

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณออกแบบระบบท่อสำหรับขนถ่ายมลสาย



นายเชาว์ ไตรทิพย์ชาติสกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

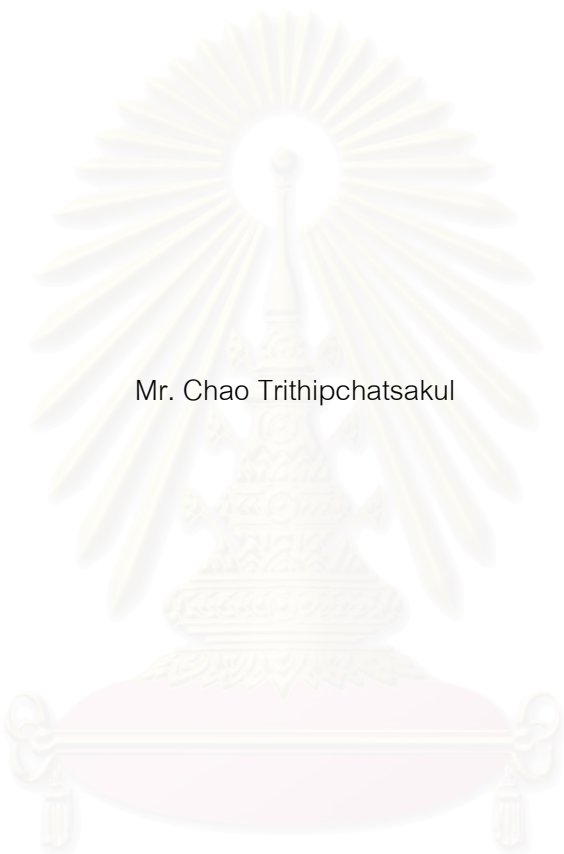
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17 -1700 -8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROGRAM DEVELOPMENT FOR SLURRY TRANSMISSION PIPELINE DESIGN



Mr. Chao Trithipchatsakul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1700-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณออกแบบระบบท่อสำหรับขนถ่าย มลสาย
โดย	นายเชาว์ ไตรทิพย์ชาติสกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	นายสุพรรณ จินดาเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(นายสุพรรณ จินดาเวช)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์)

เชาว์ ไตรทิพย์ชาติสกุล : การพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณออกแบบระบบท่อสำหรับขนถ่ายมลสาย. (PROGRAM DEVELOPMENT FOR SLURRY PIPELINE TRANSMISSION DESIGN) อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย, อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม : นายสุพรรณ จินดาเวช 105 หน้า. ISBN 974-17 -1700 -8.

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษาวิซวล เบสิก สำหรับใช้คำนวณความเร็ววิกฤตและความดันลดของระบบท่อขนถ่ายมลสาย (ของไหลสองวัฏภาค คือ ของเหลวและของแข็ง) ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นคงที่ มลสายที่ศึกษาเป็นประเภทที่ตกตะกอนได้และขนถ่ายโดยระบบท่อในแนวระดับ การพัฒนาโปรแกรมได้เลือกโมเดลที่นำเสนอโดย Turian R.M. และ Oroskar A.R. (1980) Gillies R.G. และ Shook C.A. (1991) และ Zandi I. และ Govatos G. (1967) สำหรับทำนายความเร็ววิกฤตของมลสายที่ไหลในท่อขนาด 1/2 - 6 นิ้ว และ 8 - 20 นิ้ว และตั้งแต่ 22 - 24 นิ้ว ตามลำดับ สำหรับการคำนวณหาค่าความดันลดของมลสายได้เลือกโมเดลที่นำเสนอโดย Durand R. และ Condolios E. (1952) Newit D.M. (1956) และ Zandi I. และ Govatos G. (1967) ตามลำดับ นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้ว โปรแกรมยังสามารถช่วยคำนวณออกแบบระบบท่อขนถ่ายมลสายเชิงออปติมิ้ม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อและความเข้มข้นของมลสายที่เหมาะสม ซึ่งโปรแกรมการคำนวณออกแบบเชิงออปติมิ้มจะคำนึงถึงอัตราการสูญเสียพลังงานในการขนถ่ายต่อหน่วยที่น้อยที่สุดเป็นเงื่อนไขบังคับสำคัญ

โปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาแล้วเสร็จ ได้ถูกนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงที่ได้จากผลการทดลองของนักวิจัยคนอื่น ของมลสายภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นคงที่ พบว่าในท่อขนาด 1/2 - 12 นิ้ว โปรแกรมสามารถทำนายค่าความเร็ววิกฤตได้สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงโดยมีค่าเบี่ยงเบนไปจากผลการทดลอง $\pm 30\%$ และในท่อขนาด 6 - 8 นิ้ว โปรแกรมสามารถทำนายค่าความดันลดได้สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงโดยมีค่าเบี่ยงเบนไปจากผลการทดลอง $\pm 40\%$

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4271419321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: SLURRY / PIPELINE DESIGN / SOLID-LIQUID FLOW / DESIGN / TWO PHASE FLOW

CHAO TRITHIPCHATSAKUL : PROGRAM DEVELOPMENT FOR SLURRY
PIPELINE TRANSMISSION DESIGN. (SOLID-LIQUID) THESIS ADVISOR :
SOMPRAONG SRICHAJ, Ph.D., THESIS COADVISOR : SUPAN JINDAVECH,
105 pp. ISBN 974-17 -1700 -8.

The objective of this research is to develop a computer program by using Visual Basic language for predicting critical velocity and pressure loss of setting slurry two-phase flow systems (solid-liquid) in isothermal cases of horizontal pipeline system. Slurry flow in pipe critical velocity program was developed by using models proposed by Turian R.M. and Oroskar A.R. (1980), Gillies R.G. and Shook C.A. (1991) and Zandi I. and Govatos G. (1967) for slurry flow in pipe size 1/2 to 6 inch, 8 to 20 inch and 22 to 24 inches respectively. For slurry two-phase flow pressure loss calculation was based on the studies of Durand R. and Condolios E. (1952), Newitt D.M. (1956) and Zandi I. and Govatos G. (1967) respectively. Furthermore, developed program can be used for slurry pipeline optimum design, using energy loss as an objective function.

Program results were tested against experimental data of slurry flow in pipe from reference data from other researchers at constant temperature and concentration. The result of prediction of critical velocity in pipe size 1/2 - 12 inches are consistent with the experimental data at deviation of ± 30 % and the result of pressure loss calculation in pipe size 6 - 8 inches are within ± 40 % of experimental value.

Department..... Chemical Engineering..... Student's signature.....
Field of study..... Chemical Engineering..... Advisor's signature.....
Academic year..... 2002..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุน
อย่างดียิ่งจากหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบคุณ อ.ดร. สมประสงค์ ศรีชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
และคุณสุพรรณ จินดาเวช ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ ให้คำแนะนำและข้อคิด
ต่างๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. ชัยฤทธิ์
สัตยาประเสริฐ ขอขอบพระคุณกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. ไพศาล กิตติศุภกร และ
อ.ดร. วิทย์ สุนทรนันท์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำรวมทั้งข้อคิด
เห็นต่างๆ ของงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความ
สำเร็จนี้

ทำยนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ซึ่งให้การสนับสนุนด้านการเงิน
และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การไหลในท่อแบบหนึ่งวัฏภาค.....	4
2.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในของไหล.....	9
2.3 การไหลในท่อของมอลสาย (สองวัฏภาค).....	17
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.4.1 ความเร็ววิกฤต.....	21
2.4.2 ความดันลดของการไหลในท่อแบบสองวัฏภาค.....	22
2.4.3 สมการเอมไพริกัลของ Durand และ Condolios.....	25
2.4.4 สมการเอมไพริกัลของ Zandi และ Govatos.....	27
2.4.5 สมการเอมไพริกัลของ Turian และ Oroskar.....	29
2.4.6 สมการเอมไพริกัลของ Gillies และ Shook.....	30
3. การออกแบบขั้นตอนคำนวณและการพัฒนาโปรแกรม.....	31
3.1 ขอบเขตข้อมูลและระบบหน่วย.....	31
3.2 ส่วนของตัวโปรแกรม.....	33
3.3 แบบแผนและขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม.....	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3.1 ขั้นตอนการคำนวณความดันลด.....	37
3.3.2 ขั้นตอนการคำนวณออกแบบระบบท่อเชิงออปติ้ม.....	44
4. การทดสอบโปรแกรมและตัวอย่างการใช้โปรแกรม.....	51
4.1 ผลการทดสอบโปรแกรม.....	51
4.1.1 การทดสอบโปรแกรมทำนายความเร็ววิกฤต.....	51
4.1.2 การทดสอบโปรแกรมทำนายความดันลด.....	58
4.2 การสรุปวิเคราะห์โปรแกรม.....	69
4.3 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม.....	76
5. สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	80
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	105

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงองค์ประกอบความเป็นทรงกลมของอนุภาคต่างๆ.....	14
2.2	แสดงองค์ประกอบเชิงความเป็นทรงกลมของรูปทรงต่างๆ.....	15
3.1	แสดงขอบเขตข้อมูลการทดลองที่เป็นรากฐานโปรแกรมการ คำนวณการไหลในท่อแบบสองวัฏภาค.....	31
3.2	ตารางแสดงการแปลงหน่วยของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ จำเป็นสำหรับโปรแกรมคำนวณการไหลในท่อแบบสองวัฏภาค.....	32
4.1	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมลสาย Silica Sand ความหนาแน่น 2890 kg/m ³ และน้ำ ในท่อขนาดต่างๆ	51
4.2	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมลสาย ความ หนาแน่น 1350 kg/m ³ และน้ำในท่อขนาดต่างๆ	53
4.3	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมลสาย Coal ความหนาแน่น 1410 kg/m ³	53
4.4	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมลสาย Coal ความหนาแน่น 1500 kg/m ³	54
4.5	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมลสาย Iron Ore ความหนาแน่น 5245 kg/m ³ และ Kerosene	54
4.6	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมลสาย Sand ความหนาแน่น 2650 kg/m ³ และ น้ำ ในท่อขนาดต่างๆ	55
4.7	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมลสาย Sand ความหนาแน่น 2658 kg/m ³	56
4.8	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมลสาย สินแร่ ความหนาแน่น 2670 kg/m ³ และ น้ำ ในท่อ 8 นิ้ว.....	56
4.9	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมลสาย สินแร่ ความหนาแน่น 2900 kg/m ³ และ น้ำ ในท่อขนาด 6 นิ้ว.....	57
4.10	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมลสาย สินแร่ ความหนาแน่น 2280 kg/m ³ และ น้ำ ในท่อขนาด 8" นิ้ว	57
4.11	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมลสาย สินแร่ ความหนาแน่น 2870 kg/m ³ และน้ำ ในท่อขนาด 8" นิ้ว	57

สารบัญ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดยของมลสายทราย ความหนาแน่น 2650 kg/m ³ และน้ำ ในท่อ ขนาด 6 และ 8 นิ้ว	58
4.13 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดยของมลสาย Sand ความหนาแน่น 2890 kg/m ³ และ น้ำ ในท่อขนาด	59
4.14 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดยของมลสายสินแร่ Taconite Milling ความหนาแน่น 2900 kg/m ³ และ น้ำ	60
4.15 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดยของมลสายสินแร่ Crude Anhydrite ความหนาแน่น 2740 kg/m ³ และ น้ำ	61
4.16 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดยของมลสายสินแร่ Calcium-Phosphate ความหนาแน่น 2870 kg/m ³ และ น้ำ	62
4.17 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดยของมลสายสินแร่ Limestone ความหนาแน่น 2680 kg/m ³ และ น้ำ ในท่อ 6 นิ้ว	63
4.18 ตารางแสดงค่าความดันลดยของมลสายสินแร่ Tailing from Borax Refining ความหนาแน่น 2280 kg/m ³ และ น้ำ ในท่อขนาด 6 นิ้ว	64
4.19 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดยของมลสายสินแร่ Red Mud Slurry ความหนาแน่น 2670 kg/m ³ และ น้ำ	65
4.20 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดยของมลสายสินแร่ Cement Kile Feed ความหนาแน่น 2750 kg/m ³ และ น้ำ	65
4.21 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดยของมลสาย Crude Anhydrite ความหนาแน่น 2750 kg/m ³ และน้ำ	66
4.22 ตารางแสดงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายมลสาย Gold Slime Non uniform size ความหนาแน่น 2725 kg/m ³ และ น้ำ.....	67
4.23 ตารางเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของโปรแกรมออปติมิ้ม.....	68
4.24 ตารางแสดงการวิเคราะห์ผลการทดสอบโปรแกรมทำนายความ เร็ววิกฤตเทียบกับข้อมูลอ้างอิง	69
4.25 ตารางแสดงการวิเคราะห์ผลการทดสอบโปรแกรมทำนายความ ดันลดยเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง	71
4.26 ตารางแสดงการวิเคราะห์ผลการทดสอบโปรแกรมทำนายความ ดันลดยเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง (กรณีคัดแยกข้อมูลออก)	72

สารบัญญภาพ

รูปภาพที่	หน้า
2.1	แผนภาพแสดงองค์ประกอบความเสียดทานของ Moody..... 7
2.2	แผนภาพแสดงความหยาบสัมพัทธ์ของผนังท่อของ Moody..... 8
2.3	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re_p และ C_D ของทรงกลม ผิวเรียบ..... 13
2.4	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่าง Re_p และ C_D ของอนุภาครูปทรงต่างๆ..... 13
2.5	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและความเร็ว การไหลของมลสายในท่อ 3 นิ้วที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 23
2.6	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและความเร็ว การไหลของมลสายในท่อ 6 นิ้วที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 23
2.7	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและความเร็ว การไหลของมลสายในท่อ 9 นิ้วที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 23
2.8	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดส่วนเกิน ของมลสายเทียบกับน้ำในท่อ ขนาด 9 นิ้ว ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 23
2.9	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดส่วนเกินต่อ หนึ่งหน่วยความเข้มข้นของมลสายท่อขนาด 9 นิ้ว..... 24
2.10	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดส่วนเกิน ของมลสายในท่อขนาดต่างๆ ที่ความเข้มข้น 15 %..... 24
2.11	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดส่วนเกิน ต่อหนึ่งหน่วยของมลสายในท่อขนาดต่างๆ..... 26
2.12	แผนภาพแสดงผลการทดลองของ Durand แสดงความสัมพันธ์ ของกลุ่มตัวแปรต่างๆ..... 26
3.1	แสดงหน้าต่างรับข้อมูลโปรแกรม..... 34
3.2	หน้าต่างแสดงผลการคำนวณของโปรแกรม..... 35
4.1	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตที่ทำนาย โดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของ ไหลขับเคลื่อน (แยกตามชนิดของของแข็ง)..... 70

สารบัญ (ต่อ)

รูปภาพที่	หน้า
4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตของมลสาย Iron Ore และ Kerosene ที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง.....	70
4.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน (แยกตามขนาดท่อ).....	71
4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน	73
4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน (คำนวณค่า Shape Factor).....	73
4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน (กรณีตัดข้อมูลทดสอบที่มีค่า Operating Velocity ต่ำกว่า ค่า Critical Velocity ออกจากข้อมูลทดสอบ).....	74
4.7 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน (แยกตามขนาดท่อ).....	74
4.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน (แยกตามความเข้มข้น).....	75
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายมลสายที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน	75

สัญลักษณ์

ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่

A	พื้นที่หน้าตัดท่อ
A_p	พื้นที่ผิวของอนุภาค
A_{pp}	พื้นที่ภาพฉาย
C_D	สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ของอนุภาค
C_v	ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของมลสาย
C_w	ความเข้มข้นเชิงน้ำหนักของมลสาย
D	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ
F_e	แรงภายนอก
F_b	แรงลอยตัวของอนุภาค
F_D	แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาค
K_1	ค่าคงที่ Shape factor ของอนุภาคในช่วง Stoke's Law
K_2	ค่าคงที่ Shape factor ของอนุภาคในช่วง Newton's Law
L	ความยาวของท่อ
N_l	ไอน์แบอร์
Q_s	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของมลสาย
Re	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์
Re_p	อนุภาคเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์
S	ความถ่วงจำเพาะของอนุภาค
V_c	ความเร็ววิกฤต
V_{op}	ความเร็วปฏิบัติการ
V_{opt}	ความเร็วปฏิบัติการที่เหมาะสม
V_s	ความเร็วการตกตะกอนของอนุภาคในมลสาย
V_t	ความเร็วปั่นป่วนของอนุภาคในของไหล

ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็ก

a_e	ความเร่งเนื่องจากแรงภายนอก
d_p	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค
d_a	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่คำนวณจากภาพฉาย

f	แฟกเตอร์ความเสียหาย
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก
h_w	ความดันลดเนื่องจากการไหลในท่อของน้ำ
h_L	ความดันลดเนื่องจากการไหลในท่อของของไหล
h_s	ความดันลดเนื่องจากการไหลของมลสายในท่อ
m	มวลของอนุภาค
n	ค่าคงที่ของ Madui และ Whitmore
r	ท่อ
t	เวลา

อักษรกรีก

ρ_w	ความหนาแน่นของน้ำ
ρ_L	ความหนาแน่นของของไหล
ρ_m	ความหนาแน่นของมลสาย
ρ_s	ความหนาแน่นของอนุภาค
μ_w	ความหนืดของน้ำ
μ_L	ความหนืดของของไหล
μ_s	ความหนืดของมลสาย
ϕ	Sphericity shape factor
ϕ_v	Volumetric shape factor
τ	ความเค้นเฉือน
γ	น้ำหนักจำเพาะ
ε	ความหยาบของผนังท่อ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการขนถ่ายอนุภาคของแข็งทางระบบท่อเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญมากยิ่งขึ้นทุกวันในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ ทั่วไป โดยเฉพาะกับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ในแต่ละปีจะมีการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ รวมถึงการออกแบบ หรือก่อสร้างระบบท่อขนถ่ายมวลสลายอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากการที่ระบบของไหลมีอนุภาคของแข็งเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้การออกแบบมีความยุ่งยากมากกว่าการไหลแบบหนึ่งวัฏภาค ดังนั้น ซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองระบบท่อโดยมีน้ำหรือน้ำมันเป็นของไหลขับเคลื่อน (Pipeline Hydraulic Simulation) จึงมีความจำเป็นสำหรับการออกแบบและการหาค่าพารามิเตอร์การออกแบบที่ดีที่สุด

ในงานออกแบบเชิงวิศวกรรมของระบบท่อขนถ่ายมวลสลายในแนวระดับ วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากการไหลของมวลสลายในท่อเป็นการไหลแบบสองวัฏภาค ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การไหลที่ซับซ้อน เพราะมีแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งกับของเหลวเข้ามาเกี่ยวข้องขณะเกิดการไหล ในกรณีการไหลแบบหนึ่งวัฏภาค วิศวกรผู้ออกแบบสามารถกำหนดให้ของไหลไหลภายในท่อได้ที่ทุกช่วงความเร็วตั้งแต่ช่วงการไหลแบบราบเรียบจนกระทั่งเป็นการไหลแบบปั่นป่วน แต่ในกรณีของมวลสลายซึ่งเป็นการไหลแบบสองวัฏภาค ความเร็วการไหลหรืออัตราการขนถ่ายจะต้องถูกควบคุมเป็นพิเศษ และจำกัดให้มีค่าอยู่ในช่วงแคบๆ เท่านั้น โดยเฉพาะการขนถ่ายมวลสลายที่ตกตะกอนได้ ซึ่งถ้าความเร็วการขนถ่ายต่ำกว่าความเร็วค่าๆ หนึ่ง อนุภาคของแข็งจะตกตะกอนแยกตัวออกจากของไหล และสะสมที่บริเวณท้องท่อ ทำให้พื้นที่หน้าตัดที่ลดลง และกีดขวางการขนถ่าย ทำให้ความดันลดมีค่าสูง ก่อให้เกิดความเสียหายร้ายแรงอาจถึงขั้นทำให้ระบบท่ออุดตันได้ ในทางตรงกันข้ามซึ่งถ้าความเร็วการขนถ่ายสูงเกินไป จะส่งผลให้ความดันลดในระบบท่อมีค่าสูง ทำให้อัตราความสิ้นเปลืองการใช้พลังงานในการขนถ่ายสูงตามลำดับ ซึ่งอาจไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

ช่วงต้นปี ค.ศ. 1950 จวบจนปัจจุบัน ได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยพฤติกรรมการไหลของมวลสลายในท่อแนวระดับหลายคณะ และได้เสนอสมการเอมไพริคัลที่มีรูปแบบต่างๆ กัน สำหรับทำนายความดันลดและความเร็ววิกฤต และพบว่าทั้งความดันลดและความเร็ววิกฤต ของการไหลภายในท่อของมวลสลายขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัย และสามารถจำแนกออกเป็นหมวดหมู่ได้ดังต่อไปนี้

1. สมบัติกายภาพของของแข็ง ได้แก่ ขนาดของอนุภาคของแข็ง รูปร่างของอนุภาคของแข็ง การแจกแจงขนาดของอนุภาค และความหนาแน่นของอนุภาค
2. สมบัติกายภาพของของไหล ได้แก่ ความหนาแน่น และความหนืด
3. สมบัติกายภาพของท่อ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และความหยาบของผนังท่อปกติจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำท่อ
4. คุณสมบัติของของไหลและการไหล ได้แก่ ความเร็วการไหล และความเข้มข้นของอนุภาคในมลสหาย เป็นต้น

แต่เนื่องจากสมการเอมไพริคัลนั้นมีพื้นฐานโครงสร้างมาจากข้อมูลการทดลอง ดังนั้นกลุ่มสมการเอมไพริคัลรูปแบบต่างๆ ที่ถูกคิดค้นขึ้นมานั้น แต่ละสมการจึงมีขอบเขตการนำไปใช้ทำนายความดันลดหรือความเร็ววิกฤตได้อย่างจำกัด ขึ้นอยู่กับขอบเขตข้อมูลการทดลอง และถ้านำไปคำนวณนอกขอบเขตที่ระบุไว้ ย่อมเกิดข้อผิดพลาดได้ ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีสมการใดสามารถทำนายความดันลดและความเร็ววิกฤตได้แม่นยำพอเพียงที่ทุกช่วงขอบเขตของชุดตัวแปรอิสระ ทำให้การคำนวณความดันลดและความเร็ววิกฤตเป็นเรื่องยุ่งยากซับซ้อน สิ้นเปลืองเวลามากและมีโอกาสที่จะคำนวณผิดพลาด ซึ่งเป็นปัญหาของวิศวกรผู้ออกแบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงได้นำชุดสมการเอมไพริคัลสำหรับคำนวณความดันลดที่ช่วงขอบเขตการใช้งานต่างๆ มาพัฒนาสร้างเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ ที่สามารถทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบบุคคลได้ ทั้งนี้เพื่อให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถออกแบบระบบท่อขนถ่ายมลสหายได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว มีประสิทธิภาพ และที่สำคัญ คืออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายต่อหน่วยต่ำที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาโปรแกรม สำหรับช่วยคำนวณออกแบบระบบท่อขนถ่ายมลสหาย โดยโปรแกรมสามารถทำนายความดันลด ความเร็วการขนถ่าย ความเข้มข้นของมลสหาย และขนาดท่อที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายต่อหน่วยที่น้อยที่สุดเป็นเงื่อนไขบังคับสำคัญ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาเฉพาะมลสหายประเภทที่สามารถตกตะกอนได้ หรือมลสหายที่มีอนุภาคของแข็งในของไหล ขนาดใหญ่กว่า 44 ไมครอน
2. ศึกษาการไหลของมลสหายในท่อแนวระดับเท่านั้น

3. ของเหลวที่ใช้ในการขับเคลื่อนคือ น้ำ
4. ข้อมูลป้อนเข้าโปรแกรม คือ สมบัติกายภาพของ ของแข็ง ของเหลว และท่อ ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด ขนาดของอนุภาค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และความหยาบของผนังท่อ เป็นต้น
5. การแสดงผลของโปรแกรมคือ ขนาดท่อ ความเร็วปฏิบัติการวิกฤต ความเข้มข้นในการขนถ่าย ความดันลด และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่อหน่วย

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลของมวลสายภายในท่อ ได้แก่ การไหลภายในท่อแบบหนึ่งภูมิภาค การเคลื่อนที่ของอนุภาคในของไหล เบื้องต้นเกี่ยวกับมวลสาย ประเภทของมวลสาย หรือการไหลแบบสองภูมิภาคของของแข็งและของเหลว และสมการเอมไพริคัลสำหรับคำนวณความดันลดและความเร็ววิกฤตของนักวิจัยแต่ละคนะที่นำเสนอหรือตีพิมพ์ทางวารสาร
2. กำหนดขอบเขต และแนวทางการศึกษา รวมถึงการเลือกตัวแปรภาษาคอมพิวเตอร์ที่เหมาะสม
3. จัดทำขั้นตอนและแผนผังการแก้ปัญหาหรือการคำนวณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์คือค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการออกแบบระบบท่อขนถ่ายมวลสาย
4. ดำเนินการพัฒนาโปรแกรม และการทดสอบโปรแกรม
5. สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป สำหรับใช้ทำนายความดันลด ความเร็วปฏิบัติการวิกฤต ความเข้มข้นในการขนถ่าย และขนาดท่ออย่างเหมาะสม
2. เป็นเครื่องมือสำคัญ สำหรับใช้จำลองระบบท่อ เพื่อการศึกษาและคำนวณออกแบบขั้นต้น อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การไหลในท่อแบบหนึ่งภูมิภาค

การไหลในท่อของของไหล สามารถเป็นได้ทั้งการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ในกรณีของท่อกลมที่มีของไหลหนึ่งภูมิภาคไหลเต็มท่อ ค่าความดันลดหรือพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานเนื่องจากการไหลในท่อกลมสามารถคำนวณจากสมการ

$$h_L = \frac{LfV^2}{2gD} \quad (2-1)$$

h_L	คือ	ความดันลด มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
L	คือ	ความยาวท่อ มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
f	คือ	องค์ประกอบความเสียดทาน
V	คือ	ความเร็วของไหล มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)ต่อวินาที
D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)
g	คือ	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)ต่อวินาที ²

เรียกสมการ (2-1) ว่า สมการสำหรับหาความเสียดทานของท่อ หรือเรียกอีกชื่อว่า Darcy-Weisbach Equation สำหรับค่าองค์ประกอบความเสียดทาน (f) เป็นค่าคงที่ที่ไม่มีหน่วยและเป็นฟังก์ชันของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) ค่าองค์ประกอบความเสียดทานแปรค่าตามเรย์โนลด์นัมเบอร์และความหยาบของผิวท่อ (ϵ) ส่วนความดันลด (h_L) แปรผันตาม L/D มีหน่วยเป็นความยาวเมตร (ฟุต) เช่นเดียวกับ Velocity head ($V^2/2g$) ดังนั้นจึงสามารถบอกค่าความดันลดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทานอยู่ในเทอมของ Velocity head ได้

1) การไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลม (Laminar Flow)

สำหรับในกรณีของการไหลแบบราบเรียบนั้น อัตราการไหลโดยปริมาตร Q เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรตันที่ถูกห้อมล้อมโดยเส้นแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว ปริมาตรตันในที่นี้ก็คือก้อนของไหลตันรูปพาราโบลอยด์ที่มีส่วนสูงมากที่สุดเป็นสัดส่วนกับความเร็วสูงสุด u_{max} และมีส่วนสูงเฉลี่ยเท่ากับครึ่งหนึ่งของส่วนสูงมากที่สุด

$$\text{ฉะนั้นความเร็วเฉลี่ย} \quad V_{avg} = 0.5 u_{max} \quad (2-2)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad V_{\text{avg}} = \frac{h_L \gamma D^2}{32 \mu_L} \quad (2-3)$$

เมื่อย้ายค่าแล้วคูณไขว้สมการ (2-3) ก็จะได้ สมการความดันตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทานอันเนื่องมาจากการไหล คือ

$$h_L = \frac{32 \mu_L V}{\gamma D^2} \quad (2-4)$$

μ_L คือ ความหนืดของของไหล มีหน่วยเป็น กก.ต่อเมตรวินาที
 γ คือ น้ำหนักจำเพาะ มีหน่วยเป็น แรงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

เรียกสมการ (2-4) นี้ว่า สมการ Hagen-Poiseuille Law ที่สำหรับใช้กับการไหลในท่อที่มีการไหลแบบราบเรียบ

จากสมการ Hagen-Poiseuille สามารถกล่าวได้ว่าในกรณีที่เป็นการไหลแบบราบเรียบนั้น ค่าความดันตกเป็นสัดส่วนกับความเร็วยกกำลังหนึ่ง หรือ $n = 1$ ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้โดยการทดลอง ข้อดีของสมการนี้ก็คือไม่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลองหรือตัวประกอบที่ได้จากการทดลองใดๆ จะมีแต่เพียงคุณสมบัติทางกายภาพของของไหล เช่น ความหนืด ความหนาแน่น น้ำหนักจำเพาะ เท่านั้นและจะเห็นได้จากสมการว่าในกรณีที่เป็นการไหลแบบราบเรียบนั้น ความเสียดทานจะไม่ขึ้นอยู่กับความหยาบของผิวภายในท่อเลย ซึ่งก็เป็นความจริงที่สามารถพิสูจน์ได้โดยการทดลอง

จะเห็นได้ว่า พลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทาน h_L นี้สามารถหาได้โดยวิธีการวิเคราะห์มิติอีกด้วย ดังนั้นเมื่อนำเอา h_L จากสมการจากการวิเคราะห์มิติและสมการ Hagen-Poiseuille Law มาเท่ากันแล้ว ค่าองค์ประกอบความเสียดทาน ก็จะมีค่าเป็น

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2-5)$$

ดังนั้น ถ้าหาก $\text{Re} = 2000$ ก็จะสามารถหาความดันตกอันเนื่องมาจากความเสียดทานขณะเกิดการไหลได้จาก สมการ Hagen-Poiseuille Law หรือจากสมการวิเคราะห์มิติ โดยใช้ค่าองค์ประกอบความเสียดทาน ที่คำนวณจากสมการที่ (2-5)

2) ความขรุขระของผนังท่อ

ความดันตกของการไหลแบบปั่นป่วนนอกจากจะขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความยาวของท่อ ความเร็วเฉลี่ยในการไหลและความหนืดของของไหลแล้ว ยังขึ้นอยู่กับความขรุขระของผนังท่ออีกด้วย ด้วยวิธีการต่างๆ ของนักวิทยาศาสตร์ สามารถหาขนาดความขรุขระและบอกค่าขนาดความขรุขระนี้ด้วยองค์ประกอบทางด้านรูปร่าง นอกจากนี้ยังสามารถ

พิสูจน์ได้ด้วยว่าความเสียดทานนี้ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับขนาดของผิวแต่ยังขึ้นกับรูปร่างของส่วนที่ยื่นเลยออกมาจากผิวอีกด้วย

จากความพยายามของวิศวกรชาวเยอรมันชื่อ Nikuradse ศิษย์คนหนึ่งของ Prandtl เขาได้ทำการเคลือบภายในผนังท่อขนาดต่างๆ ด้วยเม็ดทรายที่ผ่านการคัดขนาดโดยการร่อนด้วยตะแกรง ดังนั้นทรายแต่ละชุดจึงมีขนาดเท่าๆ กัน โดยกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทรายนี้เป็น ϵ และเรียกขนาดของเม็ดทรายนี้ว่าความขรุขระสัมบูรณ์ จากสมการการวิเคราะห์มิติเกี่ยวกับการไหลภายในท่อนั้นได้พิสูจน์ให้เห็นว่าในกรณีของท่อผิวเรียบนั้น องค์ประกอบความเสียดทาน จะเป็นฟังก์ชันของค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) โดยปกติแล้วเราจะใส่ค่าขนาดความขรุขระ ϵ ให้เป็นตัวแปรสำหรับหาองค์ประกอบความเสียดทานด้วย และก็ปรากฏว่า $f = f(Re, \epsilon/D)$ เราเรียกค่า ϵ/D ว่าความขรุขระสัมพัทธ์ ในการทดลองของ Nikuradse นั้นค่าความขรุขระสัมพัทธ์ ϵ/D จะมีค่า อยู่ในช่วง $0.000985 - 0.0333$

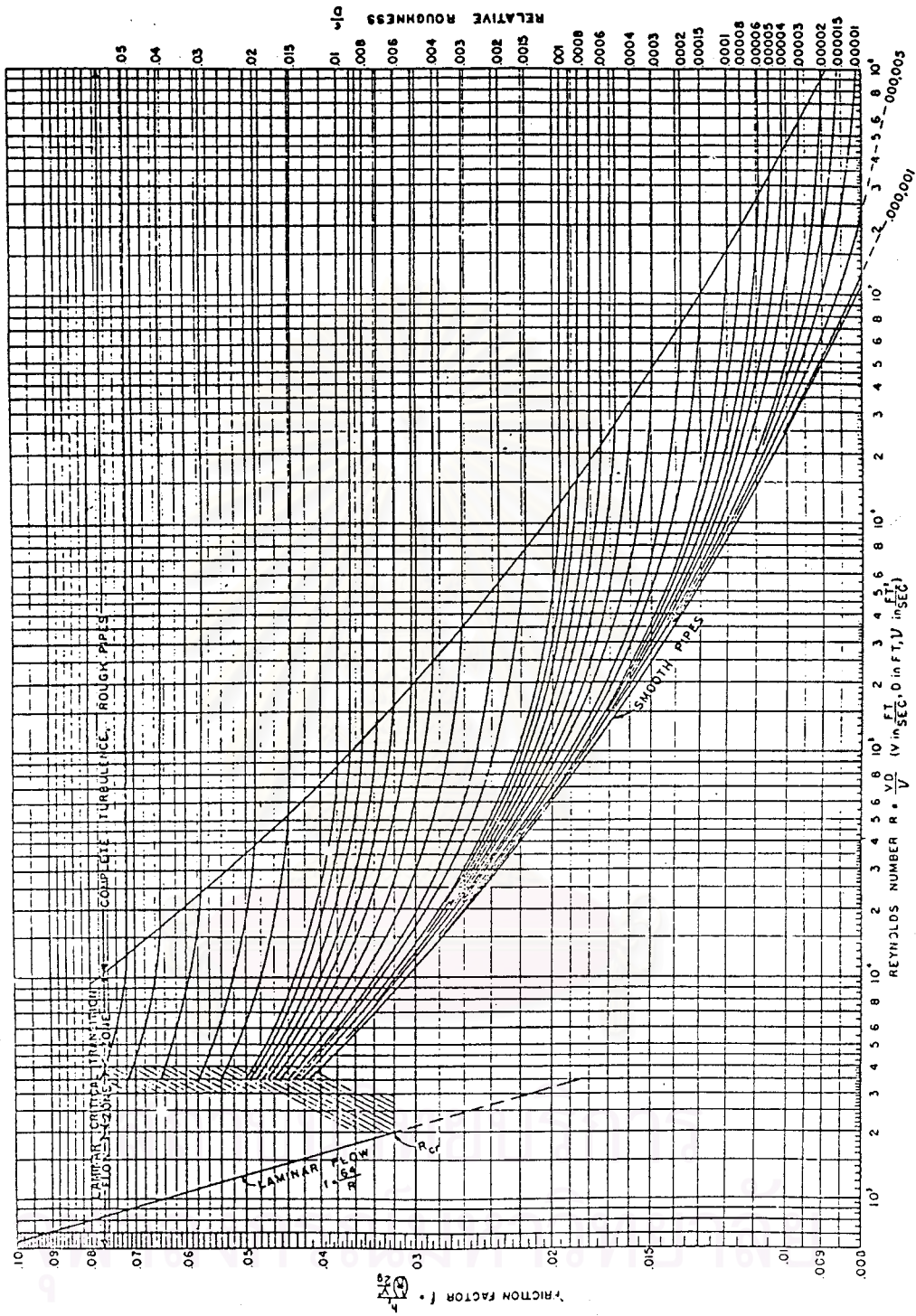
3) แผนภูมิสำหรับหาองค์ประกอบความเสียดทาน

สมการต่างๆ ที่กล่าวมานั้นยังไม่สะดวกต่อการหาค่าองค์ประกอบความเสียดทานดังกล่าว ดังนั้นจึงมีผู้ค้นคว้าจัดทำแผนภูมิเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ดังที่แสดงในแผนภูมิรูปภาพที่ 2.1 ซึ่งจัดทำโดย Moody โดยพลอตมาจากข้อมูลการทดลองที่ดีที่สุดเท่าที่จะหาได้ จากแผนภูมิจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟในแผนภูมินั้นแบ่งออกเป็น 4 ช่วงด้วยกัน คือ

1. ช่วงแรก เป็นช่วงที่มีการไหลแบบราบเรียบ
2. ต่อมาเป็นช่วงวิกฤต ในช่วงนี้ค่าต่างๆ จะไม่แน่นอนเพราะการไหลอาจจะเป็นได้ทั้งแบบปั่นป่วนหรือแบบราบเรียบก็ได้
3. บริเวณหรือช่วงที่เป็นรอยต่อ (transition zone) ในช่วงดังกล่าวนี้ค่า f จะเป็นฟังก์ชันของ Re และ ϵ/D
4. ช่วงที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนโดยสมบูรณ์ ในช่วงดังกล่าวนี้ค่า f จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า Re แต่จะขึ้นกับ ϵ/D

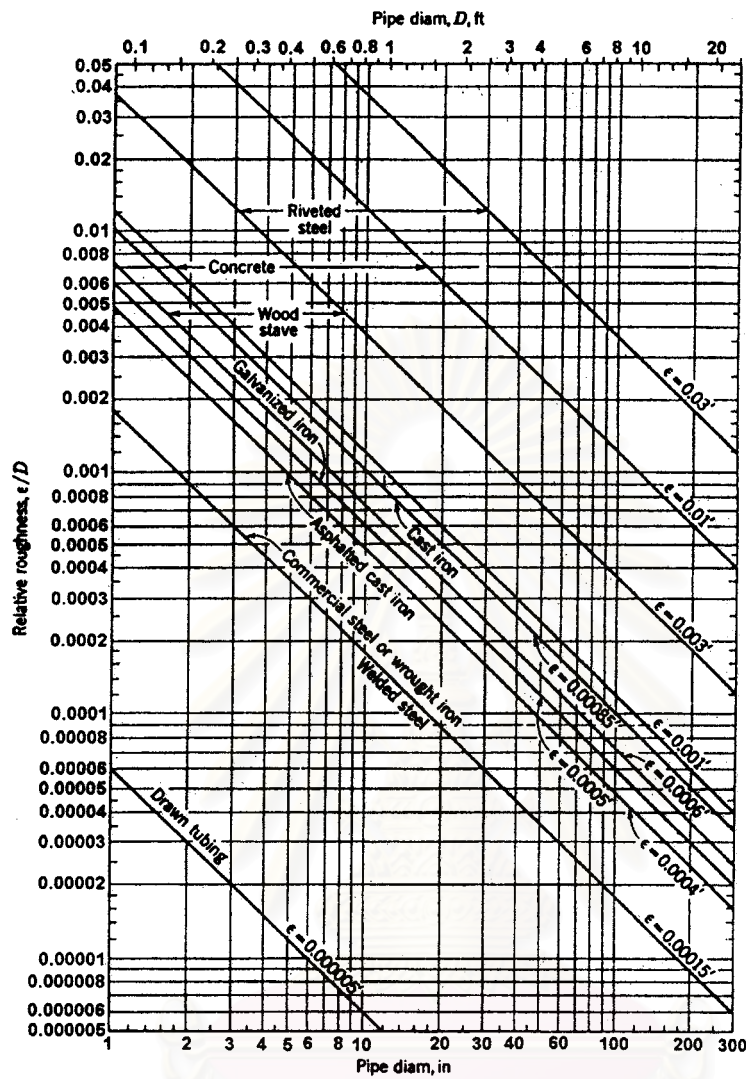
ในแผนภูมินี้ไม่มีเส้นแบ่งช่วงที่กำลังมีการเปลี่ยนแปลงการไหลอย่างเด่นชัด เส้นประที่ใช้แบ่งช่วงทั้งสองนี้ได้มาจากสมการตามการแนะนำของ R.J.S. Pigott สมการดังกล่าวนี้คือ

$$Re = 3500D/\epsilon \quad (2-6)$$



Friction Factors for any kind and size of pipe. (From Standards of the Hydraulics Institute, "Pipe Friction.")

รูปภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงองค์ประกอบความเสียดทานของ Moody



ค่าความขรุขระสัมพัทธ์ของท่อที่ผลิตขายในอุตสาหกรรม

รูปภาพที่ 2.2 แผนภาพแสดงความหยาบสัมพัทธ์ของผนังท่อของ Moody

ในการใช้แผนภูมิดังกล่าวนี้เราสามารถหาค่าของ ϵ ได้จากตารางและเนื่องจาก ϵ/D ไม่มีหน่วย ดังนั้นถึงแม้ว่าจะใช้หน่วยในระบบใดก็ตามก็จะได้ค่าเท่าๆ กัน สำหรับค่า ϵ/D ของท่อในอุตสาหกรรมนั้นหาได้จากรูปที่จัดทำโดย Moody เช่นเดียวกัน ตามรูปที่ 2.2 ในการใช้แผนภูมิและสมการวิเคราะห์มิติ นี้ควรจะใช้ค่าที่ถูกต้องของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อจะมีขนาดเล็กกว่าขนาดระบุของท่อเล็กน้อย

สำหรับในช่วงที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนโดยสมบูรณ์แล้วนั้น ความเสียดทานจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ V^2 และไม่ขึ้นอยู่กับค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์ ในกรณีดังกล่าวนี้ค่าองค์ประกอบความเสียดทาน จะขึ้นอยู่กับความขรุขระสัมพัทธ์แต่เพียงอย่างเดียว งานในทางปฏิบัติ นั้นส่วนใหญ่แล้ว จะอยู่ในช่วงหัวเลี้ยวหัวต่อ หรือบริเวณที่เป็นรอยต่อ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องรู้ค่าที่แน่นอนของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

ค่าองค์ประกอบความเสียดทาน สามารถคำนวณได้จากสมการ แต่ต้องทราบค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่าความหยาบของผนังท่อ ด้วยสมการของ Colebrook-White's Equation ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่าให้ค่าความถูกต้องเทียบเท่า แผนภูมิที่จัดทำโดย Moody

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = (-2) \log \left[\frac{\epsilon}{3.71D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right] \quad (2-7)$$

โดยที่

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2-8)$$

ϵ คือ ความขรุขระของผนังท่อ มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)

V คือ ความเร็วของไหลในท่อ มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต) ต่อวินาที

μ คือ ความหนืดของไหล หน่วยเป็น กก. ต่อเมตร (ฟุต) วินาที

2.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในของไหล (Particle Dynamics)

1) Particle Drag

การเคลื่อนที่ของอนุภาคในก๊าซและของเหลวเป็นปรากฏการณ์ที่พบได้ทั่วไปในอุตสาหกรรมเคมี หน่วยปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องยกตัวอย่างเช่น ฟลูอิดไดเซชัน ถังตกตะกอน เครื่องมือแยกสาร ระบบขนถ่ายด้วยกำลังไฮดรอลิกและนิวแมติก เป็นต้น ในกรณีที่มีของแข็งอยู่ในของไหล อาจพิจารณาได้ 4 รูปแบบคือ

- ของแข็งอยู่กับที่และมีของเหลวไหลผ่าน
- ของไหลอยู่นิ่ง และมีของแข็งเคลื่อนที่ในของไหล

- ทั้งของแข็งและของไหลต่างเคลื่อนที่
- ทั้งของแข็งและของไหลต่างอยู่นิ่ง

เมื่อพิจารณาเฉพาะในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ จากรูปแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้น สิ่งที่เรา มักให้ความสนใจได้แก่ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุทั้งสอง ในระหว่างการเคลื่อนที่สัมพัทธ์จะ เกิดแรงต้านขึ้นที่ผิวของของแข็ง แรงต้านนี้เรียกว่า Drag force ในการเคลื่อนที่ จะต้องมีการทำงาน ส่วนหนึ่งถูกใช้ไปในการเอาชนะแรงต้านทาน แรงต้านทานและพลังงานที่ใช้ในการชดเชยนี้จะขึ้น อยู่กับชนิดของการไหล และรูปร่างของของแข็ง การไหลแบบราบเรียบจะเกิดขึ้นกรณีที่ของไหลจะ ไหลที่ความเร็วต่ำ และของแข็งมีขนาดเล็ก หรือเมื่อของไหลมีความหนืดสูง การสูญเสียพลังงาน เบื้องต้นจะสูญเสียให้กับแรงเสียดทาน ถ้าความเร็วเฉลี่ยในการไหลเพิ่มขึ้น อิทธิพลของแรงเฉื่อย จะมีค่ามากขึ้นและทำให้การไหลเปลี่ยนรูปแบบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

ในกรณีที่ของแข็งที่เคลื่อนที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งมีรัศมี r แรงต้านทานที่ เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วดังสมการ

$$\text{Drag force, } F = \pi r^2 C_D \rho \frac{u^2}{2} \quad (2-9)$$

$$\text{หรือ } \frac{F}{A} = C_D \rho \frac{u^2}{2} \quad (2-10)$$

โดยที่ C_D คือ drag coefficient

A คือ projected area ของอนุภาค

u คือ ความเร็วของอนุภาค มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต)ต่อวินาที

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่คำนวณหาความดันลดของการไหลในท่อ

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \rho \frac{v^2}{2} \quad (2-11)$$

จะพบว่า C_D มีลักษณะคล้าย f โดยที่สมการจะมีเทอม L/D ซึ่งอธิบายถึงสัดส่วนของระบบ แต่ เนื่องจากวัตถุที่กำลังพิจารณามีลักษณะเป็นทรงกลม ดังนั้น L/D จึงมีค่าเท่ากับ 1 ในการไหลใน ท่อพบว่า f ขึ้นอยู่กับค่า เรย์โนลด์์นัมเบอร์ และความหยาบของผนังท่อ ในกรณีของการเคลื่อนที่ ของของแข็งในของไหลก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน สำหรับทรงกลมผิวเรียบ C_D จะขึ้นอยู่กับค่า เรย์ โนลด์์นัมเบอร์ เพียงอย่างเดียว ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ของวัตถุหาได้จาก

$$\text{Re}_p = \frac{\rho d_p u}{\mu} \quad (2-12)$$

โดยที่ d_p คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของวัตถุ ρ , μ คือ ความหนาแน่นและความหนืดของของไหล

เมื่อเปรียบเทียบรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_D - Re_p ตามรูปภาพที่ 2.3 กับ แผนภูมิของ Moody แล้วพบว่าทั้งสองภาพมีลักษณะคล้ายกัน และที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ มีค่าน้อยๆ f และ C_D จะเป็นสัดส่วนผกผันกับ Re และ Re_p ตามลำดับ

$$\text{กรณีท่อ} \quad f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Poiseuille's equation}) \quad (2-13)$$

$$\text{กรณีทรงกลม} \quad C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (\text{Stoke's Law}) \quad (2-14)$$

สำหรับช่วงที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ มีค่าปานกลางระหว่าง $1 < Re_p < 1000$ ค่า C_D สามารถคำนวณ

$$\text{ได้จาก} \quad C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.14 Re_p^{0.7}) \quad (2-15)$$

เมื่อ เรย์โนลด์์นัมเบอร์ มีค่ามากกว่า 1000 ค่า C_D จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า Re_p อีกต่อไปและจะเป็นค่าคงที่ (Newton's Law)

$$C_D = 0.44 \quad 1000 < Re_p < 350000 \quad (2-16)$$

ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ของ ของแข็งในของไหล ได้แก่ การกำจัดฝุ่นละอองออกจากอากาศ หรือ Flue gas การแยกอนุภาคออกจากน้ำเสียเพื่อที่จะสามารถปล่อยน้ำทิ้งลงสู่ท่อสาธารณะได้ ในการเคลื่อนที่ของของแข็งผ่านของไหล ต้องอาศัยแรงจากภายนอกมากระทำต่อของแข็งนั้น ซึ่งแรงภายนอกอาจมาจาก แรงโน้มถ่วง แรงเหวี่ยง หรือ แรงจากสนามไฟฟ้า หรือ สนามแม่เหล็ก

พิจารณาของแข็งที่เคลื่อนที่ในของไหล แรงทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุประกอบด้วย

- แรงภายนอก เช่น แรงโน้มถ่วง หรือ แรงเหวี่ยง
- แรงลอยตัว ซึ่งจะขนานกับแรงภายนอก แต่มีทิศทางตรงข้ามกับแรงภายนอก
- Drag force ซึ่งจะปรากฏเมื่อมีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุและของไหล โดยที่

drag force จะกระทำในทางที่ขนานแต่มีทิศทางตรงกันข้ามของการเคลื่อนที่ของวัตถุ

พิจารณา วัตถุทรงกลมที่มีมวล m เคลื่อนที่ผ่านของไหลภายใต้แรงภายนอกที่กระทำ (F_e) โดยให้ความเร็วสัมพัทธ์เท่ากับ u แรงลอยตัวบนวัตถุเท่ากับ F_b และ drag force = F_D

$$\text{ดังนั้น แรงลัพธ์ที่กระทำบนวัตถุ} = F_e - F_b - F_D$$

$$\text{ความเร่งในการเคลื่อนที่ของวัตถุ} = a = du/dt \quad \text{จากกฎของนิวตัน}$$

$$\Sigma F = ma$$

$$F_e - F_b - F_D = m \frac{du}{dt} \quad (2-17)$$

โดยที่แรงภายนอกสามารถเขียนได้ในรูป

$$F_e = ma_e$$

แรงลอยตัว (มวลของปริมาตรของของไหลที่ถูกแทนที่ด้วยวัตถุ และถูกเร่งด้วยแรงภายนอก) จะหาได้จากสมการ

$$F_b = m \frac{\rho}{\rho_p} a_e \quad (2-18)$$

ในส่วนของ Drag force จะคำนวณได้จาก

$$F_D = A C_D \rho \frac{u^2}{2} \quad (2-19)$$

แทนค่า F_D ในสมการ (2-17) จะได้สมการ

$$\frac{du}{dt} = a_e - \frac{\rho}{\rho_p} a_e - A C_D \rho \frac{u^2}{2} / m \quad (2-20)$$

2) องค์ประกอบเชิงรูปร่าง (Shape Factor)

อนุภาคของแข็งที่พบในภาคอุตสาหกรรมส่วนมากมักไม่พบทรงกลมที่สมบูรณ์แบบ ในการทำนายความเร็วที่ปลายของอนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลมจะมีความยุ่งยากกว่าเดิมตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้เนื่องมาจากผลกระทบของรูปร่างที่มีต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคในของไหล ได้มีผู้ทำการทดลองศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลมและเสนอแนวคิดเกี่ยวกับองค์ประกอบเชิงรูปร่างมากพอสมควร จากรูปภาพที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_D และ Re_p ของรูปร่างต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับอนุภาคทรงกลมผิวเรียบ ความสัมพันธ์ที่เป็นที่นิยมมาก มี 2 ความสัมพันธ์ คือ องค์ประกอบเชิงปริมาตรและรูปร่างและ องค์ประกอบเชิงความเป็นทรงกลม

ก. องค์ประกอบเชิงปริมาตรและรูปร่าง (Volumetric shape factor)

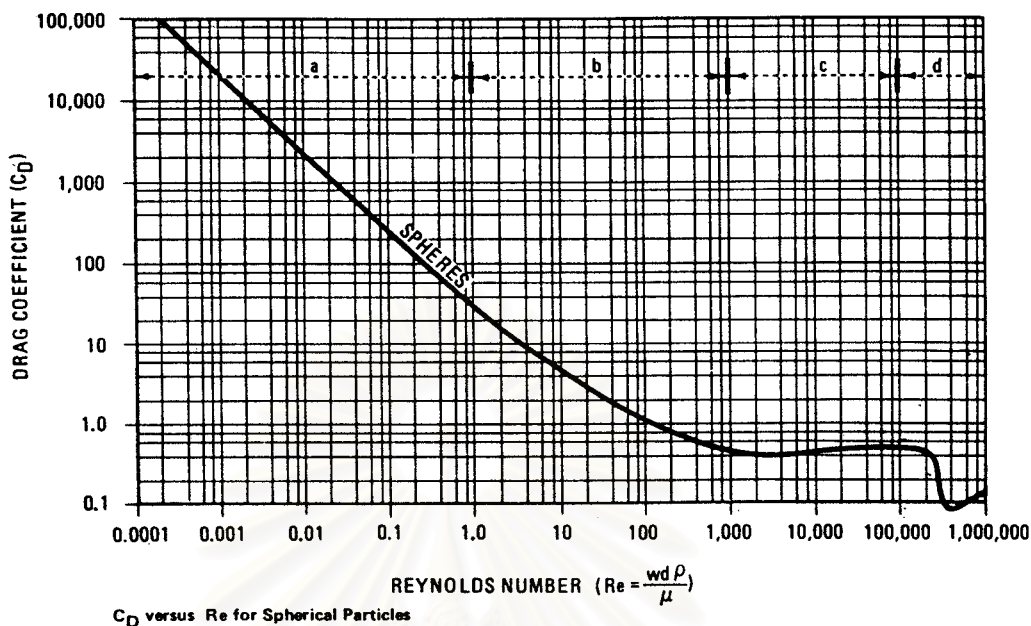
องค์ประกอบเชิงปริมาตรและรูปร่างสามารถให้คำจำกัดความได้ว่า เป็นสัดส่วนระหว่างปริมาตรของอนุภาคที่ได้จากการวัดกับปริมาตรของอนุภาคที่คำนวณได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาคที่คำนวณได้จากภาพถ่าย

$$\phi_V = V_p / d_a^3 \quad (2-21)$$

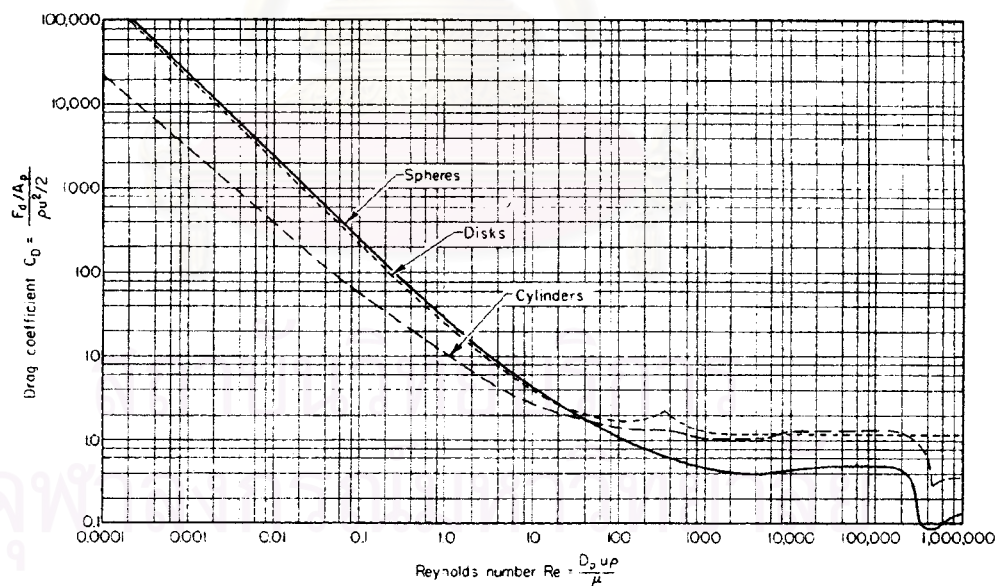
โดยที่ d_a คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่คำนวณได้จากพื้นที่ภาพถ่าย

$$d_a = \left(\frac{4A_{pp}}{\pi} \right)^{0.5} \quad (2-22)$$

โดยที่ $A_{p,p}$ คือ พื้นที่ภาพถ่าย และ V_p คือปริมาตรของอนุภาค และ ϕ_V คือ องค์ประกอบเชิงปริมาตรและรูปร่าง



รูปภาพที่ 2.3 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re_p และ C_D ของทรงกลมผิวเรียบ



Drag coefficients for spheres, disks, and cylinders: A_p = area of particle projected on a plane normal to direction of motion; C_D = overall drag coefficient, dimensionless; D_p = diameter of particle; F_d = drag or resistance to motion of body in fluid; Re = Reynolds number, dimensionless; u = relative velocity between particle and main body of fluid; μ = fluid viscosity; and ρ = fluid density. (From Lapple and Shepherd, *Incl. Eng. Chem.*, **32**, 605 (1940).)

รูปภาพที่ 2.4 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่าง Re_p และ C_D ของอนุภาครูปทรงต่างๆ

เฮย์วูด (Heywood, 1938) ประยุกต์องค์ประกอบเชิงปริมาตรและรูปร่างเข้ากับสมการความสัมพันธ์ของเรย์โนลด์นัมเบอร์ของอนุภาคและ drag coefficient

$$C_{da} = \frac{8gd_a(\rho_s - \rho_L)}{\pi V_t^2 \rho_L} \quad (2-23)$$

$$Re_{da} = \frac{\rho Du}{\mu} \quad \text{โดยที่}$$

C_{da} คือ drag coefficient ที่คำนวณจากเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่คำนวณได้จากภาพถ่าย
 Re_{da} คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของอนุภาค

ข. องค์ประกอบเชิงความเป็นทรงกลม (Sphericity Shape Factor)

องค์ประกอบเชิงความเป็นทรงกลม สามารถให้ค่าจำกัดความได้ว่า เป็นสัดส่วนระหว่างพื้นผิวทรงกลมที่มีปริมาตรเท่าอนุภาคต่อพื้นผิวของอนุภาค

$$\phi = 4\pi \left(\frac{3V_p}{4\pi} \right)^{2/3} / A_p \quad (2-24)$$

โดยที่ A_p คือ พื้นผิวของอนุภาค V_p คือปริมาตรของอนุภาค และ ϕ คือ องค์ประกอบความเป็นทรงกลม ได้มีผู้ศึกษาทดลองวัดค่าองค์ประกอบความเป็นทรงกลมของอนุภาคต่างๆ และประมาณค่าดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบความเป็นทรงกลมของอนุภาคต่างๆ

วัสดุ	ค่าประมาณความเป็นทรงกลม (ϕ)
Sand	0.95
Rounded Sand	0.83
Flint Sand	0.65
Coal dust	0.73
Coal	0.696
Bottom ash	0.80
Field 1 ash	0.90
Kaolin	0.95
Ocean bed	0.95
Kaolin	0.80
Tailing 1	0.90

Tailing 2	0.75
Tailing 3	0.53

(ข้อมูลจาก J.H. Perry (ed), Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill,1984)

บราวน์ (Brown, 1950) ได้เตรียมแหล่งข้อมูลที่มีคุณค่าทางด้านองค์ประกอบเชิง
ความเป็นทรงกลมรูปทรงต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2
ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบเชิงความเป็นทรงกลมรูปทรงต่างๆ

รูปทรง	ความเป็นทรงกลม (ϕ)
ทรงกลม	1.0
รูปแปดเหลี่ยม	0.847
ลูกบาศก์	0.806
ปริซึม (มิติ)	
$a \times a \times 2a$	0.767
$a \times 2a \times 2a$	0.761
$a \times 2a \times 3a$	0.725
ทรงกระบอก (รัศมี และความสูง)	
ความสูง = รัศมี/15	0.254
ความสูง = รัศมี/10	0.323
ความสูง = รัศมี/3	0.594
ความสูง = รัศมี	0.827
ความสูง = 3 เท่าของรัศมี	0.860
ความสูง = 10 เท่าของรัศมี	0.691
ความสูง = 20 เท่าของรัศมี	0.580

(ข้อมูลจาก Nigel P. Brown, Design of Solid-Liquid System,1991)

3) ความเร็วบั้นปลาย (Terminal Velocity, V_t)

โดยปกติ drag force จะแปรผันตามความเร็วกำลังสอง u^2 สำหรับการไหลของ
วัตถุในของไหลด้วยแรงโน้มถ่วงจะหาได้จากสมการ (2-20) ในกรณีของ แรงภายนอกเท่ากับ แรง
โน้มถ่วง $a_e = g$

$$\frac{dV_t}{dt} = g - \frac{\rho}{\rho_p} g - A C_D \rho \frac{V_t^2}{2m} \quad (2-25)$$

พบว่าความเร่งจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไป และจะมีค่าเท่ากับศูนย์ในที่สุด ซึ่งทำให้วัตถุมีความเร็วคงที่และเป็นความเร็วสูงสุด ซึ่งความเร็วค่านี้เรียกว่าความเร็วบั้นปลาย (Terminal Velocity, V_t) ภายใต้สภาวะการตกอย่างอิสระ สมการในการหา V_t จะหาได้จากสมการ (2-21) โดยกำหนดให้เทอม

$$\frac{du}{dt} = 0 \quad A = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad \text{และ} \quad m = \frac{\pi d_p^3 \rho_s}{6} \quad \text{จะได้ว่า}$$

$$V_t = \left(\frac{4gd_p(\rho_s - \rho_w)}{3C_D\rho_w} \right)^{0.5} \quad (2-26)$$

โดยที่ $C_D = f(\text{Re}_p)$

กรณีการไหลอยู่ในช่วง Stoke's Law คือ $\text{Re}_p < 1$ สามารถคำนวณหาความเร็วบั้นปลาย จาก (Pettyjohn and Chistiansen, Chem. Eng. Prog., 1948)

$$\text{สมการ} \quad V_t = K_1 \frac{gd_p^2(\rho_s - \rho_w)}{18\mu_w} \quad (2-27)$$

$$\text{โดยที่} \quad K_1 = (0.843) \log \left(\frac{\phi}{0.065} \right)$$

กรณีการไหลอยู่ในช่วง Newton's Law คือ $\text{Re}_p > 1000$ สามารถคำนวณหา ความเร็วบั้นปลาย

$$\text{จาก} \quad V_t = \left(\frac{4gd_p(\rho_s - \rho_w)}{3K_2\rho_w} \right)^{0.5} \quad (2-28)$$

$$\text{โดยที่} \quad K_2 = 5.32 - 4.88\phi$$

กรณีการไหลอยู่ในช่วง Intermediate Region คือ $1 < \text{Re}_p < 1000$ สามารถคำนวณหา ความเร็วบั้นปลาย จาก

$$V_t = 0.153 K_2 \left(\frac{g d_p^{1.6} (\rho_s - \rho_w)}{\mu_w^{0.6} \rho_w^{0.4}} \right)^{0.714} \quad (2-29)$$

$$K_2 = (0.843) \log \left(\frac{\phi}{0.065} \right)$$

โดยที่ V_t คือ ความเร็วบั้นปลาย มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

C_D คือ Drag coefficient

ρ_s คือ ความหนาแน่นของอนุภาค มีหน่วยเป็น กก.ต่อเมตร³

ρ_L คือ ความหนาแน่นของของไหล มีหน่วยเป็น กก.ต่อเมตร³
 μ_L คือ ความหนืดของของไหล มีหน่วยเป็น กก.ต่อเมตรวินาที
 ϕ คือ องค์ประกอบเชิงความเป็นทรงกลม (Sphericity Shape Factor)

ค่า C_D สามารถอ่านได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_D กับ Re_p โดยที่มีข้อกำหนดว่าวัตถุต้องอยู่ห่างกันและห่างจากผนังเพียงพอที่จะไม่รบกวนกัน และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ V_t

4) Hindered Settling

เมื่อวัตถุมีระยะทางในการเคลื่อนที่อย่างอิสระโดยอยู่ห่างจากวัตถุอื่นๆ ดังนั้นการเคลื่อนที่จะไม่ได้รับผลกระทบจากภายนอก ซึ่งการเคลื่อนที่เช่นนี้ว่า Free Settling ถ้าหากมีการรบกวนจากวัตถุตัวอื่นแม้ว่าจะไม่เกิดการชนกัน จะเรียกกระบวนการเช่นนี้ว่า Hindered Settling ซึ่งค่า C_D ที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากกว่า C_D ที่เกิดจาก Free Settling

ในกระบวนการ Hindered Settling ความเร็วเกรเดียนท์ (velocity gradient) รอบวัตถุจะถูกรบกวนด้วยวัตถุข้างเคียง ซึ่งทำให้วิธีการหา drag force วิธีทั่วไปไม่สามารถใช้ได้ แต่อย่างไรก็ตาม Madui และ Whitmore (Br. J. Appl. Phys., 1958) ได้ทำการทดลองและหาความสัมพันธ์ Settling velocity V_s และ ความเร็วปั่นป่วน (V_t) ได้ดังสมการ

$$V_s = V_t(1-C_v)^n \quad (2-30)$$

โดยที่ ถ้าการไหลอยู่ในช่วง Stork's law n มีค่าเท่ากับ 4.65
 และถ้าการไหลอยู่ในช่วง Newton's law n มีค่าเท่ากับ 2.33
 และ C_v คือความเข้มข้นเชิงปริมาตร

2.3 การไหลในท่อของมลสาย (สองวัฏภาค)

ปัจจุบันการขนถ่ายอนุภาคของแข็งทางระบบท่อเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญมากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะกับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ในแต่ละปีจะมีการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ รวมถึงการออกแบบและก่อสร้างระบบท่อขนถ่ายมลสายระยะไกลมีจำนวนหลายโครงการ แต่เนื่องจากการที่มีอนุภาคของแข็งเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้การคำนวณออกแบบมีความยุ่งยากมากกว่าการไหลแบบหนึ่งวัฏภาค ดังนั้น การออกแบบระบบท่อสำหรับขนถ่ายของแข็งที่มีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน (Pipeline Hydraulic Simulation) จึงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการคำนวณออกแบบหรือการหาภาวะที่ดีที่สุด

1. รูปแบบการไหล (Flow Regime)

ขณะปฏิบัติการขนถ่ายมลสายในท่อแนวระดับ รูปแบบการไหลของมลสายจะเป็นรูปแบบใดนั้น ขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพของของแข็งและของเหลว ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะของของแข็ง (s) ขนาดของอนุภาคของแข็ง (d_p) ความเร็วการไหลเฉลี่ย (V) ความหนาแน่นของของไหล (ρ_L) ความหนืดของของไหล (μ) ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของมลสาย (C_v) และขนาดท่อ (D) ดังนั้น 4 รูปแบบการไหลของมลสายในท่อแนวระดับที่สามารถเกิดขึ้นได้ คือ

ก. การไหลแบบโฮโมจีเนียส (Homogeneous Flow)

การไหลแบบโฮโมจีเนียส สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีอนุภาคของแข็งในมลสายมีความเข้มข้นสูง และมีขนาดเล็ก (ประมาณเล็กกว่า 44 ไมครอน) มากพอที่จะแขวนลอยได้ในของไหล ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress - shear strain ของมลสายมักจะแสดงต่างไปจากของไหลบริสุทธิ์เดิมที่เป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งโดยปกติจะใช้น้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน และมลสายมักจะแสดงพฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน รูปแบบการไหลสามารถเป็นได้ทั้งแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน ในการคำนวณความดันตก จำเป็นต้องใช้ความรู้เกี่ยวกับปริโอโลยีในการแก้ปัญหา ซึ่งอยู่นอกขอบเขตการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างของมลสายประเภทนี้ คือ น้ำโคลน และน้ำเสียที่ออกจาก Flue Gas Scrubber เป็นต้น

ข. การไหลแบบซูโดโฮโมจีเนียส (Pseudo-Homogeneous Flow)

การไหลแบบซูโดโฮโมจีเนียส คือการไหลในท่อของมลสายประเภทที่ตกตะกอนได้ การไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและความเร็วการไหลสูงมากพอที่จะทำให้ อนุภาคของแข็งที่แขวนลอยในมลสายกระจัดกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วถึงตามพื้นที่ภาคตัดขวางท่อ จนกระทั่งสามารถกล่าวได้ว่าเป็นของไหลเนื้อเดียว และความดันตกสามารถคำนวณได้ด้วย สมการของ Darcy-Weisbach โดยใช้ความเข้มข้นและความหนืดของมลสายแทนของไหลบริสุทธิ์หรือน้ำซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

ค. การไหลแบบเฮเทอโรจีเนียส (Heterogeneous Flow)

ในการออกแบบระบ่อขนถ่ายมลสายที่ตกตะกอนได้ ปกตินิยมควบคุมให้มีการไหลในรูปแบบนี้ ซึ่งการไหลแบบเฮเทอโรจีเนียสสามารถเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อ อนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่ หรือมีความถ่วงจำเพาะสูง และความเร็วของการไหลมีค่าเท่ากับความเร็ววิกฤต จนทำให้อนุภาคของแข็งแยกตัวออกจากของไหล แต่ก็ยังคงแขวนลอยในของไหล และเกิดเกรเดียนท์ของความเข้มข้นในแนวภาคตัดขวางของพื้นที่หน้าตัดท่อ ปกติอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยในมลสายประเภทนี้ จะไม่เข้าไปปรับปริโอโลยีของของไหล

ช่วงประมาณตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 ได้มีผู้ทำการศึกษาค้นคว้าพฤติกรรมการไหลของมลสารรูปแบบนี้ และได้ตีพิมพ์ผลงานออกมาเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามความรู้ต่างๆ อยู่ในรูปสมการเอมไพริคัล และมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้เขียนมุ่งเน้นไปที่การไหลแบบเซพเทอโรจีเนียส เนื่องจาก การไหลลักษณะเช่นนี้มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยพอเพียง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่อหน่วยน้อยที่สุด

ง. การไหลแบบแยกเป็นชั้น (Flow with Sliding Bed)

การไหลประเภทนี้มักเกิดขึ้น กรณี อนุภาคของแข็งมีขนาดโตและความเร็วการไหลมีค่าน้อยกว่าความเร็ววิกฤตมาก ดังนั้น แรงโน้มถ่วงที่กระทำต่ออนุภาคจึงมีค่ามากกว่าแรงพยุงอันเนื่องมาจากแรงลอยตัวหรือ Drag force ขณะเกิดการไหลอนุภาคของแข็งมีแนวโน้มตกตะกอนบริเวณท้องท่อ บางครั้งอาจมีการกลิ้งไถลของอนุภาคไปตามท้องท่อ มลสารแยกออกเป็นสองชั้นอย่างชัดเจน การไหลประเภทนี้ไม่เป็นที่ต้องการ และวิศวกรผู้ปฏิบัติงานต้องป้องกันไม่ให้เกิดขึ้น ผลกระทบ คือ ขาดแคลนข้อมูลการไหลในลักษณะนี้ และยังขาดการศึกษาอย่างต่อเนื่อง

2) โครงสร้างกระบวนการออกแบบระบบท่อ(Outline of slurry pipeline design)

ในการออกแบบระบบท่อ ตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบสามารถจำแนกเป็นหมวดได้ดังนี้

ก. หมวดกระบวนการ (Process Consideration)

- 1) การเลือกของไหลส่งกำลัง โดยปกติจะใช้น้ำเป็นของไหลส่งกำลัง
- 2) การเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสม
- 3) การคำนวณความเร็ววิกฤต
- 4) การคำนวณความดันลด

ข. หมวดเครื่องกล (Mechanical Consideration)

- 1) การเลือกประเภทเครื่องสูบล
- 2) การเลือกจำนวนและตำแหน่งของสถานีเครื่องสูบล
- 3) การควบคุมอัตโนมัติ
- 4) การเลือกวิธีการก่อสร้างระบบท่อใต้ดินหรือบนดิน

ค. หมวดทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic Factors)

- 1) การลงทุน
- 2) ค่าดำเนินการ
- 3) การเลือกขนาดท่อที่เหมาะสมและค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ผู้เขียนมุ่งเน้นไปที่หมวด ก และ หมวด ค และเฉพาะบางหัวข้อที่เกี่ยวข้องเท่านั้น

