได้จากการคำนวณเพื่ออธิบายปรากฏการณ์การการไหลที่เกิดขึ้น ดังนั้นโดยทั่วไปมักจะแสดงผลลัพธ์เหล่านี้ในรูปกราฟฟิค เช่น การพล็อตเวกเตอร์ (Vector) การพล็อตด้วยเส้นชั้น (Contour line) หรือ เส้นทางการเดินของอนุภาค (Streamline) เป็นต้น

5.2.1.1 แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ

สำหรับการไหลของของไหลที่มีความหนืด เป็นการไหลที่รวมผลที่เกิดจากการกระจายตัวและปรากฏการณ์ที่เกิดจากความหนืด โดยสมการควบคุม (Governing Equations) ที่นำมาใช้ในการคำนวณการไหลของของไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ที่มีความหนืด (Viscous flow) ที่ใช้สำหรับกรณีการไหลอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) และการจำลองปรากฏการณ์การไหลไม่มีการถ่ายเทความร้อนหรือพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง ใช้สองสมการหลักคือ สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equation) เมื่อนำสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equation) มาพิจารณาการไหลแบบ 3 มิติ และนำมาเขียนในรูปแบบอนุรักษ์ (Conservation form) สามารถเขียนได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) หรือ สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (5.1)$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

เมื่อ \vec{V} คือเวกเตอร์ความเร็วในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ และ $\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$ โดยที่ \hat{i}, \hat{j} และ \hat{k} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit vector) ตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\text{X component: } \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (5.2)$$

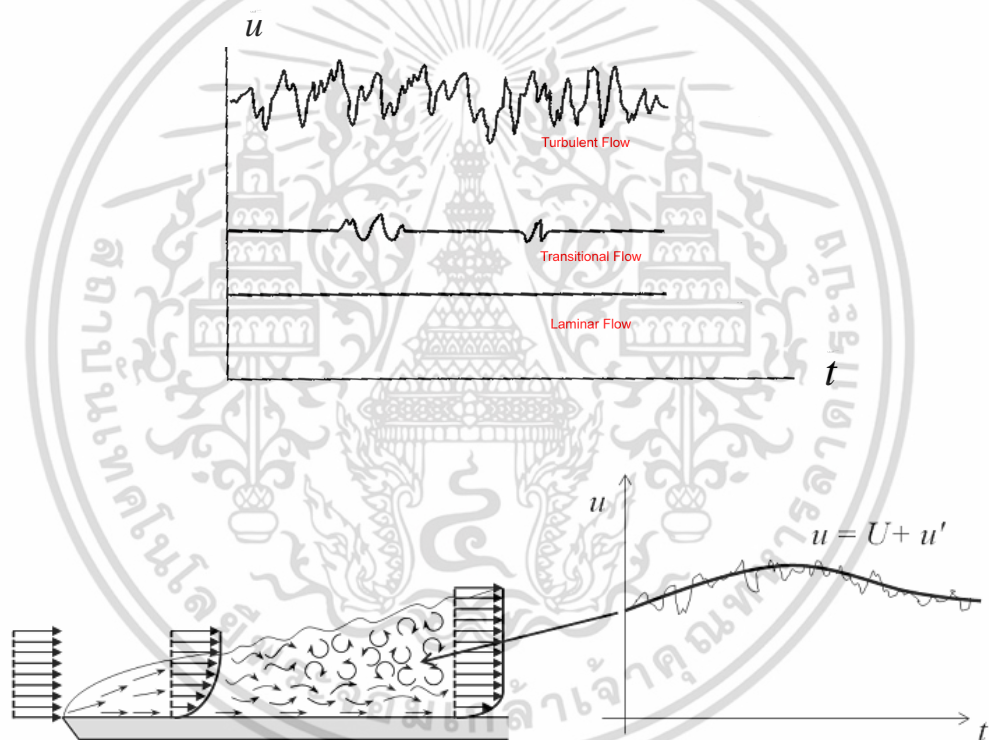
$$\text{Y component: } \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (5.3)$$

$$\text{Z component: } \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับสมการการเคลื่อนที่ของของไหลแบบปั่นป่วน จะประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่องหรือสมการอนุรักษ์มวล และสมการโมเมนตัม เช่นเดียวกับการไหลแบบราบเรียบ แต่แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมีความซับซ้อนกว่า เนื่องจากการพิจารณาในรูปของค่าเฉลี่ยและค่าการสั่น (Fluctuation) ของการไหลแบบปั่นป่วนดังรูปที่ 5.2 จะใช้การแก้สมการของการเคลื่อนที่ สมการออยเลอร์ (Euler Equation) สำหรับการไหลแบบไม่มีความหนืด (Inviscid Flow) และสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) สำหรับการไหลแบบมีความหนืด (Viscid Flow) จึงได้นำวิธี Reynolds-averaged Navier-Stokes ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยในการคำนวณค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง และได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการทำงานวิจัย มาใช้กับสมการการเคลื่อนที่เพื่อแปลงชุดสมการการไหลให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย รวมทั้งใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) มาช่วยในการคำนวณ



รูปที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกนเทียบกับเวลาของการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

Reynolds-average Navier-Stokes equations (RANS)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลสำหรับระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วน โดยจะทำการคำนวณความปั่นป่วนทั้งหมด โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน และปรับปรุงรูปแบบสมการนาเวียร์-สโตกส์เดิมโดยการแยกตัวแปรที่เกิดจากการไหล เช่น ความเร็ว (u) ออกเป็นสองส่วน คือส่วนเป็นค่าเฉลี่ย (\bar{u})

และส่วนที่เป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น (u') ดังแสดงในสมการที่ 5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(X,t) = \bar{u}(X) + u'(X,t) \quad (5.5)$$

สมการ Reynold-averaged Navier-Stokes สำหรับการไหลอัดตัวไม่ได้ แบบปั่นป่วนสามารถแสดงได้ในรูปเวกเตอร์ได้ ดังสมการที่ 5.6

$$-\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{V} + \nabla \cdot (\tau_{ij,turbulent}) = (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \quad (5.6)$$

จะสังเกตได้ว่าสมการมีรูปแบบสมการเหมือนกันกับสมการโมเมนตัม ยกเว้นเพียงเทอม Reynolds stresses ($\tau_{ij,turbulent}$) ที่เพิ่มขึ้นมา ซึ่งเทอมที่เพิ่มขึ้นมานี้ก็เนื่องมาจากการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วนนั่นเอง เทอมของ Reynolds stresses ที่เพิ่มขึ้นมานี้มีผลทำให้ไม่สามารถแก้สมการเชิงอนุพันธ์ทั้งสองได้ เนื่องมาจากจำนวนตัวแปรที่มากกว่าสมการดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) มาช่วยในการคำนวณ

เมื่อ $\tau_{ij,turbulent}$ คือผลที่เกิดจากความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความปั่นป่วน (Specific stress tensor) $\tau_{ij,turbulent}$ บนพิกัด x, y, z สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\tau_{ij,turbulent} = - \begin{bmatrix} \bar{u}'^2 & \bar{u}'v' & \bar{u}'w' \\ \bar{u}'v' & \bar{v}'^2 & \bar{v}'w' \\ \bar{u}'w' & \bar{v}'w' & \bar{w}'^2 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) เป็นแบบจำลองที่ช่วยในการคำนวณสมการความต่อเนื่องหรือสมการอนุพันธ์มวล สมการโมเมนตัม และ สมการ Reynold-averaged Navier-Stokes equations (RANS) โดยจะใช้ในการหาค่า Reynolds stress ซึ่งในการคำนวณนั้นไม่จำเป็นต้องหาค่า Fluctuation แต่จะสนใจเพียงค่าเฉลี่ยของการไหลนั้น โดยแบบจำลองที่ใช้นั้นต้องสามารถคำนวณพฤติกรรมกรไหลในลักษณะต่างๆ ได้อย่างแม่นยำรวมทั้งช่วยประหยัดหน่วยความจำ แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้กันอยู่ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมีอยู่หลายแบบด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ Model เนื่องจากการไหลเป็นแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ (Fully turbulent) และสมมุติว่าไม่มีการไหลแบบหมุนวนเนื่องจากเป็นการไหลในท่อตรง ซึ่งระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วน $k - \varepsilon$ Model ประกอบไปด้วย Transport equation 2 สมการ โดยจะต้องหาค่าตอบของสมการดังกล่าวไปพร้อมๆ กับการแก้สมการอนุพันธ์มวลและสมการอนุพันธ์โมเมนตัม โดยตัวแปรที่เพิ่มขึ้นมาจะประกอบไปด้วย k (Turbulence kinetic energy) และ ε (Turbulent dissipation rate)

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $k - \varepsilon$ Model มีอยู่ 3 แบบ คือ

1. แบบ Standard เหมาะกับการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ (Fully turbulent) และไม่มีกรไหลแบบหมุนวน
2. แบบ RNG เหมาะกับการไหลที่มีการไหลแบบหมุนวน และเมื่อที่มีความโค้งงอซึ่งแบบ RNG จะตอบสนองต่อความโค้งงอได้ดีกว่าแบบแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบบ Realizable เหมาะกับของไหลผสมที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ที่มีการไหลแบบหมุนวน มีความโค้งเว้าของผิวท่อ ของไหลมีการไหลแบบแยกชั้นการไหล โดยที่แต่ละแบบจะมีสมการ Turbulence kinetic energy (k) เหมือนกัน ต่างกันที่สมการ Turbulent dissipation rate (ε) ซึ่งในแต่ละแบบจะมีการกำหนดตัวแปรและค่าคงที่ที่แตกต่างกันไป สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\sigma k}{\sigma x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5.8)$$

สมการอัตราการแพร่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent dissipation rate equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon \mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b S_\varepsilon \quad (5.9)$$

ค่าคงที่ต่างๆภายในสมการมีค่าดังนี้

เมื่อ k คือ พลังงานจลน์ความปั่นป่วน

ε คือ อัตราการแพร่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

G_k คือ ค่าการแพร่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเนื่องจากความเร็วเฉลี่ยเกรเดียนท์

หาได้จาก $-\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$

G_b คือ ค่าการแพร่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเนื่องจากการลอยตัว

หาได้จาก $\beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$

Pr_t คือ Prandtl Number ของพลังงานความปั่นป่วน 0.85

β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (5.10)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (5.11)$$

$$S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (5.12)$$

โดยที่ Eddy Viscosity (μ_t) สามารถเขียนได้เป็น $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}} \quad (5.13)$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (5.14)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (5.15)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \tilde{\varepsilon}_{ijk} \omega_k \quad (5.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (5.17)$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \quad (5.18)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \quad (5.19)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (5.20)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (5.21)$$

เมื่อ Ω_{ij} คือ Mean Rate of rotation tensor

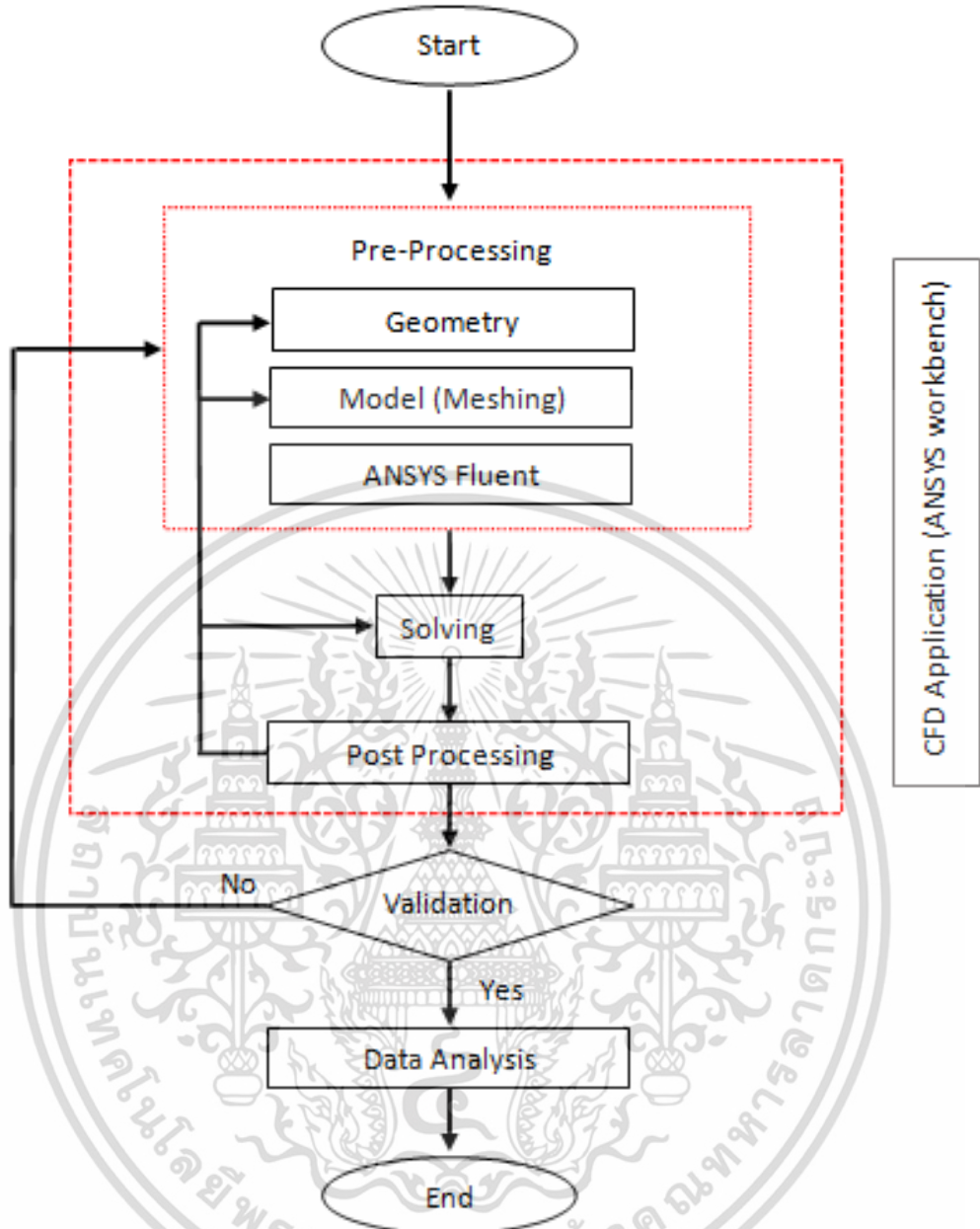
ε_{ijk} คือ Alternating tensor

และค่าคงที่ต่างๆในสมการมีค่าดังนี้

$$C_u = 0.09, C_{1-\varepsilon} = 1.44, C_{2-\varepsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0 \text{ และ } \sigma_\varepsilon = 1.3$$