3) สมบัติกายภาพของมลสาร (Physical Properties of Suspension)

ข้อมูลที่เป็นพื้นฐานการคำนวณออกแบบระบบท่อขนถ่ายมลสาร ก็คือ ข้อมูลที่เป็นสมบัติกายภาพของ ของแข็งและของไหล ได้แก่ ความหนาแน่น และ ความหนืด เป็นต้น

ก. ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของของแข็งและของไหลสามารถประเมินได้จากความถ่วงจำเพาะ ส่วนมลสารก็สามารถวัดได้โดยตรงด้วยวิธีการธรรมดา แต่บางครั้งก็อาจเกิดข้อผิดพลาดได้เช่นกัน โดยเฉพาะมลสารที่อนุภาคของแข็งตกตะกอนเร็ว เช่นที่บริเวณท้องต่อค่าความหนาแน่นที่วัดได้จะมีค่าสูงเกินจริง ดังนั้น ในทางปฏิบัติสามารถคำนวณความหนาแน่นของมลสาร จากความหนาแน่นของของแข็งและของไหล

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{c_w}{\rho_s} + \frac{100 - c_w}{\rho_L}} \quad (2-31)$$

โดยที่ C_w คือ สัดส่วนความเข้มข้นของของแข็งในมลสารโดยน้ำหนัก แต่โดยทั่วไป การไหลในท่อมักเกี่ยวข้องกับกรไหลเชิงปริมาตร ดังนั้น ความเข้มข้นเชิงปริมาตรสามารถคำนวณได้จาก

$$c_v = \frac{100 C_w / \rho_s}{\frac{c_w}{\rho_s} + \frac{100 - c_w}{\rho_L}} = \frac{C_w \rho_m}{\rho_s} \quad (2-32)$$

$$c_w = \frac{C_v \rho_s}{C_v \rho_s + (100 - C_v)} = \frac{C_v \rho_s}{\rho_m} \quad (2-33)$$

ข. ความหนืด (Viscosity)

ผลกระทบที่สำคัญของการที่อนุภาคของแข็งแขวนลอยในของไหลก็คือ ความหนืดที่เปลี่ยนไป ในหัวข้อนี้จะพิจารณาเฉพาะความหนืดที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากอนุภาคทรงกลม กรณีมลสารเจือจาง EINSTEIN ปี ค.ศ. 1905 เสนอสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\frac{\mu_m}{\mu_o} = 1 + 2.5 C_v \quad (2-34)$$

กรณีมลสารเข้มข้น THOMAS ค.ศ 1962 ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล นำเสนอสมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\frac{\mu_m}{\mu_o} = 1 + 2.5 C_v + 10.05 C_v^2 + 0.00273 \exp (16.6 C_v) \quad (2-35)$$

โดยที่ μ_m คือ ความหนืดของมลสาร

μ_o คือ ความหนืดของของไหลบริสุทธิ์

C_v คือ ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของของแข็งในมลสาร

2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความพยายามในการพัฒนาสมการคำนวณความดันลดของมลสายเริ่มจากการที่ Blatch (1906) เสนอสมการความสัมพันธ์ของความดันลด ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$h_s = h_w + AC \quad (2-36)$$

ต่อมา Howard (1939) ได้ศึกษามลสายที่มีทรายเป็นส่วนประกอบในท่อขนาด 10.2 ซม. โดยศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดของอนุภาคที่มีต่อการไหลของมลสาย และต่อมา Wilson (1942) ก็ได้ นำเสนอสมการความดันลด คือ

$$h_s = h_w + A' \frac{v_s}{v} C' \quad (2-37)$$

ทฤษฎีต่างๆ ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง ช่วงต้นทศวรรษที่ 50 Durand และคณะ (1952) ได้ทดลองเพื่อศึกษาการไหลของมลสายในท่อและได้นำเสนอผลงานโดยพัฒนาสมการเอมไพริคัล (Empirical Equation) จากการทดลอง สำหรับทำนายความดันลดของการไหลแบบสองวัฏภาค ภายใต้น้ำ และยังสามารถนำมาเสนอสมการสำหรับทำนายความเร็ววิกฤต ในรูปของความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$V_c = F_L \sqrt{2gD(s-1)} \quad (2-38)$$

โดยที่ F_L เป็นฟังก์ชันของขนาดอนุภาคและความเข้มข้น และในช่วงเวลาขณะเดียวกันนั้น Newitt (1955) ทำการศึกษาการไหลของมลสายในท่อ โดยตั้งข้อสังเกตว่า กรณีสภาวะของแข็งมีขนาดโต และอัตราการไหลค่อนข้างช้า ประมาณ น้อยกว่า 17 เท่าของ Setting Velocity ความดันลดสามารถคำนวณได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{h_s - h_w}{h_w C_V} = 66 (s-1)gDN^2 \quad (2-39)$$

ต่อมา Wasp และคณะ (1963) ได้ปรับปรุงวิธีการคำนวณความดันลด และได้พัฒนาสมการจนกระทั่งสามารถนำไปออกแบบประยุกต์ระบบท่อขนถ่ายมลสายในเชิงการค้า และต่อมา Zandi และ Govatos (1967) นำเสนอพารามิเตอร์ ที่สามารถใช้เป็นดัชนี ในการจำแนกประเภทของมลสาย และต่อมา Hanks (1978) พัฒนาระบบการทำนายแฟกเตอร์ความเสียหายในการไหลแบบไฮโมจีเนียสของของไหลที่มีริโอโลยีแบบนอนนิวโตเนียน

2.4.1 ความเร็ววิกฤต (Critical Velocity)

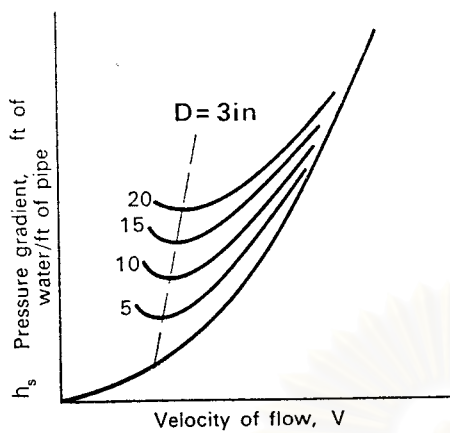
ความหมายหรือคำจำกัดความของความเร็ววิกฤตมีสองความหมาย ความหมายแรก คือ เป็นขนาดความเร็วการไหลในท่ออ้างอิงค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าของไหลมีความเร็วการไหลต่ำกว่าความเร็วอ้างอิงค่านี้ อนุภาคของแข็งจะเริ่มตกตะกอน และอีกความหมายหนึ่งก็คือ ขนาดความเร็วของการไหลของมลสารที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดความดันลดยุติที่น้อยที่สุดที่ความเข้มข้นของมลสารคงที่ ในปฏิบัติการขนถ่ายมลสารทางระบบท่อ จำเป็นต้องขนถ่ายที่ความเร็ววิกฤต เพราะถ้าขนถ่ายที่ความเร็วต่ำกว่านี้ อนุภาคของแข็งที่ตกตะกอนทำให้พื้นที่หน้าตัดท่อลดลงและกีดขวางเส้นทางการไหลและผิวด้านบนของอนุภาคที่ตกตะกอนจะมีความหนาแน่นมากกว่าผิวของท่อ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาทำให้ความดันลดยุติมีค่าสูง และอาจรุนแรงจนถึงขั้นทำให้ระบบท่ออุดตันได้ แต่ถ้าขนถ่ายที่ความเร็วสูงกว่านี้ ก็จะเกิดการสิ้นเปลืองพลังงานมากเกินไป ดังนั้น การคำนวณความเร็ววิกฤตจึงเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ทั้งในมุมมองทางด้านวิศวกรรมและทางด้านเศรษฐศาสตร์

2.4.2 ความดันลดยุติของการไหลในท่อแบบสองวัฏภาค

เมื่อพิจารณารูปภาพที่ 2.5 ถึง 2.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดยุติและความเร็วเฉลี่ยของมลสารขณะไหลในท่อที่ความเข้มข้นของมลสารต่างๆ กัน ในท่อขนาด 3 นิ้ว 6 นิ้ว และ 9 นิ้วตามลำดับ จากรูปภาพสามารถสังเกตเห็นได้ว่า ความดันลดยุติในรูปของฟุตน้ำต่อฟุตของความยาวท่อ และที่ความเร็วการไหลเดียวกันพบว่าความดันลดยุติของมลสารมีค่ามากกว่าของน้ำบริสุทธิ์ และมากขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของมลสารที่เพิ่มขึ้น จากรูปภาพที่ 2.8 พบว่าความดันลดยุติส่วนเกิน ($h_s - h_w$) อันเนื่องมาจากอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยในมลสาร จะมีขนาดลดลงเมื่อความเร็วการไหลมีค่ามากขึ้น

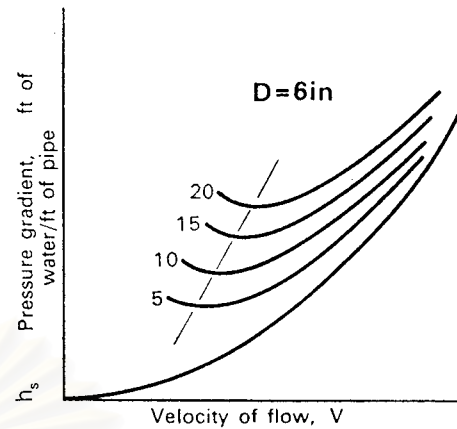
ถ้านำความดันลดยุติส่วนเกิน ($h_s - h_w$) มาหารด้วยความเข้มข้น ผลลัพธ์ที่ได้คือ ชุดของเส้นโค้งจะเหลือเพียงเส้นเดียวดังแสดงในรูปภาพที่ 2.9 และในทำนองเดียวกัน ในรูปภาพที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดยุติส่วนเกิน ($h_s - h_w$) และความเร็วการไหลของมลสาร โดยกำหนดให้มลสารคงมีความเข้มข้นคงที่ พบว่าความดันลดยุติขึ้นกับเทอม V^2/gD และที่ความดันลดยุติที่ขนาดความเร็วการไหลของมลสารจะขึ้นอยู่กับขนาดท่อ และชุดของเส้นโค้งที่ขนาดท่อต่างๆ กันจะมีลักษณะคล้ายกัน

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความดันลดยุติส่วนเกิน ($h_s - h_w$) ความเข้มข้น (C_v) และความเร็วการไหลของมลสาร (V) ตามที่แสดงในรูปภาพที่ 2.10 นั้น เป็นความสัมพันธ์ของท่อหนึ่งขนาดเท่านั้น อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของท่อขนาดอื่นๆ ก็สามารถหาได้ โดยการพรอดเทอม $\frac{h_s - h_w}{h_w C_v}$ และเทอม $\frac{V}{(gD)^{0.5}}$ ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.11



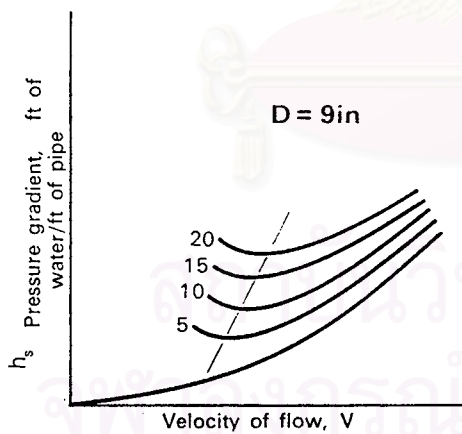
รูปภาพที่ 2.5

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด
และความเร็วการไหลของมวลสายในท่อ 3 นิ้ว
ที่ความเข้มข้นต่างๆ



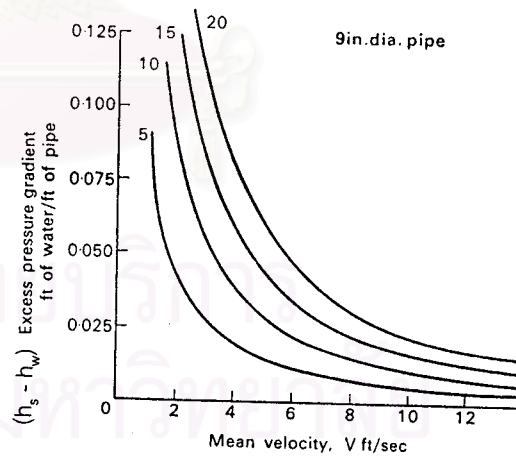
รูปภาพที่ 2.6

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด
และความเร็วการไหลของมวลสายในท่อ
6 นิ้ว ที่ความเข้มข้นต่างๆ



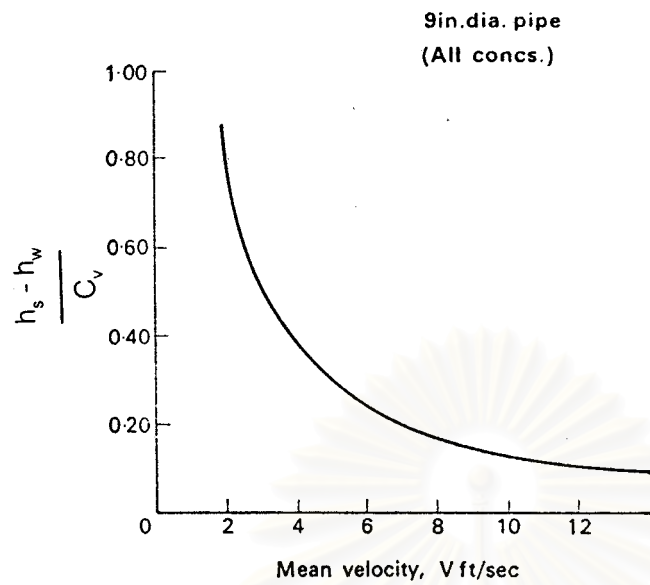
รูปภาพที่ 2.7

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด
และความเร็วการไหลของมวลสายในท่อ 9 นิ้ว
ที่ความเข้มข้นต่างๆ

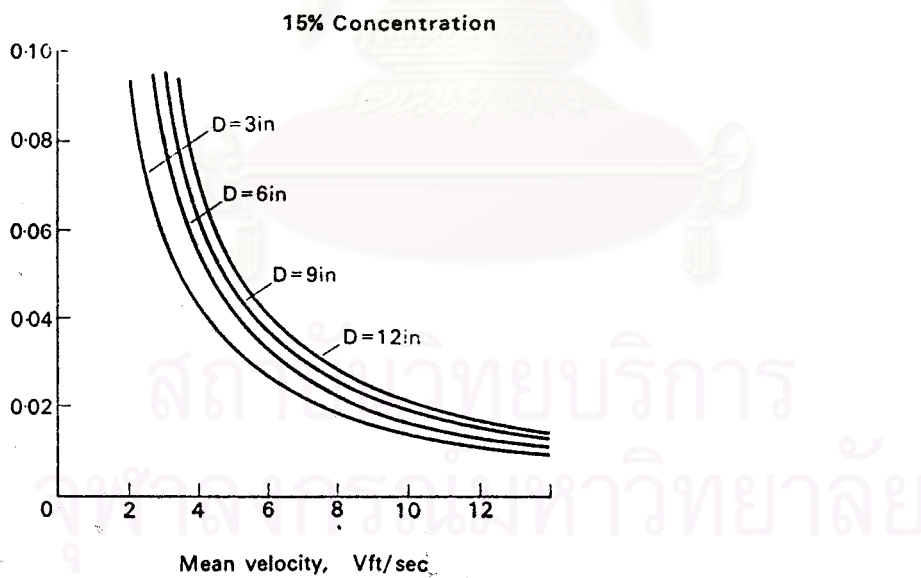


รูปภาพที่ 2.8

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด
ส่วนเกินเทียบกับน้ำในท่อขนาด 9 นิ้ว
ที่ความเข้มข้นต่างๆ



- 2.9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดส่วนเกินต่อหนึ่งหน่วยความเข้มข้นของมลสายในท่อขนาด 9 นิ้ว



- 2.10 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดส่วนเกินของมลสายในท่อขนาดต่างๆ ที่ความเข้มข้น 15 %

2.4.3 สมการเอมไพริคัลของ Durand

Durand และคณะ (1952) นำเสนอผลงานการทดลองศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการไหลของมวลสายในท่อ และเป็นมวลสายที่ประกอบไปด้วย ทราวย กรวด และ น้ำ โดย Durand และคณะ (1952) ทำการศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคที่มีต่อความดันลด พบว่าความดันลดแปรผันตรงกับขนาดอนุภาค ในการศึกษา Durand ได้นำข้อมูลทดสอบ 310 ข้อมูลมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างเทอม $(h_s - h_w)/h_w C_V$ และเทอม $V^2 C_D^{1/2}/(gD)$ พบว่า ข้อมูลทดสอบทั้ง 310 ข้อมูลเกาะกลุ่มเส้นโค้งเส้นหนึ่งดังแสดงในรูปภาพที่ 2.12 และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นที่มาของสมการเอมไพริคัล ดังต่อไปนี้

$$\frac{h_s - h_w}{h_w C_V} = 176 \left\{ \left(\frac{\sqrt{gD}}{V} \right)^3 \left(\frac{1}{\sqrt{C_D}} \right) \right\}^{1.5} \quad (2-40)$$

ในช่วงเวลาเดียวกัน Worster (1953) ได้ทำการศึกษาการไหลของมวลสายที่ประกอบด้วย ถ่านหิน และน้ำโดยอนุภาคของถ่านหินมีขนาดใหญ่กว่ากรวดและทราวย และได้นำผลงานคือสมการซึ่งมีรูปแบบคล้ายกันกับสมการของ Durand (1952) ดังนี้

$$\frac{h_s - h_w}{h_w C_V} = 120 \left[\frac{\sqrt{gD}}{V} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L}} \right]^3 \quad (2-41)$$

จากสมการ (2-41) สามารถสังเกตได้ว่า ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรได้รวมความหนาแน่นของอนุภาคเข้าไว้ในสมการด้วย แต่ไม่มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับขนาดของอนุภาคอยู่ในสมการ

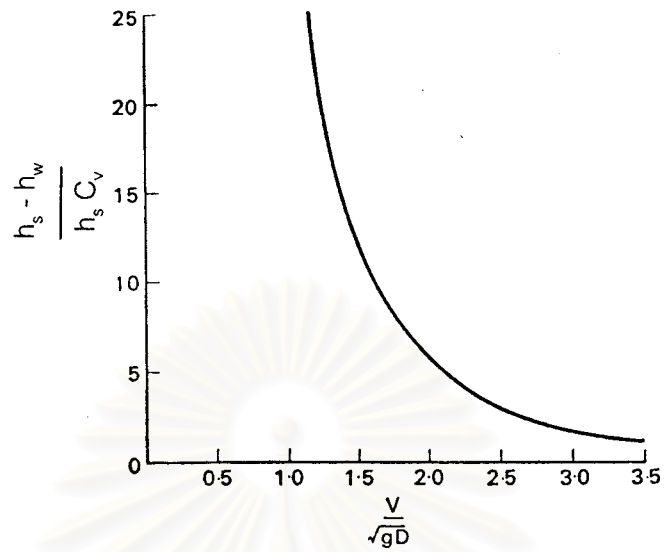
เมื่อย้อนกลับมาพิจารณาสมการของ Durand และคณะ (1952) ได้มีการปรับปรุงแก้ไขสมการเพื่อให้สามารถใช้งานได้กว้างขวางยิ่งขึ้นไม่เพียงแต่เฉพาะมวลสายประเภทกรวดและทราวยที่มีความถ่วงจำเพาะ 2.65 เท่านั้น โดยการเพิ่มเทอมความถ่วงจำเพาะเข้าไว้ในสมการเหมือนสมการ Worster และสามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ ได้ดังนี้

$$\frac{h_s - h_w}{h_w C_V} = 81 \left[\frac{gD(\rho_s - \rho_L)}{V^2 \sqrt{C_D} \rho_L} \right]^{1.5} \quad (2-42)$$

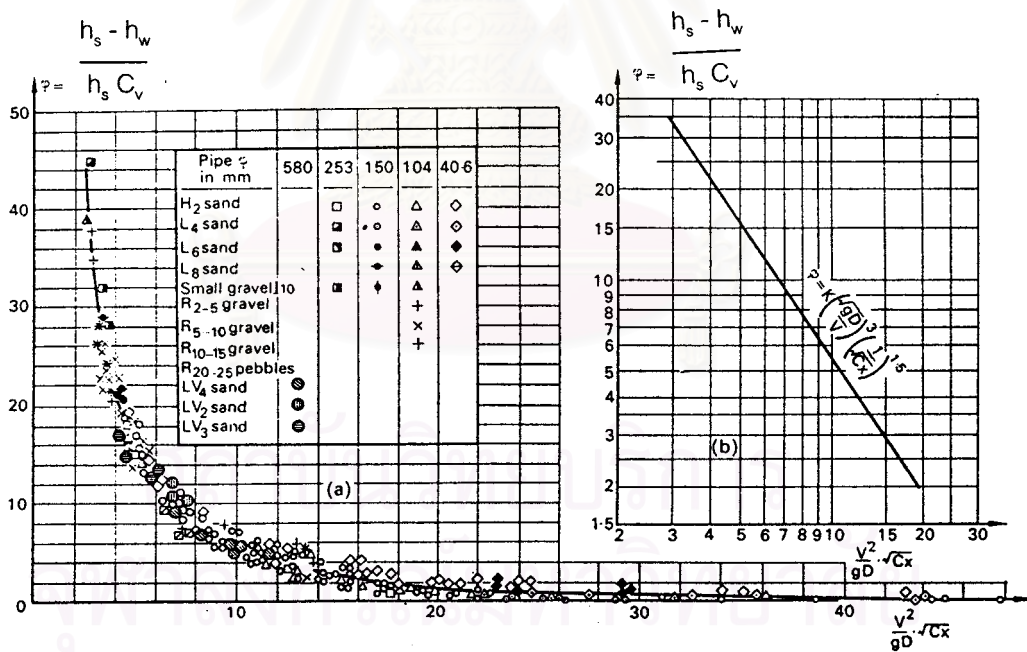
แต่โดยทั่วไป ในการขนถ่ายของแข็งมักจะขนถ่ายด้วยกำลังน้ำ ดังนั้น สมการจึงลดรูปเป็น

$$\frac{h_s - h_w}{h_w C_V} = 81 \left[\frac{gD(S - 1)}{V^2 \sqrt{C_D}} \right]^{1.5} \quad (2-43)$$

h_s คือ ความดันลดของมวลสาย มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต) น้ำต่อเมตร (ฟุต)ท่อ



2.11 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดส่วนเกินต่อหนึ่งหน่วยของมวลสายในท่อขนาดต่างๆ



2.12 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรต่างๆ ในการทดลองของ Durand และ คณะ

h_w	คือ	ความดันลดของน้ำ มีหน่วยเป็น เมตร (ฟุต) น้ำต่อเมตร (ฟุต)ท่อ
S	คือ	ความถ่วงจำเพาะของอนุภาค
C_v	คือ	ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของอนุภาคในมลสาย

ข้อมูลทดสอบ 310 ข้อมูลตามรูปภาพที่ 2.10 มีช่วงขอบเขตดังนี้

ขนาดท่อ	25	-	550	มม.
ขนาดของอนุภาค	0.1	-	25	มม.
ความเข้มข้นเชิงปริมาตร	1	-	35	%

2.4.4 สมการเอมไพริคัลของ Zandi และ Govatos

Zandi และ Govatos (1967) ได้รวบรวมข้อมูลการทดลองการไหลของมลสายในท่ออย่างกว้างขวาง โดยมีข้อมูลทั้งที่ถูกนำเสนออย่างเป็นทางการและข้อมูลที่ได้จากการทดสอบอย่างไม่เป็นทางการ และปรับปรุงข้อมูลเหล่านี้ให้อยู่ในมาตรฐานและหน่วยเดียวกัน หลังจากนั้นได้นำข้อมูลมาทดสอบเปรียบเทียบกับสมการชั้นนำที่ได้รับการยอมรับในขณะนั้น และได้แก้ไขตัดแปลงสมการเดิมเพื่อให้ทำนายความดันลดได้แม่นยำยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังได้นำเสนอ สมการสำหรับใช้จำแนกประเภทของมลสาย

Zandi และ Govatos (1967) ไม่เพียงนำเสนอสมการคำนวณความดันลด แต่ยังสามารถทำการทดสอบขอบเขตหรือข้อจำกัดการนำไปใช้ของสมการ Durand (1952) ด้วยการใช้อคอมพิวเตอร์รวบรวมข้อมูลกว่า 1452 ข้อมูล ครอบคลุมขอบเขตตัวแปรอย่างกว้างขวาง โดยทำการแยกข้อมูลของระบบที่มีการไหลแบบแยกชั้น (Flow with Sliding Bed) ออกจากฐานข้อมูล หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบ Zandi และ Govatos (1967) พบว่าสมการ Durand (1952) สามารถทำนายความดันลดของระบบที่มีการไหลแบบเฮเทอโรโรจีเนียสได้แม่นยำยิ่งขึ้น และได้เสนอ I-Number ซึ่งเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติคล้ายกันกับ เรย์โนลด์นัมเบอร์ เป็นเกณฑ์ในการคัดแยกข้อมูล โดยมีรูปสมการเป็นดังนี้

$$N_I = \frac{V^2 \sqrt{C_D}}{C_v D g (s - 1)} \quad (2-44)$$

ข้อมูลทดสอบที่มีค่า I-Number น้อยกว่า 40 จะถูกคัดออกและจัดให้เป็นการไหลแบบแยกชั้น ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ข้อมูลจำนวน 462 ข้อมูล ได้ถูกคัดแยกออกจากข้อมูลทดสอบ และถ้านำสมการ Durand (1952) มาทำนายความดันลดในช่วงขอบเขตนี้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูง นอก

จากนี้ Zandi และ Govatos (1967) ยังพบข้อสังเกตว่า ข้อมูลระหว่างเทอม $\frac{h_s - h_w}{h_w C_V}$ และ $V^2 C_D^{1/2}/gD(s-1)$ ที่พรอตบน กราฟ LOG-LOG สามารถแทนด้วยสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น 2 สมการ และในการที่จะเลือกใช้ความสัมพันธ์ใดนั้น ขึ้นอยู่กับเทอม $V^2 C_D^{1/2}/gD(s-1)$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{กรณีเทอม } \frac{gD(s-1)}{V^2 \sqrt{C_D}} &< 0.1 \\ \frac{h_s - h_w}{h_w C_V} &= 6.3 \left(\frac{gD(S-1)}{V^2 \sqrt{C_D}} \right)^{0.354} \end{aligned} \quad (2-45)$$

$$\begin{aligned} \text{กรณีเทอม } \frac{gD(s-1)}{V^2 \sqrt{C_D}} &> 0.1 \\ \frac{h_s - h_w}{h_w C_V} &= 280 \left(\frac{gD(S-1)}{V^2 \sqrt{C_D}} \right)^{1.93} \end{aligned} \quad (2-46)$$

ข้อมูลทดสอบ 1452 ข้อมูล มีช่วงขอบเขตดังนี้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	20	-	600	มม.
ขนาดของอนุภาค	0.074	-	50	มม.
ความเข้มข้นเชิงปริมาตร	1	-	50	%

สมการความสัมพันธ์ในรูปตัวแปรไร้มิติหรือ I-Number ของ Zandi และ Govatos (1967) ถือได้ว่าประสบความสำเร็จในเชิงเป็นตัวดัชนีที่สามารถชี้บ่งได้ว่าระบบท่อขนถ่ายมลสายมีการไหลแบบแยกชั้นหรือการไหลแบบเฮเทอโรโรจีเนียส และสมการเอมไพริกัล 2 สมการที่ได้เสนอมานั้น มุ่งหวังเพื่อทำนายความดันลดของระบบที่มีการไหลแบบเฮเทอโรโรจีเนียส และยังพบว่าสมการมีความยืดหยุ่นสูงหรือขอบเขตตัวแปรกว้างขวางกว่าสมการของ Durand (1952) เนื่องจากข้อมูลทดสอบที่มากกว่า แต่การที่ Zandi (1967) ออกมากล่าวว่าสมการความดันลดของ Durand (1952) ไม่สามารถทำนายระบบที่มีการไหลแบบแยกชั้นได้นั้น ขัดแย้งกับข้อมูลทดสอบของ Durand (1952) ซึ่งเป็นที่มาของสมการต้นแบบ จากรูปภาพที่ 12 ซึ่งมีข้อมูลทดสอบจำนวนหนึ่งมีการไหลแบบแยกชั้น

2.4.5 สมการเอมไพริกัลของ Turian และ Oroskar

สมการเอมไพริกัลของ Turian และ Oroskar ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 1980 สำหรับใช้ทำนายความเร็ววิกฤตของการไหลของมลสายในท่อ ตัวสมการมีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์สมดุลเชิงพลังงานระหว่างแรงโน้มถ่วงของอนุภาคที่แขวนลอยในมลสายและ Eddy force อันเนื่อง

มาจากการไหลแบบปั่นป่วน จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพสูงกว่าสมการอื่นที่มีอยู่ในขณะนั้น อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่นำมาทดสอบครอบคลุมเฉพาะท่อขนาดเล็กและอนุภาคขนาดเล็กเท่านั้น ในการวิเคราะห์ Turian และ Oroskar (1980) เริ่มต้นด้วยการคำนวณความเร็วปั่นปลายและ drag coefficient โดยวิธีการทั่วไปเริ่มจาก drag force ด้วยสมการต่อไปนี้

$$F_D = C_D(\rho_w V_s^2/2)\pi d^2/4 \quad (2-47)$$

V_s คือความเร็วปั่นปลายที่คำนึงถึงความเข้มข้นหรือ Hindered Settling Velocity ซึ่งคำนวณได้จาก $V_s = V_t(1 - C_v)^2$ ในขณะที่พลังงานต่ออนุภาคที่มาจากแรงเฉื่อยดีเพื่อพยุงอนุภาคให้อยู่นิ่ง คือ

$$(E_D)_1 = F_{D|e}$$

ดังนั้น $(E_D)_1 = C_D(\rho_w V_s^2/2)\pi d^2/4 \quad (2-48)$

สุดท้ายได้สมการใช้ทำนายความเร็ววิกฤต ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$V_C = 1.85Cv^{0.1536}(1-Cv)^{0.3564}(D/d_p)^{0.378}Re_p^{0.09}[gd_p(s-1)]^{0.5}X^{0.3} \quad (2-49)$$

$$\text{โดยที่ } Re_p = D\rho_w [gd_p(S-1)^{0.5} / \mu]$$

$$X = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \gamma \exp\left(\frac{-4\gamma^2}{\pi}\right) + \int_{\gamma}^{\infty} \exp\left(\frac{-4\gamma^2}{\pi}\right) d\gamma \right] \quad (2-50)$$

$$S_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (2-51)$$

$$\gamma = \frac{v_s}{v_c} \quad (2-52)$$

จากชุดสมการ (2-49) ถึง (2-52) ได้ชี้บ่งเป็นนัยว่า การทำนายความเร็ววิกฤต (V_C) นี้จำเป็นต้องคำนวณแบบวนซ้ำ อย่างไรก็ตามในภาวะปกติ กรณี $v_s/V_C < 0.5$ เทอม X จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.0 ดังนั้นเทอม $X^{0.3}$ จะมีค่าเข้าใกล้ 1 และความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ขอบเขตข้อมูลตัวแปรที่ Turian และ Oroskar (1980) ทำการศึกษา

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	12.5	-	1541	มม.
ความหนาแน่นของอนุภาค	1300	-	5245	กก./เมตร ³
ขนาดของอนุภาค	0.074	-	2.04	มม.
ความเข้มข้นเชิงปริมาตร	1	-	42	%
ความหนาแน่นของของไหล	900	-	1350	กก./เมตร ³
ความหนืดของของไหล	0.00047	-	0.0380	กก./ม-วินาที

2.4.6 สมการเอมไพริกัลของ Gillies และ Shook

สมการเอมไพริกัลของ Gillies และ Shook (1991) สำหรับใช้ทำนายความเร็ววิกฤต ตัวสมการมีพื้นฐานทางด้านทฤษฎีมาจากรูปแบบสมดุลของแรงระหว่างชั้น ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์การตกตะกอนของอนุภาคได้ การได้มาซึ่งสมการเริ่มต้นที่

$$d\sigma_n/dy = (\rho_s - \rho_2)g(C_2 - C_1) \quad (2-53)$$

ความเค้นเฉือน $\tau_{23} = 0.5(\rho_s - \rho_2)gd(\cos\beta_3 - \cos\beta_2) \quad (2-54)$

แต่ τ_{23} สามารถแสดงในรูปแฟกเตอร์ความเสียดทาน

$$\tau_{23} = f_{23}V^2\rho_m/2 \quad (2-55)$$

เมื่อแทน V ด้วย V_c

$$V_c^2 = (\rho_s - \rho_2)(1 - \cos\beta_2)(C_2 - C_1)gD \tan \phi / f_{23}\rho_m \quad (2-56)$$

ถึงแม้ว่าจะได้สมการคำนวณความเร็ววิกฤต แต่ก็มีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่ามากมาย ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณ จึงจำเป็นต้องมีข้อสมมติฐาน สุดท้ายได้สมการแสดงในเทอมของ F ซึ่ง Durand และคณะ (1952) เคยนำมาใช้ก่อนหน้านี้

$$V_c = F [gD (\rho_s - \rho_w) / \rho_w]^{0.5} \quad (2-57)$$

โดยที่ $F = \exp (0.51 - 0.0073 C_D - 12.5K_4) \quad (2-58)$

$$K_4 = (K_3 - 0.14)^2 \quad (2-59)$$

$$K_3 = \frac{\mu_w^{2/3}}{\rho_w^{2/3} g^{1/3} d_p} \quad (2-60)$$

สมการเอมไพริกัลของ Gillies และ Shook (1991) ครอบคลุมข้อมูลการทดลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและขนาดของอนุภาคใหญ่กว่าสมการของ Turian และ Oroska (1980) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	50	-	500	มม.
ความหนาแน่นของอนุภาค	1300	-	5245	กก./เมตร ³
ขนาดของอนุภาค	0.1	-	50	มม.
ความเข้มข้นเชิงปริมาตร	1	-	44	%
ความหนาแน่นของของไหล	993	-	1005	กก./เมตร ³
ความหนืดของของไหล	0.0009	-	0.0013	กก./ม-วินาที

บทที่ 3

การออกแบบขั้นตอนคำนวณและการพัฒนาโปรแกรม

3.1 ขอบเขตข้อมูลและระบบหน่วย

ตัวโปรแกรมการคำนวณการไหลแบบสองวัฏภาคในระบบท่อแนวระดับ พัฒนามาจากโมเดลที่เป็นสมการเอมไพริกัล ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรโดยมีพื้นฐานมาจากบันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการหรือจากโครงการนำร่อง มลสายที่ทำการทดลองประกอบด้วย ทวาย กววด ถ่านหิน ลินแร่ และน้ำ และการทดลองของนักวิจัยแต่ละคนจะมีขอบเขตของข้อมูลการทดลองแตกต่างกันไป และโดยทั่วไป ระบบหน่วยที่มักนิยมใช้เป็นมาตรฐานในการคำนวณ คือ ระบบเมตริกและระบบอังกฤษ ดังแสดงตามตารางต่อไปนี้ ตารางที่ 3.1 แสดงขอบเขตตัวแปรในการพัฒนาโปรแกรม และตารางที่ 3.2 เป็นตารางแสดงการแปลงหน่วย ตารางที่ 3.1 แสดงขอบเขตข้อมูลพื้นฐานการพัฒนาโปรแกรมการไหลในท่อแบบสองวัฏภาค

ตัวแปร ค่าคงที่ และพารามิเตอร์	ขอบเขตข้อมูลในหน่วยเมตริก	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
ประเภทของมลสาย	ตกตะกอนได้	ตกตะกอนได้
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค (mm)	0.074	50
ความถ่วงจำเพาะของอนุภาค	1.30	5.245
Sphericity Shape Factor	0.65	1
ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)	800	1350
ความหนืดของของไหล ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)	0.0005	0.038
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)	0.012	0.60
ความขรุขระของผนังท่อ (m)	0.00004572	0.00004572
ความเข้มข้นเชิงปริมาตร (%)	1	50

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงการแปลงหน่วยของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับโปรแกรมคำนวณการไหลในท่อแบบสองวัฏภาค

รายการ	ต้องการเปลี่ยน หน่วยจาก	เป็น	คูณด้วย
พื้นที่ภาคตัดขวางท่อ (A)	ft ²	m ²	0.0929
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (D)	ft	m	0.3048
ความยาวท่อ (L)	ft	m	0.3048
ความขรุขระของผนังท่อ (ε)	ft	m	0.3048
ขนาดของอนุภาค (d _p)	ft	m	0.3048
ความถี่จําเพาะอนุภาค (s)	-	-	-
ความเข้มข้นเชิงปริมาตร (C _v)	-	-	-
ความหนาแน่นของไหล (ρ)	lbm/(ft-s)	kg/m ³	1.4882
ความหนืดของของไหล (μ)	lbm/ft ³	kg/(m.s)	0.001
ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง (g)	ft/s ²	m/s ²	0.3048
อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q)	ft ³ /s	m ³ /s	0.02832
ความเร็วการไหลในท่อ (V)	ft/s	m/s	0.3048
ความดันลด (h)	ft water/ft pipe	m water/m pipe	1
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่อ หน่วย (SEC)	Btu/(lbm-mile)	kW/(ton-km)	1021.532
อุณหภูมิ (T)	deg °F	deg °C	(T-32)/1.8

3.2 ส่วนของตัวโปรแกรม

ในส่วนของการพัฒนาโปรแกรม ผู้ศึกษาวิจัยเลือกใช้ภาษาวิสซวล เบสิคบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์สำหรับการพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณความดันลดของระบบท่อขนถ่ายมวลสลาย ทั้งนี้เป็นเพราะ ภาษาวิสซวล เบสิค บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ เป็นโปรแกรมภาษาเชิงวัตถุที่ทำงานแบบตามเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น และที่สำคัญโปรแกรมที่พัฒนาโดยภาษาวิสซวล เบสิค บนวินโดวส์นั้นมีลักษณะภาษาที่คล้ายคลึงภาษาอังกฤษที่เราใช้กันอยู่ทุกวันนี้ ดังนั้นจึงเป็นการง่ายต่อการทำความเข้าใจต่อตัวโปรแกรม หลักการเขียนโปรแกรมด้วย ภาษาวิสซวล เบสิคบนวินโดวส์ นั้น มีลักษณะเป็นโปรแกรมย่อยหรือฟังก์ชัน ซึ่งจะทำงานต่อเมื่อมีเหตุการณ์มากระตุ้น ตัวอย่างเช่น การคลิกเมาส์ การเลือกปุ่มคำสั่ง หรือมีการเปลี่ยนแปลงในรายละเอียดของ Content หรือถูกเรียกจากรูทีน อื่นๆ เป็นต้น

ตัวโปรแกรมคำนวณการไหลแบบสองภูมิภาคในท่อแนวระดับ ถูกออกแบบให้เป็นสองหน้าต่าง คือหน้าต่างรับชุดข้อมูลของตัวแปรอิสระ และหน้าต่างแสดงผลการคำนวณ

3.2.1 หน้าต่างรับชุดข้อมูลของตัวแปรอิสระ

ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติกายภาพของของแข็งและน้ำหรือของไหลอื่นๆ รวมถึงสภาวะการไหลและคุณสมบัติของท่อจะถูกป้อนเข้าสู่ตัวโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณที่หน้าต่างนี้ ดังแสดงในรูปภาพที่ 3.1 ภายในหน้าต่างจะถูกออกแบบให้มีกล่องรับข้อมูล (Text Box) ซึ่งผู้ใช้โปรแกรมจะต้องกรอกข้อมูลให้ครบถ้วนทุกกล่อง

3.2.2 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณ

ภายในหน้าต่างแสดงผลการคำนวณ จะถูกออกแบบให้มีกล่องแสดงผลการคำนวณ ทั้งส่วนที่จำเป็นต่อการออกแบบระบบท่อ และส่วนที่เป็นพารามิเตอร์สำหรับใช้ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมระหว่างการคำนวณ ตัวอย่างหน้าต่างแสดงผลการคำนวณ แสดงในรูปภาพที่ 3.2

INPUT BASIC DATA PROPERTIES

INPUT DATA

Metric English

Date :	01 Jan 2003
Project Name :	Coal Slurry Cross Country Pipeline
The Client :	EGAT
The Contractor :	NKK Corporation
Job Number :	NC-3189
Run No. :	001
Drawing Ref. No. :	DG-M-3189-L-001
Prepared By :	Mr. Chao T.