5.2.2 การจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 16.0

การจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 16.0 นั้น จำเป็นต้องมีการวาดรูปทรงเรขาคณิตพร้อมทั้งสร้างกริดเพื่อใช้ในการแบ่งโดเมนของการไหลออกเป็นเอลิเมนต์หรือตารางเล็กๆ เพื่อที่จะสามารถใช้ฟังก์ชันชนิดต่างๆ สำหรับแทนลักษณะการไหลผ่านเอลิเมนต์หรือตารางเล็กๆนั้น ฟังก์ชันดังกล่าวจะถูกแทนลงไปในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล ผนวกเข้ากับกระบวนการทางคณิตศาสตร์ เพื่อลดความผิดพลาด ก่อให้เกิดระบบสมการเชิงพีชคณิตขนาดใหญ่ที่จำเป็นต้องแก้ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยหลักการทำงานสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก

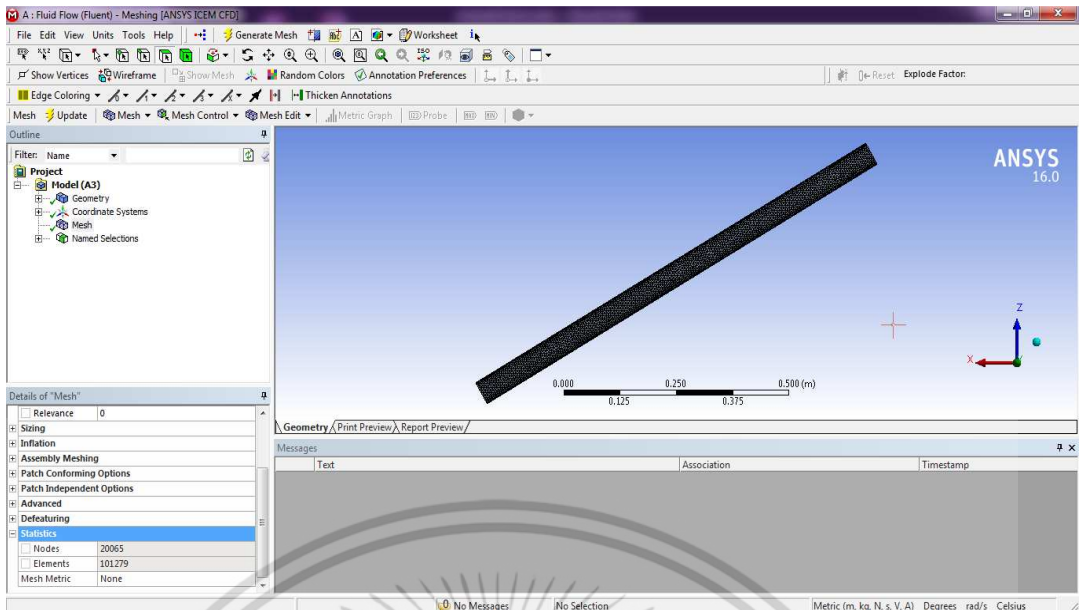


รูปที่ 5.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ANSYS Fluent

5.2.2.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-processing)

การสร้างรูปทรง (Creating Geometry) ทำการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม SolidWorks หลังจากนั้นเซฟเป็นไฟล์ Parasolid(*.x_t) เพื่อนำไปใช้คำนวณในโปรแกรม ANSYS Fluent การสร้างเซลล์คำนวณ (Meshing) คือการแบ่งเอลิเมนต์ในส่วนต่างๆ กริดที่ใช้เป็นกริดแบบ Polyhedral เพื่อช่วยลดความหนาแน่นของกริดซึ่งจะช่วยลดภาระและเวลาในการคำนวณของคอมพิวเตอร์แต่ผลลัพธ์ที่ได้ยังมีความแม่นยำ ความหนาแน่นของกริดทั้งหมดของท่อที่ใช้รวมแล้วมีค่าประมาณ 101,279 เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

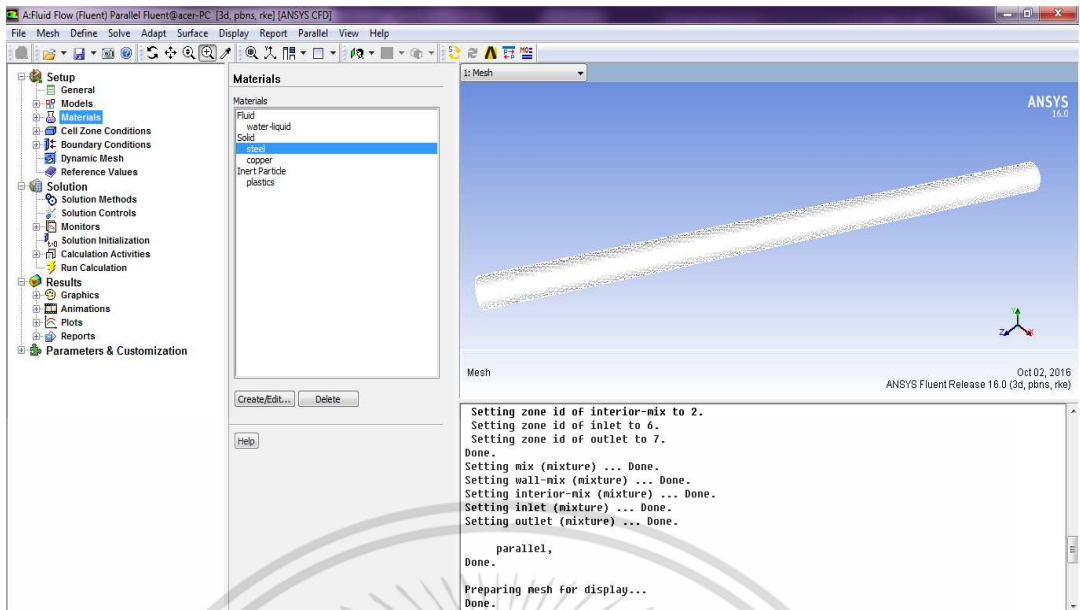


รูปที่ 5.4 ขั้นตอนการกำหนดขนาดเมช

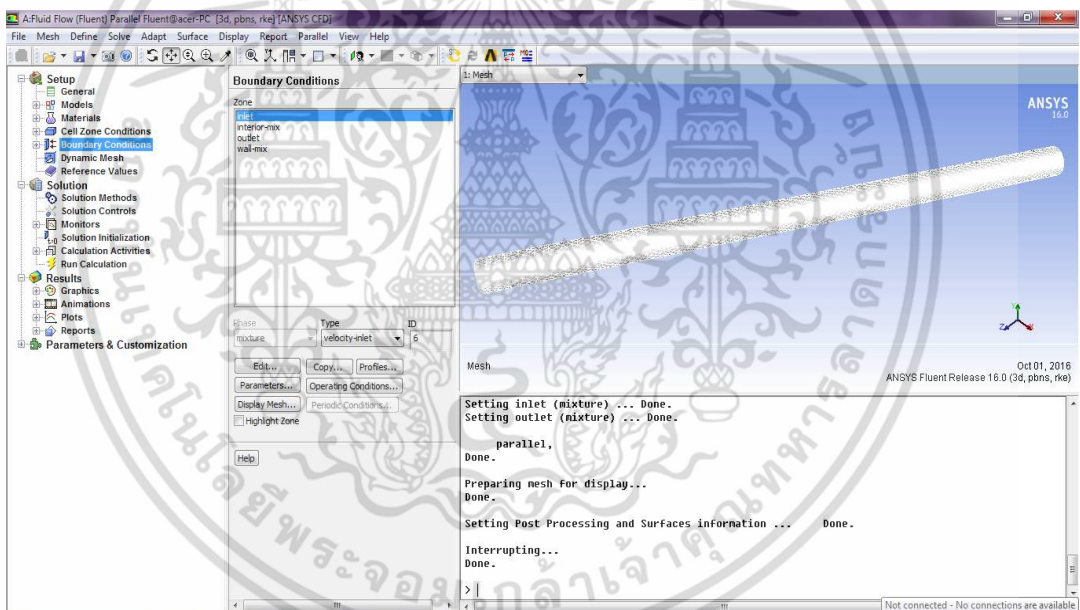
5.2.2.2 ขั้นตอนการคำนวณ (Solve-processing)

เป็นการนำรูปทรงเสมือนจริงที่ทำการสร้างกริดแล้วเข้าสู่โปรแกรม ANSYS Fluent 16.0 เพื่อทำการกำหนดค่าต่างๆที่จำเป็นต่อการคำนวณ มีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

1. นำเข้ารูปทรงที่ทำการสร้างกริดแล้วเข้าสู่โปรแกรม ANSYS Fluent 16.0
2. เลือกแบบจำลองที่จะใช้ในการแก้ปัญหาพร้อมกับตั้งค่าข้อมูลของขอบเขตต่างๆ รวมถึงกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของการไหลด้วย โดยที่เงื่อนไขเริ่มต้นกำหนดดังนี้ Model $k - \epsilon$ realizable และ Discrete phase
3. ทำการกำหนดชนิดของของไหลที่จะให้ไหลในท่อซึ่งการจำลองนี้จะใช้ของไหลผสม คือ น้ำผสมเม็ดพลาสติกทรงกลมซึ่งในส่วนของการคำนวณค่าความดันสูญเสียด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent ของงานวิจัยนี้จะใช้เม็ดพลาสติกสองขนาดคือ ขนาด 1.1 mm และ 2.91 mm (Injections Inert particle)



รูปที่ 5.5 การกำหนดชนิดของของไหล



รูปที่ 5.6 การกำหนดขอบเขตของการไหล

- เงื่อนไขที่ทางเข้า (Inlet boundary condition)
ลักษณะของของไหลผสมที่ไหลผ่านท่อนั้น กำหนดเป็นความเร็วเฉลี่ยและค่าความเข้มของการปั่นป่วน (Turbulence intensity, I) ซึ่งจากค่าความเข้มของการปั่นป่วน สามารถคำนวณหาค่า k และ ε ได้จากสมการ

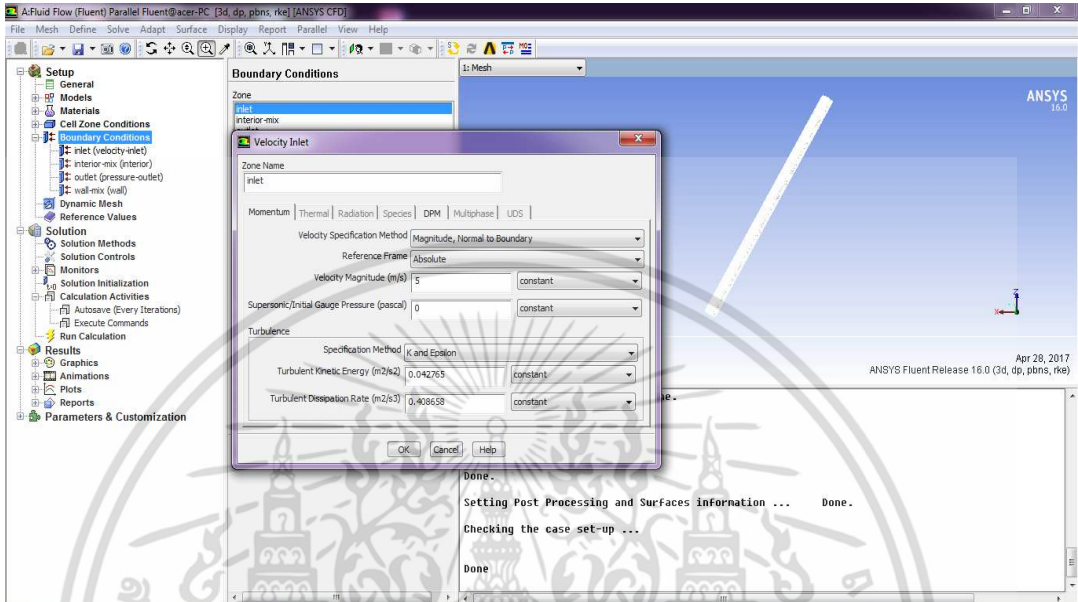
$$I = 0.16Re^{-\frac{1}{8}} \quad (5.22)$$

$$k = \frac{3}{2}(\bar{u}I)^2 \quad (5.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell} \quad (5.24)$$

เมื่อ C_{μ} คือค่าคงที่โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.09 และ $\ell = 0.07L$ โดยที่ L คือค่าคุณลักษณะความยาว (Characteristic length) และ ℓ คือสเกลของความยาว