PARTICLE SOLID PROPERTIES

PARTICLE DENSITY	2890	kg/m ³
PARTICLE DIAMETER	0.000101	m
PARTICLE FRACTION	1	
SPHERICITY	1	

LIQUID PROPERTIES

LIQUID DENSITY	998	kg/m ³
LIQUID VISCOSITY	0.00098	kg/m-s

PIPE PROPERTIES

PIPE DIAMETER	0.0509	m
PIPE WALL ROUGHNESS	0.00004572	m

FLOW PROPERTIES

INPUT OPERATING VELOCITY	1.829	m/s
VOLUME SOLID FRACTION	0.29	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปภาพที่ 3.1 แสดงหน้าต่างรับข้อมูลโปรแกรม

Calculation Result

CALCULATION RESULTS

Date :	01 Jan 2003	PARTICLE REYNOLDS NUMBER, Rep	1.295477
Project Name :	Coal Slurry Cross Country Pipeline	DRAG COEFFICIENT, CD	21.63492
Client Name :	EGAT	TERMINAL VELOCITY, Vt	1.259517E-02 m/s
The Contractor :	NKK Corporation	OPERATING VELOCITY, Vop	1.829 m/s
Job No. :	NC-3189	CRITICAL OPERATING VELOCITY, Vc	1.234858 m/s
Run No. :	001	FRICTION FACTOR, ff	2.199998E-02
Drawing Ref. No. :	DG-M-3189-L-001	PRESSURE LOSS OF WATER	7.369412E-02 m water/m
Prepared By :	Mr. Chao T.	PIPE SIZE, Dp	.0509 m
		VOLUME SOLID CONCENTRATION, Cv	.29
		TOTAL SLURRY PRESSURE LOSS, hs	9.967025E-02 m water/m
		SOLID TRANSPORTATION RATE, Rst	11.23343 tons/hr
		SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION, SEC	.324068 kw-hr/ton-kr

รูปภาพที่ 3.2 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณของโปรแกรม

3.3 แบบแผนและขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม

ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับช่วยคำนวณออกแบบระบบท่อขนถ่ายมลสาย ได้ทำการพัฒนาเป็นสองโปรแกรม คือ โปรแกรมการคำนวณความดันลด และโปรแกรมการออกแบบเชิงออปติ้มัม ทั้งสองโปรแกรมมีขอบเขตเงื่อนไขการใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้น ในการเลือกใช้โปรแกรมจึงขึ้นอยู่กับความต้องการหรือวัตถุประสงค์ของวิศวกรผู้ออกแบบว่าต้องการชุดผลลัพธ์เป็นเช่นใด

ในกรณีผู้ใช้โปรแกรมต้องการทราบขนาดความดันลดของระบบท่อที่มีอยู่แล้ว ที่สภาวะต่างๆ โปรแกรมคำนวณความดันลดสามารถตอบสนองของความต้องการของผู้ใช้ได้ดี โดยที่ ต้องทราบค่าชุดตัวแปรอิสระทั้งหมด ได้แก่

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D)
- ความหยาบของผนังท่อ (ϵ)
- ขนาดของอนุภาค (d_p)
- ความหนาแน่นของอนุภาค (ρ_s)
- ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของอนุภาคในมลสาย (C_v)
- Sphericity Shape Factor (ϕ)
- ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w)
- ความหนืดของน้ำ (μ_w)
- ความเร็วการไหล (V_{op})

ในกรณีที่ต้องการทราบผลกระทบของตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งที่มีต่อความดันลด สามารถทำได้เพียงแค่เปลี่ยนแปลงค่าชุดตัวแปรที่ต้องการทราบเท่านั้น ก็จะได้ชุดผลลัพธ์ของความดันลดออกมา นอกจากความดันลดแล้ว โปรแกรมยังคำนวณค่าตัวแปรกระบวนการอื่นๆ ออกมาด้วย คือ ความเร็วการไหลวิกฤต อัตราการขนถ่ายของแข็ง มีหน่วยเป็น tons/hr และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน มีหน่วยเป็น kW-hr/ton-km

ส่วนกรณีที่เป็นโครงการใหม่ และทราบแต่เพียงว่าต้องการขนถ่ายของแข็งใน อัตราคงที่ค่าหนึ่ง ในหน่วย เมตริกตันต่อชั่วโมง โปรแกรมการคำนวณออกแบบเชิงออปติ้มัมจะถูกนำมาใช้แทนโปรแกรมความดันลด เพียงแต่ป้อนชุดตัวแปรอิสระที่เป็นสมบัติกายภาพของของแข็ง และของไหล ได้แก่

- ขนาดของอนุภาค (d_p)
- ความหนาแน่นของอนุภาค (ρ_s)
- Sphericity Shape Factor (ϕ)

- ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w)
- ความหนืดของน้ำ (μ_w)
- อัตราการชนถ่ายของแข็ง (R_{st})

หลังจากป้อนข้อมูลแล้วเสร็จ โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ท่อที่เหมาะสมที่สุด และความเข้มข้นเชิงปริมาตรที่เหมาะสมที่สุด โดยมีเงื่อนไข คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการชนถ่ายต่อหน่วยจะต้องน้อยที่สุด เนื่องจากความดันลดขึ้นอยู่กับค่าของสองตัวแปรนี้ ดังนั้น การคำนวณจึงเป็นในลักษณะวงจร (loop) ด้วยการผันแปรค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อและความเข้มข้นเชิงปริมาตรของอนุภาคในมลสาย คำนวณจนกระทั่ง ครอบคลุมตามขอบเขตที่กำหนดไว้

ในบางกรณีวิศวกรผู้ออกแบบอาจใช้ทั้งสองโปรแกรมช่วยในการออกแบบหรือใช้ตรวจสอบความถูกต้องซึ่งกันและกันก็สามารถทำได้

3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมคำนวณความดันลด

โปรแกรมการคำนวณความดันลด ถือได้ว่าเป็นพื้นฐานการออกแบบระบบท่อทั่วไป โปรแกรมนี้นอกจากจะทำนายความดันลดแล้ว ยังสามารถทำนายค่าความเร็ววิกฤต เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับช่วยวิเคราะห์รูปแบบการไหล ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) ป้อนข้อมูลชุดตัวแปรอิสระซึ่งเป็นสมบัติกายภาพพื้นฐานของระบบที่หน้าต่างรับข้อมูล ได้แก่ ขนาดท่อ (D) ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (ρ_s) ขนาดของอนุภาค (d_p) สัดส่วนของขนาดของอนุภาค (x_i) Sphericity Shape Factor (ϕ) ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w) ความหนืดของน้ำ (μ_w) ความเร็วการไหลของมลสาย (V_{OP}) ความเข้มข้นของมลสาย (C_v)
- 2) คำนวณค่า Drag Coefficient โดยเริ่มจากการคำนวณหาค่าความเร็วปั่นปลายของอนุภาคแต่ละขนาดด้วยการสมมติให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ในช่วง Stoke's Law

$$\text{สมการ} \quad V_t = K_1 \frac{gd_p^2(\rho_s - \rho_w)}{18\mu_w}$$

$$\text{โดยที่} \quad K_1 = (0.843) \log \left(\frac{\phi}{0.065} \right)$$

- 3) นำค่า V_t ในขั้นตอนที่ (2) มาคำนวณและตรวจสอบค่า Particle Reynolds Number

$$Re_p = \frac{\rho_w V_t d_p}{\mu_w} \quad \text{และถ้า} \quad Re_p < 1 \quad \text{แล้ว}$$

$$C_{Di} = \frac{24}{Re_p} \quad \text{หลังการคำนวณแล้วเสร็จให้ข้ามไปที่ขั้นตอนที่ (7)}$$

4) จากขั้นตอนที่ (3) ถ้า Re_p มีค่ามากกว่า 1 ให้คำนวณค่าความเร็วปั่นปลายของอนุภาคแต่ละขนาดเข้าโดยสมมติให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ในช่วง Intermediate Region ด้วยสมการ

$$V_t = 0.153 K_1 \left(\frac{gd_p^{1.6} (\rho_s - \rho_w)}{\mu_w^{0.6} \rho_w^{0.4}} \right)^{0.714}$$

โดยที่ $K_1 = (0.843) \log \left(\frac{\phi}{0.065} \right)$

5) นำค่า V_t ที่ได้ในขั้นตอนที่ (4) มาคำนวณและตรวจสอบ Particle Reynolds Number

$$Re_p = \frac{\rho_w V_t d_p}{\mu_w} \quad \text{และถ้า } 1 < Re_p < 1000 \quad \text{แล้ว}$$

$$C_{Di} = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.14 Re_p^{0.7})$$

หลังการคำนวณแล้วเสร็จ ข้ามไปที่ขั้นตอน (7)

6) จากขั้นตอนที่ (5) ถ้า Re_p มีค่ามากกว่า 1000 แสดงว่าอนุภาคแต่ละขนาดมีการเคลื่อนที่ในช่วง Newton's Law Region ค่า C_D จะไม่เป็นฟังก์ชันของ Re_p อีกต่อไป แต่จะขึ้นอยู่กับ sphericity shape factor เพียงอย่างเดียว ด้วยสมการ

$$C_{Di} = 5.32 - 4.88 \phi$$

7) คำนวณค่า C_{Di} ของอนุภาคจนกระทั่งครบทุกขนาด หลังจากนั้น จึงคำนวณค่าเฉลี่ยของ C_D และ d_p

$$C_D = \sum x_i C_{Di}$$

$$d_p = \sum x_i d_{pi}$$

8) คำนวณค่าความเร็ววิกฤต (V_c) แต่ก่อนที่จะคำนวณ ต้องทำการตรวจสอบค่าขอบเขตของความเข้มข้นและขนาดท่อที่รับเข้ามา เพื่อที่จะเลือกใช้สมการภายใต้ขอบเขตที่เหมาะสม

กรณีที่ชุดตัวแปรอิสระมีค่า $C_v \leq 42$ % และ $D \leq 6$ นิ้ว

ให้คำนวณความเร็ววิกฤตด้วยชุดสมการเอมไพริกัลของ Turian และ Oroska (1980)

$$V_c = 1.85 C_v^{0.1536} (1 - C_v)^{0.3564} (D/d_p)^{0.378} Re_p^{0.09} [gd_p(s-1)]^{0.5} X^{0.3} \quad \text{โดยที่}$$

$$Re_p = D \rho_w [gd_p(S-1)^{0.5} / \mu_w]$$

$$X = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \gamma \exp\left(-\frac{4\gamma^2}{\pi}\right) + \int_{\gamma}^{\infty} \exp\left(-\frac{4\gamma^2}{\pi}\right) d\gamma \right]$$

$$\gamma = \frac{v_s}{v_c}$$

$$V_s = V_t(1 - C_v)^2 \quad \text{หลังการคำนวณแล้วเสร็จข้ามไปที่ขั้นตอน (11)}$$

9) กรณีค่าขอบเขตของความเข้มข้น $C_v \leq 44\%$ และขนาดท่อมีค่าระหว่าง $6'' < D \leq 20''$ ให้คำนวณค่าความเร็ววิกฤต V_c ด้วยสมการเอมไพริคัลของ Gillies's และ Shook (1991) หลังการคำนวณแล้วเสร็จให้ข้ามไปที่ขั้นตอน (11)

$$V_c = F [gD (\rho_s - \rho_w) / \rho_w]^{0.5} \quad \text{โดยที่}$$

$$F = \exp(0.51 - 0.0073 C_D - 12.5 K_4)$$

$$K_4 = (K_3 - 0.14)^2$$

$$K_3 = \frac{\mu_w^{2/3}}{\rho_w^{2/3} g^{1/3} d_p}$$

10) กรณีค่าความเข้มข้นและขนาดท่ออยู่นอกขอบเขตที่กล่าวมาทั้งสองกรณีแต่ไม่เกินขอบเขตต่อไปนี้

$$C_v \leq 50\% \quad \text{และหรือ} \quad \text{ขนาดท่อ, } D \leq 24''$$

ให้คำนวณค่าความเร็ววิกฤต V_c ด้วยสมการเอมไพริคัลของ Zandi (1967)

$$V_c = \left[40 g D C_v (S - 1) / \sqrt{C_D} \right]^{0.5}$$

11) คำนวณค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานของของไหลขั้วเคลื่อน ซึ่งส่วนใหญ่มักจะใช้น้ำ เป็นของไหลขั้วเคลื่อน ด้วยสมการของ Colebrook-White's Equation

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.71D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right] \quad \text{โดยที่}$$

$$\text{Re} = \rho_w V_{op} D / \mu_w$$

12) คำนวณค่าความดันลดต่อเมตรของของไหลในท่อนี้คือน้ำบริสุทธิ์ไหลในท่อด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของมวลสายไหลในท่อ

$$h_w = \frac{f V_{op}^2}{2gD}$$

13) ในกรณี ค่า $V_{op} \leq 17 * V_s$ จะคำนวณความดันลดของระบบท่อขนถ่ายมวลสายด้วยสมการของ Newitt และคณะ (1955)

$$h_s = h_w + (66) h_w C_v (S - 1) g D / V_{op}^2$$

14) ในกรณีคำนวณความเร็ววิกฤตด้วยสมการเอมไพริคัลของ Turian (1980) และของ Gillies's (1991) จะคำนวณความดันลดของระบบท่อขนถ่ายมวลสายด้วยสมการของ Durand (1952)

$$h_s = h_w + (81)h_w C_v \left[\frac{(S-1)gD}{V_{op}^2 \sqrt{C_D}} \right]^{1.5}$$

หลังการคำนวณแล้วเสร็จให้ข้ามไปที่ขั้นตอน (16)

15) ในกรณีคำนวณความเร็ววิกฤตด้วยสมการเอมไพริคัลของ Zandi (1967) จะคำนวณความดันลดของระบบท่อขนถ่ายมวลสายด้วยสมการของ Durand (1952) ที่ถูกแก้ไขดัดแปลงโดย Zandi (1967) แต่เนื่องจาก สมการที่ถูกแก้ไขดัดแปลงมี 2 สมการ และวิธีการใช้สามารถทำได้โดยตรวจสอบเงื่อนไข ดังนี้

ถ้ากรณี $\frac{(S-1)gDc_v}{V_{op}^2 \sqrt{cd}} < 0.1$ แล้วให้คำนวณความดันลดด้วยสมการต่อไปนี้

$$h_s = h_w + (6.3) h_w C_v \left[\frac{(S-1)gD}{V_{op}^2 \sqrt{C_D}} \right]^{0.354}$$

แต่ถ้าไม่ใช่ให้คำนวณความดันลดด้วยสมการต่อไปนี้

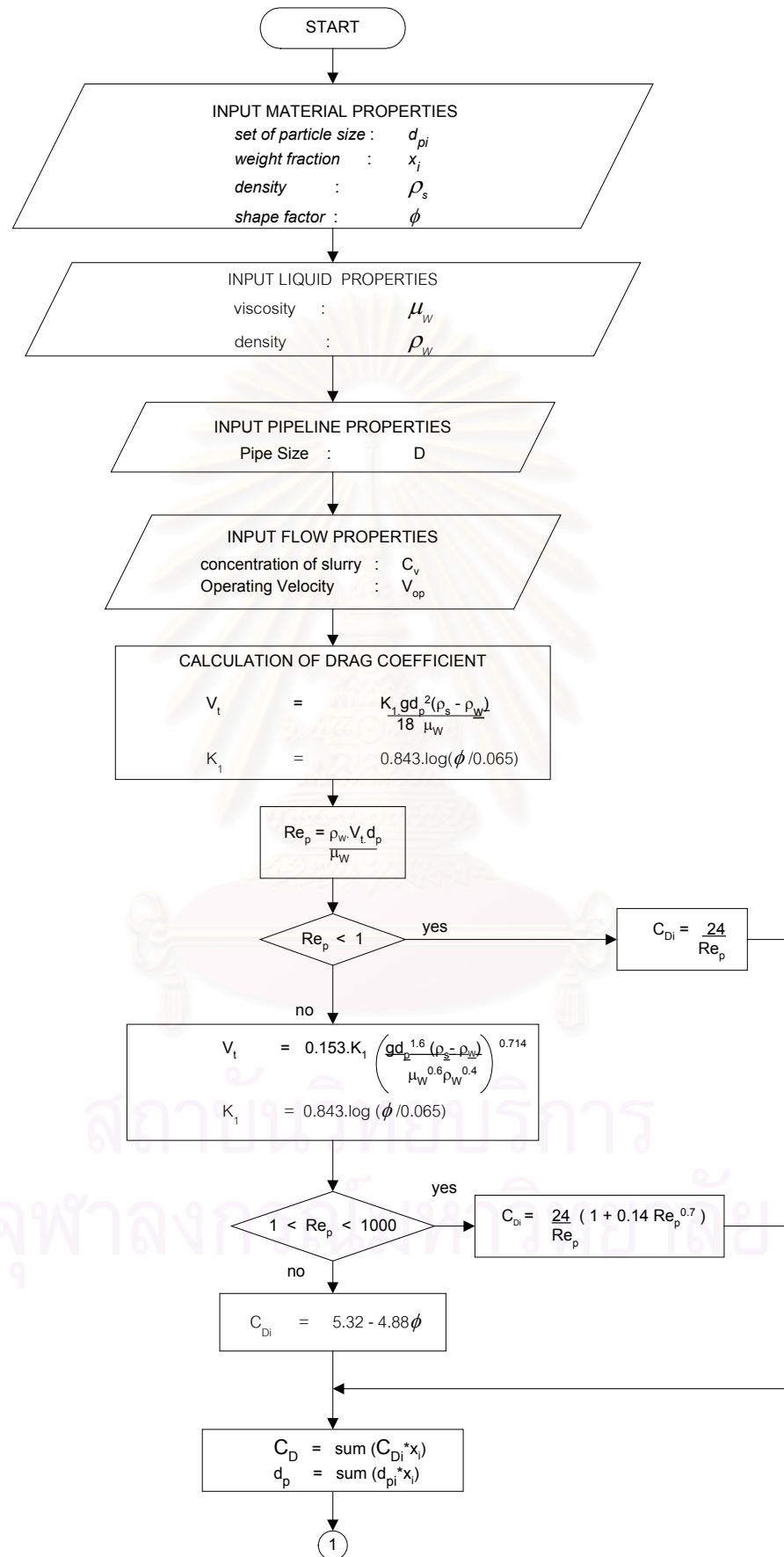
$$h_s = h_w + (280) h_w C_v \left[\frac{(S-1)gD}{V_{op}^2 \sqrt{C_D}} \right]^{1.93}$$

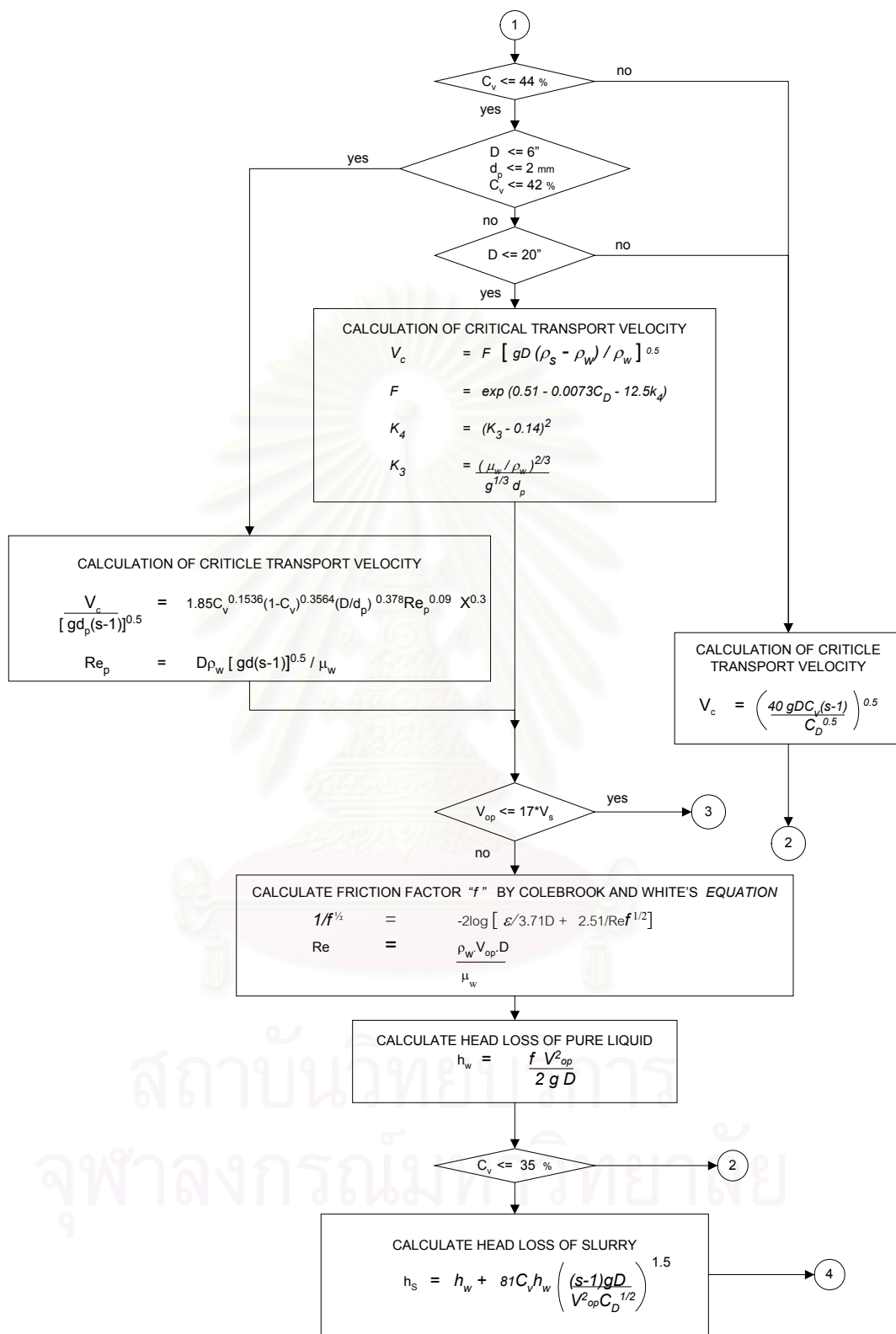
16) คำนวณอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายต่อหนึ่งหน่วยระยะทางและต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของของแข็ง Specific Energy Consumption

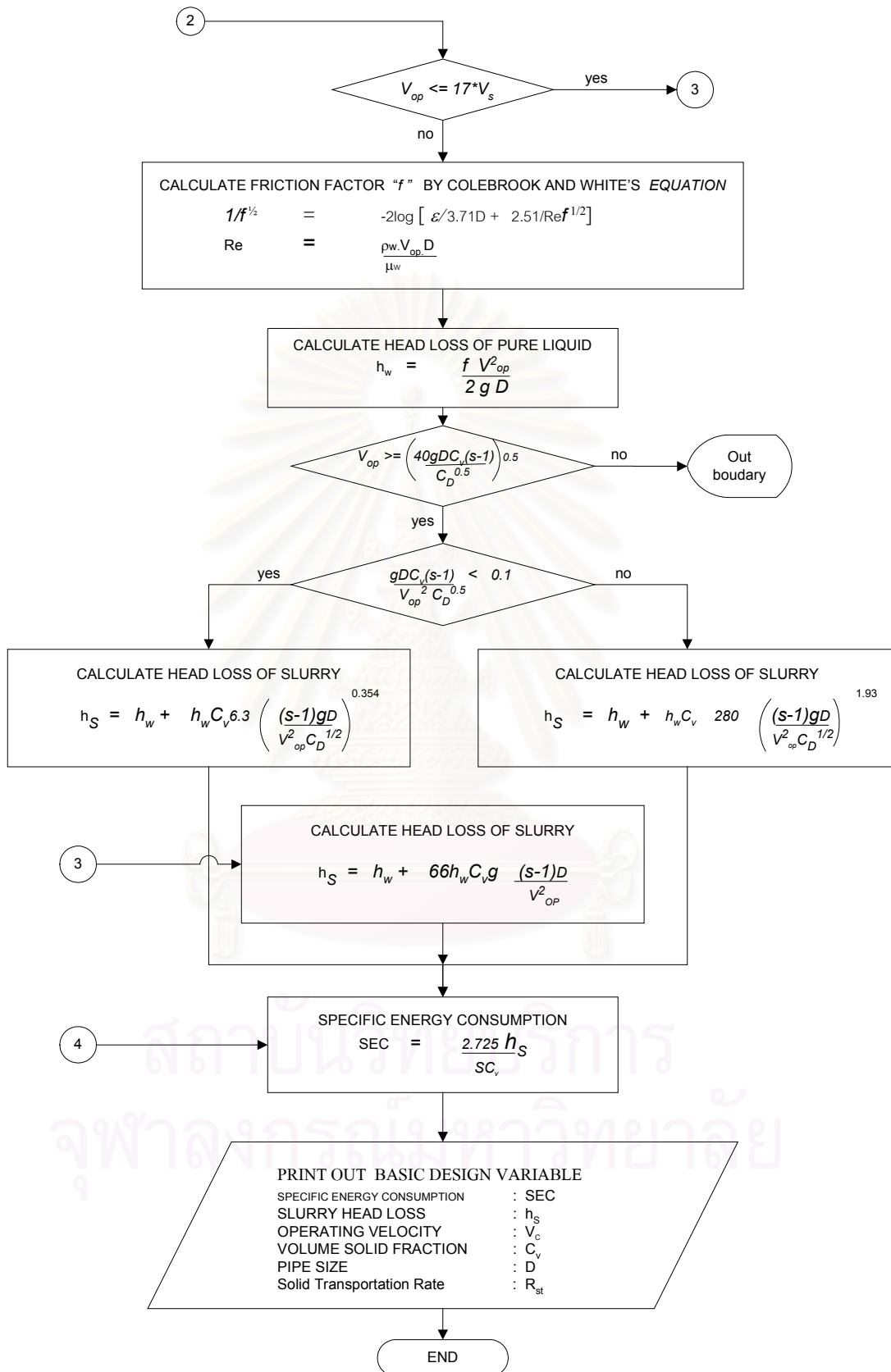
$$SEC = \frac{2.725 h_s}{SC_v}$$

17) ผลการคำนวณจะถูกแสดงที่หน้าต่างแสดงผล ดังรายการต่อไปนี้

- อัตราการขนถ่ายอนุภาคของแข็ง (R_{ST})
- อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่อหน่วย (SEC)
- ความดันลดของระบบท่อ (h_s)
- ความเร็วปฏิบัติการวิกฤต (V_c)







3.3.2 ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมการคำนวณออกแบบเชิงออปติมิ้ม

เงื่อนไขขั้นตอนการคำนวณออกแบบเชิงออปติมิ้ม จะคำนึงถึงการสูญเสียพลังงานในการขนถ่ายของแข็งต่อหน่วยที่น้อยที่สุดเป็นเงื่อนไขบังคับสำคัญ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1) รับค่าชุดข้อมูลตัวแปรอิสระซึ่งเป็นสมบัติกายภาพพื้นฐานของระบบที่หน้าต่างรับข้อมูล ได้แก่ ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (ρ_s) ขนาดของอนุภาค (d_p) การกระจายขนาดของอนุภาค (x_i) Sphericity shape factor (ϕ) ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w) ความหนืดของน้ำ (μ_w) อัตราการขนถ่ายของของแข็ง (R_{ST})

2) คำนวณค่า Drag Coefficient โดยเริ่มจากการคำนวณหาค่าความเร็วปั่นปลายของอนุภาคแต่ละขนาดด้วยการสมมติให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ในช่วง Stoke's Law

$$\text{สมการ} \quad V_t = K_1 \frac{gd_p^2(\rho_s - \rho_w)}{18\mu_w}$$

$$\text{โดยที่} \quad K_1 = (0.843) \log \left(\frac{\phi}{0.065} \right)$$

3) นำค่า V_t ที่ได้ในขั้นตอนที่ (2) มาคำนวณและตรวจสอบ Particle Reynolds Number

$$Re_p = \frac{\rho_w V_t d_p}{\mu_w} \quad \text{และถ้า} \quad Re_p < 1 \quad \text{แล้ว}$$

$$C_{Di} = \frac{24}{Re_p} \quad \text{หลังการคำนวณแล้วเสร็จให้ข้ามไปที่ขั้นตอนที่ (9)}$$

4) จากขั้นตอนที่ (3) ถ้าค่า Re_p มีค่ามากกว่า 1 ให้คำนวณค่าความเร็วปั่นปลายของอนุภาคแต่ละขนาดซ้ำโดยสมมติให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ในช่วง Intermediate Region ด้วยสมการ

$$V_t = 0.153 K_1 \left(\frac{gd_p^{1.6}(\rho_s - \rho_w)}{\mu_w^{0.6} \rho_w^{0.4}} \right)^{0.714}$$

$$\text{โดยที่} \quad K_1 = (0.843) \log \left(\frac{\phi}{0.065} \right)$$

5) นำค่า V_t ที่ได้ในขั้นตอนที่ (4) มาคำนวณและตรวจสอบ Particle Reynolds Number

$$Re_p = \frac{\rho_w V_t d_p}{\mu_w} \quad \text{และถ้า} \quad 1 < Re_p < 1000 \quad \text{แล้ว}$$

$$C_{Di} = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.14 Re_p^{0.7}) \quad \text{หลังการคำนวณแล้วเสร็จให้ข้ามไปที่ขั้นตอน (8)}$$

6) จากขั้นตอนที่ (5) ถ้า Re_p มีค่ามากกว่า 1000 แสดงว่าอนุภาคแต่ละขนาดมีการเคลื่อนที่ในช่วง Newton's Law Region ค่า C_{Di} จะไม่เป็นฟังก์ชันของ Re_p อีกต่อไป แต่จะขึ้นอยู่กับ Sphericity shape factor เพียงอย่างเดียว ด้วยสมการ

$$C_{Di} = 5.32 - 4.88 \phi$$

7) คำนวณค่า C_D ของอนุภาคจนกระทั่งครบทุกขนาด หลังจากนั้น จึงคำนวณค่าเฉลี่ยของ C_D และ d_p

$$C_D = \sum x_i \cdot C_{Di}$$

$$d_p = \sum x_i \cdot d_{pi}$$

8) เริ่มขั้นตอนการคำนวณออกแบบเชิงออปติ้ม ด้วยการรับค่าเริ่มต้น C_v คือค่าความเข้มข้นของมลสาย และค่า D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เนื่องจากความดันลดของมลสายที่ไหลในท่อขึ้นอยู่กับทั้ง C_v และ D โดยกำหนดให้มีค่าอยู่ภายใต้ขอบเขต $C_v \leq 50\%$ และ $D \leq 24"$ คำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของมลสายด้วยสมการ

$$Q_s = \frac{R_{ST}}{\rho_s C_v} \quad \text{และ} \quad Q_s = \frac{\pi D^2}{4} V_{OP}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad V_{OP} = 4Q_s / \pi D^2$$

9) ตรวจสอบขนาดท่อ ถ้า $D \leq 6"$ คำนวณค่าความเร็ววิกฤต (V_c) ด้วยสมการเอมไพริกัลของ Turian และคณะ (1980)

$$V_c = 1.85 C_v^{0.1536} (1 - C_v)^{0.3564} (D/d_p)^{0.378} Re_p^{0.09} [gd_p(s-1)]^{0.5} X^{0.3} \quad \text{โดยที่}$$

$$Re_p = D \rho_w [gd_p(S-1)^{0.5} / \mu_w]$$

$$X = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \gamma \exp\left(\frac{-4\gamma^2}{\pi}\right) + \int_{\gamma}^{\infty} \exp\left(\frac{-4\gamma^2}{\pi}\right) d\gamma \right]$$

$$\gamma = \frac{v_s}{v_c} \quad \text{หลังจากนั้น ให้ข้ามไปที่ขั้นตอน (12)}$$

10) กรณีขนาดท่ออยู่ในช่วง $6" < D \leq 20"$ ให้คำนวณหาค่าความเร็ววิกฤต (V_c) ด้วยสมการเอมไพริกัลของ Gillies's และ Shook (1991) และข้ามไปที่ขั้นตอน (12)

$$V_c = F [gD (\rho_s - \rho_w) / \rho_w]^{0.5} \quad \text{โดยที่}$$

$$F = \exp(0.51 - 0.0073 C_D - 12.5 K_4)$$

$$K_4 = (K_3 - 0.14)^2$$

$$K_3 = \frac{\mu_w^{2/3}}{\rho_w^{2/3} g^{1/3} d_p}$$

11) กรณีขนาดท่อที่มีค่าอยู่ในช่วง $20'' < D \leq 24''$ ให้คำนวณค่าความเร็ววิกฤต (V_c) ด้วยสมการเอมไพริกัลของ Zandi และ Govatos (1967)

$$V_c = \left[40 gDC_v (S-1) / \sqrt{C_D} \right]^{0.5}$$

12) ตรวจสอบเงื่อนไข ถ้า $V_{op} < V_c$ ให้กลับไปรับค่าตัวแปรชุดต่อไปในขั้นตอนที่ 8

13) คำนวณแฟกเตอร์ความเสียดทาน ด้วยสมการของ Colebrook-White's Equation

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.71D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right] \quad \text{โดยที่}$$

$$\text{Re} = \rho_w V_{op} D / \mu_w$$

14) คำนวณความดันลดของของไหลหรือน้ำบริสุทธิ์ซึ่งไหลในท่อที่ความเร็วเท่ากับความเร็วของมวลสายไหลในท่อ

$$h_w = \frac{fV_{op}^2}{2gD}$$

15) ในกรณีคำนวณความเร็ววิกฤตด้วยสมการเอมไพริกัลของ Turian (1980) และของ Gillies's (1991) จะคำนวณความดันลดของระบบท่อนถ่ายมลสายด้วยสมการของ Durand (1952)

$$h_s = h_w + (81)h_w C_v \left[\frac{(S-1)gD}{V_{op}^2 \sqrt{C_D}} \right]^{1.5}$$

หลังการคำนวณแล้วเสร็จให้ข้ามไปที่ขั้นตอน (16)

16) ในกรณีคำนวณความเร็ววิกฤตด้วยสมการเอมไพริกัลของ Zandi (1967) จะคำนวณความดันลดของระบบท่อนถ่ายมลสายด้วยสมการของ Durand (1952) ที่ถูกแก้ไขดัดแปลงโดย Zandi (1967) แต่เนื่องจาก สมการที่ถูกแก้ไขดัดแปลงมี 2 สมการ จึงต้องทำการตรวจสอบเงื่อนไขเสียก่อน ดังนี้

ถ้ากรณี $\frac{(S-1)gDc_v}{V_{op}^2 \sqrt{C_D}} < 0.1$ แล้วให้คำนวณความดันลดด้วยสมการนี้

$$h_s = h_w + (6.3)h_w C_v \left[\frac{(S-1)gD}{V_{op}^2 \sqrt{C_D}} \right]^{0.354}$$

แต่ถ้าไม่ใช่ให้คำนวณความดันลดด้วยสมการต่อไปนี้

$$h_s = h_w + (280)h_w C_v \left[\frac{(S-1)gD}{V_{op}^2 \sqrt{C_D}} \right]^{1.93}$$

17) คำนวณอัตราการใช้พลังงานในการขนถ่ายต่อหนึ่งหน่วย Specific Energy Consumption

$$SEC = \frac{2.725 h_s}{SC_v}$$

18) ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่า SEC และ SEC_{min} ทุกรอบการคำนวณ เพื่อเก็บค่า SEC_{min} ไว้

19) ทำการตรวจสอบขอบเขตของตัวแปรอิสระ C_v ถ้า $C_v < 50\%$ และ $D < 24"$ ให้กลับไปขั้นตอน (8) เพื่อรับค่า C_v และ D ชุดต่อไป แต่ถ้าคำนวณจน $C_v > 50\%$ และ $D > 24"$ ให้แสดงผลค่าตัวแปรที่ให้ค่า Minimum Specific Energy Consumption คือ

-ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อที่เหมาะสม (D_{opt})

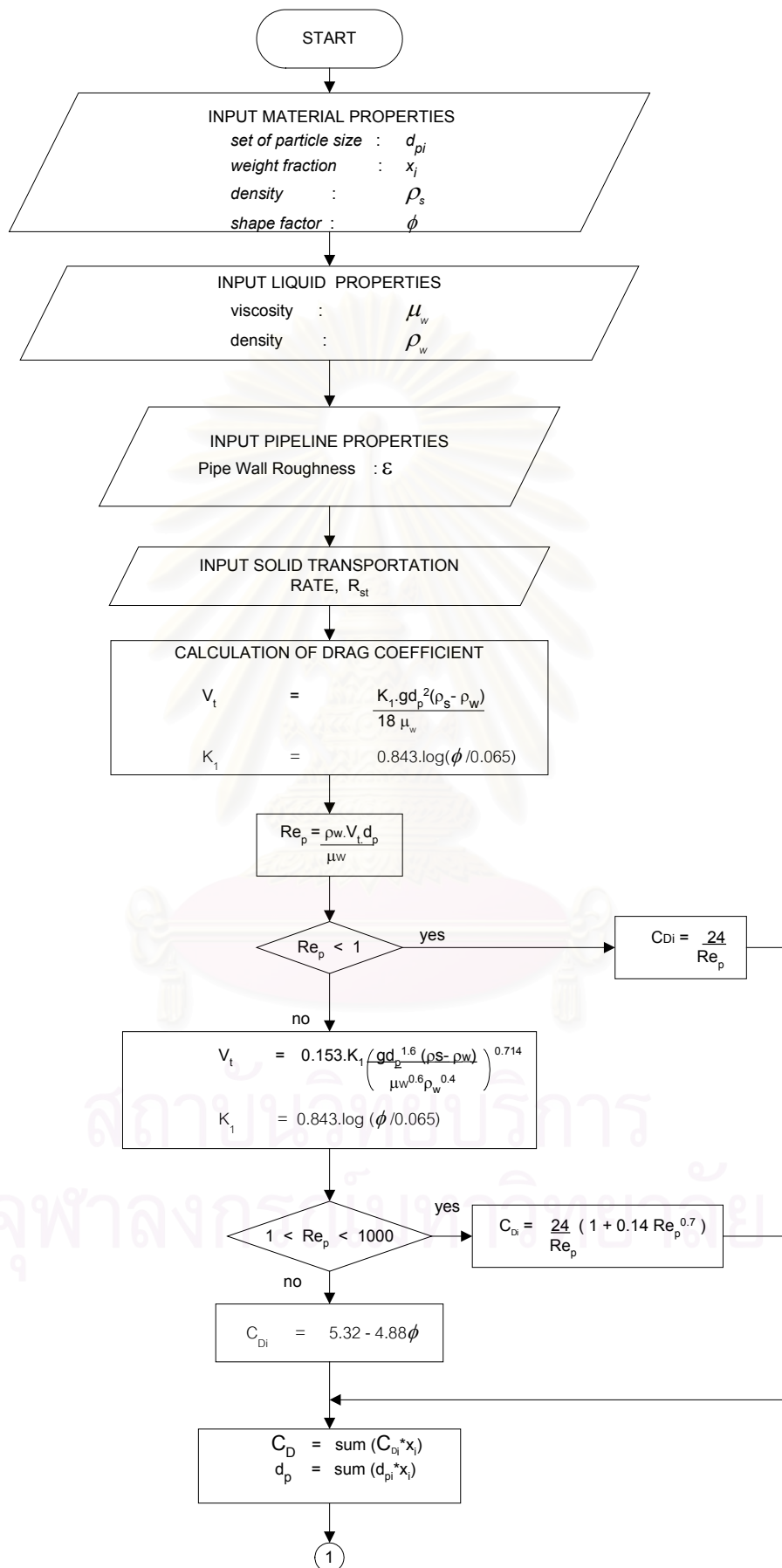
-ความเข้มข้นเชิงปริมาตรที่เหมาะสม ($C_{v,opt}$)

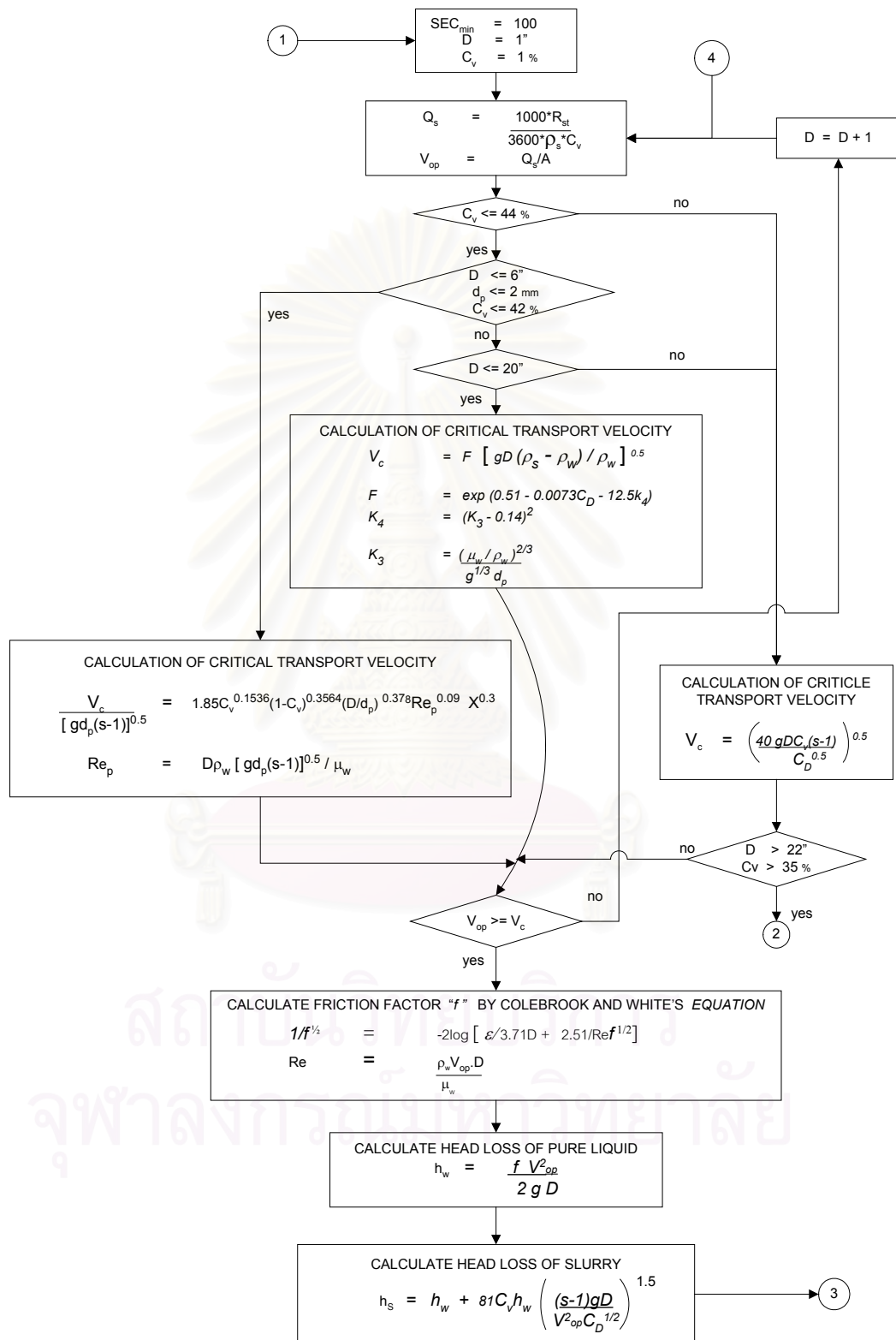
-ความเร็วปฏิบัติการ (V_{opt})

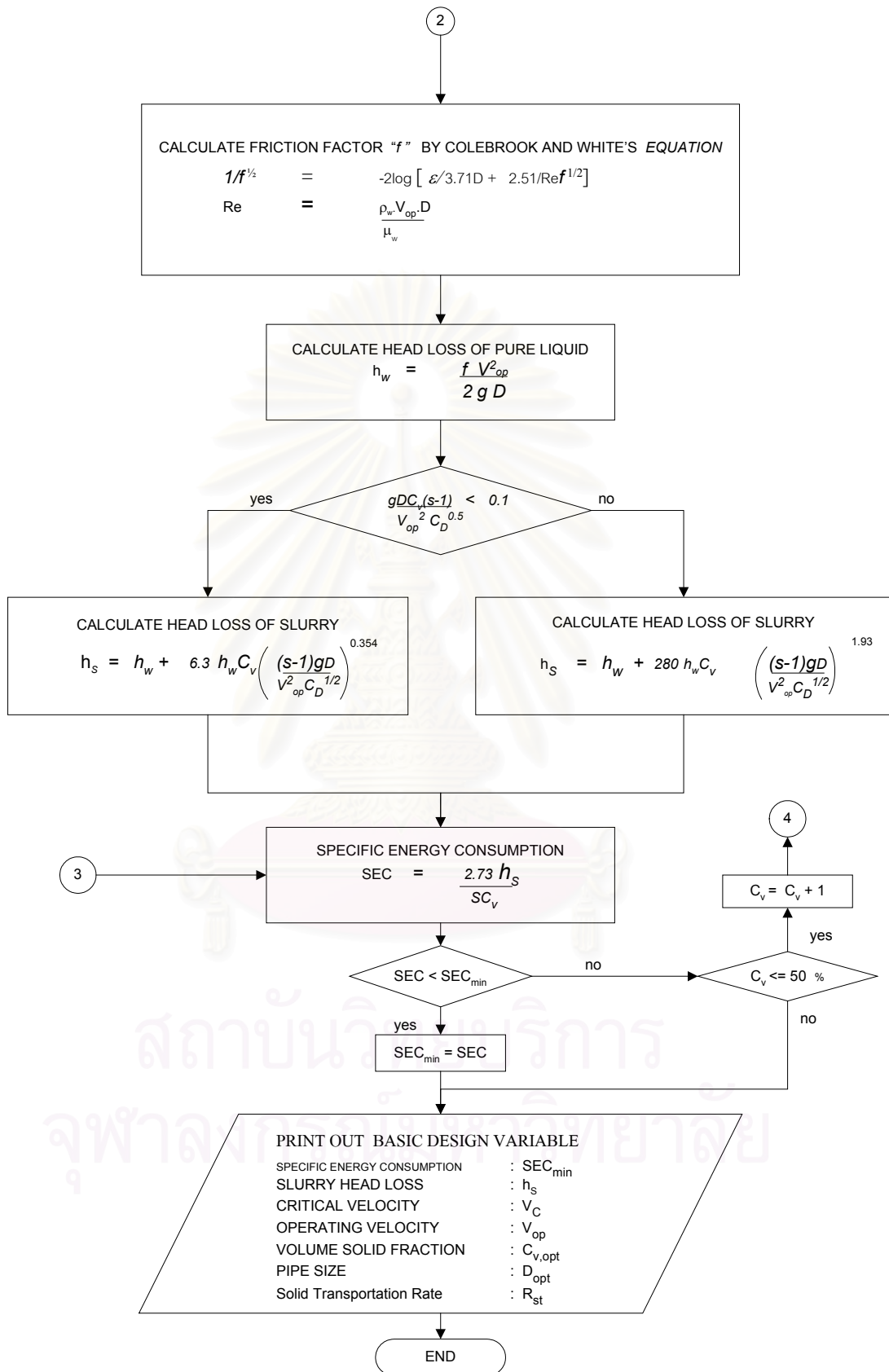
-ความเร็ววิกฤต (V_c)

-ความดันลดของระบบท่อ ($h_{s,min}$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย







บทที่ 4

การทดสอบโปรแกรมและตัวอย่างการใช้โปรแกรม

หลังจากการพัฒนาโปรแกรมแล้วเสร็จ ขั้นตอนต่อไปที่สำคัญก็คือ การทดสอบความถูกต้อง (Accuracy) ของโปรแกรม ด้วยการนำโปรแกรมไปทดสอบกับข้อมูลอ้างอิงหรือข้อมูลจริงที่ได้ถูกบันทึกไว้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการหรือโครงการนำร่องก่อนหน้านี้ ซึ่งข้อมูลส่วนใหญ่ได้ทำการทดสอบด้วยท่อขนาดเล็ก และมีน้ำเป็นของไหลส่งกำลัง พารามิเตอร์ที่จะทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมก็คือ การคำนวณค่าความเร็ววิกฤต ค่าความดันลด และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายต่อหน่วย ตามลำดับ

4.1 ผลการทดสอบโปรแกรม

ในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือหรือความถูกต้องของโปรแกรมได้รับการพัฒนาแล้วเสร็จ สามารถทดสอบได้กับข้อมูลอ้างอิงหรือค่าสังเกตซึ่งได้มาจากบันทึกผลการทดลองของงานวิจัยของคณะอื่น โดยที่ชุดค่าตัวแปรอิสระและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะป้อนเข้าสู่โปรแกรมจะเป็นชุดเดียวกันกับข้อมูลอ้างอิง การทดสอบความถูกต้องแม่นยำของโปรแกรมจะทำการแยกการทดสอบออกเป็น 3 การทดสอบด้วยกัน คือ การทดสอบค่าความเร็ววิกฤตตามตารางที่ 4.1-4.11 การทดสอบค่าความดันลดตามตารางที่ 4.12-4.22 และการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายต่อหน่วย ตามตารางที่ 4.23

4.1.1 การทดสอบโปรแกรมคำนวณความเร็ววิกฤต

โปรแกรมคำนวณความเร็ววิกฤตที่ได้รับการพัฒนาแล้วเสร็จ สามารถทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม โดยวิธีการป้อนข้อมูลชุดแปรอิสระที่นำมาจากข้อมูลอ้างอิง และนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับ ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงตามตารางที่ 4.1-4.11 ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมวลสาย Silica sand ความหนาแน่น 2890 kg/m³ และน้ำ ในท่อขนาดต่างๆ

ลำดับ ข้อมูล ทดสอบ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง m/s	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	d_p m	D m	ϕ		ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
1	1.0	0.00025	0.0267	0.95	0.4572	0.7125	0.7125	55.84	55.84
2	1.0	0.00025	0.1397	0.95	0.7925	1.5466	1.5466	95.16	95.16
3	5.0	0.00044	0.1499	0.95	2.4689	2.2163	2.2163	-10.23	-10.23
4	10.0	0.00044	0.1499	0.95	2.6518	2.4183	2.4183	-8.80	-8.80
5	15.0	0.00044	0.1499	0.95	2.7127	2.5218	2.5218	-7.04	-7.04

ตารางต่อเนื่อง

ลำดับ ข้อมูล ทดสอบ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง m/s	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	d_p m	D m	ϕ		ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
6	2.5	0.00204	0.1499	0.95	2.1946	2.3321	2.3320	6.27	6.26
7	5.0	0.00204	0.1499	0.95	2.4079	2.3321	2.3320	-3.15	-3.15
8	7.5	0.00204	0.1499	0.95	2.5298	2.3321	2.3320	-7.82	-7.82
9	10.0	0.00204	0.1499	0.95	2.6213	2.3321	2.3320	-11.03	-11.04
10	5.0	0.00023	0.1080	0.95	1.8318	1.7058	1.7057	-6.88	-6.89
11	10.0	0.00023	0.1080	0.95	1.9355	1.8612	1.8612	-3.84	-3.84
12	15.0	0.00023	0.1080	0.95	2.0757	1.9408	1.9408	-6.50	-6.50
13	20.0	0.00023	0.1080	0.95	2.3531	1.9852	1.9852	-15.63	-15.63
14	25.0	0.00023	0.1080	0.95	2.4384	2.0077	2.0077	-17.66	-17.66
15	5.0	0.000585	0.1080	0.95	1.9934	1.9964	1.9964	0.15	0.15
16	10.0	0.000585	0.1080	0.95	2.1184	2.1783	2.1783	2.83	2.83
17	15.0	0.000585	0.1080	0.95	2.2189	2.2715	2.2715	2.37	2.37
18	20.0	0.000585	0.1080	0.95	2.9627	2.3234	2.3234	-21.58	-21.58
19	25.0	0.000585	0.1080	0.95	3.0023	2.3498	2.3497	-21.73	-21.74
20	5.0	0.001150	0.1080	0.95	2.5207	2.2318	2.2318	-11.46	-11.46
21	10.0	0.001150	0.1080	0.95	2.3165	2.4351	2.4351	5.12	5.12
22	15.0	0.001150	0.1080	0.95	2.6731	2.5393	2.5393	-5.01	-5.01
23	1.0	0.000680	0.0127	0.95	0.4877	0.5951	0.5951	22.03	22.03
24	2.0	0.000680	0.0127	0.95	0.5486	0.6596	0.6596	20.22	20.22
25	3.0	0.000680	0.0127	0.95	0.6096	0.6994	0.6994	14.73	14.73
26	4.0	0.00068	0.0127	0.95	0.6401	0.7283	0.7283	13.78	13.78
27	5.0	0.00068	0.0127	0.95	0.6706	0.7509	0.7509	11.98	11.98
28	6.0	0.00068	0.0127	0.95	0.6888	0.7693	0.7693	11.68	11.68
29	7.0	0.00068	0.0127	0.95	0.7102	0.7847	0.7847	10.49	10.49
30	8.0	0.00068	0.0127	0.95	0.7315	0.7979	0.7979	9.07	9.07

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21 °C นำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s

(ข้อมูล 1-9 จาก Durand R., "The Hydraulic Transportation of Coal and Other Materials in pipes", 1952)

(ข้อมูล 10-22 จาก Sinclair C.G., "The Limit -Deposit Velocity of Heterogeneous suspensions", 1962)

(ข้อมูล 23-30 จาก Yotsukura N., "Some effect of Bentonite Suspensions on Sand Transport in 4" Pipe", 1961)

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมวลสาย ความหนาแน่น 1350 kg/m^3 และน้ำในท่อขนาดต่างๆ

ลำดับ ข้อมูล ทดสอบ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง m/s	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	d_p m	D m	ϕ		ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
1	5	0.00226	0.0127	0.95	0.4572	0.7125	0.7125	55.84	55.84
2	6	0.00226	0.0127	0.95	0.7925	1.5466	1.5466	95.16	95.16
3	7	0.00226	0.0127	0.95	2.4689	2.2163	2.2163	-10.23	-10.23
4	8	0.00226	0.0127	0.95	2.6518	2.4183	2.4183	-8.80	-8.80
5	10	0.00226	0.0127	0.95	0.3109	0.2905	0.2904	-6.56	-6.59
6	11	0.00226	0.0127	0.95	0.3048	0.2905	0.2904	-4.69	-4.72
7	12	0.00226	0.0127	0.95	0.2438	0.2905	0.2904	19.14	19.09
8	15	0.002205	0.0127	0.95	0.2896	0.2908	0.2907	0.43	0.39
9	5	0.002205	0.0254	0.95	0.3505	0.4114	0.4112	17.37	17.31
10	6	0.002205	0.0254	0.95	0.3658	0.4114	0.4112	12.48	12.42
11	7	0.002205	0.0254	0.95	0.3780	0.4114	0.4112	8.85	8.80
12	8	0.002205	0.0254	0.95	0.3901	0.4114	0.4112	5.45	5.40
13	10	0.002205	0.0254	0.95	0.4145	0.4114	0.4112	-0.75	-0.80
14	12	0.002205	0.0254	0.95	0.4481	0.4114	0.4112	-8.18	-8.23

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21°C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m^3 และความหนืด 0.00098 kg/m-s

(ข้อมูลจาก Sinclair C.G., "The Limit-Deposit Velocity of Heterogeneous suspensions", 1962)

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมวลสายของ Coal ความหนาแน่น 1410 kg/m^3

ลำดับ ข้อมูล ทดสอบ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง m/s	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	d_p m	D m	ϕ		ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
1	5	0.00140	0.025	0.95	0.640	0.5068	0.5068	-20.81	-20.81
2	5	0.00150	0.012	0.95	0.457	0.3636	0.3636	-20.44	-20.44
3	10	0.00140	0.025	0.95	0.800	0.5529	0.5529	-30.89	-30.89
4	10	0.00150	0.012	0.95	0.597	0.3967	0.3967	-33.55	-33.55
5	15	0.00140	0.025	0.95	0.912	0.5766	0.5766	-36.78	-36.78
6	15	0.00150	0.012	0.95	0.445	0.4137	0.4137	-7.03	-7.03

(ข้อมูลจาก Novak, Study of the correlation of sediment motion in pipe flow, Hydrotransport 2, 1972)

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมวลสาย Coal ความหนาแน่น 1500 kg/m³

ลำดับ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	d_p m	D m	ϕ		ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
1	5	0.00127	0.075	0.95	1.405	0.9285	0.9285	-33.91	-33.91
2	5	0.02540	0.150	0.95	1.965	1.1249	1.1128	-42.75	-43.37
3	10	0.00127	0.075	0.95	1.650	1.0131	1.0131	-38.60	-38.60
4	10	0.02540	0.150	0.95	2.420	1.1249	1.1128	-53.52	-54.02
5	15	0.00127	0.075	0.95	1.895	1.0565	1.0565	-44.25	-44.25

(ข้อมูลจาก Novak, Study of the correlation of sediment motion in pipe flow, Hydrotransport 2,1972)

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมวลสาย Iron Ore ความหนาแน่น 5245 kg/m³ และ Kerosene ในท่อขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 21 °C Kerosene มีความหนาแน่น 820 kg/m³ และความหนืด 0.00271 kg/m-s

ลำดับ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	d_p m	D m	ϕ		ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
1	1	0.000138	0.0191	0.9	1.2192	0.8884	0.8884	-27.13	-27.16
2	2	0.000138	0.0191	0.9	1.3868	0.9846	0.9846	-29.00	-29.03
3	4	0.000138	0.0191	0.9	1.4935	1.0872	1.0872	-27.21	-27.23
4	5	0.000138	0.0191	0.9	1.5392	1.1209	1.1209	-27.18	-27.20
5	6	0.000138	0.0191	0.9	1.5392	1.1484	1.1484	-25.39	-25.41
6	7	0.000138	0.0191	0.9	1.5392	1.1714	1.1714	-23.90	-23.92
7	8	0.000138	0.0191	0.9	1.5392	1.1911	1.1911	-22.62	-22.64
8	10	0.000138	0.0191	0.9	1.5240	1.2230	1.2230	-19.75	-19.77
9	12	0.000138	0.0191	0.9	1.4935	1.2477	1.2477	-16.46	-16.48
10	14	0.000138	0.0191	0.9	1.4691	1.2672	1.2672	-13.75	-13.77
11	16	0.000138	0.0191	0.9	1.4326	1.2827	1.2827	-10.46	-10.48
12	18	0.000138	0.0191	0.9	1.4021	1.2949	1.2949	-7.64	-7.67

(ข้อมูลจาก Sinclair C.G., "The Limit -Deposit Velocity of Heterogeneous suspensions", 1962)

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมวลทราย Sand ความหนาแน่น 2650 kg/m^3 และน้ำ ในท่อขนาดต่างๆ

ลำดับ ข้อมูล ทดสอบ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง m/s	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	d_p m	D m	ϕ		ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
1	10	0.00053	0.300	0.95	4.2200	3.2061	3.2061	-24.03	-24.03
2	15	0.00053	0.300	0.95	4.1000	3.3433	3.3433	-18.46	-18.46
3	5	0.00083	0.050	0.95	1.5400	1.3692	1.3692	-11.09	-11.09
4	10	0.00083	0.050	0.95	1.7100	1.4939	1.4939	-12.64	-12.64
5	15	0.00083	0.050	0.95	1.9200	1.5578	1.5578	-18.86	-18.86
6	2.8	0.00023	0.042	0.95	0.9845	0.9393	0.9393	-4.59	-4.59
7	4.9	0.00053	0.042	0.95	0.8291	1.1676	1.1676	40.83	40.83
8	6.5	0.00010	0.042	0.95	0.8169	0.9174	0.9174	12.31	12.31
9	6.7	0.00053	0.042	0.95	0.8352	1.2180	1.2180	45.84	45.84
10	7.2	0.00023	0.042	0.95	0.8047	1.0682	1.0682	32.75	32.75
11	7.2	0.00023	0.042	0.95	1.0333	1.0682	1.0682	3.38	3.38
12	6.5	0.00010	0.042	0.95	0.8169	0.9174	0.9174	12.31	12.31
13	9.6	0.00010	0.042	0.95	0.6431	0.9624	0.9624	49.64	49.64
14	9.6	0.00010	0.042	0.95	0.6431	0.9624	0.9624	49.64	49.64
15	15.3	0.00010	0.061	0.95	0.8870	1.2029	1.2029	35.62	35.62
16	31.6	0.00010	0.110	0.95	0.9845	1.6419	1.6419	66.77	66.77
17	12.2	0.00023	0.084	0.95	0.9662	1.5708	1.5708	62.57	62.57
18	12.8	0.00023	0.061	0.95	0.9022	1.3590	1.3590	50.63	50.63
19	12.8	0.00023	0.061	0.95	0.9296	1.3590	1.3590	46.19	46.19
20	33.3	0.00023	0.110	0.95	1.2924	1.8852	1.8852	45.87	45.87

สมบัติกายภาพของน้ำที่ 21°C ความหนาแน่น = 998 kg/m^3 และความหนืด = 0.00098 kg/m-s

(ข้อมูลจาก P. Novak, C. Nalluni, A study into the correlation of sediment motion in pipe flow, Hydrotransport 2, 1972)

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมวลสาย Sand ความหนาแน่น 2658 kg/m³

ลำดับ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง m/s	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)		
	ข้อมูล ทดสอบ	C_v %	d_p m	D m		ϕ	ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
1		23.7	0.00025	0.0522	0.95	1.372	1.3467	1.3467	-1.82	-1.82
2		12.2	0.00025	0.0522	0.95	1.189	1.2785	1.2785	7.55	7.55
3		23.9	0.00025	0.1076	0.95	1.707	1.8893	1.8893	10.69	10.69
4		11.6	0.00025	0.1076	0.95	1.707	1.7835	1.7835	4.49	4.49
5		22.8	0.00025	0.1585	0.95	2.225	2.2603	2.2603	1.58	1.58
6		17.0	0.00025	0.1585	0.95	2.225	2.2172	2.2172	-0.35	-0.35
7		11.4	0.00025	0.1585	0.95	2.195	2.1343	2.1343	-2.61	-2.61
8		28.2	0.00025	0.2085	0.95	2.347	2.8950	2.8936	23.35	23.29
9		22.8	0.00025	0.2085	0.95	2.377	2.8950	2.8936	21.77	21.71
10		17.7	0.00025	0.2085	0.95	2.408	2.8950	2.8936	20.23	20.17
11		35.0	0.00025	0.2631	0.95	2.652	3.2521	3.2505	22.64	22.58
12		23.2	0.00025	0.2631	0.95	2.682	3.2521	3.2505	21.25	21.19
13		17.6	0.00025	0.2631	0.95	2.682	3.2521	3.2505	21.25	21.19
14		11.6	0.00025	0.2631	0.95	2.652	3.2521	3.2505	22.64	22.58
15		28.1	0.00025	0.3150	0.95	2.804	3.5584	3.5567	26.90	26.84

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s (ข้อมูลจาก Series 0n Bulk Material Handling, Edward J. Wasp, Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transport, 1977)

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมวลสายสินแร่ความหนาแน่น 2670 kg/m³ และน้ำ ในท่อ 8 นิ้ว

ลำดับ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง m/s	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)		
	ข้อมูล ทดสอบ	C_v %	d_p m	D m		ϕ	ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
1		8.55	0.000074	0.2027	0.9	2.10	1.67	1.67	-20.59	-20.59
2		13.78	0.000074	0.2027	0.9	1.83	1.76	1.76	-3.76	-3.76
3		19.95	0.000074	0.2027	0.9	1.58	1.81	1.81	14.20	14.20

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s

(ข้อมูลจาก F.L. Smith, B.S., Pilot Plant Experiences with Pipelines Carrying Mineral Slurries, Hydrotransport 1, 1970)

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมวลสายสินแร่ความหนาแน่น 2900 kg/m^3 และน้ำ ในท่อขนาด 6 นิ้ว

ลำดับ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง m/s	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)		
	ข้อมูล ทดสอบ	C_v %	d_p m	D m		ϕ	ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
1		18.65	0.00015	0.1541	0.9	2.62	2.17	2.17	-17.22	-17.22
2		21.98	0.00015	0.1541	0.9	2.56	2.20	2.20	-14.07	-14.07
3		25.61	0.00015	0.1541	0.9	2.53	2.21	2.21	-12.64	-12.64
4		29.61	0.00015	0.1541	0.9	2.35	2.22	2.22	-5.41	-5.41
5		34.04	0.00015	0.1541	0.9	1.98	2.21	2.21	11.55	11.55

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมวลสายสินแร่ความหนาแน่น 2280 kg/m^3 และน้ำ ในท่อขนาด 8 นิ้ว

ลำดับ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง m/s	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)		
	ข้อมูล ทดสอบ	C_v %	d_p m	D m		ϕ	ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
1		12.72	0.000841	0.2027	0.75	2.13	2.26	2.26	5.92	5.92
2		15.80	0.000841	0.2027	0.75	2.38	2.31	2.31	-2.84	-2.84
3		25.59	0.000841	0.2027	0.75	2.71	2.38	2.38	-12.27	-12.27
4		28.77	0.000841	0.2027	0.75	2.74	2.39	2.39	-12.88	-12.88

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็ววิกฤตของมวลสายสินแร่ความหนาแน่น 2870 kg/m^3 (2750 kg/m^3 สำหรับ หัวข้อ 4) และน้ำ ในท่อขนาด 8 นิ้ว

ลำดับ	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c อ้างอิง m/s	ค่า V_c ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)		
	ข้อมูล ทดสอบ	C_v %	d_p m	D m		ϕ	ทรงกลม m/s	SHAPE m/s	ทรงกลม %	SHAPE %
1		15.78	0.000074	0.2027	0.75	2.13	2.26	2.26	5.92	5.92
2		20.78	0.000074	0.2027	0.75	2.38	2.31	2.31	-2.84	-2.84
3		16.40	0.00007	0.2027	0.75	2.71	2.38	2.38	-12.27	-12.27
4		16.40	0.00007	0.2027	0.75	1.16	2.01	2.01	73.54	73.54

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21°C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m^3 และความหนืด 0.00098 kg/m-s (ข้อมูลจาก F.L. Smith, B.S., Pilot Plant Experiences with Pipelines Carrying Mineral Slurries, Hydrotransport 1,1970)