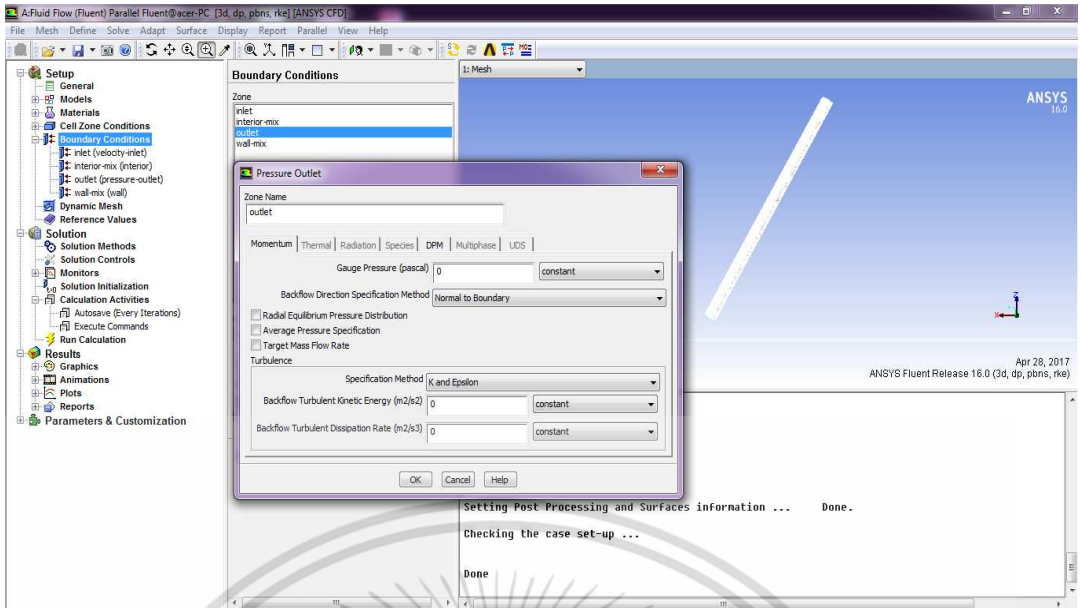


รูปที่ 5.7 ตัวอย่างการกำหนดเงื่อนไขที่ทางเข้า

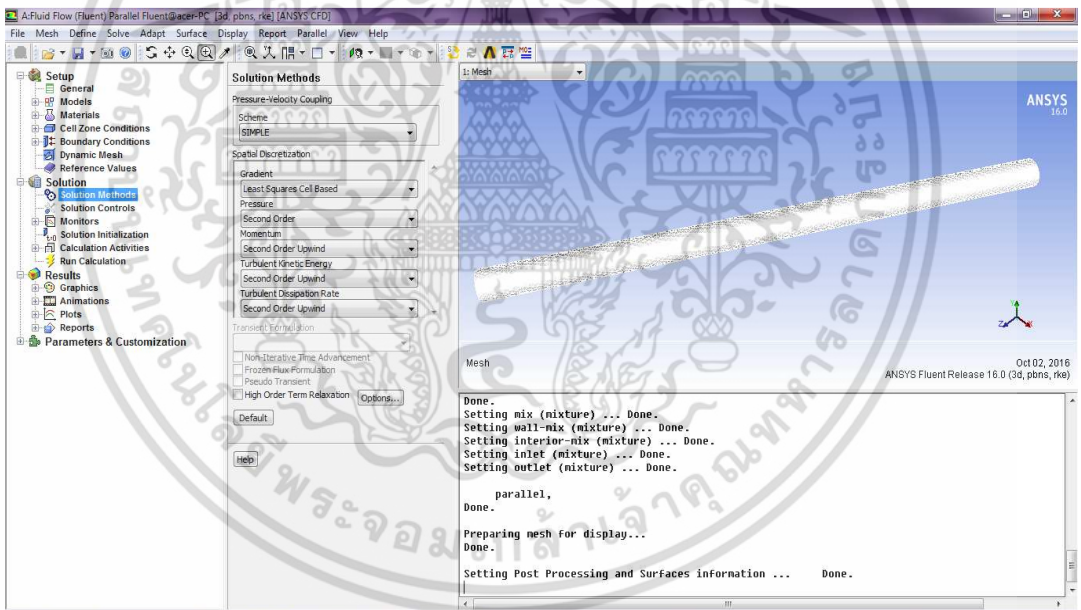
- เงื่อนไขที่ทางออก (Outlet boundary condition)
สำหรับเงื่อนไขขอบที่ทางออกกำหนดเป็นแบบ Outflow ซึ่งให้ค่าพลังค์ของการแพร่มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยไม่คิดผลจากความดันที่ทางออกย้อนกลับ (Back pressure) และการไหลอยู่ในช่วงพัฒนาเต็มที่แล้ว (Fully developed) Pressure Outlet มีค่าเป็นศูนย์

4. เลือกรูปแบบการหาคำตอบของสมการ SIMPLE algorithm (Semi-Implicit Method for Pressure-linked Equations) ซึ่งถูกพัฒนาโดย Patankar and Spalding (1972) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการคำนวณความเร็ว และความดัน เพื่อให้ค่า u และ v ที่คำนวณได้จากสมการโมเมนตัมนั้นสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง โดยใช้สมการ Pressure-Correction ช่วยในการคำนวณและการจัดลำดับและวางความต่อเนื่องของการแก้สมการเพื่อให้ค่าที่คำนวณได้นั้นสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ในการหาคำตอบดังแสดงในรูป 5.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

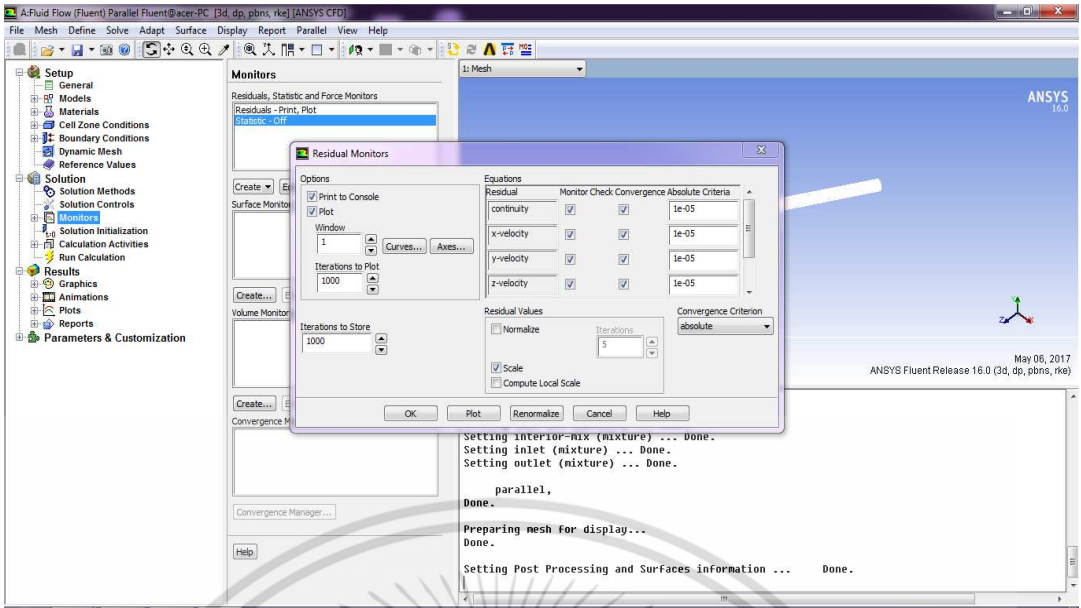


รูปที่ 5.8 ตัวอย่างการกำหนดเงื่อนไขที่ทางออก



รูปที่ 5.9 การกำหนดรูปแบบของการหาคำตอบสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

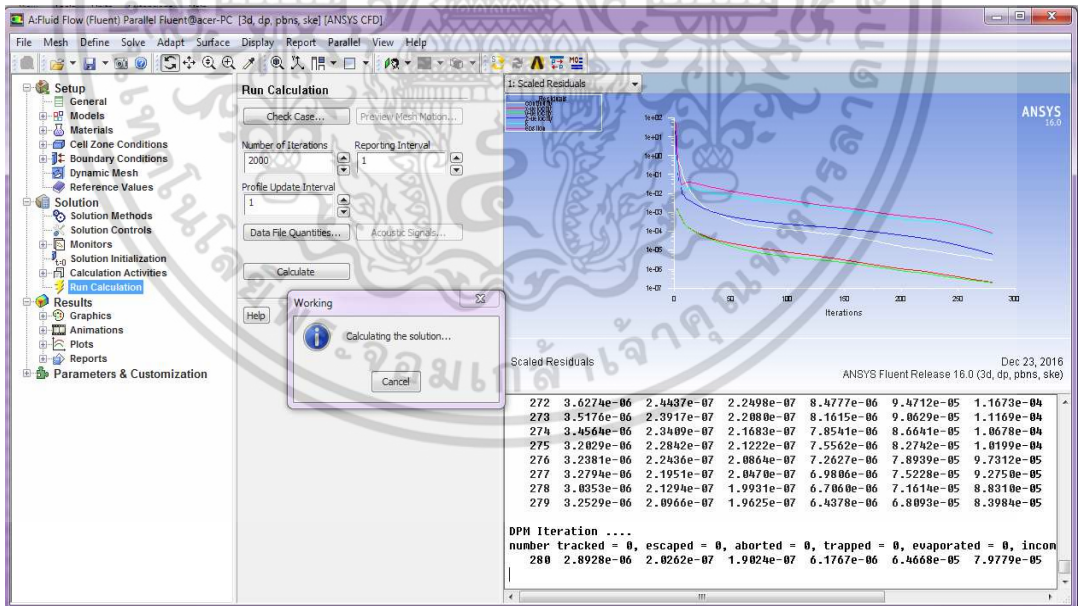
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ตัวอย่างการกำหนดค่า Criteria สำหรับการหาคำตอบ

5. กำหนดค่า Criteria ที่ใช้เป็นเกณฑ์สำหรับการลู่ออกใกล้ศูนย์ของสมการต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมให้มีค่าเท่ากับ 0.00001

6. ทำการจำลองการไหลและวัดค่าความดันที่ทางเข้าและทางออก



รูปที่ 5.11 การคำนวณของโปรแกรม ANSYS Fluent

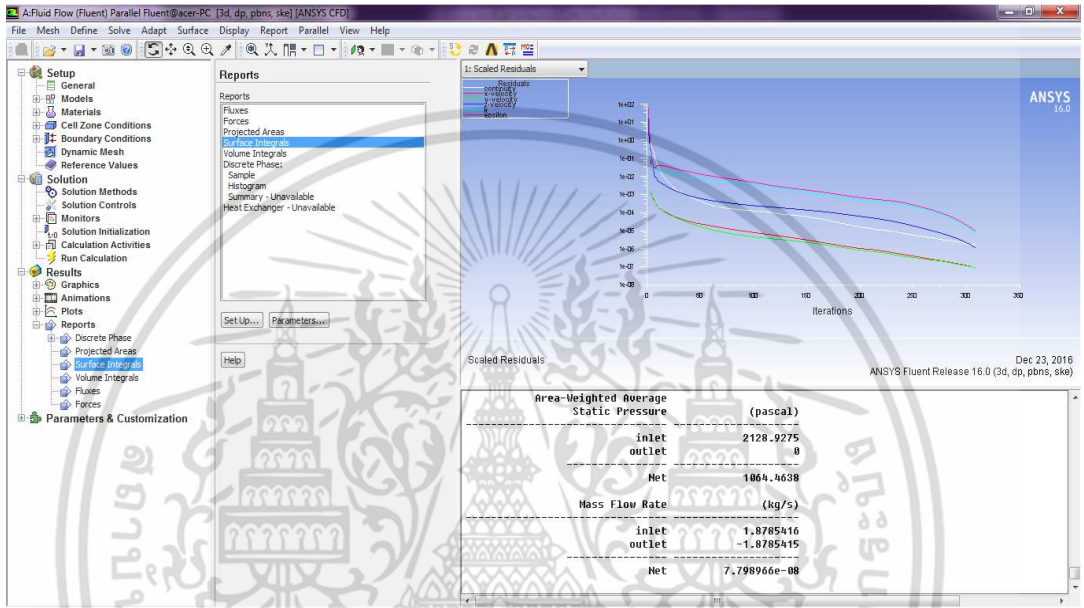
5.2.2.3 ขั้นตอนการแสดงผลและวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post-processing)

เมื่อนำผลของการจำลองการไหลที่ได้ มาทำการยืนยันผลการจำลองด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

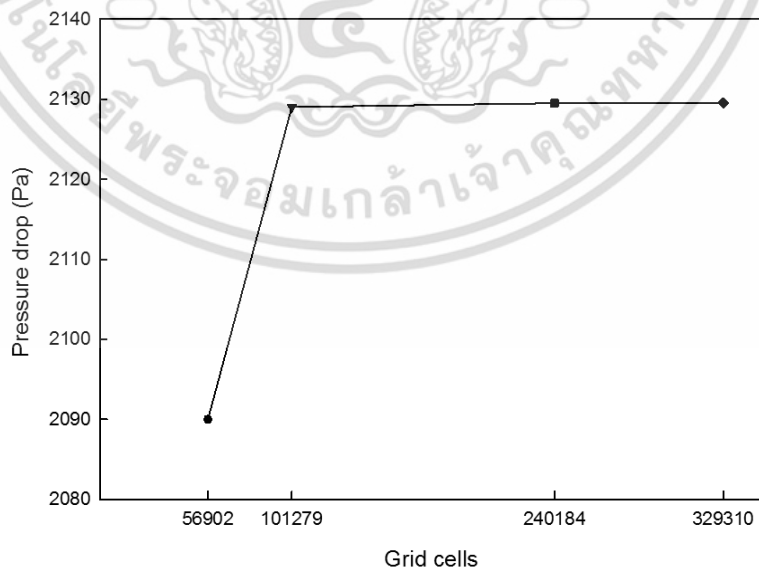
1. อัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้าและทางออกต้องมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการหาจำนวนของกริดเซลล์ที่ไม่ส่งผลต่อค่าคำตอบที่ได้ (Mesh Independence) ดังแสดงในรูปที่ 5.13 กริดเซลล์ที่จำนวน 56,902 เอลิเมนต์ มีค่าความผิดพลาดสูงเนื่องจากจำนวนเอลิเมนต์ที่น้อยเกินไป จำนวนกริดเซลล์ตั้งแต่ 101,279 เอลิเมนต์เป็นต้นไปให้ผลการคำนวณที่ผิดพลาดน้อยมากจึงเลือกใช้ความหนาแน่นของกริดเซลล์ที่ 101,279 เอลิเมนต์ในการคำนวณ เพื่อลดภาระและเวลาในการคำนวณของโดยที่ผลลัพธ์ที่ได้ยังมีความแม่นยำ โดยมีรูปแบบของกริดเป็น Polyhedral



รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวล

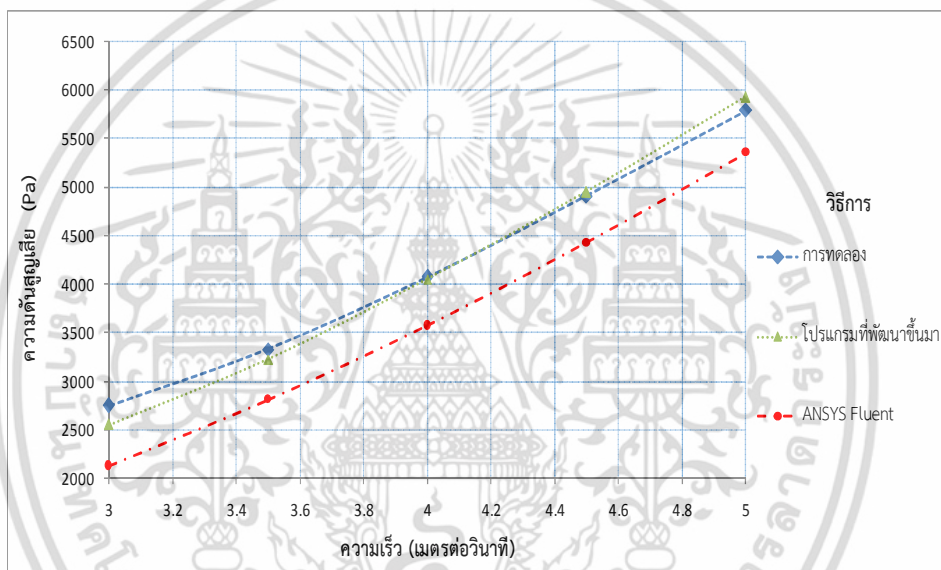


รูปที่ 5.13 กราฟการเปรียบเทียบผลของจำนวนกริดเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทวนสอบโมเดลรูปแบบการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent

นำโมเดลการจำลองมาจำลองเทียบกับการงานวิจัยของ Krampa ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับของไหลผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่ไหลในท่อชั้น 90 องศา [9] โดยของไหลผสมที่ใช้คือ น้ำผสมเม็ดพีวีซีพลาสติก $\rho_s=1400 \text{ kg/m}^3$ $d_s=3.4 \text{ mm}$ $D=40 \text{ mm}$ และความเร็วการไหลตั้งแต่ 3-5 m/s ที่อัตราส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่า ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent เทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของ Krampa มีค่าคลาดเคลื่อน 14 เปอร์เซ็นต์ เมื่อการยืนยันผลสามารถยอมรับได้จึงนำกริดและวิธีการที่ได้ไปใช้ต่อในการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent ลักษณะเดียวกับที่เราคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาที่ค่าอื่นๆแล้วนำผลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา และโปรแกรม ANSYS Fluent มาทำการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบ

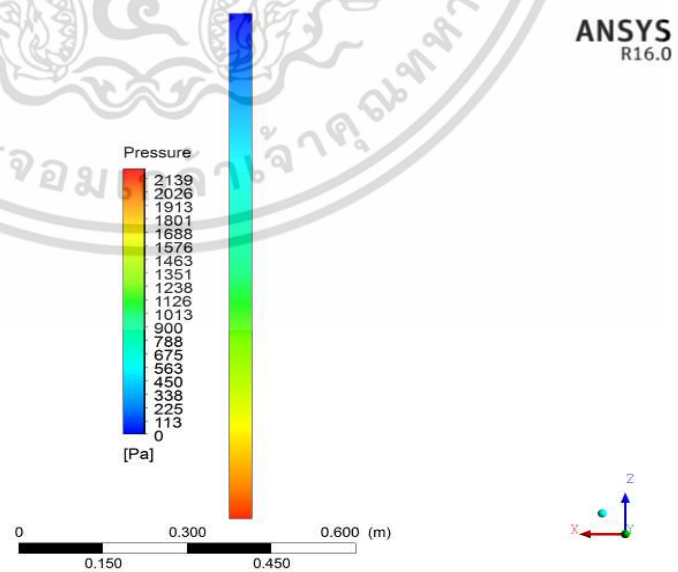


รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วของของไหลผสม ที่ท่อชั้น 90 องศา $\rho_s=1400 \text{ kg/m}^3$, $d_s=3.4 \text{ mm}$, $D=40 \text{ mm}$, $C_g=10 \%$

รูปที่ 5.14 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา และโปรแกรม ANSYS Fluent กับผลการทดลองของ Krampa [9] กรณีของไหลเป็นของไหลผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพีวีซีพลาสติกที่ไหลในท่อชั้น 90 องศา จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา และโปรแกรม ANSYS Fluent มีค่าสอดคล้องกันกับค่าที่ได้จากการทดลองของ Krampa แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมามีค่าความคลาดเคลื่อนจากโปรแกรม ANSYS Fluent อยู่ประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลลัพธ์ที่แตกต่างกันนี้อาจเกิดจากการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent นั้นใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD Computational Fluid Dynamics) เป็นการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและอัลกอริทึม (Algorithm) ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหล โดยมีชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่มีการระบุความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่แน่นอนหรือชัดเจนหากแต่ระบุอัตราการเปลี่ยนแปลงแทนซึ่งแตกต่างจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา โดยผู้เขียนได้เขียนขึ้นเพื่อประโยชน์ทางการศึกษา ไม่หวังกำไรใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการพีชคณิต ตัวอย่างเช่น ในสมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับของไหลในอุดมคติ ซึ่งไม่มีความหนืดและอัดตัวไม่ได้ สามารถระบุความสัมพันธ์ของความเร็วนั้นเป็นอัตราส่วนต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความดัน ชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ไม่สามารถใช้ระบุตำแหน่งได้แต่สามารถบอกความเร็วได้ ทำให้คำตอบของชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ถูกเรียกว่าสนามความเร็วหรือสนามการไหล ซึ่งเป็นตัวอธิบายถึงความเร็วของของไหล ณ ตำแหน่ง และเวลาที่กำหนด และเมื่อสนามความเร็วถูกระบุแล้ว ตัวแปรอื่น ๆ เช่น อัตราการไหล หรือแรงจุด ก็จะถูกค้นพบด้วยชุดสมการนี้ ต่างออกไปจากสมการที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา ซึ่งมีคำตอบในรูปของเส้นแนวโน้มของตำแหน่งของอนุภาคหรือการเปลี่ยนแปลงของความต่อเนื่อง แต่วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะพิจารณาความเร็วมากกว่าที่จะพิจารณาดำแหน่ง ซึ่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากกว่าสำหรับกลศาสตร์ของไหล สำหรับการสร้างแบบจำลองจะใช้คอมพิวเตอร์ในการสร้างเส้นแนวโน้ม โดยมีสมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการอนุพันธ์ย่อยที่เป็นเส้นตรงหรือไม่เป็นเส้นตรงก็ได้ จึงเหมาะกับทุกสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งในบางกรณีความไม่เป็นเส้นตรงทำให้ปัญหาส่วนมากยากหรือเป็นไปไม่ได้ที่จะแก้ปัญหาคความไม่เป็นเส้นตรงนั้นขึ้นกับความเร่งการพาซึ่งเป็นความเร่งที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความเร็วในแต่ละจุด ดังนั้น การไหลแบบพาไม่ว่าจะเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน ล้วนแต่เกี่ยวข้องกับสมการไม่เป็นเส้นตรงทั้งสิ้น รวมถึงยังใช้สมการเวลาเฉลี่ย Reynolds-averaged Navier–Stokes equations (RANS) แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้ในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อให้คอมพิวเตอร์นำมาใช้เพื่อทำการคำนวณนับล้านครั้ง ก่อนที่จะสร้างแบบจำลองการทำปฏิกิริยาของของไหลต่อขอบผิวซึ่งกำหนดโดยสภาวะของขอบเขต จึงทำให้การคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent ได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างจากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา



รูปที่ 5.15 ผลของค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นโดยจำลองรูปแบบตามงานวิจัยของ Krampa ที่ความเร็ว 3 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

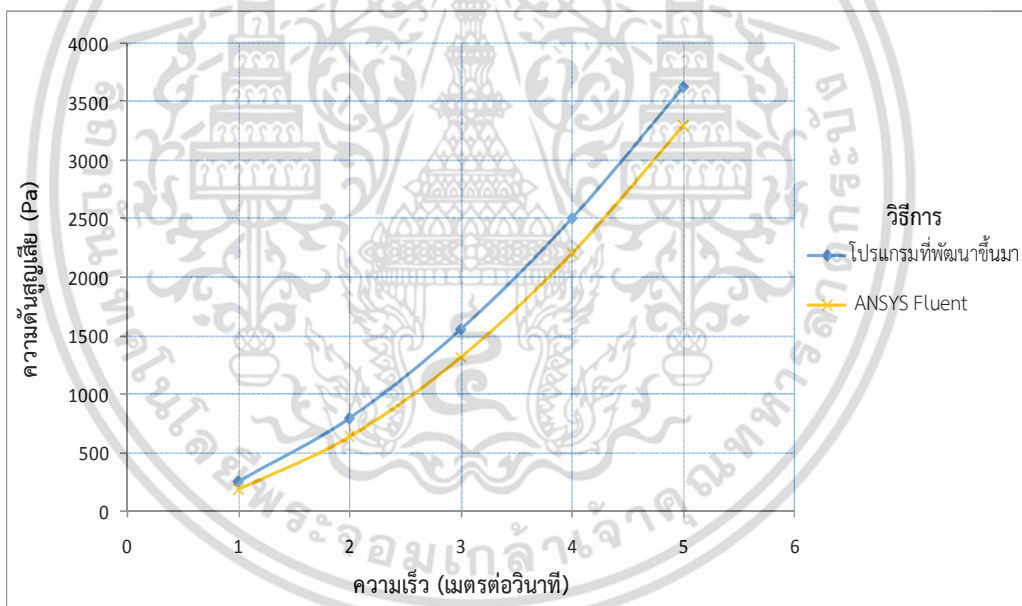
รูปที่ 5.15 เป็นตัวอย่างผลของค่าความดันที่เกิดขึ้นโดยการจำลองรูปแบบโมเดลตามงานวิจัยของ Krampa ที่ความเร็วการไหล 3 m/s

5.4 ผลการคำนวณการสูญเสียความดันการไหลของของไหลผสมในท่อลาดชันที่มี

ความยาว 1 เมตร

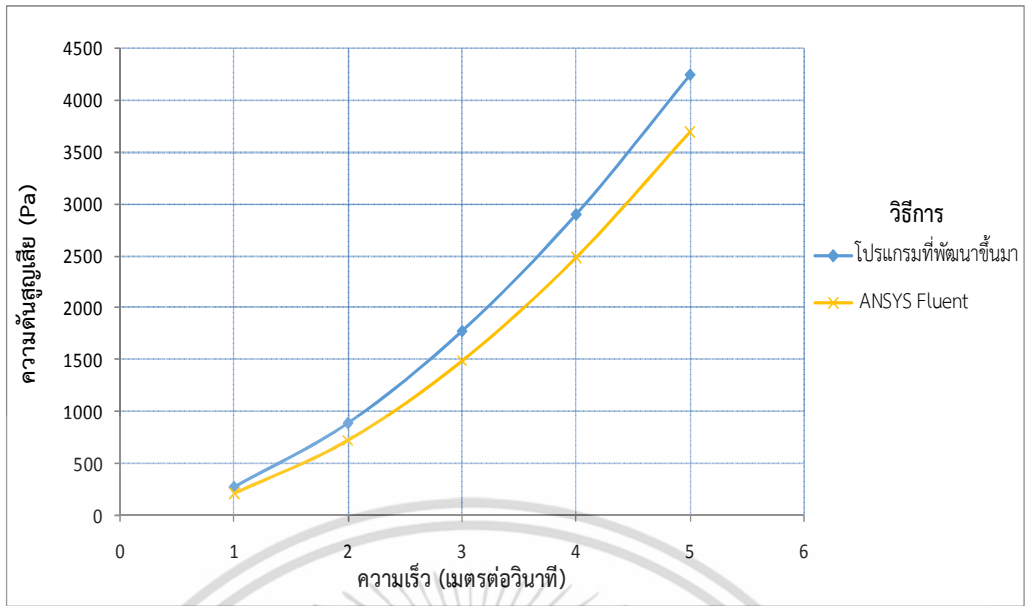
ทำการคำนวณหาค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมระหว่างของแข็งกับของเหลวที่เกิดขึ้นภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 mm ที่วางทำมุมต่างกันตั้งแต่ 0 30 60 และ 90 องศาจากแนวระดับ ในอัตราส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และของไหลผสม คือน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 และ 2.91 mm เพื่อหาค่าความดันสูญเสียโดยหาได้จากผลต่างของความดันที่ทางเข้าและทางออกของท่อที่จำลองขึ้นและนำผลเฉลี่ยที่ได้มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา

5.4.1 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm

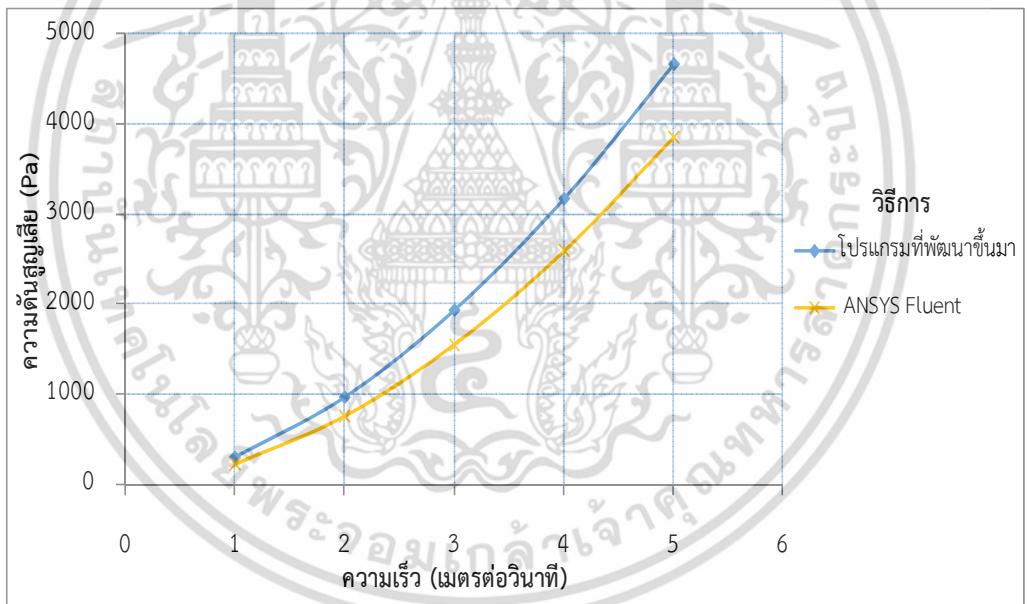


รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อลาดชัน 0 องศา

จากรูปที่ 5.16 – 5.19 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา กับโปรแกรม ANSYS Fluent กรณีของไหลผสมเป็นน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm จากกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความดันสูญเสียก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน

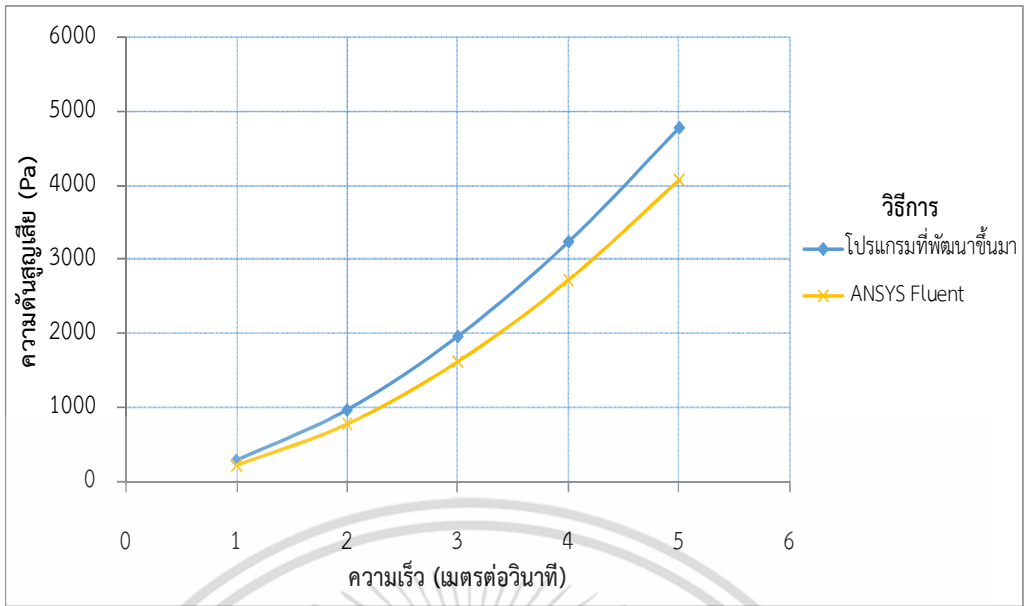


รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชั้น 30 องศา

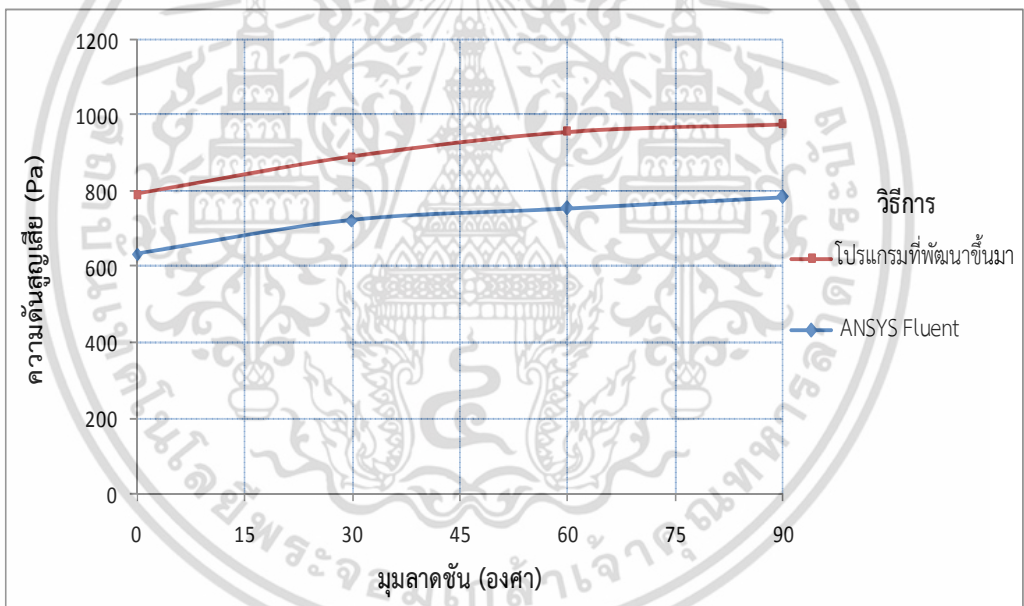


รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชั้น 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

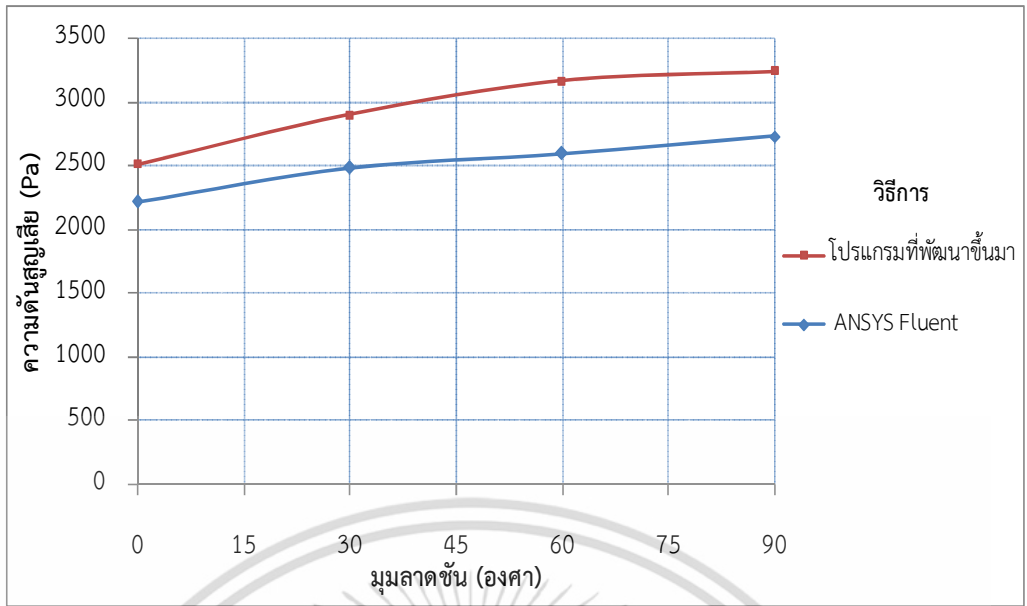


รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชั้น 90 องศา



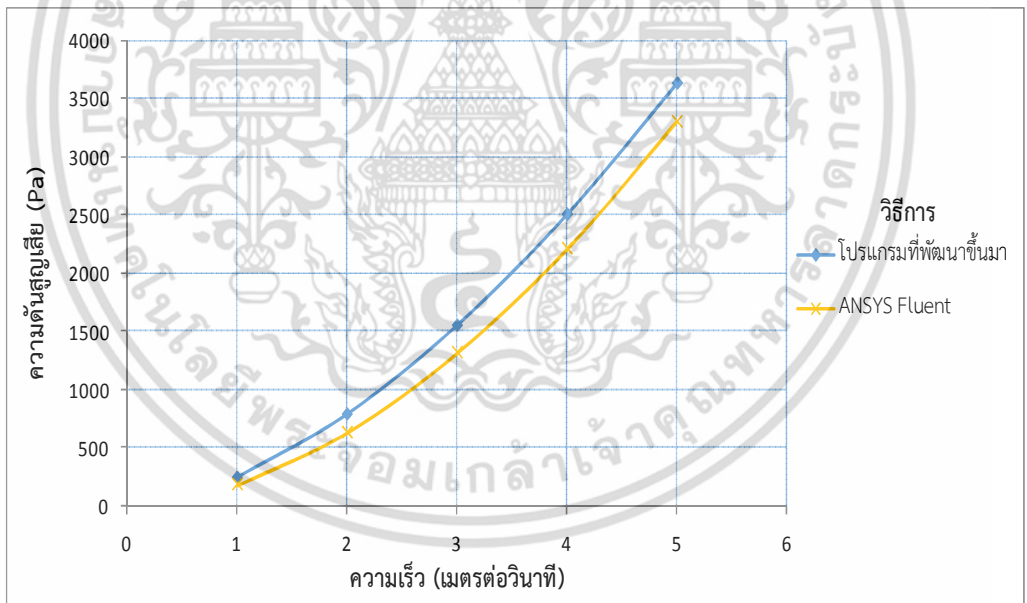
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมลาดชันของท่อ ที่ความเร็ว 2 m/s

รูปที่ 5.20 – 5.21 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมากับโปรแกรม ANSYS Fluent กรณีของไหลผสมเป็นน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมลาดชันของท่อกับค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่า เมื่อมุมลาดชันของท่อที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น



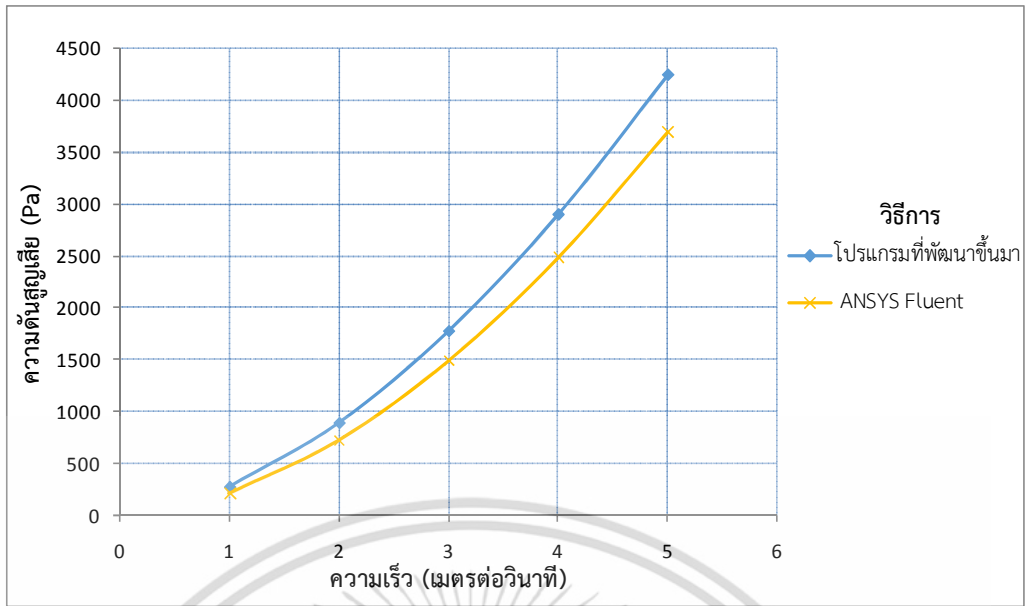
รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุลาดชั้นของท่อ ที่ความเร็ว 4 m/s

5.4.2 กรณีน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.91 mm



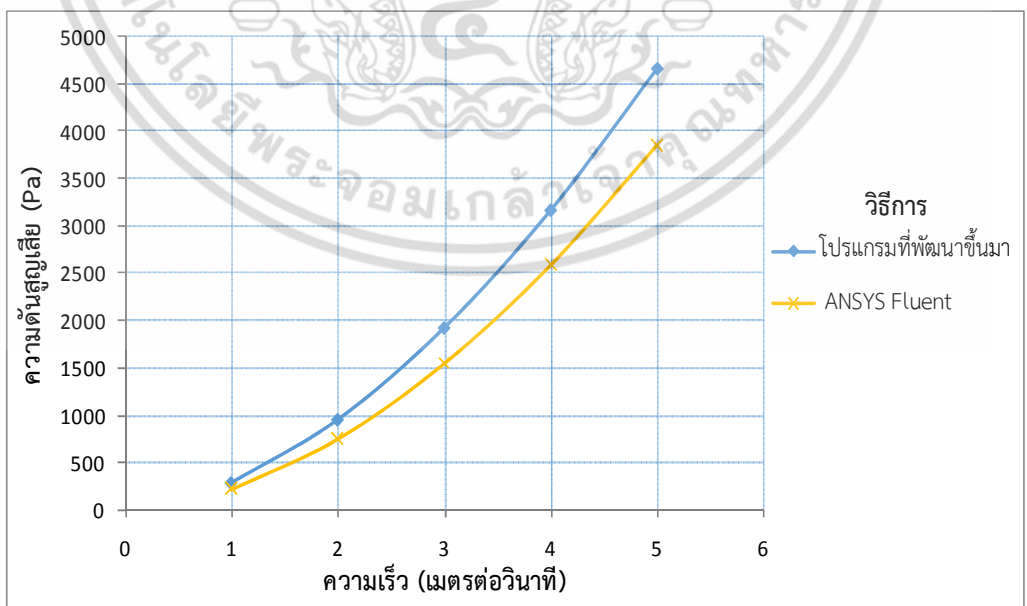
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อลาดชั้น 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



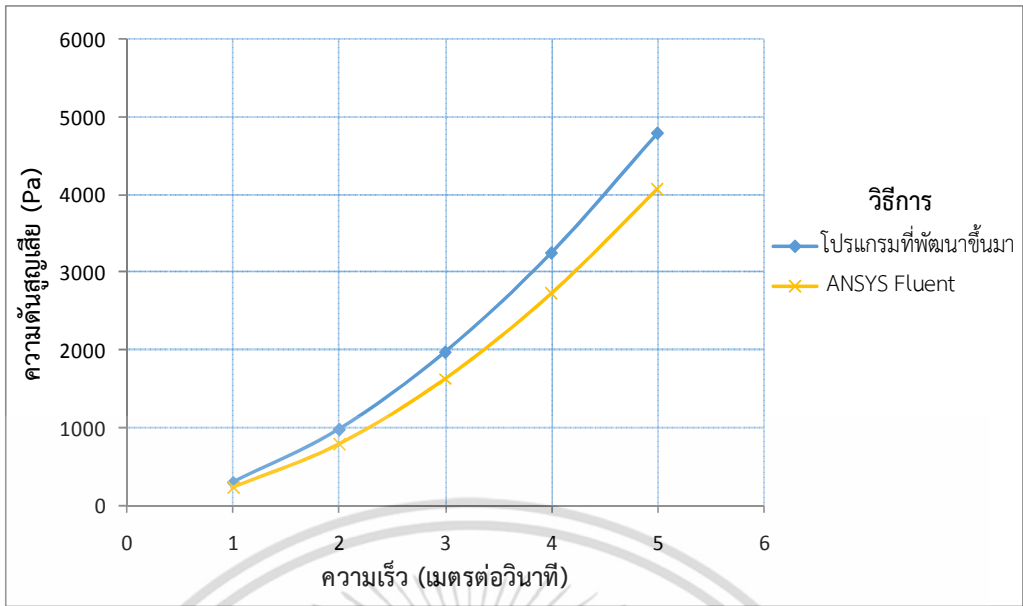
รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชั้น 30 องศา

จากรูปที่ 5.22 - 5.25 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา กับโปรแกรม ANSYS Fluent กรณีของไหลผสมเป็นน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.91 mm จากกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความดันสูญเสียก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และขนาดของเม็ดพลาสติกที่มีขนาดโตขึ้นมีผลทำให้ค่าความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้จากกรณีส่วนผสมเป็นเม็ดพลาสติกที่มีขนาด 2.91 mm จะมีผลทำให้เกิดค่าความดันสูญเสียมากกว่าเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน



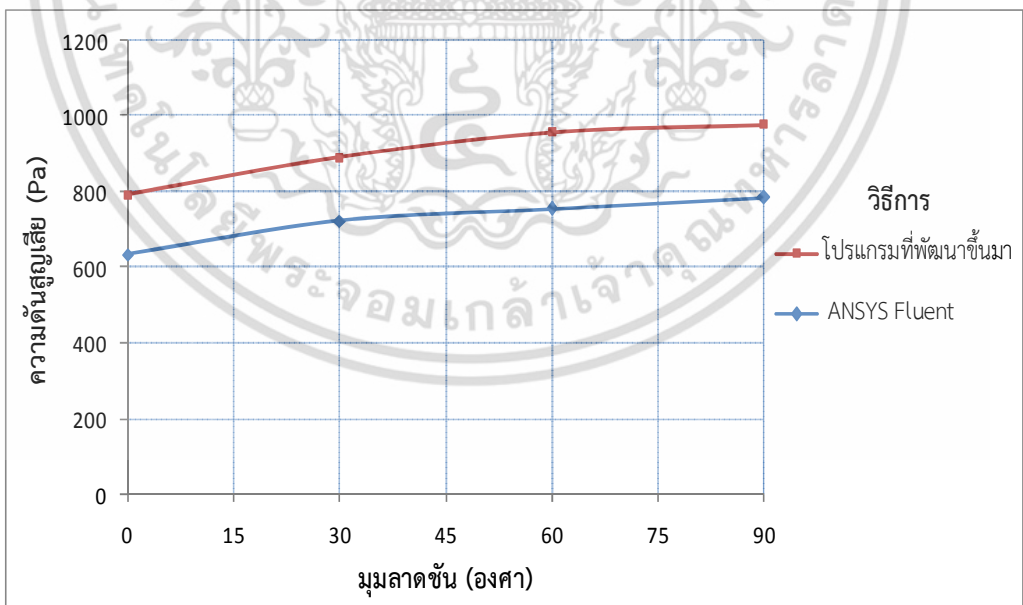
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชั้น 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็ว ท่อชั้น 90 องศา