ตารางต่อเนื่อง

26	26.63	0.0003	0.2036	3.20	2.60	0.0636	0.1001	0.1003	57.39	57.70
27	26.63	0.0003	0.2036	3.35	2.60	0.0645	0.1026	0.1020	59.07	58.14
28	11.20	0.0003	0.2036	3.38	2.43	0.0608	0.0678	0.0676	11.51	11.18
29	11.20	0.0003	0.2036	3.14	2.43	0.0509	0.0642	0.0639	26.13	25.54
30	11.20	0.0003	0.2036	2.93	2.43	0.0459	0.0619	0.0616	34.86	34.20
31	11.20	0.0003	0.2036	2.62	2.43	0.0422	0.0587	0.0584	39.10	38.39
32	11.20	0.0003	0.2036	2.50	2.43	0.0384	0.0587	0.0583	52.86	51.82
33	4.40	0.0003	0.2036	3.35	2.16	0.0484	0.0523	0.0522	8.06	7.85
34	4.40	0.0003	0.2036	3.38	2.16	0.0496	0.0530	0.0529	6.85	6.65
35	4.40	0.0003	0.2036	3.14	2.16	0.0434	0.0481	0.0480	10.83	10.60
36	4.40	0.0003	0.2036	2.93	2.16	0.0397	0.0442	0.0441	11.34	11.08
37	4.40	0.0003	0.2036	2.62	2.16	0.0335	0.0392	0.0391	17.01	16.72
38	4.40	0.0003	0.2036	2.47	2.16	0.0322	0.0373	0.0372	15.84	15.53
39	4.40	0.0003	0.2036	2.29	2.16	0.0285	0.0353	0.0352	23.86	23.51
40	4.40	0.0003	0.2036	3.14	2.16	0.0459	0.0493	0.0492	7.41	7.19

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 18-29 °C น้ำมีความหนาแน่น 996-998.5 kg/m³ และความหนืด 0.00082-0.00106 kg/m-s (ข้อมูลจาก R. Faddick, G. Pouska, Ultrasonic Velocity Meter, Hydrotransport 6, 1979)

ตารางที่ 4.13 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดของมวลสาย Sand ความหนาแน่น 2890 kg/m³ และน้ำ ในท่อขนาดต่างๆ

ข้อมูล ท.ส.	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c m/s	ค่า h_s ข้างอิง mw/mp	ค่า h_s ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	d_p m	D m	V_{op} m/s			ทรงกลม mw/mp	$\phi = 0.95$ mw/mp	ทรงกลม %	$\phi = 0.95$ %
1	22	0.000101	0.0509	1.829	1.22	0.0983	0.0928	0.0926	-5.60	-5.80
2	22	0.000101	0.0509	2.438	1.22	0.1495	0.1417	0.1415	-5.22	-5.35
3	29	0.000101	0.0509	1.829	1.23	0.0995	0.0991	0.0982	-0.40	-1.31
4	29	0.000101	0.0509	2.438	1.23	0.1610	0.1463	0.1460	-9.13	-9.32
5	29	0.000101	0.0762	2.134	1.49	0.0974	0.0838	0.0835	-13.96	-14.27
6	39	0.000101	0.1015	1.829	1.69	0.0823	0.0731	0.0726	-11.18	-11.79
7	39	0.000101	0.1015	2.438	1.69	0.1231	0.0848	0.0844	-31.14	-31.46

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และมีความหนืด 0.00098 kg/m-s (ข้อมูลจาก Irig Zandi and Govatos, Heterogeneous Flow of Solid in Pipeline, ASME, 1967)

ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดของมวลสายสินแร่ Taconite Milling ความหนาแน่น 2900 kg/m³ และ น้ำ ในท่อขนาด 6 นิ้ว

ข้อมูล ท.ส.	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c m/s	ค่า h_s อ้างอิง mw/mp	ค่า h_s ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	$d_{p,50}$ m	D m	V_{op} m/s			ทรงกลม mw/mp	$\phi = 0.9$ mw/mp	ทรงกลม %	$\phi = 0.9$ %
1	18.65	0.00015	0.1541	4.24	2.19	0.1163	0.1110	0.1105	-4.55	-4.98
2	18.65	0.00015	0.1541	3.72	2.19	0.0941	0.0919	0.0914	-2.33	-2.86
3	18.65	0.00015	0.1541	3.23	2.19	0.0755	0.0770	0.0765	2.05	1.39
4	18.65	0.00015	0.1541	2.77	2.19	0.0652	0.0665	0.0659	1.92	1.01
5	18.65	0.00015	0.1541	2.59	2.19	0.0595	0.0634	0.0627	6.60	5.42
6	21.98	0.00015	0.1541	4.05	2.19	0.1110	0.1064	0.1059	-4.11	-4.56
7	21.98	0.00015	0.1541	3.63	2.19	0.0914	0.0922	0.0916	0.84	0.19
8	21.98	0.00015	0.1541	3.08	2.19	0.0741	0.0774	0.0767	4.42	3.48
9	21.98	0.00015	0.1541	2.83	2.19	0.0675	0.0721	0.0714	6.87	5.84
10	21.98	0.00015	0.1541	2.62	2.19	0.0621	0.0686	0.0679	10.40	9.27
11	25.61	0.00015	0.1541	3.96	2.19	0.1114	0.1063	0.1057	-4.58	-5.12
12	25.61	0.00015	0.1541	3.47	2.19	0.0914	0.0904	0.0897	-1.13	-1.89
13	25.61	0.00015	0.1541	3.32	2.19	0.0857	0.0872	0.0865	1.80	0.98
14	25.61	0.00015	0.1541	2.77	2.19	0.0701	0.0758	0.0750	8.09	6.95
15	25.61	0.00015	0.1541	2.65	2.19	0.0639	0.0743	0.0734	16.25	14.84
16	29.61	0.00015	0.1541	3.96	2.20	0.1127	0.1094	0.1088	-2.96	-3.49
17	29.61	0.00015	0.1541	3.51	2.20	0.0888	0.0956	0.0948	7.70	6.80
18	29.61	0.00015	0.1541	2.93	2.20	0.0679	0.0824	0.0815	21.34	20.02
19	29.61	0.00015	0.1541	2.71	2.20	0.0599	0.0802	0.0792	33.85	32.18
20	29.61	0.00015	0.1541	2.38	2.20	0.0470	0.0776	0.0765	64.94	62.60
21	34.04	0.00015	0.1541	3.66	2.20	0.1198	0.1051	0.1043	-12.30	-12.96
22	34.04	0.00015	0.1541	3.35	2.20	0.1056	0.0972	0.0963	-7.98	-8.84
23	34.04	0.00015	0.1541	2.90	2.20	0.0861	0.0874	0.0864	1.50	0.34
24	34.04	0.00015	0.1541	2.59	2.20	0.0719	0.0855	0.0843	18.91	17.24
25	34.04	0.00015	0.1541	2.01	2.20	0.0617	0.0871	0.0855	41.18	38.59
26	40.04	0.00015	0.1541	3.96	2.20	0.1522	0.1588	0.1584	4.31	4.05
27	40.04	0.00015	0.1541	3.35	2.20	0.1172	0.1220	0.1216	4.12	3.78
28	40.04	0.00015	0.1541	2.87	2.20	0.0883	0.1132	0.1110	28.17	25.67

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s (ข้อมูลจาก F.L. Smith, B.S., Pilot Plant Experiences with Pipelines Carrying Mineral Slurries, Hydrotransport 1,1970)

ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดของมวลสายสินแร่ Crude Anhydrite ความหนาแน่น 2740 kg/m³ และ น้ำ ในท่อขนาด 6 นิ้ว

ข้อมูล ท.ส.	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_C m/s	ค่า h_s อ้างอิง mw/mp	ค่า h_s ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	$d_{p,50}$ m	D m	V_{op} m/s			ทรงกลม mw/mp	$\phi = 0.9$ mw/mp	ทรงกลม %	$\phi = 0.9$ %
1	10.83	0.00015	0.1541	2.96	1.97	0.0941	0.0586	0.0583	-37.72	-38.04
2	10.83	0.00015	0.1541	2.44	1.97	0.0577	0.0467	0.0463	-19.06	-19.76
3	10.83	0.00015	0.1541	2.16	1.97	0.0444	0.0414	0.0410	-6.72	-7.62
4	10.83	0.00015	0.1541	1.74	1.97	0.0280	0.0373	0.0368	33.40	31.61
5	17.30	0.00015	0.1541	3.11	2.06	0.0968	0.0694	0.0689	-28.27	-28.79
6	17.30	0.00015	0.1541	2.74	2.06	0.0732	0.0604	0.0599	-17.52	-18.21
7	17.30	0.00015	0.1541	2.50	2.06	0.0577	0.0555	0.0549	-3.81	-4.85
8	24.05	0.00015	0.1541	3.05	2.10	0.0976	0.0746	0.0740	-23.60	-24.21
9	24.05	0.00015	0.1541	2.77	2.10	0.0790	0.0687	0.0680	-13.04	-13.93
10	24.05	0.00015	0.1541	2.47	2.10	0.0590	0.0642	0.0634	8.76	7.40
11	24.05	0.00015	0.1541	2.07	2.10	0.0453	0.0609	0.0600	34.52	32.53
12	32.12	0.00015	0.1541	2.90	2.11	0.0941	0.0948	0.0938	0.75	-0.31
13	32.12	0.00015	0.1541	2.77	2.11	0.0852	0.0777	0.0768	-8.82	-9.88
14	32.12	0.00015	0.1541	2.44	2.11	0.0644	0.0741	0.0731	15.14	13.59
15	32.12	0.00015	0.1541	2.13	2.11	0.0528	0.0733	0.0721	38.78	36.51
16	38.27	0.00015	0.1541	2.87	2.11	0.1012	0.0862	0.0852	-14.82	-15.81
17	38.27	0.00015	0.1541	2.74	2.11	0.0972	0.0842	0.0831	-13.37	-14.51
18	38.27	0.00015	0.1541	2.47	2.11	0.0741	0.0823	0.0811	11.03	9.42
19	38.27	0.00015	0.1541	2.19	2.11	0.0595	0.0819	0.0805	37.71	35.35

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s (ข้อมูลจาก F.L. Smith, B.S., Pilot Plant Experiences with Pipelines Carrying Mineral Slurries, Hydrotransport 1,1970)

ตารางที่ 4.16 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดของมวลสายสินแร่ Calcium-Phosphate ความหนาแน่น 2870 kg/m³ และ น้ำ ในท่อขนาด 6 นิ้ว

ข้อมูล ท.ส.	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_C m/s	ค่า h_S อ้างอิง mw/mp	ค่า h_S ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	$d_{p,50}$ m	D m	V_{op} m/s			ทรงกลม mw/mp	$\phi = 0.9$ mw/mp	ทรงกลม %	$\phi = 0.9$ %
1	15.78	0.000074	0.1541	4.63	1.89	0.1221	0.1161	0.1160	-4.88	-4.96
2	15.78	0.000074	0.1541	3.32	1.89	0.0790	0.0639	0.0637	-19.12	-19.37
3	15.78	0.000074	0.1541	2.99	1.89	0.0639	0.0536	0.0534	-16.14	-16.45
4	15.78	0.000074	0.1541	2.23	1.89	0.0407	0.0349	0.0346	-14.25	-14.99
5	15.78	0.000074	0.1541	1.80	1.89	0.0265	0.0270	0.0268	2.07	1.31
6	15.78	0.000074	0.1541	1.34	1.89	0.0164	0.0234	0.0230	42.88	40.44
7	20.78	0.000074	0.1541	3.47	1.93	0.1141	0.0767	0.0765	-32.76	-32.93
8	20.78	0.000074	0.1541	3.14	1.93	0.0746	0.0599	0.0597	-19.67	-19.94
9	20.78	0.000074	0.1541	2.50	1.93	0.0679	0.0422	0.0419	-37.86	-38.30
10	20.78	0.000074	0.1541	2.10	1.93	0.0448	0.0349	0.0346	-22.15	-22.82
11	20.78	0.000074	0.1541	1.77	1.93	0.0351	0.0303	0.0299	-13.58	-14.73
12	20.78	0.000074	0.1541	1.31	1.93	0.0200	0.0274	0.0269	37.19	34.68
13	20.78	0.000074	0.1541	0.91	1.93	0.0108	0.0315	0.0307	192.07	184.65
14	33.36	0.000074	0.1541	3.75	1.95	0.1438	0.0838	0.0835	-41.73	-41.93
15	33.36	0.000074	0.1541	3.14	1.95	0.0976	0.0639	0.0636	-34.56	-34.87
16	33.36	0.000074	0.1541	2.19	1.95	0.0608	0.0425	0.0420	-30.11	-30.93
17	33.36	0.000074	0.1541	1.92	1.95	0.0488	0.0390	0.0384	-20.12	-21.35
18	33.36	0.000074	0.1541	1.49	1.95	0.0327	0.0371	0.0364	13.57	11.43
19	33.36	0.000074	0.1541	1.25	1.95	0.0229	0.0387	0.0378	68.98	65.05
20	33.36	0.000074	0.1541	0.98	1.95	0.0161	0.0449	0.0438	179.46	172.61

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s (ข้อมูลจาก F.L. Smith, B.S., Pilot Plant Experiences with Pipelines Carrying Mineral Slurries, Hydrotransport 1,1970)

ตารางที่ 4.17 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดของมวลสายสินแร่ Limestone ความหนาแน่น 2680 kg/m³ และ น้ำ ในท่อขนาด 6 นิ้ว

ข้อมูล ท.ส.	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_C m/s	ค่า h_S ข้างถึง mw/mp	ค่า h_S ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	$d_{p,50}$ m	D m	V_{op} m/s			ทรงกลม mw/mp	$\phi = 0.9$ mw/mp	ทรงกลม %	$\phi = 0.9$ %
1	18.54	0.000074	0.1541	2.01	1.81	0.0267	0.0302	0.0300	13.22	12.47
2	18.54	0.000074	0.1541	1.71	1.81	0.0209	0.0256	0.0253	22.20	20.77
3	18.54	0.000074	0.1541	1.49	1.81	0.0171	0.0234	0.0231	36.59	34.83
4	18.54	0.000074	0.1541	1.28	1.81	0.0168	0.0222	0.0218	31.97	29.60
5	18.54	0.000074	0.1541	1.01	1.81	0.0109	0.0225	0.0221	106.07	102.41
6	25.98	0.000074	0.1541	2.44	1.84	0.0462	0.0414	0.0411	-10.31	-10.96
7	25.98	0.000074	0.1541	2.01	1.84	0.0334	0.0333	0.0330	-0.36	-1.26
8	25.98	0.000074	0.1541	1.49	1.84	0.0194	0.0277	0.0272	43.14	40.56
9	25.98	0.000074	0.1541	1.10	1.84	0.0120	0.0281	0.0275	133.62	128.63
10	25.98	0.000074	0.1541	0.82	1.84	0.0067	0.0333	0.0324	393.60	380.26
11	25.98	0.000074	0.1541	0.52	1.84	0.0065	0.0512	0.0497	690.12	666.97
12	34.44	0.000074	0.1541	2.32	1.84	0.0457	0.0504	0.0500	10.25	9.37
13	34.44	0.000074	0.1541	2.13	1.84	0.0412	0.0386	0.0382	-6.38	-7.35
14	34.44	0.000074	0.1541	1.86	1.84	0.0306	0.0349	0.0345	14.13	12.82
15	34.44	0.000074	0.1541	1.40	1.84	0.0191	0.0325	0.0319	69.90	66.76
16	34.44	0.000074	0.1541	0.52	1.84	0.0064	0.0673	0.0654	953.00	923.27
17	40.68	0.000074	0.1541	2.13	1.84	0.0524	0.0386	0.0382	-26.30	-27.06
18	40.68	0.000074	0.1541	1.98	1.84	0.0416	0.0364	0.0359	-12.47	-13.68
19	40.68	0.000074	0.1541	1.74	1.84	0.0342	0.0337	0.0329	-1.39	-3.73
20	40.68	0.000074	0.1541	1.52	1.84	0.0267	0.0321	0.0315	20.14	17.89
21	40.68	0.000074	0.1541	1.34	1.84	0.0210	0.0327	0.0320	55.43	52.11
22	40.68	0.000074	0.1541	1.04	1.84	0.0103	0.0359	0.0351	248.64	240.88
23	40.68	0.000074	0.1541	0.70	1.84	0.0064	0.0495	0.0482	669.15	648.95
24	44.95	0.000074	0.1541	1.86	2.41	0.0415	0.0432	0.0430	4.21	3.73
25	44.95	0.000074	0.1541	1.62	2.41	0.0344	0.0479	0.0466	39.08	35.30
26	44.95	0.000074	0.1541	1.37	2.41	0.0251	0.0557	0.0540	121.73	114.96
27	44.95	0.000074	0.1541	1.19	2.41	0.0193	0.0689	0.0666	256.87	244.95
28	44.95	0.000074	0.1541	0.82	2.41	0.0126	0.1313	0.1266	941.65	904.36
29	44.95	0.000074	0.1541	0.40	2.41	0.0113	0.5441	0.5239	4726.4	4547.19

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s (ข้อมูลจาก F.L. Smith, B.S., Pilot Plant Experiences with Pipelines Carrying Mineral Slurries, Hydrotransport 1,1970)

ตารางที่ 4.18 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดของมลสายสินแร่ Tailing from Borax Refining ความหนาแน่น 2280 kg/m³ และ น้ำ ในท่อขนาด 6 นิ้ว

ข้อมูล ท.ส.	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_c m/s	ค่า h_s ข้างถึง mw/mp	ค่า h_s ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	$d_{p,50}$ m	D m	V_{op} m/s			ทรงกลม mw/mp	$\phi = 0.9$ mw/mp	ทรงกลม %	$\phi = 0.9$ %
1	12.72	0.000841	0.1541	3.54	2.26	0.0790	0.1050	0.1045	32.91	32.27
2	12.72	0.000841	0.1541	2.90	2.26	0.0612	0.0916	0.0909	49.55	48.41
3	12.72	0.000841	0.1541	2.53	2.26	0.0470	0.0899	0.0891	91.09	89.39
4	12.72	0.000841	0.1541	2.19	2.26	0.0313	0.0908	0.0899	190.18	187.31
5	18.77	0.000841	0.1541	4.24	2.31	0.1318	0.1405	0.1400	6.58	6.21
6	10.84	0.000841	0.1541	3.78	2.31	0.1079	0.1252	0.1245	16.08	15.44
7	10.84	0.000841	0.1541	3.29	2.31	0.0914	0.1096	0.1089	19.87	19.11
8	10.84	0.000841	0.1541	2.74	2.31	0.0635	0.1034	0.1034	62.91	62.91
9	10.84	0.000841	0.1541	2.53	2.31	0.0555	0.1032	0.1027	86.01	85.11
10	10.84	0.000841	0.1541	2.29	2.31	0.0475	0.1053	0.1043	121.73	119.62
11	25.59	0.000841	0.1541	3.84	2.38	0.1136	0.1552	0.1542	36.59	35.71
12	25.59	0.000841	0.1541	3.69	2.38	0.0963	0.1465	0.1455	52.11	51.07
13	25.59	0.000841	0.1541	3.35	2.38	0.0888	0.1421	0.1410	60.08	58.84
14	25.59	0.000841	0.1541	3.02	2.38	0.0826	0.1407	0.1395	70.43	68.98
15	25.59	0.000841	0.1541	2.65	2.38	0.0728	0.1439	0.1425	97.69	95.77
16	28.77	0.000841	0.1541	4.63	2.39	0.1682	0.1782	0.1773	5.94	5.40
17	28.77	0.000841	0.1541	4.42	2.39	0.1536	0.1713	0.1704	11.55	10.96
18	28.77	0.000841	0.1541	4.11	2.39	0.1403	0.1636	0.1626	16.65	15.93
19	28.77	0.000841	0.1541	3.72	2.39	0.1247	0.1562	0.1551	25.24	24.36
20	28.77	0.000841	0.1541	3.44	2.39	0.1114	0.1523	0.1510	36.71	35.54
21	28.77	0.000841	0.1541	2.93	2.39	0.0914	0.1505	0.1491	64.61	63.07
22	28.77	0.000841	0.1541	2.59	2.39	0.0839	0.1581	0.1564	88.47	86.45

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s (ข้อมูลจาก F.L. Smith, B.S., Pilot Plant Experiences with Pipelines Carrying Mineral Slurries, Hydrotransport 1,1970)

ตารางที่ 4.19 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดของมวลสายสินแร่ Red Mud Slurry ความหนาแน่น 2670 kg/m³ และ น้ำ ในท่อ 6 นิ้ว ที่ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s

ข้อมูล ท.ส.	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V _c m/s	ค่า h _s ข้างอิง mw/mp	ค่า h _s ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C _v %	d _{p,50} m	D m	V _{op} m/s			ทรงกลม mw/mp	φ =0.9 mw/mp	ทรงกลม %	φ =0.9 %
1	8.55	0.000074	0.1541	2.96	1.67	0.0573	0.0494	0.0494	-13.72	-13.72
2	8.55	0.000074	0.1541	2.62	1.67	0.0457	0.0401	0.0400	-12.28	-12.50
3	8.55	0.000074	0.1541	2.23	1.67	0.0379	0.0305	0.0304	-19.63	-19.89
4	8.55	0.000074	0.1541	1.74	1.67	0.0293	0.0212	0.0210	-27.63	-28.31
5	13.78	0.000074	0.1541	2.90	1.76	0.0577	0.0514	0.0513	-10.92	-11.09
6	13.78	0.000074	0.1541	2.62	1.76	0.0506	0.0417	0.0416	-17.58	-17.78
7	13.78	0.000074	0.1541	2.38	1.76	0.0389	0.0357	0.0356	-8.18	-8.44
8	13.78	0.000074	0.1541	1.86	1.76	0.0375	0.0255	0.0254	-32.09	-32.35
9	13.78	0.000074	0.1541	1.52	1.76	0.0242	0.0209	0.0207	-13.60	-14.42
10	19.95	0.000074	0.1541	2.44	1.81	0.0502	0.0392	0.0390	-21.84	-22.24
11	19.95	0.000074	0.1541	2.32	1.81	0.0555	0.0364	0.0362	-34.39	-34.75
12	19.95	0.000074	0.1541	2.19	1.81	0.0411	0.0340	0.0338	-17.36	-17.85
13	19.95	0.000074	0.1541	1.86	1.81	0.0322	0.0283	0.0280	-12.05	-12.98
14	19.95	0.000074	0.1541	1.58	1.81	0.0260	0.0249	0.0246	-4.10	-5.26

ตารางที่ 4.20 ตารางแสดงค่าความดันลดของมวลสาย Cement Kile Feed ความหนาแน่น 2750 kg/m³ และ น้ำ

ข้อมูล ท.ส.	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V _c m/s	ค่า h _s ข้างอิง mw/mp	ค่า h _s ที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C _v %	d _{p,50} m	D m	V _{op} m/s			ทรงกลม mw/mp	φ =0.9 mw/mp	ทรงกลม %	φ =0.9 %
1	16.40	0.000074	0.2027	3.32	2.08	0.0612	0.0471	0.0470	-23.10	-23.26
2	16.40	0.000074	0.2027	2.59	2.08	0.0415	0.0324	0.0323	-21.93	-22.17
3	16.40	0.000074	0.2027	1.83	2.08	0.0254	0.0218	0.0215	-14.13	-15.31
4	16.40	0.000074	0.2027	1.71	2.08	0.0226	0.0215	0.0212	-4.83	-6.16
5	26.56	0.000074	0.2027	3.08	2.14	0.0697	0.0449	0.0447	-35.56	-35.85
6	26.56	0.000074	0.2027	2.53	2.14	0.0475	0.0352	0.0349	-25.88	-26.51
7	26.56	0.000074	0.2027	2.16	2.14	0.0372	0.0306	0.0302	-17.73	-18.80
8	26.56	0.000074	0.2027	1.86	2.14	0.0291	0.0280	0.0276	-3.83	-5.21
9	41.40	0.000074	0.2027	2.38	2.12	0.0564	0.0461	0.0459	-18.22	-18.57
10	41.40	0.000074	0.2027	2.16	2.12	0.0541	0.0398	0.0397	-26.50	-26.68
11	41.40	0.000074	0.2027	1.89	2.12	0.0470	0.0452	0.0440	-3.93	-6.48

มวลสายในท่อ 8 นิ้ว (ข้อมูลจาก F.L. Smith, B.S., Pilot Plant Experiences with Pipelines Carrying Mineral Slurries, Hydrotransport 1,1970)

ตารางที่ 4.21 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลดของมวลสายดินแร่ Crude Anhydrite ความหนาแน่น 2740 kg/m³ และ Cement kiln ความหนาแน่น 2750 kg/m³ ในน้ำ ในท่อขนาด 6 และ 8 นิ้ว

ข้อมูล ท.ส.	ชุดตัวแปรอิสระ				ค่า V_C m/s	ค่า h_S อ้างอิง mw/mp	ค่า h_S ที่คำนวณ			ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C_v %	ρ_s Kg/m ³	D m	V_{op} m/s			ทรงกลม mw/mp	$\phi = 0.9$ mw/mp	ทรงกลม %	$\phi = 0.9$ %	
1	10.83	2740	0.1541	1.40	2.36	0.0201	0.0167	0.0166	-16.76	-17.25	
2	17.30	2740	0.1541	1.89	2.47	0.0353	0.0263	0.0261	-25.46	-26.03	
3	17.30	2740	0.1541	1.13	2.47	0.0132	0.0186	0.0183	41.10	38.83	
4	17.30	2740	0.1541	0.85	2.47	0.0087	0.0196	0.0192	124.16	119.59	
5	24.05	2740	0.1541	1.49	2.52	0.0242	0.0239	0.0236	-1.38	-2.61	
6	24.05	2740	0.1541	1.16	2.52	0.0150	0.0227	0.0223	50.87	48.21	
7	24.05	2740	0.1541	0.64	2.52	0.0066	0.0318	0.0310	380.86	368.76	
8	32.12	2740	0.1541	1.74	2.54	0.0375	0.0297	0.0293	-20.90	-21.97	
9	32.12	2740	0.1541	1.52	2.54	0.0286	0.0279	0.0275	-2.39	-3.79	
10	32.12	2740	0.1541	1.07	2.54	0.0137	0.0285	0.0278	107.81	102.70	
11	32.12	2740	0.1541	0.61	2.54	0.0079	0.0435	0.0423	453.72	438.45	
12	38.27	2740	0.1541	1.86	2.52	0.0434	0.0334	0.0330	-23.05	-23.98	
13	38.27	2740	0.1541	1.49	2.52	0.0320	0.0306	0.0301	-4.51	-6.07	
14	38.27	2740	0.1541	1.10	2.11	0.0212	0.0321	0.0314	51.62	48.32	
15	38.27	2740	0.1541	0.85	2.11	0.0198	0.0380	0.0370	91.54	86.50	
16	16.40	2750	0.2027	1.31	2.00	0.0160	0.0119	0.0118	-25.52	-26.15	
17	16.40	2750	0.2027	1.16	2.00	0.0138	0.0112	0.0111	-18.86	-19.58	
18	16.40	2750	0.2027	0.88	2.00	0.0095	0.0109	0.0107	15.30	13.18	
19	26.56	2750	0.2027	1.46	2.06	0.0193	0.0157	0.0155	-18.68	-19.72	
20	26.56	2750	0.2027	1.04	2.06	0.0127	0.0147	0.0144	15.81	13.44	

ขนาดอนุภาคของ Crude Anhydrite เปอร์เซ็นต์ อนุภาคของ Crude Anhydrite มม. เปอร์เซ็นต์

3.36	5.2	0.297	23.3
2.38	1.9	0.149	15.7
1.68	2.1	0.074	16.7
0.841	8.6	0.044	26.5

ขนาดอนุภาคของ Cement kiln เปอร์เซ็นต์ ขนาดอนุภาคของ Cement kiln มม. เปอร์เซ็นต์

0.297	1.2	0.074	20.0
0.149	5.2	0.044	73.6

สมบัติกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s (ข้อมูลจาก F.L. Smith, B.S., Pilot Plant Experiences with Pipelines Carrying Mineral Slurries, Hydrotransport 1,1970)

ตารางที่ 4.22 ตารางแสดงการเปรียบเทียบอัตราการผลิตพลังงานในการขนถ่ายมลสาย Gold Slime ความหนาแน่น 2725 kg/m³ และ น้ำ ในท่อขนาดต่างๆ

ข้อมูล ท.ส.	ชุดตัวแปรอิสระ				h _s อ้างอิง mw/mp	SEC อ้างอิง Kw-hr	ค่าที่คำนวณ		ค่าเบี่ยงเบน (DEV.)	
	C _v %	R _{st} Tons/hr	D m	V _{op} m/s			h _s mw/mp	SEC Kw-hr	h _s %	SEC %
1	16.424	27	0.1049	1.9	0.0424	0.2522	0.0332	0.2023	-21.77	-19.79
2	16.424	103	0.2066	1.9	0.0183	0.1107	0.0151	0.0919	-17.53	-16.98
3	16.424	165	0.2610	1.9	0.0140	0.0874	0.0117	0.0713	-16.43	-18.42
4	16.424	306	0.3560	1.9	0.0093	0.0562	0.0085	0.0517	-8.50	-8.01
5	16.424	505	0.4570	1.9	0.0069	0.0416	0.0067	0.0405	-2.62	-2.64
6	16.424	754	0.5590	1.9	0.0054	0.0324	0.0061	0.0373	13.81	15.12
7	16.424	1053	0.6600	1.9	0.0043	0.0261	0.0051	0.0311	18.06	19.16
8	22.995	37	0.1049	1.9	0.0511	0.2177	0.0335	0.1458	-34.49	-33.03
9	22.995	144	0.2066	1.9	0.0218	0.0942	0.0155	0.0672	-28.90	-28.66
10	22.995	231	0.2610	1.9	0.0164	0.0709	0.0121	0.0527	-26.22	-25.67
11	22.995	428	0.3560	1.9	0.0107	0.0463	0.0089	0.0388	-16.90	-16.20
12	22.995	707	0.4570	1.9	0.0079	0.0343	0.0071	0.0310	-10.47	-9.62
13	22.995	1056	0.5590	1.9	0.0062	0.0267	0.0068	0.0298	10.03	11.61
14	22.995	1474	0.6600	1.9	0.0050	0.0215	0.0057	0.0250	14.46	16.28
15	30.847	50	0.1049	1.9	0.0598	0.1897	0.0339	0.1100	-43.30	-42.01
16	30.847	193	0.2066	1.9	0.0259	0.0835	0.0159	0.0516	-38.70	-38.20
17	30.847	309	0.2610	1.9	0.0188	0.0605	0.0126	0.0408	-32.98	-19.79
18	30.847	574	0.3560	1.9	0.0120	0.0387	0.0095	0.0310	-20.90	-19.90
19	30.847	948	0.4570	1.9	0.0087	0.0282	0.0077	0.0250	-11.90	-11.35
20	30.847	1416	0.5590	1.9	0.0068	0.0218	0.0077	0.0250	13.91	14.68
21	30.847	1977	0.6600	1.9	0.0054	0.0175	0.0065	0.0210	19.71	20.00

สมบัติกายภาพของน้ำที่ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s

ขนาดอนุภาค	เปอร์เซ็นต์	ขนาดอนุภาค	เปอร์เซ็นต์	ขนาดอนุภาค	เปอร์เซ็นต์
0.001200	0.85	0.000303	0.61	0.000077	16.44
0.000855	0.13	0.000215	1.58	0.000054	8.89
0.000605	0.49	0.000153	8.16	0.000054	47.62
0.000428	0.49	0.000108	14.74		

(ข้อมูลจาก C.M. Sabbagha, Practical Experiences in Pumping Slurries at ERGO, Hydrotransport 8,1982)

ตารางที่ 4.23 ตารางแสดงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายมวลสลาย Gold Slime ความหนาแน่น 2725 kg/m³ และ น้ำจากข้อมูลอ้างอิงเปรียบเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่คำนวณโดยโปรแกรมออปติ้ม ที่ อัตราการขนถ่าย (R_{st}) เท่ากัน ในที่ขนาดต่างๆ

ข้อมูล ท.ส.	ชุดตั้งแปรจากข้อมูลอ้างอิง				SEC	ค่าที่คำนวณโดยโปรแกรม			SEC	หมายเหตุ
	C_v	R_{st}	D	V_{op}	Kw-hr	C_{vop}	D_{op}	V_{opt}	kw-hr	
	%	Tons/hr	m	m/s	ton-km	%	m	m/s	ton-km	
1	16.424	27	0.1049	1.9	0.2522	48.99	0.100	0.7059	0.0265	
2	16.424	103	0.2066	1.9	0.1107	45.99	0.175	0.9440	0.0232	
3	16.424	165	0.2610	1.9	0.0874	49.99	0.200	1.0684	0.0233	
4	16.424	306	0.3560	1.9	0.0562	34.99	0.325	1.0725	0.0201	
5	16.424	505	0.4570	1.9	0.0416	33.99	0.425	1.0664	0.0191	
6	16.424	754	0.5590	1.9	0.0324	34.99	0.475	1.2391	0.0183	
7	16.424	1053	0.6600	1.9	0.0261	43.99	0.450	1.5328	0.0182	
8	22.995	37	0.1049	1.9	0.2177	41.99	0.125	0.7378	0.0303	
9	22.995	144	0.2066	1.9	0.0942	45.99	0.200	1.0119	0.0223	
10	22.995	231	0.2610	1.9	0.0709	31.99	0.325	0.8851	0.0212	
11	22.995	428	0.3560	1.9	0.0463	49.99	0.300	1.2337	0.0191	
12	22.995	707	0.4570	1.9	0.0343	34.99	0.475	1.1612	0.0184	
13	22.995	1056	0.5590	1.9	0.0267	43.99	0.450	1.5375	0.0182	
14	22.995	1474	0.6600	1.9	0.0215	47.99	0.500	1.5935	0.0171	
15	30.847	50	0.1049	1.9	0.1897	49.99	0.125	0.8315	0.0259	
16	30.847	193	0.2066	1.9	0.0835	45.99	0.225	1.0734	0.0216	
17	30.847	309	0.2610	1.9	0.0605	34.99	0.325	1.0855	0.0201	
18	30.847	574	0.3560	1.9	0.0387	34.99	0.425	1.1782	0.0188	
19	30.847	948	0.4570	1.9	0.0282	34.99	0.425	1.9457	0.0183	
20	30.847	1416	0.5590	1.9	0.0218	45.99	0.500	1.5979	0.0175	
21	30.847	1977	0.6600	1.9	0.0175	45.99	0.550	1.8435	0.0168	

สมบัติกายภาพของน้ำที่ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 kg/m³ และความหนืด 0.00098 kg/m-s

ขนาดอนุภาค	เปอร์เซ็นต์	ขนาดอนุภาค	เปอร์เซ็นต์	ขนาดอนุภาค	เปอร์เซ็นต์
0.001200	0.85	0.000303	0.61	0.000077	16.44
0.000855	0.13	0.000215	1.58	0.000054	8.89
0.000605	0.49	0.000153	8.16	0.000054	47.62
0.000428	0.49	0.000108	14.74		

(ข้อมูลจาก C.M. Sabbagha, Practical Experiences in Pumping Slurries at ERGO, Hydrotransport 8,1982)

4.2 การสรุปวิเคราะห์โปรแกรม

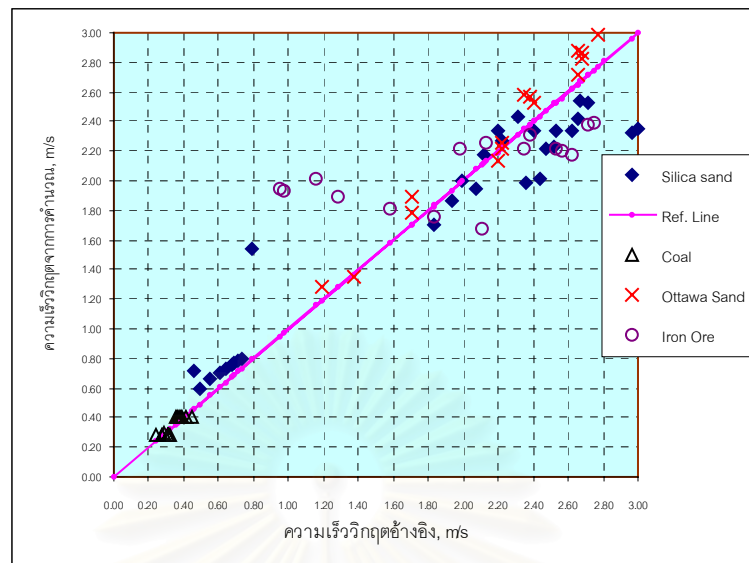
ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการทดสอบความถูกต้องแม่นยำ (Accuracy) ของโปรแกรมซึ่งข้อมูลอ้างอิงที่นำมาทดสอบกับโปรแกรมคำนวณค่าความเร็ววิกฤตของการไหลในท่อของมลสายเป็นท่อขนาด $\frac{1}{2}$ - 12 นิ้ว และเมื่อนำผลการทดสอบมาทำการสรุปวิเคราะห์เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบน (Deviation) พบว่าเป็นดังแสดงในตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 แสดงการสรุปวิเคราะห์ผลการทดสอบโปรแกรมทำนายความเร็ววิกฤตเทียบกับข้อมูลอ้างอิง

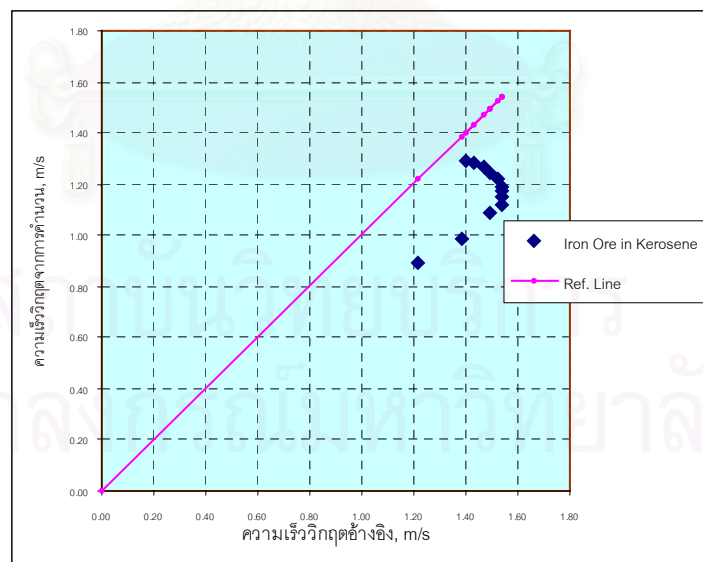
	ผลการทำนายด้วยโปรแกรม	จำนวนข้อมูลทดสอบ	เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์สะสม	หมายเหตุ
1	ค่าเบี่ยงเบน $\leq \pm 10\%$	35	38.04	38.04	
2	$\pm 10\% < \text{ค่าเบี่ยงเบน} \leq \pm 20\%$	31	33.70	71.74	
3	$\pm 20\% < \text{ค่าเบี่ยงเบน} \leq \pm 30\%$	15	16.30	88.04	
4	ค่าเบี่ยงเบน $> \pm 30\%$	11	11.96	100.00	
	จำนวนข้อมูลทดสอบทั้งหมด	92	100.00		

เมื่อนำผลการทดสอบมาสร้างเป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตที่คำนวณด้วยโปรแกรมเทียบกับความเร็ววิกฤตจากข้อมูลอ้างอิง ตามรูปภาพที่ 4.1 ถึง 4.3 พบว่าโปรแกรมสามารถคำนวณความเร็ววิกฤตของมลสายที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหรือเป็นของไหลซับซ้อนได้ใกล้เคียงกว่ามลสายที่มีของไหลอื่นเป็นส่วนประกอบ และยังพบว่าโปรแกรมสามารถคำนวณค่าความเร็ววิกฤตของมลสายที่ไหลในท่อขนาดเล็กได้แม่นยำกว่ามลสายที่ไหลในท่อขนาดใหญ่

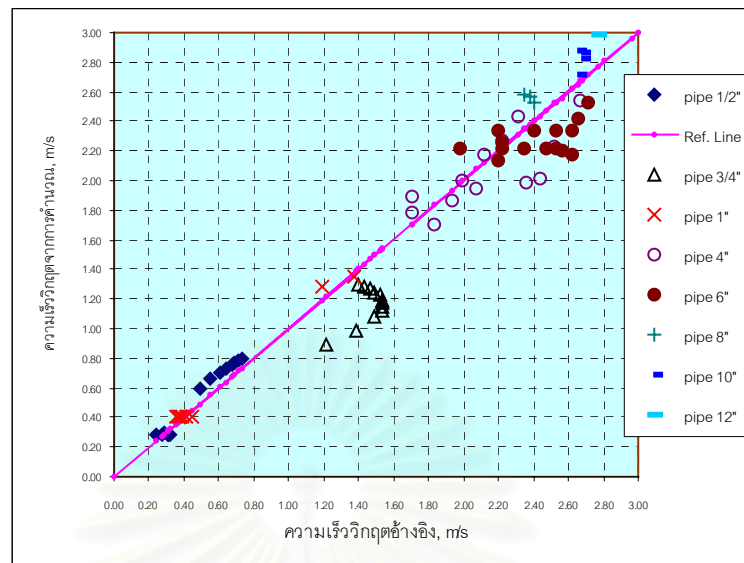
เนื่องจากชุดสมการที่นำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมมีพื้นฐานเป็นสมการเอมไพริคัล ซึ่งเป็นสมการที่พัฒนามาจากข้อมูลการทดลอง และการทดลองส่วนมากมักจะทดลองในท่อขนาดเล็กและมีน้ำเป็นส่วนประกอบของมลสาย ซึ่งของไหลแต่ละประเภทมีสมบัติกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น และความหนืดแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อนำโปรแกรมไปคำนวณค่าความเร็ววิกฤตของมลสายที่มีของไหลอื่นที่ไม่ใช่น้ำเป็นส่วนประกอบหลัก จึงมีความคลาดเคลื่อนมากกว่ามลสายที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ



รูปภาพที่ 4.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน (แยกตามประเภทของอนุภาคของแข็ง)



รูปภาพที่ 4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตของมวลสาย Iron Ore และ Kerosene ที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง



รูปภาพที่ 4.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน (แยกตามขนาดท่อ)

ส่วนกรณีการทดสอบโปรแกรมการคำนวณค่าความดันลดของมัลติสกายประเภทต่างๆ ที่ไหลในท่อแนวระดับ ซึ่งข้อมูลทดสอบส่วนใหญ่เป็นท่อขนาด 6 – 8 นิ้ว และเมื่อนำผลการทดสอบมาทำการสรุปวิเคราะห์เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบน (Deviation) พบว่า ผลการคำนวณความดันลดด้วยโปรแกรม ส่วนใหญ่ให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิง ดังแสดงในตารางที่ 4.25 และเมื่อคัดแยกข้อมูลทดสอบที่มีค่าความเร็วปฏิบัติการ (Operating Velocity) ต่ำกว่าค่าความเร็ววิกฤต (Critical Velocity) ออกจากข้อมูลทดสอบ พบว่า โปรแกรมสามารถคำนวณค่าความดันลดได้สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.25 ตารางแสดงการสรุปวิเคราะห์ผลการทดสอบโปรแกรมคำนวณความดันลดเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง

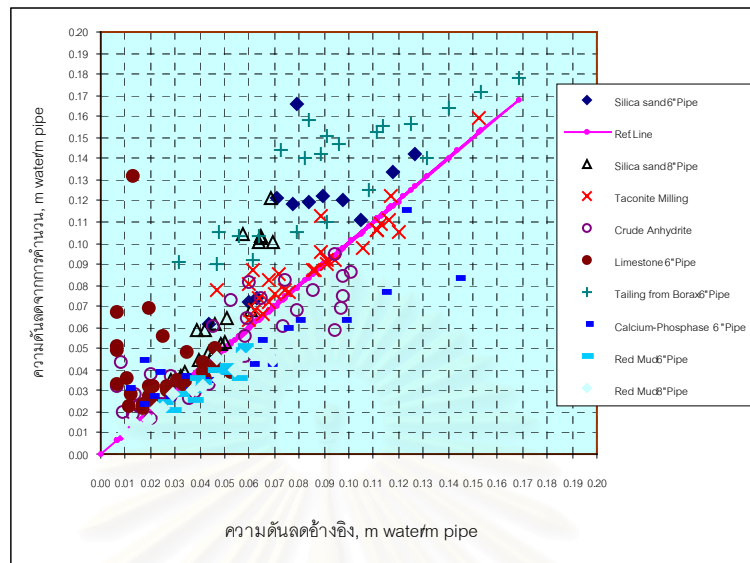
	ผลการทำนายด้วยโปรแกรม เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง	จำนวนข้อมูล ทดสอบ	เทียบเป็น เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์สะสม	หมายเหตุ
1	ค่าเบี่ยงเบน $\leq \pm 5\%$	29	14.43	14.43	
2	$\pm 5\% < \text{ค่าเบี่ยงเบน} \leq \pm 10\%$	19	9.45	23.88	
3	$\pm 10\% < \text{ค่าเบี่ยงเบน} \leq \pm 20\%$	52	25.87	49.75	
4	$\pm 20\% < \text{ค่าเบี่ยงเบน} \leq \pm 40\%$	49	24.38	74.13	
5	ค่าเบี่ยงเบน $> \pm 40\%$	52	25.87	100.00	
	จำนวนข้อมูลทดสอบทั้งหมด	201	100.00		

ตารางที่ 4.26 ตารางแสดงการสรุปวิเคราะห์ผลการทดสอบโปรแกรมทำนายความดันลดเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง (กรณีตัดข้อมูลที่ Operating Velocity มีค่าต่ำกว่าค่าความเร็ววิกฤต (V_c) ออกจากชุดข้อมูลทดสอบ)

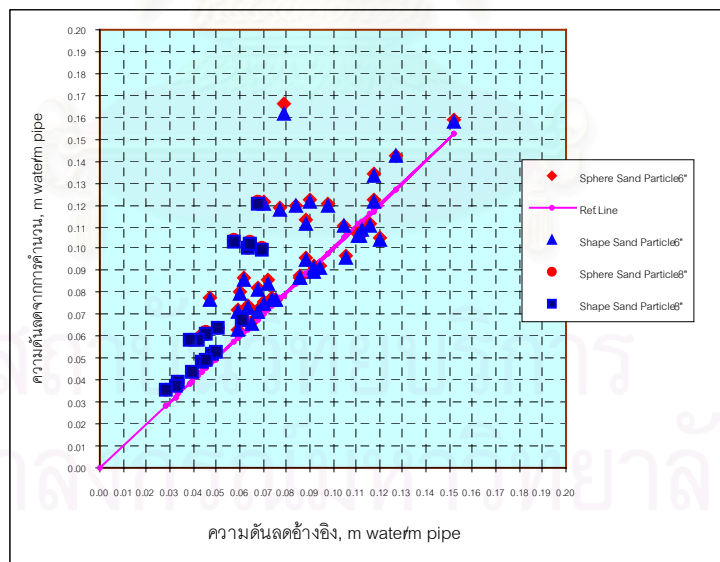
	ผลการทดสอบโปรแกรม เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง	จำนวนข้อมูล	ร้อยละ	ร้อยละสะสม	หมายเหตุ
1	ค่าเบี่ยงเบน $\leq \pm 5\%$	26	18.06	18.06	
2	$\pm 5\% < \text{ค่าเบี่ยงเบน} \leq \pm 10\%$	19	13.19	31.25	
3	$\pm 10\% < \text{ค่าเบี่ยงเบน} \leq \pm 20\%$	44	30.56	61.81	
4	$\pm 20\% < \text{ค่าเบี่ยงเบน} \leq \pm 40\%$	31	21.53	83.33	
5	ค่าเบี่ยงเบน $> \pm 40\%$	24	16.67	100.00	
	จำนวนข้อมูลทดสอบทั้งหมด	144	100.00		

ในทำนองเดียวกันเมื่อนำผลการทดสอบมาสร้างแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความดันลดที่คำนวณด้วยโปรแกรมและความดันลดจากข้อมูลอ้างอิง ตามรูปภาพที่ 4.4 ถึง 4.8 พบว่า ค่าความดันลดจากการคำนวณมีแนวโน้มสูงกว่าค่าอ้างอิงเล็กน้อย (Over Estimate) และเมื่อนำค่า Sphericity Shape Factor ของอนุภาคมาใช้ประกอบการคำนวณ พบว่า โปรแกรมสามารถคำนวณค่าความดันลดได้สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.5 และยังพบว่าโปรแกรมสามารถทำนายค่าความดันลดของมลสายเจ็จจาง ได้สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงมากกว่ากรณีมลสายที่มีความเข้มข้นสูง ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.8

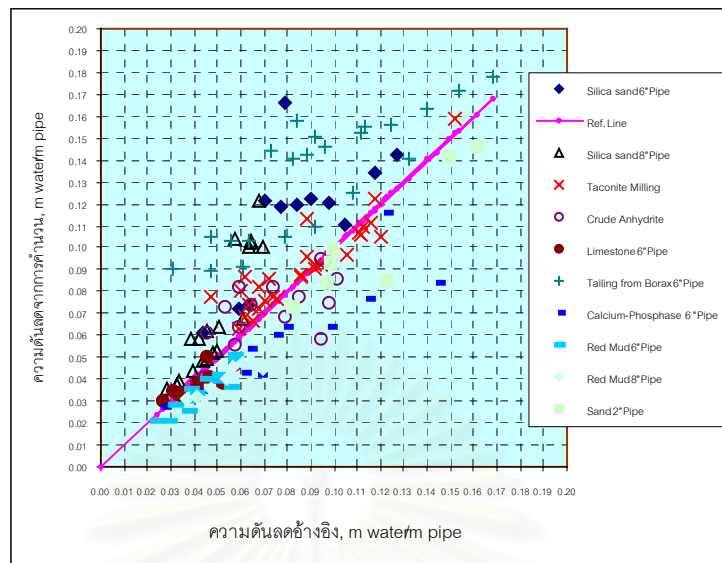
ด้วยเหตุที่ชุดสมการที่นำมาพัฒนาโปรแกรมเป็นสมการเอมไพริคัล ซึ่งเป็นสมการที่ได้รับการพัฒนามาจากข้อมูลการทดลอง และการทดลองส่วนมากมักจะทดลองในท่อขนาดเล็ก และจากแผนภาพ พบว่า ค่าความดันลดที่คำนวณด้วยโปรแกรมมีแนวโน้มสูงกว่าค่าอ้างอิงน่าจะมีสาเหตุมาจากการคำนวณค่า Drag Coefficient ซึ่งสูตรหรือแผนภาพที่ใช้คำนวณ โดยทั่วไปไม่มีไว้สำหรับ อนุภาคที่เป็นทรงกลมเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงในภาคอุตสาหกรรม อนุภาคไม่ได้เป็นทรงกลม 100 เปอร์เซ็นต์ และยังมีรูปร่างแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสมบัติกายภาพของอนุภาคนั้นๆ ส่งผลให้ค่าความเร็วบั้นปลาย (Particle Terminal Velocity) ของอนุภาคที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงเกินความเป็นจริง ทำให้ค่า Drag Coefficient มีค่าต่ำ ดังนั้น ความดันลดที่คำนวณด้วยโปรแกรมจึงมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับข้อมูลอ้างอิง แต่เมื่อนำค่า Sphericity Shape Factor ของ



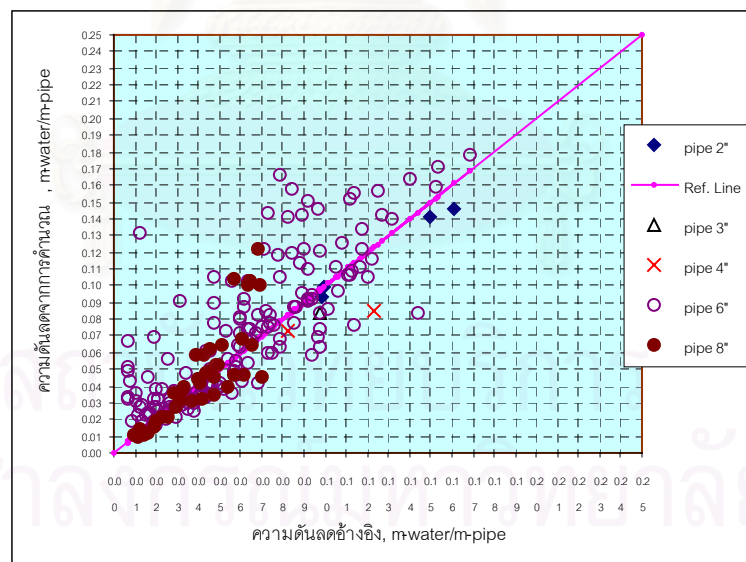
รูปภาพที่ 4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลหลักเคลื่อน



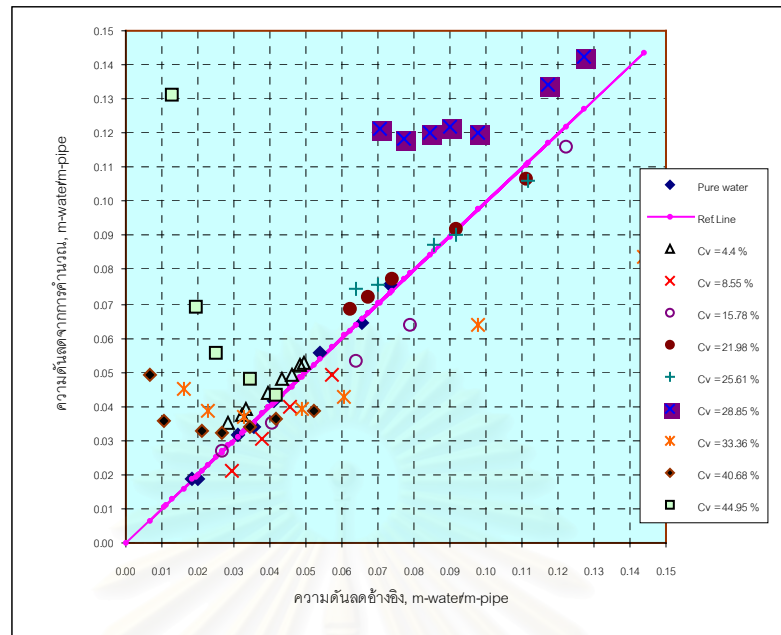
รูปภาพที่ 4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลหลักเคลื่อน (ค่านิ่งค่า Sphericity Shape Factor)



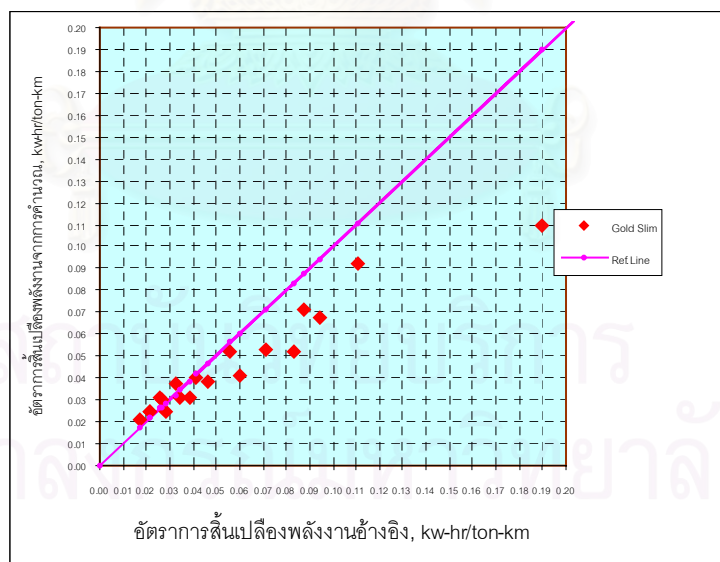
รูปภาพที่ 4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน (กรณีตัดข้อมูลทดสอบที่มี ค่า Operating Velocity ต่ำกว่า ค่า Critical Velocity ออกจากข้อมูลทดสอบ)



รูปภาพที่ 4.7 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน (แยกตามขนาดท่อ)



รูปภาพที่ 4.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน (แยกตามขนาดความเข้มข้นต่างๆ)



รูปภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้พลังงานในการขนถ่ายมลสายที่ทำนายโดยโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน

อนุภาคมาใช้ประกอบการคำนวณ พบว่า ค่า Terminal Velocity มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่า Drag Coefficient มีค่าสูงขึ้น ดังนั้น ความดันลดที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม จึงมีค่าต่ำกว่า กรณีที่สมมติว่า อนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม

กรณีการทดสอบโปรแกรมการคำนวณออกแบบเชิงออปติมิ้ม จะแบ่งการทดสอบออกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก เป็นการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายต่อหน่วย โดยที่ชุดตัวแปรป้อนเข้า จะเป็นชุดเดียวกันกลับข้อมูลอ้างอิง ผลการทดสอบ พบว่า ให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิง ดังแสดงในตารางที่ 4.22 และการทดสอบในขั้นตอนที่สอง โดยโปรแกรมจะคำนวณค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรสำหรับการออกแบบระบบท่อเชิงออปติมิ้ม คือ ขนาดท่อที่เหมาะสม ความเข้มข้นของมลสายที่เหมาะสม และความเร็วการขนถ่ายที่เหมาะสม และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรดังกล่าวมาคำนวณหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่อหน่วย พบว่า มีค่าต่ำกว่าค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายต่อหน่วยของข้อมูลอ้างอิง ที่อัตราการขนถ่ายเท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4.23

4.3 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม

1. กรณีต้องการทราบความเร็ววิกฤตหรือความดันลดของระบบท่อ โดยมีข้อมูลสมบัติกายภาพ และพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

อนุภาคของแข็งขนาด 0.1 มม. 0.2 มม. 1.5 มม. คิดเป็นสัดส่วน 50 % 35% และ 15% ตามลำดับ โดยมี shape factor = 0.95 และความหนาแน่น 2650 กก./ม³ ส่วนของไหลคือน้ำ ที่อุณหภูมิ 21 °C น้ำมี ความหนาแน่น 998 กก./ม³ และความหนืด 0.00098 กก./ม.วินาที ไหลในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว มีค่าความขรุขระของผนังท่อ 0.0004572 เมตร ที่ความเข้มข้น 18 % โดยของไหล ไหลที่ความเร็ว 3.2 ม./วินาที

เริ่มต้นด้วยการป้อนค่าข้อมูล ที่กล่าวมา ที่ช่อง Text Box ของหน้าต่างด้าน Input

Particle Size	0.0001,0.0002,0.0015	m
Particle Size Distribution	0.50,0.35,0.15	
Particle Shape Factor	0.95	
Particle Density	2650	kg/m ³
Liquid Density	998	kg/m ³

Liquid Viscosity	<input type="text" value="0.00098"/>	kg/m-s
Pipe Size	<input type="text" value="0.1011"/>	m
Pipe Wall Roughness	<input type="text" value="0.00004572"/>	m
Operating Velocity	<input type="text" value="3.2"/>	m/s
Volume Solid Concentration	<input type="text" value="0.18"/>	

เมื่อป้อนข้อมูลแล้วเสร็จ ให้คลิกที่ปุ่ม Command Button Calculation ผลการคำนวณจะแสดงในหน้าต่าง แสดงผล ดังต่อไปนี้

Terminal Velocity	<input type="text" value="0.245"/>	m/s
Drag Coefficient	<input type="text" value="15.58"/>	
Critical Velocity	<input type="text" value="1.90"/>	m/s
Pure Liquid Head-Loss	<input type="text" value="0.092"/>	mw/mp
Slurry Head-Loss	<input type="text" value="0.267"/>	mw/mp
Solid Transportation Rate	<input type="text" value="44.13"/>	tons/hr
Energy Concentration Rate	<input type="text" value="1.525"/>	kw-hr/ton-km

เมื่อต้องการทราบผลกระทบของตัวแปรอิสระตัวแปรใดๆ ที่มีต่อความดันลด สามารถทำได้เพียงแค่ คลิกที่ปุ่ม Command Button Back หน้าต่างแสดงผลจะเปลี่ยนไปเป็นหน้าต่างป้อนข้อมูล ซึ่ง

จะปรากฏให้ผู้ใช้งานสามารถแก้ไขข้อมูลที่ต้องการทราบผลกระทบ โดยสามารถแก้ไขข้อมูลได้โดยตรงที่ช่อง Text Box ตัวนั้นๆ หรือคลิกที่ปุ่ม Command Button Clear ข้อมูลทั้งหมดจะถูกลบทิ้ง

2. กรณีต้องการออกแบบระบบท่อเชิงออปติ้ม โดยมีข้อมูลสมบัติกายภาพและพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

ต้องการขนถ่ายอนุภาคของแข็งขนาด 0.1 มม. 0.2 มม. 1.5 มม. คิดเป็นสัดส่วน 50 % 35% และ 15% ตามลำดับ โดยมี shape factor = 0.95 และความหนาแน่น 2650 กก./ม³ ในอัตรา 80 tons/hr ส่วนของไหลคือน้ำ ที่อุณหภูมิ 21 °C น้ำมีความหนาแน่น 998 กก./ม³ และความหนืด 0.00098 กก./ม.วินาที ไหลในท่อที่มีค่าความขรุขระของผนังท่อ 0.0004572 เมตร เริ่มต้นด้วยการป้อนค่าข้อมูล ที่กล่าวมา ที่ช่อง Text Box ของหน้าต่างด้าน Input

Particle Size	0.0001,0.0002,0.0015	m
Particle Size Distribution	0.50,0.35,0.15	
Particle Shape Factor	0.95	
Particle Density	2650	kg/m ³
Liquid Density	998	kg/m ³
Liquid Viscosity	0.00098	kg/m-s
Pipe Wall Roughness	0.00004572	m
Solid Transportation Rate	80	tons/hr
<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px 20px;">Calculation</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px 20px;">Back</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px 20px;">Clear</div> </div>		

เมื่อป้อนข้อมูลแล้วเสร็จ ให้คลิกที่ปุ่ม Command Button Calculation ผลการคำนวณจะแสดงในหน้าต่าง แสดงผล ดังต่อไปนี้

Operating Velocity	15.58	m/s
Critical Velocity	1.90	m/s

Optimum Pipe Size	<input type="text" value="0.200"/>	m
Slurry Head-Loss	<input type="text" value="0.267"/>	mw/mp
Optimum Solid Concentration	<input type="text" value="39"/>	%
Minimum Specific Energy Consumption Rate	<input type="text" value="0.0225"/>	kw-hr/ton-km

เมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรอิสระใดๆ ที่มีต่ออัตราการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากการไหล สามารถทำได้เพียงแค่ คลิกที่ปุ่ม Command Button Back หน้าต่างแสดงผลจะเปลี่ยนไปเป็นหน้าต่างป้อนข้อมูล ซึ่งจะปรากฏให้ผู้ใช้สามารถแก้ไขข้อมูลที่ต้องการทราบผลกระทบทบ โดยสามารถแก้ไขข้อมูลได้โดยตรงที่ช่อง Text Box ตัวนั้นๆ หรือคลิกที่ปุ่ม Command Button Clear ข้อมูลทั้งหมดจะถูกลบทิ้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากผลการดำเนินงาน ผู้ศึกษาได้นำทฤษฎีและสมการต่างๆ มาพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษาวิสซวลเบสิกสำหรับใช้คำนวณออกแบบระบบการขนถ่ายมลสาย (ของไหล 2 ภูมิภาค คือ ของแข็ง-ของเหลว) ประเภทที่ตกตะกอนได้ ในระบบท่อแนวระดับ โดยโปรแกรมได้รับการพัฒนาออกเป็นสองโปรแกรม คือ โปรแกรมการคำนวณความดันลด และโปรแกรมการคำนวณออกแบบเชิงออปติมิ้ม โดยทั้งสองโปรแกรมได้นำสมการการทดลอง (Empirical Equation) ของ Turian และ Oroska (1980) สมการของ Shook และ Gillies (1991) และสมการของ Zandi และ Govatos (1967) สำหรับใช้คำนวณหาค่าความเร็วการไหลในท่อวิกฤต และนำสมการเอมไพริคัลของ Durand และ Condolios (1952) สมการของ Newitt และคณะ (1956) และสมการของ Zandi และ Govatos (1967) สำหรับใช้คำนวณค่าความดันลดของการไหลในท่อของมลสาย ตามลำดับ และได้นำโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาแล้วเสร็จ มาทำการทดสอบ Accuracy ของโปรแกรมเทียบกับข้อมูลอ้างอิง ซึ่งเป็นข้อมูลจากการทดลองจริงโดยนักวิจัยคณะอื่น และผลการทดสอบสามารถจำแนกได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1) การทดสอบโปรแกรมการคำนวณความเร็ววิกฤต โดยช่วงข้อมูลทดสอบเป็นท่อขนาด $1/2 - 12$ นิ้ว ของมลสายที่ประกอบด้วย ททราย กรวด ถ่านหิน และสินแร่อื่นๆ โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน ที่อุณหภูมิคงที่ พบว่า 88.04 % ของข้อมูลทดสอบ โปรแกรมสามารถทำนายค่าความเร็ววิกฤตได้สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงโดยมีค่าเบี่ยงเบนไปจากผลการทดลอง ± 30 %

2) การทดสอบโปรแกรมการคำนวณความดันลด ข้อมูลทดสอบส่วนใหญ่เป็นท่อขนาด $6 - 8$ นิ้ว ของมลสายที่ประกอบด้วย ททราย กรวด ถ่านหินและสินแร่อื่นๆ โดยมีน้ำเป็นของไหลขับเคลื่อน ที่อุณหภูมิคงที่ พบว่า 74.13 % ของข้อมูลทดสอบ โปรแกรมสามารถทำนายค่าความดันลดได้สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงโดยมีค่าเบี่ยงเบนไปจากผลการทดลอง ± 40 %

3) กรณีคัดแยกข้อมูลที่มีค่าความเร็วการไหลในท่อต่ำกว่าค่าความเร็ววิกฤตออกจากข้อมูลทดสอบในข้อ (2) พบว่าค่า Accuracy ของโปรแกรมคำนวณความดันลดมีแนวโน้มสูงขึ้น คือ 83.33 % ของข้อมูลทดสอบ โปรแกรมสามารถทำนายค่าความดันลดได้สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงโดยมีค่าเบี่ยงเบนไปจากผลการทดลอง ± 40 %

4) การทดสอบโปรแกรมการคำนวณออกแบบระบบท่อเชิงออปติมิ้ม โดยช่วงข้อมูลทดสอบเป็นท่อขนาด $4 - 24$ นิ้ว พบว่า โปรแกรมสามารถทำนายค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ

สำหรับการออกแบบ คือ ขนาดท่อที่เหมาะสม ความเข้มข้นของมลสายที่เหมาะสม และความเร็วการไหลในท่อที่เหมาะสม ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อนำชุดค่าพารามิเตอร์ที่ทำนายด้วยโปรแกรมดังกล่าว มาคำนวณหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน พบว่า อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายต่อหน่วย มีค่าต่ำกว่าของข้อมูลอ้างอิงทุกค่าการทดสอบ ที่อัตราการขนถ่ายเท่ากัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การนำโปรแกรมไปคำนวณความเร็ววิกฤตในช่วงขนาดท่อใหญ่กว่า 12 นิ้ว เป็นต้นไป ผู้ใช้จะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากโปรแกรมยังไม่ได้รับการตรวจสอบค่าความถูกต้อง ดังนั้น ก่อนนำโปรแกรมไปใช้คำนวณ ควรทำการตรวจสอบโปรแกรมด้วยการทดสอบกับข้อมูลอ้างอิงเสียก่อน นอกจากนี้ การนำค่าความเร็ววิกฤตไปปฏิบัติงานจริง ควรพิจารณาค่าความปลอดภัยที่ 30 % หรือนำค่าความเร็ววิกฤตที่ได้จากการคำนวณบวกด้วย 0.3 เมตรต่อวินาที โดยเลือกค่าที่สูงกว่าเป็นหลัก ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่า การไหลในท่อแนวระดับของมลสายจะไม่เกิดการตกตะกอน

2) ถึงแม้ว่าโปรแกรมความดันลด จะได้รับการตรวจสอบ Accuracy ของโปรแกรมในช่วงขนาดท่อ 2 - 24 นิ้ว แต่ 90 % ของข้อมูลทดสอบเป็นท่อขนาด 6 - 8 นิ้ว ดังนั้น การนำโปรแกรมไปใช้ทำนายความดันลดนอกขอบเขตนี้ ผู้ใช้จะต้องระมัดระวังเช่นเดียวกัน เนื่องจากข้อมูลสำหรับการตรวจสอบ Accuracy ของโปรแกรมยังน้อยเกินกว่าจะสรุปได้

3) กรณีความเร็วการไหลในท่อมีน้อยกว่าความเร็ววิกฤต อนุภาคของแข็งจะตกตะกอนสะสมบริเวณท้องท่อ ทำให้ผิวบนของตะกอนมีความขรุขระมากกว่าผิวภายในท่อ ส่งผลให้ค่าองค์ประกอบความเสียดทาน (Friction Factor) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของขนาดความขรุขระของผิวภายในท่อมีค่าสูง ดังนั้น ความดันลดจะมีค่าสูงกว่ากรณีปกติ นอกจากนี้ พื้นที่ภาคตัดขวางของท่อบริเวณที่มีการสะสมของตะกอนจะลดลง ทำให้ความเร็วการไหลบริเวณนี้มีค่าสูง ส่งผลให้ความดันลดซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็วยกกำลังสอง มีค่าสูงขึ้นไปอีก ดังนั้นจึงไม่แนะนำให้ นำโปรแกรมไปคำนวณความดันลดของมลสายในสภาวะนี้

4) ถึงแม้ว่าโปรแกรมสามารถทำนายชุดค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้ออกแบบระบบท่อเชิงออปติ้ม คือ ขนาดท่อที่เหมาะสม ความเข้มข้นที่เหมาะสม และความเร็วการขนถ่ายที่เหมาะสม ซึ่งมีค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการขนถ่ายต่อหน่วยน้อยที่สุด แต่การนำค่าความดันลดซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการเลือกขนาดของเครื่องสูบน้ำ (pump) จะต้องระมัดระวังและควรพิจารณาค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ไว้ด้วย และควรนำชุดค่าพารามิเตอร์

มิเตอร์ดังกล่าวมาตรวจสอบตัวเองด้วยโปรแกรมความดันลดอีกหนึ่งครั้งและทั้งสองค่าควรจะเท่ากัน หรือใกล้เคียงกัน

5) ตรวจสอบค่าสมบัติกายภาพต่างๆ ของของแข็ง ของน้ำ และของท่อ ให้ถูกต้องแน่นอนก่อนที่จะป้อนเข้าสู่โปรแกรม โดยเฉพาะค่าที่มีผลต่อการคำนวณ ได้แก่ shape factor ขนาดของอนุภาค สัดส่วนการกระจายของขนาดของอนุภาค โดยเฉพาะอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญมากเนื่องจากทั้งค่าความหนาแน่นและความหนืดของน้ำแปรผันตรงกับอุณหภูมิ

6) เพื่อความสะดวกต่อการปฏิบัติงานและป้องกันข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น ควรสร้างฐานข้อมูลบรรจุไว้ในโปรแกรม โดยเฉพาะค่าสมบัติกายภาพของน้ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น และความหนืด เป็นต้น

7) นำโปรแกรมไปทดสอบกับมลสายที่ประกอบด้วย อนุภาคของแข็ง และของไหลประเภทอื่น ได้แก่ เยื่อกระดาษ ดิน และโคลน ใน น้ำ หรือ หิน ในน้ำมัน เป็นต้น

8) พัฒนาโปรแกรมเพื่อให้สามารถคำนวณออกแบบระบบท่อสำหรับขนถ่ายมลสาย กรณีที่อนุภาคของแข็งเป็นของผสมต่างชนิดกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- Bain, A.G., Bonnington, S.T. The Hydraulic Transport of Solid by Pipeline. First Edition. Great Britain : Pergamom Press, 1970.
- Durand, R., and Condolios, E. Experimental Study of the Hydraulic Transport of Coal and Other Materials in Pipes. Colloq. of National Coal Board Paper IV (1952) : 39- 52.
- Durand, R. Basic Relationships of the transportation of Solids in Pipes Experimental Reseach. Proc. International Assoc. for Hydraulic Research. Minneapolis, 1953.
- Edward, J. Wasp, John, P. Kenny, Ramesh, L. Gandhi. Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation. First Edition. Germany : Trans Tech Publications, 1977.
- Faddick, R., Pouska, G. Ultrasonic Velocity Meter. Hydrotransport Vol. 6 Paper B4 (1979) : 113 -120.
- Gillies, R.G., and Shook, C.A. A Deposition Velocity Correlation for Water Slurries. Can. J. Chem. Eng. Vol. 69 (1991) : 1225-1227.
- Haas, D. B., Small, and Husband, W.H.W. Study of the hydraulic properties of coarse particles of metallurgical coals when transported in slurry form through pipelines of various diameters. Saskatchewan Research Council Report E76-13, 1978.
- Mohinder, L. Nayyar. Piping Handbook. Seventh Edition. United State of America : The McGraw-Hill, 1997.
- Nigel, P. Brown, Nigel, I. Heywood. Design of Solid-Liquid System. Great Britain : Elsevier Science Publishers, 1991.
- Novak, P., Nalluni, C. A study into the correlation of sediment motion in pipe flow. Hydrotransport Vol. 2 (1972) :
- Newitt, D.M. Hydraulic Conveying of Solid in Horizontal Pipes. Trans. Inst. Chem. Eng., Vol. 33/2 (1955) : 93–110.
- Robert, H. Perry, and Don, W. Green. Perry's Chemical Engineer Handbook. Seventh Edition. Singapore : The McGraw-Hill, 2000.
- Shook, C.A., Roco, M.C. Slurry Flow Principle and Practice. United State of America : Butterworth-Heinemann, 1991.
- Smith, F.L., B.S. Pilot Plant Experiences with Pipelines Carrying Mineral Slurries.