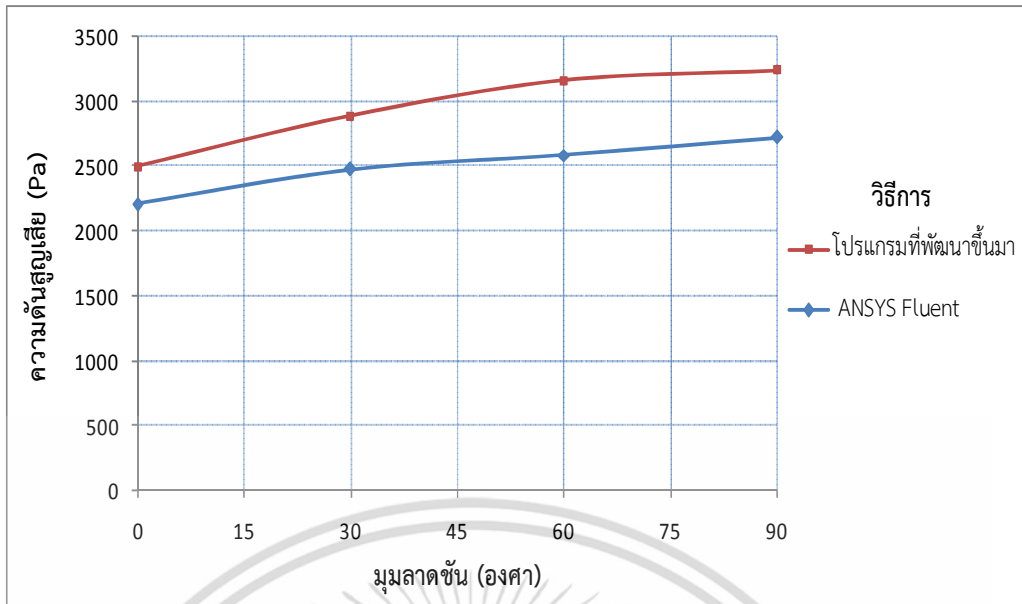
จากรูปที่ 5.26 - 5.27 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา กับโปรแกรม ANSYS Fluent กรณีของไหลผสมเป็นน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.91 mm จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมลาดชันของท่อกับค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่า เมื่อมุมลาดชันของท่อมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความดันสูญเสียก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมลาดชันของท่อ ที่ความเร็ว 2 m/s

ขนาดของเม็ดพลาสติกที่มีขนาดโตขึ้นมีผลทำให้ค่าความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้จากกรณีส่วนผสมเป็นเม็ดพลาสติกที่มีขนาด 2.91 mm จะมีผลทำให้เกิดค่าความดันสูญเสียมากกว่าเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ในสื่อนิตยสารวิชาการ ซึ่งเอกสารนี้เป็นของทางบริษัทและสงวนลิขสิทธิ์ไว้ ไม่สามารถนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสถิตย์เสียดกับมุลาดชั้นของท่อ ที่ความเร็ว 4 m/s

สิ่งที่สำคัญในการออกแบบระบบขนส่งของไหลผสมคือการคำนวณพลังงานที่จะใช้ในการขนส่งของไหลผสม ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมากับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent มีค่าแตกต่างกันอยู่ 12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีสาเหตุดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.3 แต่ผลลัพธ์ที่ได้มาจากทั้งสองวิธีนั้นก็ยังเป็นเพียงการประมาณการที่ได้จากในหลายๆกรณีเท่านั้น ทำให้ในการออกแบบระบบการขนส่งของไหลผสมควรมีการตรวจสอบผลซ้ำด้วยวิธีการทดลองควบคู่กับการคำนวณออกแบบ [11] โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานี้จะเป็นเครื่องมือหนึ่งที่จะช่วยในการดำเนินการเริ่มต้นสำหรับการทำต้นแบบเพื่อทดสอบ พัฒนาต้นแบบและการวิเคราะห์องค์ประกอบที่จำกัดเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของการออกแบบที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ผลที่ได้จากการศึกษาพิจารณาถึงผลของค่าตัวแปรกรณีของไหลผสมเป็นน้ำผสมเม็ดพลาสติก ขนาด 1.1 2.19 และ 2.91 mm ที่อัตราส่วนผสม 0 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ที่ไหลในท่อผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 mm ที่ท่อลาดชัน 0 30 60 และ 90 องศา พบว่า

1. โปรแกรมการคำนวณที่พัฒนาขึ้นมาสามารถช่วยลดเวลาในการคำนวณหาค่าความดันสูญเสียและสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมที่เกิดขึ้นโดยอยู่ในรูปแบบของค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ความเร็ว มุมลาดชัน และอัตราส่วนผสม ที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียที่ไหลผ่านท่อลาดชัน

2. เมื่อศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปร ได้แก่ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ความเร็ว มุมลาดชัน ขนาดของอนุภาค และอัตราส่วนผสม ที่มีต่อค่าความดันสูญเสียที่ไหลผ่านท่อลาดชัน พบว่า จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสีย เรย์โนลด์นัมเบอร์ ค่าความเร็ว มุมลาดชันของท่อ และขนาดของอนุภาค พบว่า อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก เรย์โนลด์นัมเบอร์ ความเร็วของการไหล มุมเอียงของท่อ และขนาดของอนุภาคจะแปรผันตรงต่อค่าความดันสูญเสีย การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก เรย์โนลด์นัมเบอร์ ความเร็วของการไหล มุมเอียงของท่อ และขนาดของอนุภาคจะส่งผลให้ค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อศึกษาเชิงพาราเมตริกจากสมการแนวโน้มโดยสังเกตได้จากค่าความชันของกราฟ พบว่า ค่าความเร็วเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนผสมระหว่างของแข็งและของเหลว การเปลี่ยนแปลงมุมลาดชันของท่อ และการเปลี่ยนแปลงขนาดความโตของอนุภาคของแข็งตามลำดับโดยค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดความโตของอนุภาคของแข็งจะมีผลต่อค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด

3. เมื่อเปรียบเทียบค่าความความดันสูญเสียของของไหลผสมที่ไหลผ่านท่อลาดชันที่ได้จากวิธีคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาและวิธีคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent ค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันแต่ค่าความดันสูญเสียที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent จะมีค่าน้อยกว่าค่าความดันสูญเสียที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองของ Krampa โดยมีค่าแตกต่างกันประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ และผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองของ Krampa โดยค่าที่ได้แตกต่างกันประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น การออกแบบระบบขนส่งของไหลผสม จึงต้องคำนึงถึงตัวแปรดังกล่าวเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียซึ่งจะอยู่ในรูปของการสูญเสียความดันไปกับแรงเสียดทานระหว่างของไหลผสมกับผิวท่อ และสูญเสียความดันกับการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของการไหลในระบบท่อให้เหมาะสมกับการสภาพการใช้งานจริง

โปรแกรมคำนวณค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมในท่อลาดชันสามารถนำไปประยุกต์ใช้ช่วยในการออกแบบระบบการขนส่งของไหลผสมผ่านท่อเพื่อหาค่าความดันสูญเสีย ช่วยเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการคำนวณค่าพลังงานที่ต้องใช้ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการเลือกกำลังของปั๊มที่ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของไหลผสมที่เหมาะสม

ข้อเสนอแนะ

1. โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถพัฒนาต่อเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับลักษณะการไหลในรูปแบบอื่นโดยการเพิ่มส่วนการติดต่อกับผู้ใช้งาน (GUI) ให้หลากหลายมากยิ่งขึ้น โดยการออกแบบตัวโปรแกรมให้สามารถป้อนค่าคุณสมบัติของของไหลผสม เช่น ความหนาแน่นหรือน้ำหนักจำเพาะ ความหนืดจลน์ ฯ
2. ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลผสมในท่อลาดชันด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 16.0 ควรทำการศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนอื่นๆเปรียบเทียบกัน เช่น k-omega model ในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วน ฯ
3. ในการจำลอง Discrete phase model สามารถใช้คำนวณของไหลผสมจำกัดที่อัตราส่วนผสมน้อยคือ 10 เปอร์เซ็นต์ การพัฒนางานวิจัยควรทำการศึกษาการจำลองแบบ Multiphase model ในการจำลองที่สามารถกำหนดอัตราส่วนผสมต่างๆที่มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ได้

บรรณานุกรม

- [1] P. Doron, M. Simkhis and D. Barnea. (1997), “**Flow of Solid-Liquid Mixtures in Inclined Pipes**”, Int. J. Multiphase Flow Vol. 23, No. 2, pp. 313-323
- [2] D.R. Kaushal, Kimihiko Sato, Takeshi Toyota, Katsuya Funatsu, Yuji Tomita. (2005), “**Effect of Particle Size Distribution on Pressure Drop and Concentration Profile in Pipeline Flow of Highly Concentrated Slurry**”, International Journal of Multiphase Flow 31 pp. 809–823
- [3] V. Matousek. (2002), “**Pressure Drops and Flow Patterns in Sand-Mixture Pipes**”, Experimental Thermal and Fluid Science 26 pp. 693–702
- [4] P. Doron, D. Barnea. (1996), “**Flow Pattern Maps For Solid-Liquid Flow in Pipes**”, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 22, No. 2, pp. 273-283
- [5] Pinchas Doron and Dvora Barnea. (1995), “**Pressure Drop and Limit Deposit Velocity for Solid-Liquid Flow in Pipes**”, Chemical Engineering Science, Vol. 50, No. 10, pp. 1595-1604
- [6] Nuampiem P. (2011), “**Calculation of Friction Coefficient and Loss Coefficient of Non-Newtonian Fluids in Pipeline and Valves**” The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand.
- [7] Prabkeao C. and Jaikuson M. (2008), “**The Calculation for Friction Coefficient of Two Phase Flow in The Circular Pipeline**”, Technology and Innovation for Sustainable development conference, Faculty of engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen Thailand, pp 272-276
- [8] Kao, D. T. Y. and Hwang, L. Y. (1979), “**Critical Slope for Slurry Pipeline Transporting Coal and Other Solid Particles**” In Proc. of the 6th Int. Conf. on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, Canterbury, England, pp. 5774.
- [9] Franklin Norvisi Krampa, “**Two-Fluid Modeling of Heterogeneous Coarse Particle Slurry Flows**”, Ph.D. Thesis of University of Saskatchewan. 2009
- [10] R.P. Chhabra and J.F. Richardson. **Non-Newtonian Flow in the Process Industries**, Linacre House Jordan Hill Oxford: Butterworth-Heinemann. 1999
- [11] Baha E. Abulnaga, P.E. **Slurry Systems Handbook**, New York, United states of America: McGraw-Hill. 2002
- [12] Gandhi, R.L. **Slurry and Sludge Piping**, New York, San Francisco, United states of America: McGraw-Hill. 2000

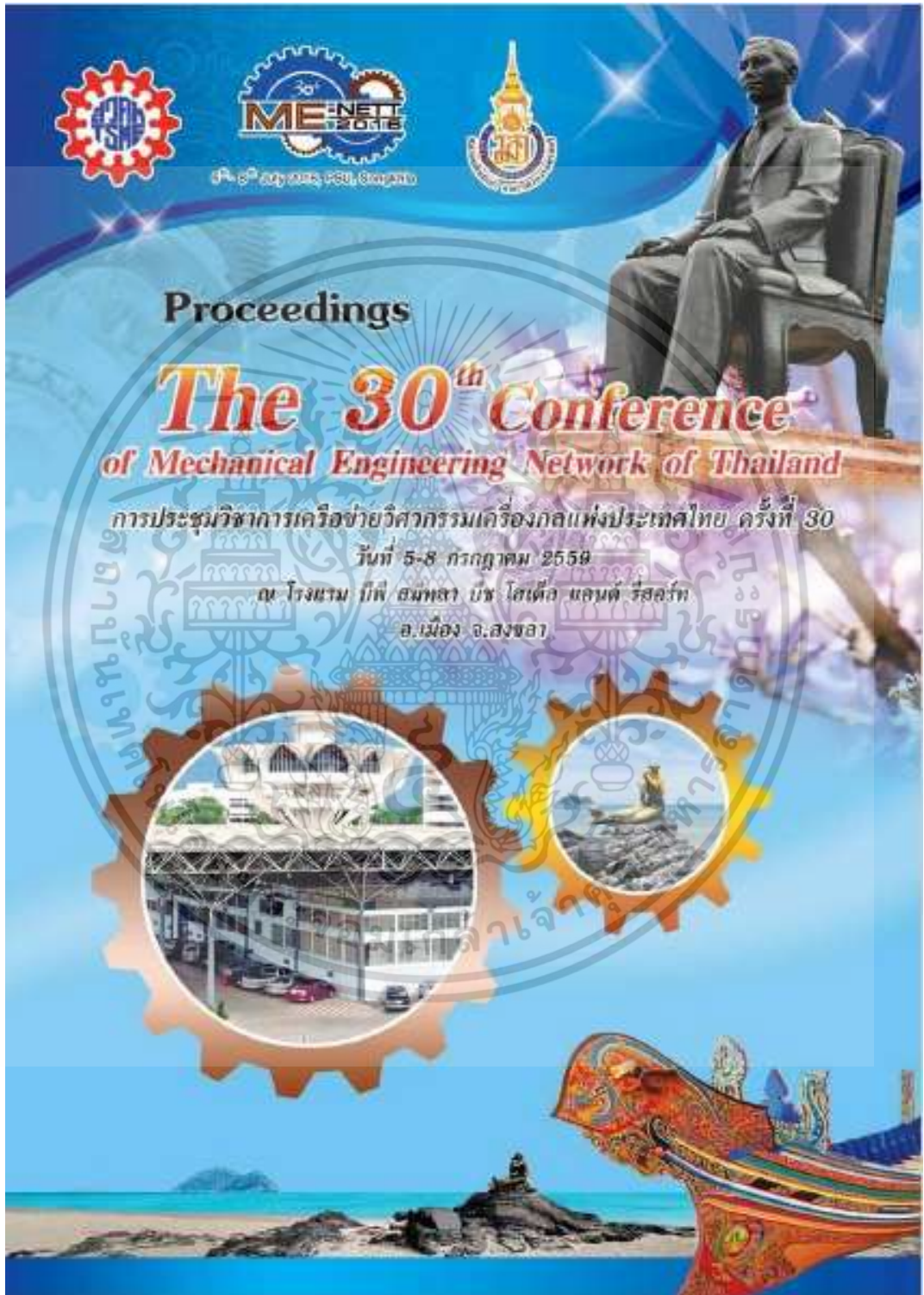
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Ph.D.Prof. Variddhi Ungbhakorn. **Design of Plumbing Systems**, Judthong Printing. 2000
- [14] Bruce R.Munson Donald F. Young and Theodore H. Okiishi. **Fundamentals of Fluid Mechanics, 4ed., John Wiley & Sons, Inc.** 2002
- [15] Dulyachot Cholaseuk. **Engineering Piping System Design**,Thammasatpress. 2016
- [16] Rennels,D.C. **Pipe flow : A Practical and Comprehensive Guide**. Hoboken, New Jersey, Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2012
- [17] James Conca “**Pick your choice for crude transport - pipeline, train, truck or ship.**”[Online].Available:<http://ikanmedia.tv/pick-your-choice-for-crude-transport-pipeline-train-truck-or-ship/>. 2014.
- [18] Arthit“**How to make ketchup.**”[Online].Available:http://farmfriend.blogspot.com/2011/12/blog-post_14.html. 2011.
- [19] Jackkaphan “**Freelance interpreter.**”[Online].Available:
<https://jtfreelanceinterpreter.wordpress.com/2013/08/19/20111012/>. 2013.



ภาคผนวก

เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TSF0007

การประจักษ์วิชาการระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

5-8 กรกฎาคม 2560 จังหวัดสงขลา



การวิเคราะห์สมการคำนวณค่าการสูญเสียความดันเนื่องจากการไหลของ
ของไหลผสมในท่อเอียง

Analysis and calculation pressure drop of solid-liquid mixture flow
in inclined pipe

ณัฐญ์ อินอัญญาพร¹, จำลอง ปรารถนแก้ว^{2*}

¹ นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

*ติดต่อ E-mail: jpcbam@kmit.ac.th โทรศัพท์ (662) 3264197, โทรสาร (662) 3264198

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกรณีวิเคราะห์สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์การสูญเสียของของไหลผสมที่ไหลในท่อเอียง แล้วเขียนโปรแกรมแมทแลบ คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วการไหล ขนาดอนุภาคของท่อเทียบกับค่าความดันสูญเสียจากนั้นก็จะหาค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานเพื่อเป็นข้อมูลในการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการส่งของไหลผสมระหว่างน้ำกับของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ในการศึกษา นี้จะใช้ของไหลผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ขนาด 1.1 มิลลิเมตร และ 2.91 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วน 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ไหลในท่อเอียงผ่านท่อเอียงทำมุม 0, 30, 60 และ 90 องศา จากผลวิเคราะห์ เขียนโปรแกรมแมทแลบ คำนวณหาความดันที่สูญเสียในระหว่างการไหลที่อัตราส่วนความเข้มข้นและมุมเอียงของท่อต่างกัน จากผลการคำนวณพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ความเร็วของการไหล มุมเอียงของท่อ และขนาดของอนุภาค จะส่งผลให้ค่าความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น

คำหลัก: ความดันสูญเสีย, การไหลของของไหลเนื้อผสม, ท่อเอียง

ABSTRACT

This article presents an analysis of equations used to calculate the coefficient loss of slurry flow in inclined pipes. The MATLAB program is used to calculate the correlation between the velocity and angles of the inclination pipes and the pressure drop. As well as the coefficient friction so that the calculation of the energy used in the transport of slurry fluid is revealed. Considering that the concentration of water and the plastic size of 1.1 mm and 2.91 mm in the ratio of 10 20 30 and 40 percent per volume are flowing through the pipes with angles of 0 30 60 and 90 degrees of a horizontal inclination. The MATLAB program calculates the pressure drop that flows with different concentration and angles of inclination, the results show that the increase in concentration, velocities, angles of inclination and size of the particles will result in a pressure drop that increases.

Keywords: Pressure drop, Solid-Liquid flow, Inclined pipes



1. บทนำ

ระบบท่อส่งของเหลวเป็นส่วนประกอบสำคัญในระบบงานทางวิศวกรรม พบได้ตั้งแต่ในเครื่องจักรต่างๆ ไปจนถึงในอาคารและในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีมูลค่าประมาณ 7 - 8% ของมูลค่าการก่อสร้างโรงงานทั่วไป และอาจมีมูลค่ามากถึง 30% ในกรณีของเรือเดินสมุทรบางชนิด ระบบท่อมียุคอย่างมากต่อการใช้พลังงานของอาคารและโรงงานซึ่งจะเป็นค่าใช้จ่ายสะสมตลอดอายุการใช้งาน หากมีการวางระบบหรือออกแบบท่อไม่มีประสิทธิภาพแล้วก็จะเกิดผลกระทบต่อบรรยากาศนำไปสู่การสูญเสียค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้นได้ ระบบท่อส่งของเหลวทำหน้าที่ส่งของเหลวจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ซึ่งนอกจากจะมีการส่งของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกันแล้ว ยังมีรายละเอียดประเภทที่มีการขนถ่ายของไหลผสมระหว่างของเหลวกับของแข็งที่มีอนุภาคขนาดเล็กๆ ซึ่งในการขนถ่ายของไหลผสมผ่านระบบนั้น จะเกิดการสูญเสียความดันเนื่องจากความผิดพลาดทางผิวสัมผัสในของท่อ กับของไหลผสมที่ไหลผ่านซึ่งถือเป็น การสูญเสียหลัก นอกจากนี้การระบบที่มีการเชื่อมต่อกับท่อต่อต่างๆ หรือมีการเปลี่ยนขนาดของท่อหรือมีการวางท่อเอียงๆ มุมองศาต่างๆ ก็จะมีการสูญเสียความดันเกิดขึ้นอีกเช่นกัน ดังนั้น การออกแบบระบบท่ออย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การหาค่าการสูญเสียพลังงานเป็นหนึ่งในเทคนิคที่สำคัญที่สุด ที่จะได้รับการประเมินโดยนักออกแบบสำหรับการออกแบบระบบการขนส่งของไหลผ่านท่อ และในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการเลือกกำลังของปั๊มที่ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของไหลให้เหมาะสมซึ่งที่ตามมาได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับการไหลของของไหลแบบเนื้อผสมที่ไหลในท่อ

P. Doron M. Simkhis and D. Bamea [1] ได้ทดลองลักษณะของการไหลของของไหลผสมระหว่างของแข็ง - ของเหลว ในท่อเอียงที่มุมระหว่าง -7° - 4° , 0° , 4° , 7° ความเข้มข้นของส่วนผสม 7% , 10% , 13% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของของแข็ง 3 mm ขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลางท่อ 50 mm ความหนาแน่น 1240 kg/m^3 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมุมเอียงของท่อเพิ่มขึ้นจากแนวระดับ จะส่งผลให้ค่าความดันสูญเสียเพิ่มมากขึ้น สำหรับที่ค่าอัตราการไหลที่น้อยมาก ค่าความดันสูญเสียจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงโน้มถ่วงยังไม่มีส่วนต่อการไหลมากนัก แต่เมื่อค่าอัตราการไหลมากขึ้น ความเร็วก็จะมีผลทำให้ค่าความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของมุมเอียงท่อและปริมาณส่วนผสม แต่เมื่อมุมเอียงของท่อลดลงจากแนวระดับ ค่ามุมเอียงของท่อที่ลดลงจะส่งผลให้ค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นลดลง

D.R. Kaushal [2] ได้ศึกษาผลกระทบจากขนาดของอนุภาคและความเข้มข้นของอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อความดันสูญเสีย โดยได้ทำการทดลองในท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54.9 mm ใช้ลูกแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $440 \mu\text{m}$, $125 \mu\text{m}$ และเม็ดลูกแก้วขนาดผสม $440 \mu\text{m}$ กับ $125 \mu\text{m}$ ความเร็วของการไหลตั้งแต่ $0 - 5 \text{ m/s}$ และความเข้มข้นของส่วนผสม $0 - 50\%$ โดยจะมีผล จากการศึกษาพบว่าความดันสูญเสียจะเพิ่มขึ้นตามขนาดความโตเม็ดลูกแก้ว อัตราส่วนผสมและความเร็วที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ขนาดส่วนผสม $440 \mu\text{m}$ พบว่าค่าความดันสูญเสียจะลดลงแล้วเพิ่มขึ้นแต่จะน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วและ อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่ความเร็วที่ต่ำและอัตราส่วนผสมน้อยค่าความดันสูญเสียจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เมื่อความเร็วของการไหลมีค่า 5 m/s และมีค่าความเข้มข้นของอัตราส่วนผสม 50% ค่าความดันสูญเสียจะมีค่าลดลง

V. Matousek [3] ได้ศึกษารูปแบบการไหลในท่อของของไหลผสมระหว่างน้ำกับทรายที่มีผลต่อค่าไฮดรอลิกเรียดัน โดยได้ทำการทดลองในท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm ใช้เม็ดทราย 3 ขนาด คือ ขนาดละเอียด (0.1-0.2 mm) ขนาดปานกลาง (0.2-0.5 mm) และขนาดหยาบ (1.6-2.7 mm) ความเร็วของการไหลได้ตั้งแต่ $0 - 10 \text{ m/s}$ และความเข้มข้นของส่วนผสม

0 - 45% โดยปริมาตร จากการทดลองพบว่า ในท่อ แนวตั้งค่าความไฮดรอลิกเกรเดียนต์จะเพิ่มขึ้นตาม ความเร็วที่เพิ่มขึ้นแต่อัตราส่วนผลน้ำกับทรายจะไม่มีผล ต่อค่าไฮดรอลิกเกรเดียนต์มากนัก สำหรับท่อแนวนอน ค่าไฮดรอลิกเกรเดียนต์จะลดลงเล็กน้อยในช่วงความเร็วต่ำ (2-4 m/s) และจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น (4-10 m/s) เช่นเดียวกับอัตราส่วนผลที่เพิ่มขึ้น

P. Doron and D. Barnea [4] ได้ทำการศึกษา เกี่ยวกับรูปแบบการไหลในท่อของของไหลผสมระหว่าง ของแข็ง - ของเหลว ที่อัตราการไหลต่ำ (0-1 m/s) รูปแบบการไหลจะมี 3 รูปแบบคือ ในช่วงแรกที่อัตราการ ไหลต่ำการไหลจะเป็นการไหลแบบ Stationary bed เมื่อ อัตราการไหลเพิ่มขึ้น ลักษณะการไหลจะกลายเป็นการ ไหลแบบ Moving bed และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 m/s การไหลจะกลายเป็นการไหลแบบ Heterogeneous suspension flow หรือ full suspension ระดับความสูงของ Stationary bed จะ ค่อยๆลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น สำหรับค่า Pressure gradient (ค่าความตกต่าง) [5] จะคงที่ใน ช่วงแรกและลดลงเล็กน้อยในช่วงความเร็วต่ำ หลังจากนั้น จะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นอย่าง รวดเร็วที่ความเร็วมากกว่า 1 m/s

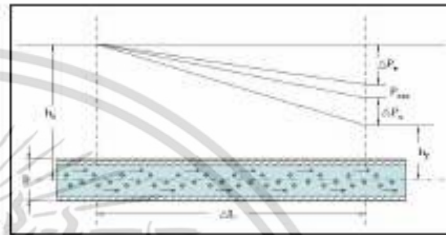
2. ทฤษฎี

การไหลในท่อของส่วนผสมระหว่างของแข็งกับ ของเหลวจะมีตัวแปรหลายตัวที่มีผลต่อค่าความดัน สูญเสียในท่อ เช่น ความเข้มข้นของส่วนผสม ความเร็วใน การไหล ขนาดของของแข็งที่ผสมในของไหล ความ ขรุขระของผิวท่อ การสั่นไถ่ระหว่างของของแข็งกับ ของเหลว เราจะศึกษาพฤติกรรมการไหลของส่วนผสม ระหว่างของแข็งกับของเหลวโดยวิเคราะห์จากสมการ ต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงานเพื่อ คำนวณหาค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น ความเร็วของการ ไหล ความเข้มข้นของส่วนผสมที่แตกต่างกัน และค่าความ

ดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในท่อแนวระดับและท่อเอียงทำมุม ต่างๆกัน

2.1 การสูญเสียความดันเมื่อวางท่อในแนวนอน

ในการคำนวณหาการสูญเสียความดันของของไหล ผสมภายใต้สมมติฐานให้อ่อนทฤษฎีการไหลคงที่และเป็น การไหลแบบ Uniform steady flow ตามแนวแกน

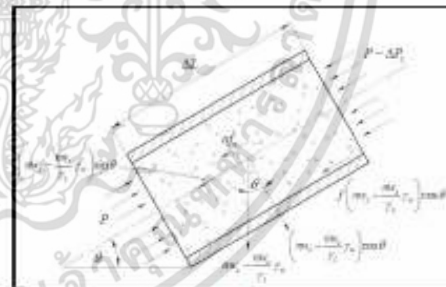


รูปที่ 1 แสดงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในท่อแนวนอน

เมื่อพิจารณาการสูญเสียความดันของการไหลของของ ไหลผสม ค่าความดันสูญเสียของของไหลผสมสามารถหา ได้จากหาค่าความดันสูญเสียของของเหลวร่วมกับของแข็ง

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_s = (\lambda_s + \lambda_w) \frac{\Delta L}{D} \frac{\rho_w U_m^2}{2g} \quad (1)$$

2.2 การสูญเสียความดันเมื่อวางท่อแนวเอียงทำมุม θ



รูปที่ 2 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในท่อเอียงทำมุม

ในกรณีที่ท่อเอียงทำมุมต่างๆกับแนวระดับ เพื่อหาค่า ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยจะทำการศึกษากจากการไหล ในท่อที่ความยาวควบคุม จากรูปที่ 3 จารณาภาคตัดของท่อ

TSF0007

การประยุกต์วิชาการคาน้ำหนักและกลศาสตร์ของไหลและประติสศาสตร์ ครั้งที่ 30



5-8 กรกฎาคม 2560 จังหวัดสงขลา

ที่บริเวณ Section 1 และ Section 2 ตามความยาว ΔL ความเร็วเฉลี่ย U_m พิจารณาแรงกระทำ

$PA = \eta f_s + (P - \Delta P_s)A$
จะได้ค่าความดันสูญเสียของของแข็ง (ΔP_s)

$$\Delta P_s = \eta \frac{f_s}{A} \quad (2)$$

โดยที่ Drag coefficient (f_s) หาได้จากสมการ

$$f_s = \frac{k}{Re_s^2} \gamma_s (U_m - U_s)^2 a \quad (3)$$

และค่า Re_s จะมีผลต่อค่า k และค่า ϵ

$$Re_s = (1 - \phi) \frac{d}{D} Re$$

โดยที่ k และ ϵ สามารถหาได้จากการพิจารณา Re_s

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

ตารางที่ 1 แสดงค่า Re_s ที่มีผลต่อค่า k และค่า ϵ

เมื่อพิจารณาสมการของน้ำหนักจะได้ น้ำหนักของเม็ดพลาสติกรวมกับน้ำหนักของน้ำเท่ากับน้ำหนักของทั้งหมด

$$m v_s + (A \Delta L - \frac{m v_s}{\gamma_s}) \gamma_w = \gamma A \Delta L$$

$$\bar{n} = \frac{\mu \gamma_w A \Delta L}{w_s \phi (1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s})} \quad (4)$$

จากสมการที่ (2) ค่า ΔP_s จะลดลงเนื่องมาจากความเร็วของไหลที่ลง เส้นกึ่งกลางท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค ความเข้มข้นของของแข็งที่ผสม ค่า η จะเป็นตัวคำนวณปรับค่าในสมการที่ (5)

$$\Delta P_s = \eta \cdot n \frac{f_s}{A} \quad (5)$$

แทนค่าสมการ (3) และ (4) ลงในสมการ (5) แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\Delta P_s = \left[\eta \frac{3k\mu (1-\phi)^{2\epsilon} \left(\frac{D}{d}\right)^{2\epsilon} \gamma_w}{2R_s^2 \phi \gamma_s \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s}\right)} \right] \frac{\Delta L \gamma_w U_m^2}{D 2g} \quad (6)$$

ค่าความดันสูญเสียที่ได้จากสมการ (6) เป็นค่าความดันสูญเสียของของแข็ง (ΔP_s) ในการหาค่าความดันสูญเสียของของไหลผสม (ΔP) เราจะนำค่าความดันสูญเสียของของแข็ง (ΔP_s) แทนลงในสมการ (1) จะได้

$$\Delta P = \lambda_s \left[\eta \frac{3k\mu (1-\phi)^{2\epsilon} \left(\frac{D}{d}\right)^{2\epsilon} \gamma_w}{2R_s^2 \phi \gamma_s \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s}\right)} \right] \frac{\Delta L \gamma_w U_m^2}{D 2g} \quad (7)$$

จากรูปที่ (2) พหุคูณส่วนระหว่างความเร็วของอนุภาคและความเร็วเฉลี่ยภายใน โดยพิจารณาแรงภายในปริมาตรควบคุมที่ตัดจากสองผลที่เป็นของแข็ง นำมาคิดสมดุลแรงจะได้สมการ

$$\eta \frac{dU_s}{g \cdot dt} = \frac{\eta d_s - U_s^2 f_s}{U_s} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right) - f_s \left(\frac{m_s}{\gamma_s} \right) \cos \theta \left(\frac{m_s}{\gamma_s} \right) \sin \theta \quad (8)$$

เมื่อ $\phi = \frac{U_s}{U_m}$ นำไปแทนค่าในสมการ (8)

$$\frac{1}{\left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}\right)} \frac{U_m}{g} \frac{d\phi}{dt} = (1-\phi)^2 \left(\frac{U_m}{U_s}\right)^2 - f \cos \theta + \sin \theta$$

พิจารณาเป็น Steady flow ($\frac{d\phi}{dt} = 0$)

$$\phi = 1 - \frac{U_s}{U_m} = \sqrt{f \cos \theta + \sin \theta} \quad (9)$$

Constant velocity of solid

$$U_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g d_s}{k / Re_s^2} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s} - 1\right)} \quad (10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Friction factor in turbulent flow

$$f = \left[\frac{0.25}{\log_{10} \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right)} \right]^2 \quad (11)$$

Weight ratio

$$\begin{aligned} \mu_s &= \frac{W_s}{W_w} \\ C_f &= \frac{W_s}{W_s + W_w} \\ \text{ดังนั้น} \quad \mu_s &= \frac{C_f}{1 - C_f} \quad (12) \end{aligned}$$

Coefficient loss of Water

$$\lambda_w = \frac{1.12}{Re^{0.33}} \quad (13)$$

3. วิธีการคำนวณ

ทำการคำนวณหาค่าความดันสูญเสียของไหลผสมระหว่างของแข็งกับของเหลวที่เกิดขึ้นภายในท่อเอียงที่วางทำมุมต่างกันตั้งแต่ 0 - 90 องศาจากแนวระดับ ในอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และมีขนาดของส่วนผสมที่เป็นของแข็งที่ผสมในน้ำ คือ เม็ดพลาสติกขนาด 1.1 และ 2.91 mm โดยใช้สมการที่ได้ศึกษามาใช้ในการเขียนคำนวณด้วยโปรแกรมแมทแล็บเพื่อหาค่าความดันสูญเสียและนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบความแตกต่างในสภาวะที่แตกต่างกัน



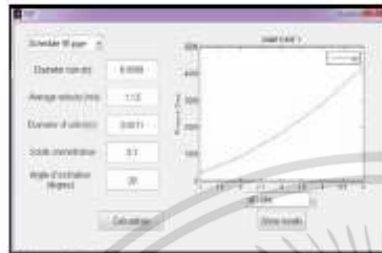
รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

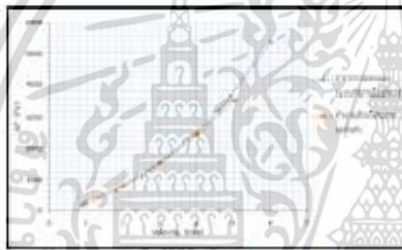


4. ผลการการคำนวณ

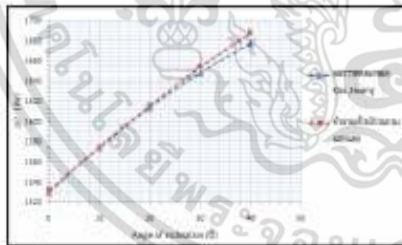
4.1 การทดสอบโปรแกรมคำนวณค่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลของของไหลผสมในท่อเอียง



รูปที่ 4 หน้าต่างโปรแกรมสามารถหาค่าหัวแบบฟังก์ชัน พร้อมทั้งแสดงผลการคำนวณและกราฟความสัมพันธ์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วน้ำ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมเอียงของท่อของของไหลผสม ที่ความเร็ว 3 m/s, $\rho_s = 2475 \text{ kg/m}^3$, $d_s = 0.66 \text{ mm}$, $D = 51 \text{ mm}$, $C_f = 5.8 \%$

รูปที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมเมทแลบกับทฤษฎีการออกแบบระบบท่อภายในอาคาร กรณีของไหลเป็นน้ำที่ไหลในท่อฉิวเรียบ จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ผลการคำนวณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการหาทฤษฎีการออกแบบระบบท่อภายในอาคาร [8] รูปที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมเมทแลบกับผลการทดลองของ Kao, Hwang [6] กรณีของไหลเป็นของไหลผสมระหว่างน้ำกับขี้มวลระตอยที่ไหลในท่อเอียงทำมุม 0, 10, 20, 30 และ 40 องศา จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ผลการคำนวณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากการทดลองของ Kao, Hwang

4.2 ผลการคำนวณการสูญเสียความดันการไหลของของไหลผสม

พิจารณาในท่อฉิวเรียบของไหลผสมคือขี้ผสมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm และ 2.91 mm ที่ความเร็วการไหล 1-5 m/s อัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ท่อเอียงทำมุม 0, 30, 60 และ 90 องศา



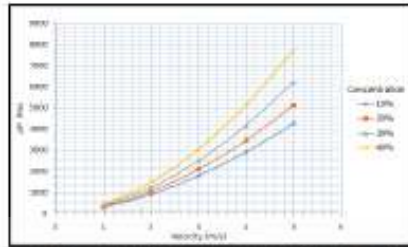
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับความเร็วน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 mm ท่อเอียง 0 องศา

จากรูปที่ 7 จะพบว่าค่าความดันสูญเสียจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก โดยในช่วงความเร็ว 1-2 m/s อัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียมากนักแต่จะเริ่มมีผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดที่ความเร็ว 3-5 m/s

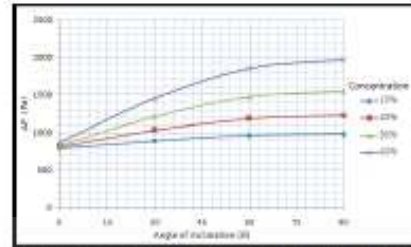
TSF0007

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติกรมการศึกษานอกโรงเรียนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30

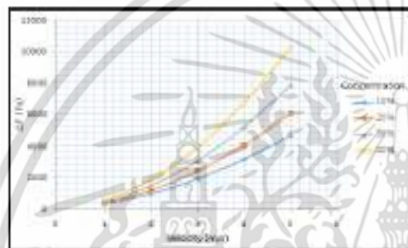
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



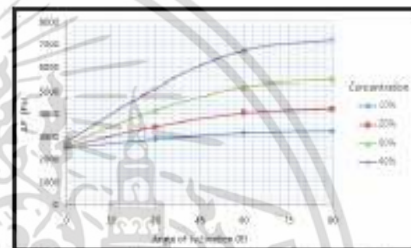
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตึงเฉือนกับความเร็วของน้ำสนมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 มม ที่ความเร็ว 30 รอบต่อนาที



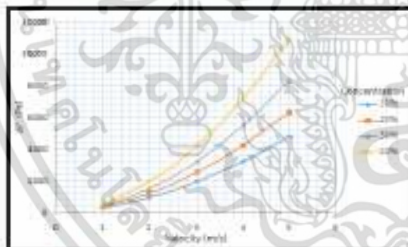
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตึงเฉือนกับมุมเอียงของท่อของน้ำสนมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 มม ที่ความเร็ว 2 รอบต่อนาที



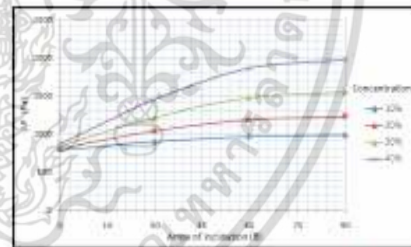
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตึงเฉือนกับความเร็วของน้ำสนมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 มม ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตึงเฉือนกับมุมเอียงของท่อของน้ำสนมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 มม ที่ความเร็ว 4 รอบต่อนาที



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตึงเฉือนกับความเร็วของน้ำสนมเม็ดพลาสติกขนาด 1.1 มม ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที

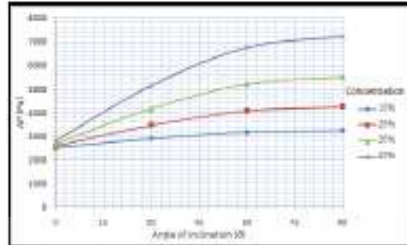


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตึงเฉือนกับมุมเอียงของท่อของน้ำสนมเม็ดพลาสติกขนาด 2.91 มม ที่ความเร็ว 2 รอบต่อนาที

จากกราฟรูปที่ 8 9 และ 10 จะพบว่า ที่มุมท่อเอียง 30, 60 และ 90 ค่าความตึงเฉือนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนสนม

จากรูปที่ 11 และ 12 พบว่ามุมเอียงของท่อที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความตึงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มของอัตราส่วนสนมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับมุมเอียงของท่อของน้ำผสมเม็ดพลาสติกขนาด 2.91 mm ที่ความเร็ว 4 m/s

จากรูปที่ 13 และ 14 พบว่าขนาดความโตของเม็ดพลาสติกที่เพิ่มก็มีผลทำให้ความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น

5. สรุปผลการทดลอง

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสีย (ΔP) ค่าความเร็วเฉลี่ย (U_m) มุมการเอียงของท่อ (θ) และขนาดของอนุภาค (d_p) พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับเม็ดพลาสติก ความเร็วของการไหลเฉลี่ยของท่อ และขนาดของอนุภาค จะส่งผลต่อค่าความดันสูญเสียที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น การออกแบบระบบขนส่งของไหลผสม จึงต้องคำนึงถึงตัวแปรดังกล่าวเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียซึ่งจะอยู่ในรูปของการสูญเสียความดันไปกับแรงเสียดทานระหว่างของไหลผสมกับผนังท่อ และสูญเสียความดันกับการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในการไหลในระบบท่อให้เหมาะสมกับการสภาพการใช้งานจริง

6. เอกสารอ้างอิง

6.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] P. Doron, M. Simikhis and D. Barnea. (1997), Flow of solid-liquid mixtures in inclined pipes, *Int. J. Multiphase Flow* Vol. 23, No. 2, pp. 313-323,

[2] D.R. Kaushal, Kimihiko Sato, Takeshi Toyota, Katsuya Funatsu, Yuji Tomita. (2005), Effect of particle size distribution on pressure drop and concentration profile in pipeline flow of highly concentrated slurry, *International Journal of Multiphase Flow* 31 pp. 809-823.

[3] V. Matousek. (2002), Pressure drops and flow patterns in sand-mixture pipes, *Experimental Thermal and Fluid Science* 26 pp. 693-702.

[4] P. Doron, D. Barnea. (1996), Flow Pattern Maps For Solid-Liquid Flow in Pipes, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 2, pp. 273-283.

[5] Pinchas Doron and Dvora Barnea. (1995), Pressure drop and limit deposit velocity for solid-liquid flow in pipes, *Chemical Engineering Science*, Vol. 50, No. 10, pp. 1595-1604.

[6] Kao, D. T. Y. and Hwang, L. Y. (1979) Critical slope for slurry pipeline transporting coal and other solid particles. In *Proc. of the 6th Int. Conf. on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes*, Canterbury, England, Paper A5, pp.57-74.

6.2 หนังสือ (Books)

[7] Behar Abu-naga, P. E. (2002), *Slurry systems handbook*, New York, United states of America: McGraw-Hill.

[8] Ph.D. Prof. Vanddhi Ungbhakorn (2000), *Design of plumbing systems*, Bangkok, Thailand.

[9] Bruce R. Munson, Donald F. Young and Theodore H. Oklilshi. (2002) *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 4ed., John Wiley & Sons, Inc.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายณัฐ ชนอัญญาพร
วัน เดือน ปีเกิด	เกิดวันที่ 2 มกราคม 2529
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (มอ.) วิทยาเขตหาดใหญ่
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2553 – 2558	บริษัท ไทยซัมมิทอโตพาร์ท อินดัสทรี จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรศูนย์วิจัยและพัฒนากระบวนการผลิต Manufacturing Research And Development, MRD
พ.ศ. 2558 – ปัจจุบัน	บริษัท ไทยซัมมิทอโตโมทีฟ อินดัสทรี จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรส่วนวิศวกรรมกระบวนการและซ่อมบำรุงรักษา Production And Maintenance Engineering (PE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้