Hydrotransport Vol.1 Paper A2 (1970) : 13- 24.

Sabbagha, C.M. Practical Experiences in Pumping Slurries at ERGO,

Hydrotransport Vol. 8 Paper A1 (1982) : 1- 9.

Schriek, W. Experimental studies on the hydraulic transport of coal. Saskatchewan Research Council. Report V E73-17, 1973.

Turian, R.M., and Oroskar, A.R. The Critical Velocity in Pipeline Flow of Slurry. AIChE Journal 26 (1980) : 550-558.

Zandi, I. Advances in Solid-Liquid Flow in Pipes and its Application. Great Britain : Pergamon Press Ltd. First Edition, 1971.

Zandi, I., and Govatos, G. Heterogeneous Flow of Solid in Pipeline. Journal of the Hydraulics Division ASCE 93 HY3 (1967) : 145-159.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงคุณสมบัติท่อ

ข้อมูลจากภาคผนวก ค ในหนังสือ วิศวกรรมระบบท่ออุตสาหกรรม แต่งโดย นาวาอากาศโท
 ตระการ ก้าวกลิกรรม พิมพ์ครั้งที่ 1 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2544 สำนักพิมพ์ บริษัท เอ็มแอนดีอี
 จำกัด

DN (mm) (NPS)	PIPING CODES and MANUFACTURERS' WEIGHTS			DIMENSIONS			WEIGHTS		AREAS				Moment of Inertia (10 ⁷ mm ⁴)	Section Modulus (10 ³ mm ³)	Radius of Gyration (mm)	Continuous Spans		Code Pressures	
				O.D. (mm)	I.D. (mm)	Wall (mm)	Empty (kg/m)	Water filled (kg/m)	External (mm ² /mm)	Internal (mm ² /mm)	Flow (mm ² /mm)	Metal (mm ² /mm)				Span (m)	Sag (mm)	Design (MPa)	Bursting (MPa)
10 .375	SCH 40	STD	API	17.15	12.52	2.311	.8434	.9666	53.86	39.34	123.2	107.7	3.035	.3540	5.308	3.52	5.42	12.1	60.3
	SCH 80	XS	API	17.15	10.74	3.200	1.098	1.188	53.86	33.75	90.66	140.2	3.587	.4185	5.058	3.45	5.52	19.9	66.4
15 .500	SCH 40	STD	API	21.34	15.80	2.769	1.265	1.461	67.03	49.63	196.0	161.5	7.114	.6669	6.637	3.93	5.39	12.6	42.1
	SCH 80	XS	API	21.34	13.87	3.734	1.617	1.768	67.03	43.57	151.1	206.5	8.357	.7833	6.362	3.87	5.53	19.5	64.8
	SCH 160			21.34	11.79	4.775	1.945	2.054	67.03	37.03	109.1	248.4	9.225	.8648	6.094	3.77	5.43	27.5	91.6
			XS	API	21.34	6.401	7.468	2.548	2.580	67.03	20.11	32.18	325.4	10.09	.9458	5.569	3.52	4.96	52.1
20 .750	SCH 40	STD	API	26.67	20.93	2.870	1.680	2.024	83.79	65.75	344.0	214.6	15.42	1.156	8.475	4.39	5.17	9.14	30.5
	SCH 80	XS	API	26.67	18.85	3.912	2.190	2.469	83.79	59.21	279.0	279.7	18.64	1.398	8.164	4.37	5.48	14.8	49.2
	SCH 160			26.67	15.54	5.563	2.888	3.078	83.79	48.84	189.8	368.9	21.97	1.647	7.717	4.25	5.48	24.5	81.7
			XS	API	26.67	11.02	7.823	3.627	3.722	83.79	34.63	95.44	463.2	24.11	1.808	7.215	4.05	5.16	39.8
25 1.00	SCH 40	STD	API	33.40	26.64	3.378	2.495	3.052	104.9	83.71	557.6	318.6	36.35	2.177	10.68	4.91	5.08	8.77	29.2
	SCH 80	XS	API	33.40	24.31	4.547	3.227	3.691	104.9	76.37	464.1	412.1	43.96	2.632	10.33	4.91	5.43	13.8	45.9
	SCH 160			33.40	20.70	6.350	4.225	4.562	104.9	65.03	336.6	539.6	52.08	3.119	9.824	4.80	5.51	22.1	73.7
			XS	API	33.40	15.21	9.093	5.437	5.619	104.9	47.80	181.8	694.4	58.46	3.501	9.176	4.59	5.25	36.5
32 1.25	SCH 40	STD	API	42.16	35.05	3.556	3.377	4.342	132.5	110.1	965.0	431.3	81.04	3.844	13.71	5.47	4.75	7.03	23.4
	SCH 80	XS	API	42.16	32.46	4.851	4.453	5.280	132.5	102.0	827.6	568.7	100.6	4.774	13.30	5.52	5.26	11.3	37.7
	SCH 160			42.16	29.46	6.350	5.594	6.276	132.5	92.56	681.8	714.5	118.2	5.604	12.86	5.49	5.49	16.5	55.2
			XS	API	42.16	22.76	9.703	7.748	8.155	132.5	71.50	406.8	989.5	142.0	6.734	11.98	5.28	5.41	29.5
40 1.50	SCH 40	STD	API	48.26	40.89	3.683	4.039	5.352	151.6	128.5	1313	515.8	129.0	5.346	15.81	5.81	4.54	6.46	21.5
	SCH 80	XS	API	48.26	38.10	5.080	5.396	6.536	151.6	119.7	1140	689.1	162.8	6.748	15.37	5.90	5.14	10.5	34.9
	SCH 160			48.26	33.99	7.137	7.220	8.127	151.6	106.8	907.1	922.1	200.8	8.321	14.76	5.88	5.48	16.7	55.7
			XS	API	48.26	27.94	10.16	9.522	10.14	151.6	87.78	613.1	1216	236.4	9.795	13.94	5.71	5.47	26.8
50 2.00	SCH 40	STD	API	60.32	52.50	3.912	5.428	7.593	189.5	164.9	2165	693.2	277.1	9.187	19.99	6.39	4.17	5.07	16.9
	SCH 80	XS	API	60.32	49.25	5.537	7.463	9.368	189.5	154.7	1905	953.1	361.3	11.98	19.47	6.57	4.91	8.72	29.1
			API	60.32	47.62	6.350	8.431	10.21	189.5	149.6	1781	1077	397.5	13.18	19.21	6.60	5.14	10.6	35.4
	SCH 160			60.32	42.85	8.738	11.09	12.53	189.5	134.6	1442	1416	484.6	16.07	18.50	6.58	5.47	16.4	54.7
		XS	API	60.32	38.18	11.07	13.42	14.56	189.5	119.9	1145	1713	545.8	18.10	17.85	6.48	5.52	22.5	75.0

Thru DN 250, wall thicknesses for SCH 40S and SCH 80S stainless steel pipes are the same as for SCH 40 and SCH 80 carbon steel pipes

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงความหนืดของน้ำ (หน่วยเมตริก)

อุณหภูมิ องศาเซลเซียส	ความหนืด กก./ม-วินาที	อุณหภูมิ องศาเซลเซียส	ความหนืด กก./ม-วินาที
1	0.00173	28	0.00084
2	0.00167	29	0.00082
3	0.00162	30	0.00080
4	0.00157	31	0.00078
5	0.00152	32	0.00077
6	0.00147	33	0.00075
7	0.00143	34	0.00074
8	0.00139	35	0.00072
9	0.00135	36	0.00071
10	0.00131	37	0.00069
11	0.00127	38	0.00068
12	0.00124	39	0.00067
13	0.00120	40	0.00066
14	0.00117	41	0.00064
15	0.00114	42	0.00063
16	0.00111	43	0.00062
17	0.00108	44	0.00061
18	0.00106	45	0.00060
19	0.00103	46	0.00059
20	0.00100	47	0.00058
21	0.00098	48	0.00057
22	0.00096	49	0.00056
23	0.00094	50	0.00055
24	0.00091	51	0.00054
25	0.00089	52	0.00053
26	0.00087	53	0.00052
27	0.00085	54	0.00051

ตารางแสดงความหนืดของน้ำ (หน่วยอังกฤษ)

อุณหภูมิ	ความหนืด	อุณหภูมิ	ความหนืด
องศาเซลเซียส	ปอนด์/ฟุต-วินาที	องศาเซลเซียส	ปอนด์/ฟุต-วินาที
1	0.0011632	28	0.0005617
2	0.0011246	29	0.0005497
3	0.0010881	30	0.0005381
4	0.0010534	31	0.0005268
5	0.0010206	32	0.0005160
6	0.0009894	33	0.0005055
7	0.0009597	34	0.0004953
8	0.0009314	35	0.0004855
9	0.0009044	36	0.0004760
10	0.0008787	37	0.0004668
11	0.0008542	38	0.0004578
12	0.0008307	39	0.0004492
13	0.0008083	40	0.0004408
14	0.0007868	41	0.0004326
15	0.0007662	42	0.0004247
16	0.0007465	43	0.0004171
17	0.0007276	44	0.0004096
18	0.0007094	45	0.0004024
19	0.0006920	46	0.0003954
20	0.0006752	47	0.0003885
21	0.0006591	48	0.0003819
22	0.0006436	49	0.0003755
23	0.0006287	50	0.0003692
24	0.0006143	51	0.0003631
25	0.0006004	52	0.0003571
26	0.0005870	53	0.0003514
27	0.0005742	54	0.0003457

ตารางแสดงค่าพิกัดของของไหล

PHYSICAL AND CHEMICAL DATA

Viscosities of Liquids: Coordinates for Use with Fig. 2-33

Liquid	X	Y	Liquid	X	Y
Acetaldehyde	15.2	4.8	Freon-113	12.5	11.4
Acetic acid, 100%	12.1	14.2	Glycerol, 100%	2.0	30.0
Acetic acid, 70%	9.5	17.0	Glycerol, 50%	6.9	19.6
Acetic anhydride	12.7	12.8	Heptane	14.1	8.4
Acetone, 100%	14.5	7.2	Hexane	14.7	7.0
Acetone, 35%	7.9	15.0	Hydrochloric acid, 31.5%	13.0	16.6
Acetonitrile	14.4	7.4	Iodobenzene	12.8	15.9
Acrylic acid	12.3	13.9	Isobutyl alcohol	7.1	18.0
Allyl alcohol	10.2	14.3	Isobutyric acid	12.2	14.4
Allyl bromide	14.4	9.6	Isopropyl alcohol	8.2	16.0
Allyl iodide	14.0	11.7	Isopropyl bromide	14.1	9.2
Ammonia, 100%	12.6	2.0	Isopropyl chloride	13.9	7.1
Ammonia, 26%	10.1	13.9	Isopropyl iodide	13.7	11.2
Amyl acetate	11.8	12.5	Kerosene	10.2	16.9
Amyl alcohol	7.5	18.4	Linseed oil, raw	7.5	27.2
Aniline	8.1	15.7	Mercury	18.4	16.4
Anisole	12.3	13.5	Methanol, 100%	12.4	10.5
Arsenic trichloride	13.9	14.5	Methanol, 90%	12.3	11.8
Benzene	12.5	10.9	Methanol, 40%	7.8	15.5
Brine, CaCl ₂ , 25%	6.6	15.9	Methyl acetate	14.2	8.2
Brine, NaCl, 25%	10.2	16.6	Methyl acrylate	13.0	9.5
Bromine	14.2	13.2	Methyl <i>i</i> -butyrate	12.3	9.7
Bromotoluene	20.0	15.9	Methyl <i>n</i> -butyrate	13.2	10.3
Butyl acetate	12.3	11.0	Methyl chloride	15.0	3.8
Butyl acrylate	11.5	12.6	Methyl ethyl ketone	15.9	8.6
Butyl alcohol	8.6	17.2	Methyl formate	14.2	7.5
Butyric acid	12.1	15.3	Methyl iodide	14.3	9.3
Carbon dioxide	11.6	0.3	Methyl propionate	13.5	9.0
Carbon disulfide	16.1	7.5	Methyl propyl ketone	14.3	9.5
Carbon tetrachloride	12.7	13.1	Methyl sulfide	15.3	6.4
Chlorobenzene	12.3	12.4	Naphthalene	7.9	18.1
Chloroform	14.4	10.2	Nitric acid, 95%	12.8	13.8
Chlorosulfonic acid	11.2	15.1	Nitric acid, 60%	10.8	17.0
Chlorotoluene, ortho	13.0	13.3	Nitrobenzene	10.6	16.2
Chlorotoluene, meta	13.3	12.5	Nitrogen dioxide	12.9	8.6
Chlorotoluene, para	13.3	12.5	Nitrotoluene	11.0	17.0
Cresol, meta	2.5	20.8	Octane	13.7	10.0
Cyclohexanol	2.9	24.3	Octyl alcohol	6.6	21.1
Cyclohexane	9.8	12.9	Pentachloroethane	10.9	17.3
Dibromomethane	12.7	15.8	Pentane	14.9	5.2
Dichloroethane	13.2	12.2	Phenol	6.9	20.8
Dichloromethane	14.6	8.9	Phosphorus tribromide	13.8	16.7
Diethyl ketone	13.5	9.2	Phosphorus trichloride	16.2	10.9
Diethyl oxalate	11.0	16.4	Propionic acid	12.8	13.8
Diethylene glycol	5.0	24.7	Propyl acetate	13.1	10.3
Diphenyl	12.0	15.3	Propyl alcohol	9.1	16.5
Dipropyl ether	13.2	8.6	Propyl bromide	14.5	9.6
Dipropyl oxalate	10.3	17.7	Propyl chloride	14.4	7.5
Ethyl acetate	13.7	9.1	Propyl formate	13.1	9.7
Ethyl acrylate	12.7	10.4	Propyl iodide	14.1	11.6
Ethyl alcohol, 100%	10.5	13.8	Sodium	16.4	13.9
Ethyl alcohol, 95%	9.8	14.3	Sodium hydroxide, 50%	3.2	25.8
Ethyl alcohol, 40%	6.5	16.6	Stannic chloride	13.5	12.8
Ethyl benzene	13.2	11.5	Succinonitrile	10.1	20.8
Ethyl bromide	14.5	8.1	Sulfur dioxide	15.2	7.1
2-Ethyl butyl acrylate	18.2	14.0	Sulfuric acid, 110%	7.2	27.4
Ethyl chloride	14.8	6.0	Sulfuric acid, 100%	8.0	25.1
Ethyl ether	14.5	5.3	Sulfuric acid, 98%	7.0	24.8
Ethyl formate	14.2	8.4	Sulfuric acid, 60%	10.2	21.3
2-Ethyl hexyl acrylate	9.0	15.0	Sulfuryl chloride	15.2	12.1
Ethyl iodide	14.7	10.3	Tetrachloroethane	11.9	15.7
Ethyl propionate	13.2	9.9	Thiophene	13.2	11.0
Ethyl propyl ether	14.9	7.0	Titanium tetrachloride	14.1	12.3
Ethyl sulfide	13.8	8.9	Toluene	13.7	10.4
Ethylene bromide	11.9	15.7	Trichloroethylene	14.8	10.5
Ethylene chloride	12.7	12.2	Triethylene glycol	4.7	24.8
Ethylene glycol	6.0	23.6	Turpentine	11.5	14.9
Ethylene chloride	14.1	8.7	Vinyl acetate	14.0	8.8
Fluorobenzene	13.7	10.4	Vinyl toluene	13.4	13.0
Formic acid	10.7	13.8	Water	10.2	13.0
Freon-11	14.4	9.0	Xylene, ortho	13.5	12.1
Freon-12	16.8	5.6	Xylene, meta	13.9	10.6
Freon-21	15.7	7.5	Xylene, para	13.9	10.9
Freon-22	17.2	4.7			

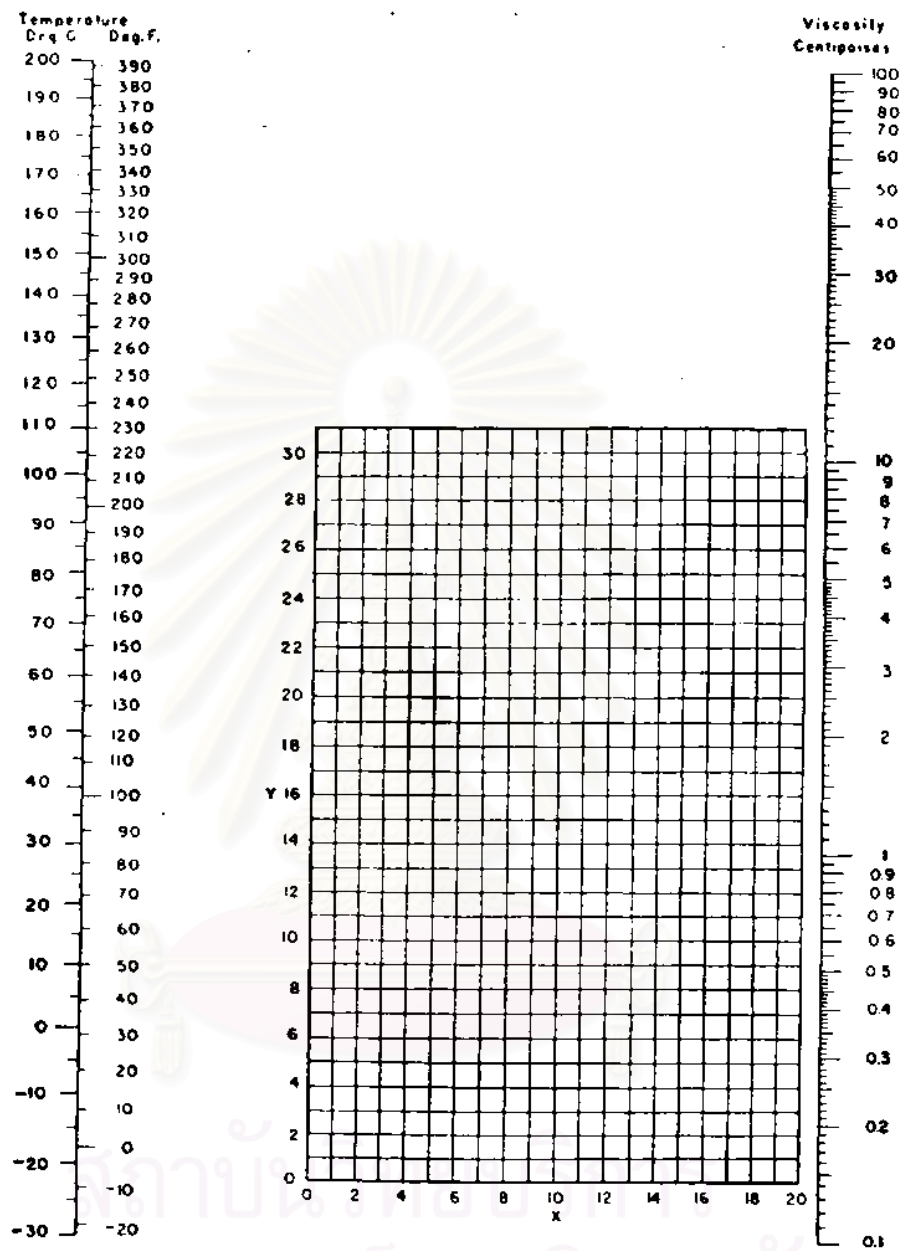


FIG. 2-33 Nomograph for viscosity of liquids at 1 atm. For coordinates see Table 2-95. If units of centipoises to pound seconds, multiply by 0.001.

รูปภาพแสดงความหนืดของของไหล ที่ 1 atm

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงความหนาแน่นของน้ำ (หน่วยเมตริก)

อุณหภูมิ	ความหนาแน่น	อุณหภูมิ	ความหนาแน่น
องศาเซลเซียส	กก./ม.3	องศาเซลเซียส	กก./ม.3
1	1000.2216	28	996.2261
2	1000.2064	29	995.9452
3	1000.1804	30	995.6555
4	1000.1435	31	995.3572
5	1000.0959	32	995.0503
6	1000.0377	33	994.7349
7	999.9689	34	994.4111
8	999.8896	35	994.0790
9	999.8000	36	993.7387
10	999.7000	37	993.3901
11	999.5898	38	993.0335
12	999.4694	39	992.6689
13	999.3389	40	992.2963
14	999.1984	41	991.9159
15	999.0480	42	991.5277
16	998.8878	43	991.1319
17	998.7178	44	990.7284
18	998.5381	45	990.3174
19	998.3488	46	989.8989
20	998.1500	47	989.4731
21	997.9417	48	989.0400
22	997.7241	49	988.5996
23	997.4972	50	988.1522
24	997.2611	51	987.6976
25	997.0158	52	987.2361
26	996.7615	53	986.7678
27	996.4983	54	986.2926

ตารางแสดงความหนาแน่นของน้ำ (หน่วยอังกฤษ)

อุณหภูมิ องศาเซลเซียส	ความหนาแน่น ปอนด์/ฟุต3	อุณหภูมิ องศาเซลเซียส	ความหนาแน่น ปอนด์/ฟุต3
1	62.4418	28	62.1924
2	62.4409	29	62.1748
3	62.4392	30	62.1568
4	62.4369	31	62.1381
5	62.4340	32	62.1190
6	62.4303	33	62.0993
7	62.4260	34	62.0791
8	62.4211	35	62.0583
9	62.4155	36	62.0371
10	62.4092	37	62.0153
11	62.4024	38	61.9931
12	62.3948	39	61.9703
13	62.3867	40	61.9470
14	62.3779	41	61.9233
15	62.3685	42	61.8991
16	62.3585	43	61.8744
17	62.3479	44	61.8492
18	62.3367	45	61.8235
19	62.3249	46	61.7974
20	62.3125	47	61.7708
21	62.2995	48	61.7438
22	62.2859	49	61.7163
23	62.2717	50	61.6883
24	62.2570	51	61.6600
25	62.2417	52	61.6312
26	62.2258	53	61.6019
27	62.2094	54	61.5722

ภาคผนวก ง

โปรแกรมการคำนวณ (Source Code)

```

Option Explicit

Public Rst As Single, D As Single, hl As Single, sec As Single
Public Cv As Single, Vop As Single, Vc As Single, Vt As Single
Public Rep As Single, CD As Single, ff As Single, hs As Single
Private Sub Command1_Click()

Form3.Visible = True

Form3.Text13.Text = Form2.Text9.Text
Form3.Text14.Text = Form2.Text10.Text
Form3.Text15.Text = Form2.Text11.Text
Form3.Text16.Text = Form2.Text12.Text
Form3.Text17.Text = Form2.Text13.Text
Form3.Text18.Text = Form2.Text14.Text
Form3.Text19.Text = Form2.Text15.Text
Form3.Text20.Text = Form2.Text16.Text

Dim dps As Single, sgp As Single, denl As Single, vil As Single, Re As Single
Dim A As Single, Vs As Single, B As Single, f As Single, denf As Single
Dim Vip As Single, Repp As Single, K1 As Single, K2 As Single, eps As Single
Dim C As Single, w As Single, E As Single, fff As Single, dens As Single
Dim K3 As Single, K4 As Single, K5 As Single, sph As Single, g As Single
Dim dt() As String, xt() As String, dd(1 To 12) As String, xx(1 To 12) As String
Dim cdd(1 To 12) As Single, dpss As Single, dpsavg As Single, dpst As String
Dim xtext As String, i As Integer, j As Integer, m As Integer, n As Integer
Dim sum_x As Single, z As Integer, k As Integer, xr As String, dr As String
'Dim CD As Single

'dps : particle size diameter           'dens : particle specific gravity
'sph : sphericity shape factor         'Rst : solid transportation rate
'denl : liquid density                 'vil : liquid viscosity
'D : pipe size diameter                'eps : pipe wall roughness

```

'Cv : volume solid fraction 'Vip : input operating velocity
 'Vop : selected operating velocity 'Vc : critical(min) operating velocity
 'Vt : particle terminal velocity 'Rep : particle Reynolds number
 'Re : flow Reynolds number 'CD : drag coefficient
 'ff : friction factor 'hs : slurry pressure loss
 'hl : carrier fluid head-loss 'sec : specific energy consumption
 'Input Basic Properties Data 'dps = Val(Text2.Text)

dpst = Text2.Text + "," xtext = Text18.Text + ","
 dens = Val(Text1.Text) denl = Val(Text4.Text)
 vil = Val(Text5.Text) D = Val(Text7.Text)
 Vip = Val(Text3.Text) Cv = Val(Text6.Text)
 eps = Val(Text8.Text) sph = Val(Text17.Text)

'Calculation of Drag Coefficient

dt = Split(dpst, ",", -1, vbTextCompare)

i = 0

dr = ""

Do While dt(i) <> ""

 j = i + 1

 dd(j) = dt(i)

 dr = dr + dd(j)

 i = i + 1

Loop

xt = Split(xtext, ",", -1, vbTextCompare)

m = 0

xr = ""

Do While xt(m) <> ""

 n = m + 1

 xx(n) = xt(m)

 xr = xr + xx(n)


```

m = m + 1
Loop
If i = m Then
  If j = n Then
    sum_x = 0
    For k = 1 To n
sum_x = sum_x + Val(xx(k))
    Next k
  End If
End If
If sum_x = 1 Then
If Option1.Value = True Then
g = 9.81
Else
g = 32.2
End If
For z = 1 To n
dpss = Val(dd(z))
K1 = 0.843 * 0.43398 * Log(sph / 0.065)
Vt = K1 * g * dpss ^ 2 * (dens - denl) / 18 / vil
Rep = denl * Vt * dpss / vil
If Rep <= 1 Then
cdd(z) = 24 / Rep
Else
K3 = 5.32 - 4.88 * sph
Vt = (4 * g * dpss * (dens - denl) / 3 / K3 / denl) ^ 0.5
Rep = denl * Vt * dpss / vil
If Rep >= 1000 Then
cdd(z) = 5.32 - 4.88 * sph
Else

```

```

K2 = 0.843 * 0.43398 * Log(sph / 0.065)
Vt = 0.153 * K2 * (g * dpss ^ 1.6 * (dens - denl) / vil ^ 0.6 / denl ^ 0.4) ^ 0.714
Rep = denl * Vt * dpss / vil
If (Rep < 1000) And (Rep > 1) Then
  cdd(z) = (24 / Rep) * (1 + 0.14 * Rep ^ 0.7)
End If
End If
End If
Next z
dpsavg = 0
CD = 0
For j = 1 To n
  CD = CD + (Val(xx(j)) * cdd(j))
  dpsavg = dpsavg + (Val(dd(j)) * Val(xx(j)))
  dps = dpsavg
Next j
End If
'PRESSURE LOSS CALCULATION PORTION
'Calculation of Criticle Operating Velocity
If (Cv <= 0.42) And (D <= 0.1541) And dps <= 0.002 Then
  Repp = D * denl * ((g * dps * (dens / denl - 1)) ^ 0.5) / vil
  'Hindered effect
  Vs = Vt * (1 - Cv) ^ 2
  C = (g * dps * (dens / denl - 1)) ^ 0.5
  Vc = 1.85 * Cv ^ 0.1536 * (1 - Cv) ^ 0.3564 * (D / dps) ^ 0.378 * (Repp ^ 0.09) * C
  w = Vs / Vc
Else
  If (Cv <= 0.44) And (D <= 0.5) And dps < 0.05 Then
    K4 = (vil / denl) ^ (2 / 3) / g ^ (1 / 3) / dps
    K5 = (K4 - 0.14) ^ 2

```

```

f = Exp(0.51 - 0.0073 * CD - 12.5 * K5)
Vc = f * (g * D * (dens / denl - 1)) ^ 0.5
Else
Vc = (40 * g * D * Cv * (dens / denl - 1) / CD ^ 0.5) ^ 0.5
End If
End If
'Calculation Flow Reynolds Number
Vop = Vip
Re = denl * Vop * D / vil
'Calculation of Friction Factor
For fff = 0.008 To 0.1 Step 0.0001
A = -2 * 0.43429448190328 * Log(eps / (3.71 * D) + 2.51 / (Re * (fff ^ 0.5)))
B = 1 / (fff ^ 0.5)
If Abs((A - B)) < 0.001 Then
ff = fff
End If
Next fff
'Calculation of carrier fluid head-loss
hl = ff * (Vop ^ 2) / 2 / D / g
'Calculation of Slurry Headloss
If Vip <= 17 * Vt Then
hs = hl + hl * Cv * 66 * g * (dens / denl - 1) * D / (Vop ^ 2)
Else
If (Cv <= 0.35) And (D <= 0.5) Then
hs = hl + hl * Cv * 81 * (g * (dens / denl - 1) * D / (Vop ^ 2) / (CD ^ 0.5)) ^ 1.5
Else
If g * D * (dens / denl - 1) / (Vop ^ 2) / (CD ^ 0.5) < 0.1 Then
hs = hl + hl * Cv * 6.3 * (g * (dens / denl - 1) * D / (Vop ^ 2) / (CD ^ 0.5)) ^ 0.354
Else
hs = hl + hl * Cv * 280 * (g * (dens / denl - 1) * D / (Vop ^ 2) / (CD ^ 0.5)) ^ 1.93

```

```

End If
End If
End If
Rst = 22 * (D ^ 2) * Vop * Cv * dens * 3600 / 28 / 1000
sec = 2725 * hs / dens / Cv
'End If

```

OPTIMUM DESIGN CALCULATION PORTION

```

SECmin = 100
For Cv = 0.01 To 0.5 Step 0.001
Qs = 1000 * Rst / (3600 * dens * Cv)
For D = 0.025 To 0.6 Step 0.025
Vop = 4 * 7 * Qs / (22 * (D ^ 2))
'Calculation of Criticle Operating Velocity
If (Cv <= 0.42) And (D <= 0.1541) And dps <= 0.002 Then
Repp = D * denl * ((g * dps * (dens / denl - 1)) ^ 0.5) / vil
C = (g * dps * (dens / denl - 1)) ^ 0.5
Vc = 1.85 * Cv ^ 0.1536 * (1 - Cv) ^ 0.3564 * (D / dps) ^ 0.378 * (Repp ^ 0.09) * C
'Else
If (Cv <= 0.44) And (D <= 0.5) And dps < 0.05 Then
K4 = (vil / denl) ^ (2 / 3) / g ^ (1 / 3) / dps
K5 = (K4 - 0.14) ^ 2
f = Exp(0.51 - 0.0073 * CD - 12.5 * K5)
Vc = f * (g * D * (dens / denl - 1)) ^ 0.5
Else
Vc = (40 * g * D * Cv * (dens / denl - 1) / CD ^ 0.5) ^ 0.5
End If
If Vop > Vc Then
'Calculation Flow Reynolds Number
Re = denl * Vop * D / vil

```

'Calculation of Friction Factor

For fff = 0.008 To 0.1 Step 0.0001

$A = -2 * 0.43429448190328 * \text{Log}(\text{eps} / (3.71 * D) + 2.51 / (\text{Re} * (\text{fff} ^ 0.5)))$

$B = 1 / (\text{fff} ^ 0.5)$

If Abs((A - B)) < 0.001 Then

ff = fff

End If

Next fff

'Calculation of carrier fluid head-loss

$h_l = \text{ff} * (\text{Vop} ^ 2) / 2 / D / g$

'Calculation of Slurry Headloss

If (Cv <= 0.35) And (D <= 0.550) Then

$h_s = h_l + h_l * \text{Cv} * 81 * (g * (\text{dens} / \text{denl} - 1) * D / (\text{Vop} ^ 2) / (\text{CD} ^ 0.5)) ^ 1.5$

Else

If $g * D * (\text{dens} / \text{denl} - 1) / (\text{Vop} ^ 2) / (\text{CD} ^ 0.5) < 0.1$ Then

$h_s = h_l + h_l * \text{Cv} * 6.3 * (g * (\text{dens} / \text{denl} - 1) * D / (\text{Vop} ^ 2) / (\text{CD} ^ 0.5)) ^ 0.354$

Else

$h_s = h_l + h_l * \text{Cv} * 280 * (g * (\text{dens} / \text{denl} - 1) * D / (\text{Vop} ^ 2) / (\text{CD} ^ 0.5)) ^ 1.93$

End If

End If

$\text{sec} = 2725 * h_s / \text{dens} / \text{Cv}$

If sec < SECmin Then

SECmin = sec

Dop = D

Cvop = Cv

Vopt = Vop

End If

End If

End If

Next D

```

Next Cv
Form3.Text1.Text = Str(Rep)  Form3.Text2.Text = Str(CD)
Form3.Text3.Text = Str(Vt)   Form3.Text4.Text = Str(Vop)
Form3.Text5.Text = Str(Vc)   Form3.Text6.Text = Str(ff)
Form3.Text7.Text = Str(hl)   Form3.Text8.Text = Str(D)
Form3.Text9.Text = Str(Cv)   Form3.Text10.Text = Str(hs)
Form3.Text11.Text = Str(Rst) Form3.Text12.Text = Str(sec)
End Sub
Private Sub Command2_Click()
Unload Form2
End Sub
Private Sub Option1_Click() 'Metric Unit
Label3.Caption = "kg/m3"      Label5.Caption = "m"
Label10.Caption = "kg/m3"    Label12.Caption = "kg/m-sec"
Label18.Caption = "m"       Label19.Caption = "m"
Label16.Caption = "m/s"     Form3.Label19.Caption = "m/s"
Form3.Label10.Caption = "m/s" Form3.Label22.Caption = "m/s"
Form3.Label15.Caption = "m water/m" Form3.Label11.Caption = "m"
Form3.Label13.Caption = "m water/m" Form3.Label18.Caption = "tons/hr"
Form3.Label14.Caption = "Kw-hr/ton-km"
End Sub

```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเชาว์ ไตรทิพย์ชาติสกุล เกิดวันที่ 12 เมษายน พ.ศ. 2510 ที่จังหวัดกำแพงเพชร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2535 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานที่ บริษัท เอ็นเคเค วิศวกรรม ประเทศไทย จำกัด ในตำแหน่ง วิศวกรประจำสำนักงาน มีหน้าที่ เป็นผู้ช่วยวิศวกรอาวุโส ทำงานทางด้านวิศวกรรมของระบบท่อขนถ่ายของไหล ได้แก่ น้ำ น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ต่อมา ในปี พ.ศ. 2542 ได้เข้าศึกษาต่อปริญญาโท ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และปัจจุบัน ทำงาน ในตำแหน่ง วิศวกรโครงการ บริษัท เอ็นเคเค วิศวกรรม ประเทศไทย จำกัด มีหน้าที่ ประเมินราคาโครงการ จัดซื้อ จัดจ้าง ทำสัญญา รวมถึงงานทางด้านวิศวกรรมทั่วไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย