

แบบจำลองเชิงประจักษ์ขนาดความหนาของฟิล์มของเหลวของการไหลแบบวงแหวนระหว่างแก๊สและ  
ของเหลวในท่อแนวตั้ง



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2560  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Empirical modeling of liquid film thickness in vertical annular gas-liquid flow.



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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แบบจำลองเชิงประจักษ์ขนาดความหนาของฟิล์ม  
ของเหลวของการไหลแบบวงแหวนระหว่างแก๊สและ  
ของเหลวในท่อแนวตั้ง

โดย

นางสาวเนตรชนก เทียบสี

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร.สร้อย ศาลากิจ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร.สร้อย ศาลากิจ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธรรมานิช)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ปภัทสรณ์ พุ่งธรรมสาร)

เนตรชนก เทียบสี : แบบจำลองเชิงประจักษ์ขนาดความหนาของฟิล์มของเหลวของการไหลแบบวงแหวนระหว่างแก๊สและของเหลวในท่อแนวตั้ง (Empirical modeling of liquid film thickness in vertical annular gas-liquid flow.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.สร้อย ศาลากิจ, 73 หน้า.

This thesis establish a database of experimental results of liquid film thickness in vertical annular flow. A total of 8 experimental results were collected from different experimental groups, which measured the liquid film thickness covering the conditions of annular flow. And propose a mathematical model to predict the liquid film thickness in the vertical annular flow.

Annular flow is described as high velocity of gas flow in pipe center and liquid is flowing low velocity around pipe wall. When the velocity of gas is very high, interfacial shear stress increases and shear the surface of fluid drops into gas core flow. Annular flow is more efficient of heat transfer than other types of flow. The high heat transfer efficient occurs when the transition from liquid to gas. Annular flow has liquid film thickness that affects heat transfer efficiency. When thin liquid film thickness affects good heat transfer performance. But if the liquid film thickness is too thin to evaporate, all the gas will cause little or no heat transfer.

The comparison of empirical and semi-empirical models to predict the liquid film thickness film under the database from 8 different experimental groups. The mean relative absolute error is 22.55% and 20.78%. Both of models predict the liquid film thickness better than other models under the created database conditions.

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

# # 5970229121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ANNULAR FLOW; TWO-PHASE FLOW; LIQUID FILM THICKNESS; MODELING; CORRELATION

NETCHANOK THIABSI: Empirical modeling of liquid film thickness in vertical annular gas-liquid flow.. ADVISOR: SARAN SALAKIJ, Ph.D., 73 pp.

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้สร้างฐานข้อมูลผลการทดลองของขนาดความหนาฟิล์มของเหลวในการไหลแบบวงแหวนในแนวตั้ง โดยทำการรวบรวมผลการทดลองทั้ง 8 ผลการทดลองจากต่างกลุ่มการทดลองที่ทำการวัดขนาดความหนาฟิล์มที่ครอบคลุมเงื่อนไขของการไหลแบบวงแหวน และเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายขนาดความหนาฟิล์มในการไหลแบบวงแหวนในท่อแนวตั้ง

การไหลแบบวงแหวน มีลักษณะการไหลของแก๊สไหลด้วยความเร็วสูงในแกนท่อ และการไหลของเหลวจะไหลด้วยความเร็วต่ำที่ผนังโดยรอบท่อ กรณีเมื่อความเร็วของแก๊สสูงมากจะทำให้แรงเฉือนระหว่างผิวสัมผัสของแก๊สและของเหลวเพิ่มมากขึ้นและตัดส่วนของผิวของของเหลวเป็นหยดของเหลวไหลไปในส่วนของแกนท่อ การไหลแบบวงแหวนจะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการไหลในแบบอื่น เพราะการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อเกิดการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวไปเป็นแก๊ส การไหลแบบวงแหวนจะมีฟิล์มของเหลวซึ่งขนาดความหนาฟิล์มของเหลวมีผลกับประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อน โดยที่ฟิล์มของเหลวบางจะช่วยให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดี แต่ถ้าฟิล์มบางเกินไปจนระเหยเป็นแก๊สทั้งหมดจะทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นน้อยมากหรือแทบไม่มี

ผลจากเปรียบเทียบแบบจำลองเชิงประจักษ์ทำนายขนาดความหนาฟิล์มกับฐานข้อมูลผลการทดลองวัดขนาดความหนาฟิล์มทั้ง 8 ผลการทดลองจากต่างกลุ่มการทดลอง พบว่ามีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 22.55% และผลจากเปรียบเทียบแบบจำลองเชิงประจักษ์ทำนายขนาดความหนาฟิล์มกับฐานข้อมูลผลการทดลองวัดขนาดความหนาฟิล์มทั้ง 8 ผลการทดลองจากต่างกลุ่มการทดลอง พบว่ามีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 20.78% ซึ่งทั้งสองแบบจำลองสามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์มของเหลวได้ดีกว่าแบบจำลองอื่น ภายใต้เงื่อนไขฐานข้อมูลที่สร้างขึ้น

Department: Mechanical Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.สร้อย ศาลากิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างมาก รวมไปถึงคอยช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น และคอยดูแลติดตามผลงานงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระยุทธ ศรีสุระวานิช และ ดร. ปภัสสร พึ่งธรรมสาร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์กับวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	3
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	3
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 การทดลองการไหลของของไหลสองเฟสท่อวงกลมแนวตั้ง.....	5
2.1.2 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ของขนาดความหนาของฟิล์มในการไหลแบบวงแหวน..	8
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
3.1 การไหลสองเฟส [27].....	15
3.2 รูปแบบการไหลชั้นในท่อแนวตั้ง.....	16
3.2.1 Bubbly flow.....	19
3.2.2 Slug flow.....	19
3.2.3 Churn flow.....	19
3.2.4 Annular flow.....	19
3.2.5 Wispy-annular flow.....	20

3.3 ประเภทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	20
3.4 พิจารณา Mechanistic model ของการไหลแบบวงแหวน (Annular flow) .....	21
3.4.1 Annular flow without entrainment .....	21
3.4.2 Annular flow with entrainment.....	24
บทที่ 4 การสร้างฐานข้อมูลผลการทดลอง .....	28
4.1 การเก็บรวบรวมผลการทดลองขนาดความหนาของฟิล์ม .....	28
4.2 สรุปผลการทดลองที่รวบรวม .....	33
บทที่ 5 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ศึกษาผ่านมา.....	35
บทที่ 6 พารามิเตอร์ที่มีผลกับขนาดความหนาฟิล์ม.....	44
6.1 พารามิเตอร์ที่มีผลกับขนาดความหนาฟิล์ม .....	44
6.1.1 ผลของความเร็วก๊าซและของเหลว .....	44
6.1.2 ผลของความหนาแน่น .....	48
6.1.3 ผลของความหนืดพลวัต.....	49
6.1.4 ผลของฟลักซ์เชิงมวล.....	50
6.2 สรุปพารามิเตอร์ไร้มิติที่ใช้สร้างแบบจำลอง.....	51
บทที่ 7 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	53
7.1 การสร้างแบบจำลองเชิงประจักษ์ของขนาดความหนาฟิล์ม .....	53
7.1.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง .....	53
7.1.2 แบบจำลองใหม่.....	55
7.1.3 การเปรียบเทียบแบบจำลองใหม่กับผลการทดลองที่รวบรวม.....	55
7.1.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองใหม่กับแบบจำลองอื่นๆ .....	56
7.1.5 สรุปแบบจำลองเชิงประจักษ์ใหม่.....	56



7.2 การสร้างแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ (Semi-Empirical model) ของขนาดความหนา ฟิล์ม .....	59
7.2.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง .....	60
7.2.2 แบบจำลองใหม่ .....	62
7.2.3 การเปรียบเทียบแบบจำลองใหม่กับผลการทดลองที่รวบรวม .....	62
7.2.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองใหม่กับแบบจำลองอื่นๆ .....	63
7.2.5 สรุปผลแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ใหม่ .....	65
บทที่ 8 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	66
8.1 สรุปผลงานวิจัย .....	66
8.2 ข้อเสนอแนะ .....	67
รายการอ้างอิง .....	68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	73

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	สรุปแบบจำลองคณิตศาสตร์ 7 แบบจำลองที่ศึกษาผ่านมา.....	14
ตารางที่ 2	สรุปการทดลองการวัดขนาดความหนาฟิล์มของการไหลแบบวงแหวนที่เก็บ รวบรวม.....	34
ตารางที่ 3	เฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแบบจำลองขนาดความหนาฟิล์มของการไหลแบบ วงแหวนเมื่อเทียบกับผลการทดลองในฐานข้อมูลที่สร้างขึ้น .....	43
ตารางที่ 4	พิสัยของพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม .....	52
ตารางที่ 5	แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแต่ละแบบจำลอง .....	57
ตารางที่ 6	สรุปจำนวนจุดผลการทดลองที่อยู่ภายใต้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 20%, 30% และ 40% ของแต่ละแบบจำลอง .....	58
ตารางที่ 7	แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแต่ละแบบจำลอง .....	64
ตารางที่ 8	สรุปจำนวนจุดผลการทดลองที่อยู่ภายใต้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 20%, 30% และ 40% ของแต่ละแบบจำลอง .....	65

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 ลักษณะการไหลของแก๊ส-ของเหลวในท่อกลมแนวตั้งไหลขึ้น (วาดใหม่โดยอ้างอิงจาก [27]).....	4
รูปที่ 2 แบบจำลองการไหลสองเฟสในท่อกลมเอียง (วาดใหม่โดยอ้างอิงจาก [27]) .....	15
รูปที่ 3 รูปแผนที่ลักษณะการไหลในท่อแนวตั้ง [27].....	18
รูปที่ 4 แบบจำลองการพิจารณาการไหลแบบวงแหวนแบบไม่มีหยดของเหลว .....	21
รูปที่ 5 รูปการเรียงตารางข้อมูล .....	28
รูปที่ 6 รูปโปรแกรม Data Thief.....	29
รูปที่ 7 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief.....	29
รูปที่ 8 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief.....	30
รูปที่ 9 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief.....	30
รูปที่ 10 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief.....	31
รูปที่ 11 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief.....	31
รูปที่ 12 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief.....	32
รูปที่ 13 รูปการเปิด Data ในโปรแกรมเอ็กซ์เซล.....	32
รูปที่ 14 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Henstock และ Hanratty.....	39
รูปที่ 15 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Tatterson และคณะ ....	40
รูปที่ 16 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Hori และคณะ .....	40
รูปที่ 17 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Fukano และ Furukawa .....	41
รูปที่ 18 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ MacGillivray .....	41
รูปที่ 19 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Berna และคณะ .....	42
รูปที่ 20 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Ju และคณะ .....	42

รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ของความเร็วสัมผัสของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของผลการทดลองของ Sawant .....	45
รูปที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของการทดลอง Ashwood และคณะ ที่เลขเรย์โนลด์ของเหลว 3058.8, 1835.3 และ 1223.5.....	46
รูปที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของการทดลอง Ashwood และคณะ ที่เลขเรย์โนลด์ของเหลว 3.6039, 1.2974 และ 0.5766.....	47
รูปที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขฟรูดของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของการทดลอง Ashwood และคณะ ที่เลขฟรูดของเหลว 0.198, 0.1188 และ 0.0792.....	48
รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ของความเร็วสัมผัสของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของผลการทดลองของ Sawant ที่ความดัน 1.2, 4 และ 6 bar.....	49
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ของความเร็วสัมผัสของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของผลการทดลองของ Fukano และ Furukawa ที่ความหนืด 0.8483, 3.784, 6.4344 และ 9.9674 mPa.s.....	50
รูปที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดความหนาฟิล์มกับเลขเรย์โนลด์ของแก๊สและอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อของเหลว.....	54
รูปที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดความหนาฟิล์มกับเลขเรย์โนลด์ของแก๊ส, อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อของเหลวและ Non-dimensional viscosity number .....	55
รูปที่ 29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดความหนาฟิล์มที่รวบรวมกับแบบจำลองใหม่.....	56
รูปที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ขนาดความหนาฟิล์มกับเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อของเหลว.....	61
รูปที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดความหนาฟิล์มกับเลขเรย์โนลด์ของแก๊ส, อัตราการไหลเชิงมวลและอัตราส่วนความหนืด .....	61
รูปที่ 32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดความหนาฟิล์มที่รวบรวมกับแบบจำลองใหม่.....	63

## บทที่ 1 บทนำ

ในบทนำนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่จะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

การไหลสองเฟสเป็นการไหลของของไหลสองสถานะไปพร้อมกัน ซึ่งสามารถจำแนกได้ 4 ประเภท คือ การไหลของแก๊ส-ของเหลว, แก๊ส-ของแข็ง, ของเหลว-ของเหลว และ ของเหลว-ของแข็ง

การไหลของแก๊ส-ของเหลว มีความซับซ้อนของรูปแบบการไหลมากที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการแรงตึงผิว (Interfacial tension force), ลักษณะการเปียก (Wetting characteristics) ของของเหลวบนผนัง และ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม (Momentum) ระหว่างแก๊สกับของเหลว โดยเฉพาะการไหลแบบวงแหวน (Annular flow) ที่เกิดขึ้นในหลากหลายอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น การระบายความร้อนด้วยน้ำของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (water-cooled nuclear reactors), เครื่องระเหย (evaporators), หม้อไอน้ำ (boilers), การแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchangers) และโรงงานปิโตรเคมี (petrochemical plants) เป็นต้น

การแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบเดือด (Boiling water reactor) และหม้อไอน้ำ การไหลแบบวงแหวนมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะนอกจากการไหลแบบวงแหวนจะเกิดขึ้นในส่วนของท่อในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบเดือดและหม้อไอน้ำแล้ว การไหลแบบวงแหวนยังมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูง เนื่องจากมีฟิล์มของของเหลว (Liquid film thickness) ไหลผ่านช่วยในการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัส การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อมีการเปลี่ยนเฟสของของไหล ในการถ่ายเทความร้อนจากผิวของท่อไปยังฟิล์มของของเหลวและเมื่อผิวของฟิล์มของของเหลวเปลี่ยนเป็นไอน้ำ จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากฟิล์มของของเหลวมายังไอน้ำ และไอน้ำจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เพื่อนำความร้อนออกจากท่อ ซึ่งเมื่อฟิล์มของของเหลวบางประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะดีกว่าฟิล์มของของเหลวที่หนา ในบางกรณีฟิล์มของของเหลวบางมากจนเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำหมดทั้งท่อเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Dryout หรือ Critical heat flux (CHF) เมื่อเกิดการปรากฏการณ์ Dryout จะเกิดการถ่ายเทความร้อนที่น้อยมากจนแทบไม่มีการถ่ายเทความร้อน เมื่อการถ่ายเทความร้อนมีน้อยมากจะทำให้แกนสร้างความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีการสร้างอัตราความร้อนสูงเกิด overheat แกนสร้างความร้อนเกิดความเสียหาย จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ขนาดความหนาฟิล์มเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมาก

ที่ส่งผลกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน เพื่อให้สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดที่เป็นไปได้ และเพื่อให้การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ดำเนินไปอย่างปลอดภัย ป้องกันไม่ให้เกิดปรากฏการณ์ Dryout จึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาพารามิเตอร์ขนาดความหนาฟิล์ม และสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายขนาดความหนาฟิล์ม

## 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายขนาดความหนาฟิล์ม (Liquid film thickness) ของการไหลรูปแบบวงแหวนในการไหลในท่อกลมแนวดิ่ง

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายขนาดความหนาฟิล์มของการไหลแบบวงแหวนในท่อหน้าตัดวงกลมในแนวดิ่ง กรณีไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ

1.3.2 ใช้ข้อมูลผลการทดลองที่แตกต่างกันอย่างน้อย 8 การทดลอง ที่วัดขนาดความหนาฟิล์มของของเหลวในท่อกลมแนวดิ่งเป็นพื้นฐาน

1.3.3 การทดลองเป็นการไหลของอากาศ-น้ำ, อากาศ-น้ำ/กลีเซอลอง และฮีเลียม-น้ำ

1.3.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 9.4-32 mm

1.3.5 ความเร็วการไหลของของเหลว 0.04-0.6m/s

1.3.6 ความเร็วการไหลของของแก๊ส 2-81 m/s

## 1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.4.1 เกิดความรู้และความเข้าใจในการไหลแบบวงแหวน (Annular flow) เข้าใจถึงหลักการของการเกิดการไหลแบบวงแหวน, ลักษณะ และ พารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องและมีผลกับการไหลแบบวงแหวน

1.4.2 เข้าใจพารามิเตอร์ขนาดความหนาฟิล์มในการไหลแบบวงแหวนในท่อหน้าตัดกลมในท่อแนวดิ่ง เข้าใจ ถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นกลไกทางฟิสิกส์ โดยขนาดความหนาฟิล์มมีผลมาจาก shear stress, Interfacial friction factor และ Reynolds number เป็นต้น

1.4.3 สามารถสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบเชิงประจักษ์ และกึ่งเชิงประจักษ์ เพื่อทำนายขนาดความหนาฟิล์มได้อย่างแม่นยำ ภายใต้เงื่อนไขฐานข้อมูลผลการทดลองที่รวบรวมทั้ง 8 ผลการทดลอง

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

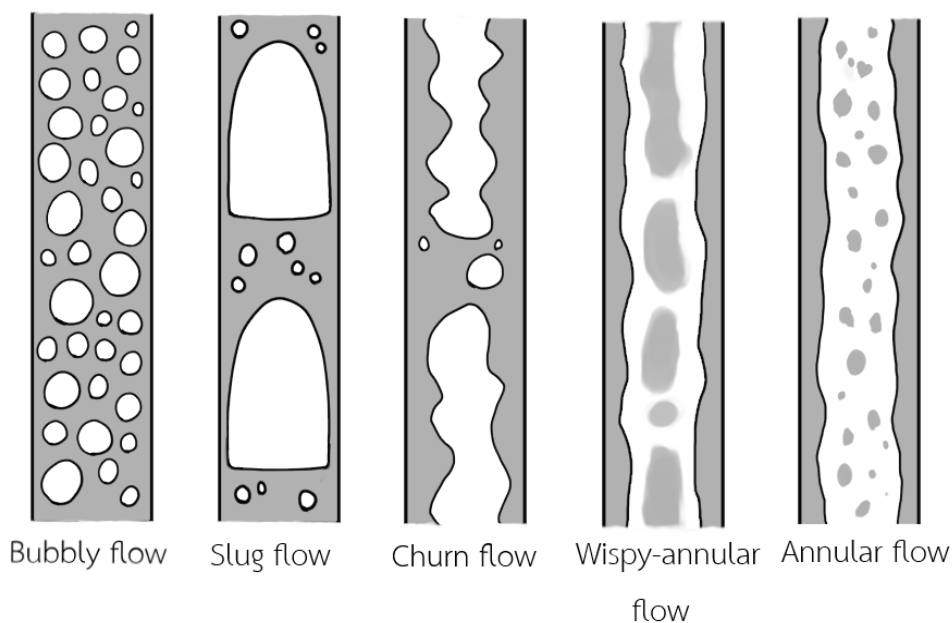
กิจกรรม	ต.๕9	ก.๕9	ค.๕9	พ.๕9	ธ.๕9	ม.๖0	ก.๖0	ธ.๖0	ม.๖0	พ.๖0	ค.๖0	ก.๖0	ธ.๖0	ม.๖0	พ.๖0	ค.๖0	ก.๖1	ธ.๖1	ม.๖1	พ.๖1		
1. ศึกษาวิจัยที่ผ่านมา	←	→																				
2. รวบรวมผลการทดลองของขนาดความหนาฟิล์มภายใต้แบบวงแหวนในท่อแนวตั้ง			←	→																		
3. เปรียบเทียบแบบจำลองทำนายขนาดความหนาฟิล์มที่ผ่านมากับผลการทดลองที่รวบรวมได้						←	→															
4. ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกับความหนาฟิล์ม										←	→											
5. พัฒนาแบบจำลองใหม่														←	→							
6. เขียนโครงร่างวิทยานิพนธ์												←	→									
7. เสนอโครงร่างวิทยานิพนธ์														↔								
8. วิเคราะห์และสรุปผล																		←	→			
9. เขียนรายงานและนำเสนอวิทยานิพนธ์																					←	→

## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 เป็นการศึกษางานวิจัยในอดีตที่ศึกษาเกี่ยวกับขนาดความหนาฟิล์มในการไหลแบบวงแหวน ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ประเภท คือ การทดลองเพื่อวัดขนาดความหนาฟิล์ม และการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายขนาดความหนาฟิล์ม

### 2.1 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การไหลสองเฟส (Two-phase flow) คือ การไหลของของไหลสองสถานะไปพร้อมกันภายในท่อ เช่น การไหลของน้ำกับอากาศ โดยการไหลสองเฟสจะมีประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการไหลเฟสเดียว (Single phase flow) เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อเกิดการเปลี่ยนเฟสของของไหล สามารถมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เคมี นิวเคลียร์ และปิโตรเลียม การไหลสองเฟสในท่อตรงแนวดิ่งจะแบ่งรูปแบบการไหลได้ 5 แบบ คือ Bubbly flow, Slug flow, Churn flow, Wispy-annular flow และ Annular flow ที่แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะการไหลของแก๊ส-ของเหลวในท่อกลมแนวดิ่งไหลขึ้น (วาดใหม่โดยอ้างอิงจาก [27])

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษากการไหลสองเฟสของการไหลของของเหลวกับแก๊สในลักษณะการไหลแบบวงแหวน (Annular flow) ในท่อกลมแนวดิ่ง ซึ่งการไหลแบบวงแหวนจะเป็นการไหลของของเหลวกับแก๊สโดยแบ่งชั้นการไหลอย่างชัดเจน โดยของเหลวจะไหลโดยรอบท่อเป็นฟิล์ม (Liquid film thickness) ด้วยความเร็วต่ำ และแก๊สจะไหลในส่วนตรงแกนของท่อด้วยความเร็วสูง



และสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายขนาดความหนาของฟิล์มในการไหลแบบวงแหวน ซึ่งขนาดความหนาของฟิล์มเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อผลของประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อน

ในอดีตมีผู้ศึกษาเกี่ยวกับขนาดความหนาของฟิล์มในการไหลแบบวงแหวนโดยการทดลองและการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1.1 การทดลองการไหลของของไหลสองเฟสท่อวงกลมแนวดิ่ง

Bousman และ McQuillen [1] ได้ทำการทดลองการไหลของของไหลแบบวงแหวนในสภาพไร้น้ำหนัก (Microgravity) โดยใช้ NASA Lewis Learjet ทำการทดลองวัดขนาดความหนาของฟิล์มในท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 mm ทดลองในของไหล 3 ชนิด คือ อากาศ-น้ำ อากาศ-น้ำ/กลีเซอริน (Glycerin) และ อากาศ-น้ำ/Zonyl โดยทดลองที่ความเร็วการไหลตามผิวของแก๊ส 5-25 m/s และความเร็วการไหลตามผิวของของเหลว 0.07-0.5 m/s ผลการทดลองของ อากาศ-น้ำ แนวโน้มขนาดความหนาของฟิล์มจะลดลง เมื่อความเร็วการไหลตามผิวของแก๊สเพิ่มขึ้น และความเร็วการไหลตามผิวของของเหลวลดลง รวมทั้งผลการทดลองของ อากาศ-น้ำ/กลีเซอริน และ อากาศ-น้ำ/Zonyl ขนาดความหนาของฟิล์ม มีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับการทดลองของ อากาศ-น้ำ แต่ขนาดความหนาของฟิล์มที่ ความเร็วการไหลตามผิวของแก๊ส และ ความเร็วการไหลตามผิวของของเหลวเดียวกัน ขนาดของฟิล์มจะใหญ่มากกว่าถึง 20-30% และ 40-50% ตามลำดับ

Fukano และ Furukawa [2] ทำการทดลองหาผลกระทบของความหนืดของของไหลบนความหนาของฟิล์ม, ความสูงของคลื่น (Wave height) และความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส (Interfacial shear stress) ในท่อแนวดิ่งของการไหลแบบวงแหวนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 26 mm ของไหลที่ใช้ทดลองมี 2 ชนิดคือ น้ำ และกลีเซอรอล (Glycerol) โดยกำหนดให้ความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) ของของไหลอยู่ระหว่าง  $0.85 \times 10^{-6}$  ถึง  $8.6 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s การกำหนดค่าความหนืดพลวัตได้จากการผสมน้ำกับกลีเซอรอลเข้าด้วยกัน จะคิดการผสมเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 3 ระดับคือ 45%, 53% และ 60% ผลการทดลอง เมื่อความหนืดของของไหลเพิ่มขึ้น ค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial friction factor) จะมีแนวโน้มลดลง และขนาดความหนาของฟิล์มจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ของแก๊สเดียวกัน จากการนำเสนอวิธีทำนายค่าความดันลดลงจากแรงต้านทาน (frictional pressure drop) โดยผลมีค่าความแม่นยำตรงกับผลการทดลองบวกลบ 20 เปอร์เซ็นต์

Gill และคณะ [3] ศึกษาผลของอัตราการไหลที่มีผลกับเฟสและการกระจายตัวของความเร็ว โดยทำการทดลองการไหลของอากาศกับน้ำในท่อกลมแนวดิ่ง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1.25

นี้ว โดยการไหลเป็นการไหลแบบวงแหวน การทดลองโดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศอยู่ระหว่าง 100-700 ปอนด์/ชั่วโมง และอัตราการไหลของน้ำอยู่ระหว่าง 30-1250 ปอนด์/ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ขนาดความหนาฟิล์มมีแนวโน้มลดลง ในอีกทางเมื่อ อัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ขนาดความหนาฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

MacGillivray [4] ทำการทดลองการไหลสองเฟสแบบวงแหวนในท่อตรงแนวตั้ง ภายใต้ความดัน และอุณหภูมิห้อง ในการทดลองทดลองการไหลของอากาศ-น้ำ และฮีเลียม-น้ำ ทำการไหลในท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 mm พิจารณาผลของความหนาแน่นของแก๊ส และความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม และความดันลด การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สจากการทดลองของ อากาศกับน้ำ และฮีเลียมกับน้ำ การเปลี่ยนแปลงความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจากการทดลองที่ความดันบรรยากาศ (normal gravity), microgravity และ hypergravity โดยการทดสอบจากบนเครื่องบินและที่ภาคพื้น พิสัยของการทดลอง กำหนดให้ mass flux ของของเหลวระหว่าง 76-314  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ , mass flux ของอากาศระหว่าง 14.3-47.7  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  และ mass flux ของฮีเลียมระหว่าง 5-11.6  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  ผลจากการทดสอบพบว่า ขนาดความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วการไหลตามผิวสัมผัสของของเหลวเพิ่มขึ้น และเมื่อความเร็วการไหลตามผิวสัมผัสของแก๊สลดลง เมื่อพิจารณาการลดลงของผลเนื่องจากความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจะส่งผลให้ขนาดความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น และความดันลดจะลดลง

Sawant [5] ทำการทดลองการไหลแบบวงแหวนในท่อกลมแนวตั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.4 mm ในการทดลองใช้อากาศ-น้ำ ทดลองภายใต้ความดันระหว่าง 1.2-6 bar กำหนดให้ความเร็วการไหลตามผิวของของเหลวระหว่าง 0.05-0.5 m/s และความเร็วการไหลตามผิวของแก๊สระหว่าง 15-100 m/s การทดลอง organic fluid (Freon-113) ภายใต้ความดันระหว่าง 3-8.5 bar กำหนดให้ความเร็วการไหลตามผิวของของเหลวระหว่าง 0.08-0.4 m/s และความเร็วการไหลตามผิวของแก๊สระหว่าง 6-24 m/s จากการทดลองพบว่า ขนาดความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วการไหลตามผิวสัมผัสของของเหลวเพิ่มขึ้น และเมื่อความเร็วการไหลตามผิวสัมผัสของแก๊สลดลง ในการทดลองผลของอากาศ-น้ำ และ organic fluid (Freon-113) มีแนวโน้มไปทางเดียวกัน

Ashwood และคณะ [6] ทดลองการไหลของอากาศ-น้ำในท่อแนวตั้ง เพื่อวัดขนาดความหนาของฟิล์ม และเพื่อทำนายค่าความดันลด (Pressure drop) ในการไหลแบบวงแหวน ที่ความดัน และอุณหภูมิห้อง ในการทดลองแบ่งการทดลองเป็น 2 วิธี คือ 1. Total Internal Reflection (TIR) โดยทดลองท่อในส่วนของควอตซ์ และ 2. Planer Laser Induced Fluorescence (PLIF) ทดลองท่อในส่วนของทองแดง ซึ่งท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23.4 mm ทำการทดลองที่ความเร็ว

การไหลตามผิวของของเหลว 0.04-0.34 m/s และที่ความเร็วการไหลตามผิวของแก๊ส 35-85 m/s ผลการทดลอง วิธี TIR ขนาดความหนาของฟิล์มจะลดลง เมื่อความเร็วในการไหลตามผิวของแก๊สเพิ่มขึ้น และที่ความเร็วในการไหลตามผิวของของเหลวลดลง และในส่วนของวิธี PLIF ขนาดความหนาของฟิล์มมีแนวโน้มเหมือนกันกับวิธี TIR และผลการปรับปรุงแบบจำลองของ Hurlburt – Newell [7] เพื่อทำนายค่าความดันสูญเสีย (Pressure) และผลของการกระจายของความดัน (Pressure gradient) เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วในการไหลตามผิวของแก๊สและของเหลวเพิ่มขึ้น

Schubring และคณะ [8] ทำการทดลองการไหลของ อากาศ-น้ำ เพื่อวัดขนาดความหนาของฟิล์มในการไหลแบบวงแหวนในท่อแนวตั้ง ทำการทดลองด้วยวิธี Planer Laser Induced Fluorescence (PLIF) โดยให้ของไหลไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23.4 mm ที่ความดันและอุณหภูมิห้อง ของไหลที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำกับอากาศ ผลการทดลองขนาดความหนาของฟิล์มลดลง เมื่อความเร็วในการไหลตามผิวของแก๊สเพิ่มขึ้น และความเร็วในการไหลตามผิวของของเหลวลดลง

Alamu [9] ได้ทำการทดลองการไหลของอากาศ-น้ำ เพื่อวัดขนาดความหนาของฟิล์มในการไหลแบบวงแหวนในท่อแนวตั้ง โดยให้ของไหลไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm ภายใต้ความดันสัมพัทธ์ 1.4 bar โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทำการทดลองที่ความเร็วในการไหลตามผิวของแก๊สระหว่าง 13-43 m/s และความเร็วในการไหลตามผิวของของเหลว ที่ 0.05 และ 0.15 m/s และส่วนที่ 2 ทำการทดลองที่ความเร็วในการไหลตามผิวของแก๊สที่ 14 m/s และความเร็วในการไหลตามผิวของของเหลวระหว่าง 0.03-0.18 m/s ผลการทดลองส่วนที่ 1 ความเร็วในการไหลตามผิวของของเหลว 0.05 m/s เมื่อเพิ่มความเร็วในการไหลตามผิวของแก๊ส ค่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของแก๊สต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อ (Void fraction) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และที่ความเร็วในการไหลตามผิวของของเหลว 0.15 m/s เมื่อเพิ่มค่าความเร็วในการไหลตามผิวของแก๊ส ค่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของแก๊สต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อจะแนวโน้มเหมือนกับที่ความเร็วในการไหลตามผิวของของเหลว 0.05 m/s ผลการทดลองในส่วนที่ 2 ที่ความเร็วในการไหลตามผิวของแก๊ส 14 m/s เมื่อเพิ่มค่า ความเร็วในการไหลตามผิวของของเหลว ค่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของแก๊สต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อมีแนวโน้มลดลง

จากการศึกษาการทดลองการไหลสองเฟสแบบการไหลแบบวงแหวนในท่อแนวตั้งที่ผ่านมา ได้ทำการพิจารณาข้อมูลและผลการทดลองยกตัวอย่างมาทั้งหมด 8 กลุ่มการทดลอง โดยจะทำการทดลองที่ความเร็วการไหลตามผิวของของเหลว, ความเร็วการไหลตามผิวของแก๊ส, ความดัน, ฟลักซ์เชิงมวล, ความหนืด และขนาดของท่อที่แตกต่างกัน เพื่อทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดความ

หนาฟิล์มจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆนี้ โดยผลการทดลองของ Bousman และ McQuillen [1], Fukano และ Furukawa [2], Gill และคณะ [3], MacGillivray [4], Sawant [5], Ashwood และคณะ [6], Schubring และคณะ [8] และ Alamu [9] ทั้ง 8 มีแนวโน้มผลการทดลองที่เหมือนกัน คือ เมื่อความเร็วการไหลตามผิวของแก๊สเพิ่มขึ้น ขนาดความหนาฟิล์มจะลดลง แต่เมื่อความเร็วการไหลตามผิวของของเหลวเพิ่มขึ้น ขนาดความหนาฟิล์มจะเพิ่มขึ้น การทดลองของ Fukano และ Furukawa [2] และ Alamu [9] ทำการทดลองโดยใช้ของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของของเหลวและความหนาแน่นของของเหลว จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความหนืดและความหนาแน่นของของเหลว ขนาดความหนาฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การทดลองของ MacGillivray [4] ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแก๊สที่ใช้ในกาทดลองจากอากาศเป็นฮีเลียม เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นของแก๊ส และ Sawant [5] ทำการทดลองโดยใช้อากาศ-น้ำในการทดลองที่ความดันที่แตกต่างกัน เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของแก๊ส กล่าวคือเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของแก๊สจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ผลจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊ส เมื่อความหนาแน่นของแก๊สเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ขนาดความหนาฟิล์มลดลง ผลการทดลองทั้ง 8 กลุ่มการทดลองสามารถนำมาสร้างเป็นฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายขนาดความหนาฟิล์มได้

### 2.1.2 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ของขนาดความหนาของฟิล์มในการไหลแบบวงแหวน

Henstock และ Hanratty [10] ศึกษาวิธีทำนายค่า Interfacial drag และความหนาของฟิล์มในการไหลแบบวงแหวน ภายใต้เงื่อนไขของไหลเป็นการไหลของอากาศ-น้ำในท่อกลมแบบจำลองมีพื้นฐานมาจากการพิสูจน์ Interfacial shear stress โดยแยกแบบจำลองออกเป็นแนวตั้งและแนวนอน ดังนี้

แบบจำลองแนวตั้ง

$$\frac{\delta}{D} = \frac{6.59F}{(1+1400F)^{0.5}} \quad (1.1)$$

แบบจำลองแนวนอน

$$\frac{\delta}{D} = \frac{6.59F}{(1+850F)^{0.5}} \quad (1.2)$$

และได้ค้นพบว่าพารามิเตอร์  $F$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มาจากเงื่อนไขของลักษณะการไหลของของไหล และคุณสมบัติของของไหล โดยที่พารามิเตอร์ตัวนี้มีลักษณะคล้ายกับพารามิเตอร์ของ Martinelli [11] โดยพารามิเตอร์จะเป็นฟังก์ชันของเลขเรย์โนลด์ ความหนืด และความหนาแน่นของของไหล และอีกพารามิเตอร์ที่สำคัญคือแรงดันของแก๊ส พารามิเตอร์  $F$  คำนวณได้ดังนี้

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\text{Re}_f^{0.5} \mu_f \rho_g^{0.5}}{\text{Re}_g^{0.4} \mu_g \rho_f^{0.5}} \quad (1.3)$$

สามารถคำนวณหาค่าเลขเรย์โนลด์ของแก๊ส และเลขเรย์โนลด์ของของเหลว ได้ดังนี้

$$\text{Re}_g = \frac{\rho_g j_g D}{\mu_g} \quad (1.4)$$

$$\text{Re}_f = \frac{\rho_f j_f D}{\mu_f} \quad (1.5)$$

โดยที่  $j_g$  คือ ความเร็วการไหลตามผิวของแก๊ส,  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Diameter),  $j_f$  คือ ความเร็วการไหลตามผิวของของเหลว,  $\rho_f$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว (Density of liquid),  $\mu_f$  คือ ความหนืดของของเหลว (Viscosity of liquid),  $\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (Density of gas) และ  $\mu_g$  คือ ความหนืดของแก๊ส (Viscosity of gas)

แบบจำลองของ Henstock and Hanratty [10] มีพื้นฐานการสร้างมาจากผลการทดลองของ Willis[12], Whalley และคณะ[13], Gill และคณะ[3], Gollier และ Hewitt[14], Chien และ Ibele[15] และ Charvonja[16] ซึ่งเป็นการทดลองในท่อกลมแนวตั้ง และผลการทดลองของ Butterworth[17] และ Swanson[18] เป็นผลการทดลองในท่อกลมแนวนอน การทดลองมีพิสัยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.8-63.5 mm เลขเรย์โนลด์ของเหลว 10-15100 และ เลขเรย์โนลด์ของแก๊ส 5000-225000

ผลจากการเปรียบเทียบแบบจำลอง และ Martinelli's parameter [11] กับ Martinelli's data [11] ผลของ Martinelli's parameter [11] ผลจะแม่นยำกว่าเมื่อเป็นการไหลในท่อแนวนอน

Tatterson และคณะ [19] พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความหนาฟิล์มในการไหลแบบวงแหวน โดย Tatterson และคณะ[19] ได้นำแบบจำลองของ Henstock และ Hanratty [10] มาปรับปรุง โดยปรับปรุงพารามิเตอร์  $F$  ด้วยการเพิ่มผลอันเนื่องมาจากเลขเรย์โนลด์ของฟิล์ม สามารถคำนวณพารามิเตอร์  $F$  ใหม่ได้จาก

$$F = \frac{\gamma(\text{Re}_f) \mu_f \rho_g^{0.5}}{\text{Re}_g^{0.9} \mu_g \rho_f^{0.5}} \quad (1.6)$$

$$\text{และ} \quad \gamma(\text{Re}_f) = [(0.707 \text{Re}_f^{0.5})^{2.5} + (0.0379 \text{Re}_f^{0.9})^{2.5}]^{0.4} \quad (1.7)$$

แบบจำลอง Tatterson และคณะ[19] มีพื้นฐานการสร้างมาจากผลการทดลองของเขาเอง จากการเปรียบเทียบแบบจำลอง Tatterson และคณะ [19] ผลมีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลองของ Henstock และ Hanratty [10] เมื่อเทียบกับผลการทดลองของ Tatterson และคณะ[19] เอง

Fukano และ Furukawa [2] ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายขนาดความหนาของฟิล์มในการไหลแบบวงแหวนในท่อแนวตั้ง ได้นำเสนอแบบจำลอง 2 แบบจำลองคือ Fukano's model [2] โดยที่แบบจำลองจะเป็นฟังก์ชันของเลขฟรูด (Froude number) ซึ่งสามารถหาได้จากความเร็วการไหลตามผิวของของแก๊ส และเลขเรย์โนลด์สามารถหาได้จากความเร็วการไหลตามผิวของของเหลว และค่าอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อการไหลทั้งหมด (Quality) แบบจำลองของ Fukano และ Furukawa [2] เป็นไปตามสมการนี้

$$\frac{\delta}{D} = 0.0594 \exp(-0.34 Fr_g^{0.25} Re_f^{0.19} x^{0.6}) \quad (1.8)$$

และสามารถหาค่าเลขฟรูด และอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อการไหลทั้งหมด ได้ดังนี้

$$Fr_g = \frac{j_g}{\sqrt{gD}} \quad (1.9)$$

$$x = \frac{j_g \rho_g}{j_g \rho_g + j_f \rho_f} \quad (1.10)$$

โดยที่  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational acceleration)

จากการเปรียบเทียบ Fukano's model [2] กับข้อมูลการทดลองของ Fukano และ Furukawa [2] ผลที่ได้ทั้งแบบจำลองและผลการทดลองไปในทางเดียวกัน ส่วน Hori's model [20] โดยแบบจำลองจะเป็นสัดส่วนของขนาดความหนาของฟิล์มต่อขนาดของท่อ โดยแบบจำลองนี้เป็นฟังก์ชันของเลขฟรูด, เลขเรย์โนลด์ และความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 20°C ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\delta}{D} = 0.905 Re_g^{-1.45} Re_f^{0.9} Fr_g^{0.93} Fr_f^{-0.68} \left( \frac{\mu_f}{\mu_{water @ 20^\circ C}} \right)^{1.06} \quad (1.11)$$

เลขฟรูดของของเหลว คำนวณได้จาก

$$Fr_f = \frac{j_f}{\sqrt{gD}} \quad (1.12)$$

เมื่อเปรียบเทียบ Hori's model [20] กับแบบจำลองอื่นๆ และกับข้อมูลผลการทดลองของ Fukano และ Furukawa [2] โดย Hori's model [20] มีความแม่นยำบวกลบ 15 เปอร์เซ็นต์ ในเงื่อนไขที่ทำการทดลอง

MacGillivray [4] ได้ศึกษาและทดลองผลของแรงโน้มถ่วงและความหนาแน่นของแก๊สมีผลกับขนาดความหนาของฟิล์ม ทำการทดลองโดยใช้ของไหลเป็น อากาศ-น้ำ และ ฮีเลียม-น้ำไหลในท่อแนวตั้ง โดยทำการทดลองใน Normal gravity, Microgravity และ Hypergravity จากผลการทดลองพบว่าขนาดความหนาฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลที่ผิวสัมผัสของของเหลวหรือลดค่าอัตราการไหลที่ผิวสัมผัสของแก๊ส แบบจำลอง MacGillivray [4] สร้างมาจากผลการทดลองของเขาเอง และแบบจำลองทำนายขนาดความหนาฟิล์มในกรณี Normal gravity และ Microgravity [4] ได้ผลในช่วงบวกลบ 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกรณี Hypergravity ผลอยู่ในช่วงบวกลบ 15 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของเขาเอง แบบจำลองในกรณี Normal gravity ดังนี้

$$\frac{\rho_f \langle j_f \rangle \delta}{\mu_f} = 39 \text{Re}_f^{0.2} \left( \frac{1-x}{x} \right) \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.5} \quad (1.13)$$

Berna และคณะ [21] ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายขนาดความหนาของฟิล์มในการไหลแบบวงแหวน แบบจำลองของ Berna และคณะ [21] สามารถทำนายได้ทั้งขนาดความหนาฟิล์มในท่อแนวนอนและแนวตั้ง โดยที่แบบจำลองเป็นฟังก์ชันของเลขเรย์โนลด์ของทั้งแก๊สและของเหลว และเลขฟรูดของทั้งของเหลวและแก๊ส สามารถคำนวณแบบจำลองได้ตามสมการนี้

$$\frac{\delta}{D} = 7.165 \text{Re}_g^{-1.07} \text{Re}_f^{0.48} \left( \frac{\text{Fr}_g}{\text{Fr}_f} \right)^{0.24} \quad (1.14)$$

หาค่าเลขฟรูดของแก๊สได้ดังนี้

$$\text{Fr}_g = \frac{j_g}{\sqrt{gD}} \quad (1.15)$$

แบบจำลองมีพื้นฐานการสร้างมาจากผลการทดลองทั้งท่อในแนวนอนและท่อในแนวตั้ง ผลการทดลองในท่อแนวนอนมี Tatterson และคณะ [19], Paras และ Karabelas [22] และ Schubring และคณะ [8] และผลการทดลองในท่อแนวตั้งมี Cousins [23], Alamu [9] และ Schubring และคณะ [8] เมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูล Tatterson's data [19] ผลไม่ดีเมื่อเทียบกับ Ishii's model [24] แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ ข้อมูลการทดลองของจาก horizontal และ Vertical data [8] และ Alamu's data [9] ซึ่งมีผลที่แม่นยำกว่าแบบจำลองอื่น

Ju และคณะ [25] ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายขนาดความหนาของฟิล์มในการไหลแบบวงแหวนในท่อแนวตั้ง โดยที่แบบจำลองทำนายขนาดความหนาของ

ฟิล์มจะมีพื้นฐานมาจากเลขเว็เบอร์ (Weber number) ของทั้งแก๊สและของเหลวและค่าความหนืด แบบจำลองได้แสดงดังนี้

$$\frac{\delta}{\delta_{\max}} = \tanh(14.22We_f^{0.24}We_g^{n-0.47}N_{\mu_f}^{0.21}) \quad (1.16)$$

ซึ่ง เลขเว็เบอร์ของทั้งแก๊สและของเหลวและค่าความหนืด ได้แสดงถึงผลของความเฉื่อยของของเหลว (Liquid inertia), ความเฉื่อยของแก๊ส (Gas inertia), ความหนาแน่นของแก๊ส, แรงตึงผิว และความหนืดของของเหลว ที่มีผลกับขนาดความหนาของฟิล์ม สามารถหาค่าเลขเว็เบอร์ของของเหลวและของแก๊สได้ดังนี้

$$We_f = \frac{\rho_f \langle J_f \rangle^2 D}{\sigma} \quad (1.17)$$

และ

$$We_g^n = \frac{\rho_g \langle J_g \rangle^2 D}{\sigma} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_g} \right)^{1/4} \quad (1.18)$$

ค่าเลขเว็เบอร์ของแก๊สได้ทำการปรับปรุงใหม่โดย Sawant [5] โดยเพิ่มของความหนาแน่น  $\Delta\rho$  คือ ผลต่างของความหนาแน่นระหว่างแก๊สและของเหลว และ  $\sigma$  คือ แรงตึงผิว ผลเนื่องมาจากความหนืด แสดงด้วยค่า Non-dimensional viscosity number ( $N_{\mu_f}$ ) ได้ถูกเสนอโดย Ishii and Grolmes [26] สามารถหาได้จาก

$$N_{\mu} = \frac{\mu_f}{\sqrt{\rho_f \sigma} \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta\rho}}} \quad (1.19)$$

แบบจำลองของ Ju และคณะ [25] มีพื้นฐานการสร้างมาจากการทดลองของ Sawant [5], Whalley และคณะ [13], และ Fukano และ Furukawa [2] ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองนี้มีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย 14 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้เงื่อนไขผลการทดลองของ Swant [5], Whalley และคณะ [13], และ Fukano และ Furukawa [2]

ตารางที่ 1 สรุปรูปแบบของแบบจำลองจากที่กล่าวมาข้างต้นทั้ง 7 แบบ จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง Fukano และ Furukawa [2] ได้เสนอแบบจำลองที่เป็นฟังก์ชันของค่าอัตราส่วนการไหลของแก๊สต่อการไหลทั้งหมด, เลขเรย์โนลด์ของของเหลวและเลขฟรูดของแก๊ส Hori's mode [20] ได้ทำการพิสูจน์ว่าเลขเรย์โนลด์ และเลขฟรูดของทั้งของเหลวและแก๊สมีความสำคัญกับแบบจำลองเพื่อทำนายขนาดความหนาฟิล์ม เช่นเดียวกับแบบจำลองของ Berna และคณะ [21] Ju และคณะ [25] เสนอแบบจำลองที่เป็นฟังก์ชันของเลขเว็เบอร์ของทั้งแก๊สและของเหลวและค่าความหนืดแบบจำลองของ Henstock และ Hanratty [10] แบบจำลองนี้ได้จากการพิสูจน์สมการ Interfacial



friction factor และ Tatterson และคณะ [19] ได้นำสมการ Interfacial friction factor มาปรับปรุงใหม่โดยการเพิ่มผลของเลขเรย์โนลด์ของของเหลวเข้าไป MacGillivray [4] ได้เสนอแบบจำลองที่เป็นฟังก์ชันของเลขเรย์โนลด์ของฟิล์ม, ค่าอัตราส่วนการไหลของแก๊สต่อการไหลทั้งหมด และอัตราส่วนของความหนาแน่นของแก๊สต่อของเหลวทั้ง 7 แบบจำลองพบว่าแบบจำลองส่วนมากสร้างมาจากผลการทดลองของตนเอง และจำนวนผลการทดลองที่ใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างมีจำนวนน้อย จึงทำให้แบบจำลองไม่สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง และมีความแม่นยำค่อนข้างน้อย เมื่อนำไปใช้ทำนายผลการทดลองที่ไม่ใช่ผลการทดลองของเขาเอง เพราะเหตุนี้จึงได้คิดพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายขนาดความหนาของฟิล์มที่มีความแม่นยำ และสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง



ตารางที่ 1 สรุปแบบจำลองคณิตศาสตร์ 7 แบบจำลองที่ศึกษาผ่านมา

Reference	Correlation
Henstock and Hanratty [10]	<p>Vertical flow</p> $\frac{\delta}{D} = \frac{6.59F}{(1+1400F)^{0.5}}$ $F = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\text{Re}_f^{0.5} \mu_f \rho_g^{0.5}}{\text{Re}_g^{0.4} \text{Re}_g^{0.5} \mu_g \rho_f^{0.5}}$ <p>Horizontal flow</p> $\frac{\delta}{D} = \frac{6.59F}{(1+850F)^{0.5}}$
Tatterson et al. [19]	<p>Vertical flow</p> $\frac{\delta}{D} = \frac{6.59F}{(1+1400F)^{0.5}}$ $F = \frac{\gamma(\text{Re}_f) \mu_f \rho_g^{0.5}}{\text{Re}_g^{0.9} \mu_g \rho_f^{0.5}}$ $\gamma(\text{Re}_f) = [(0.707 \text{Re}_f^{0.5})^{2.5} + (0.0379 \text{Re}_f^{0.9})^{2.5}]^{0.4}$ <p>Horizontal flow</p> $\frac{\delta}{D} = \frac{6.59F}{(1+850F)^{0.5}}$
Hori et al. [20]	$\frac{\delta}{D} = 0.905 \text{Re}_g^{-1.45} \text{Re}_f^{0.9} Fr_g^{0.93} Fr_f^{-0.68} \left( \frac{\mu_f}{\mu_{\text{water @ 20 }^\circ\text{C}}} \right)^{1.06}$
Fukano and Furukawa [2]	$\frac{\delta}{D} = 0.0594 \exp(-0.34 Fr_g^{0.25} \text{Re}_f^{0.19} x^{0.6})$ $x = \frac{\langle j_g \rangle \rho_g}{\langle j_g \rangle \rho_g + \langle j_f \rangle \rho_f}$
MacGillivray [4]	$\frac{\rho_f \langle j_f \rangle \delta}{\mu_f} = 39 \text{Re}_f^{0.2} \left( \frac{1-x}{x} \right) \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.5}$
Berna et al. [21]	$\frac{\delta}{D} = 7.165 \text{Re}_g^{-1.07} \text{Re}_f^{0.48} \left( \frac{Fr_g}{Fr_f} \right)^{0.24}$
Ju et al. [25]	$\frac{\delta}{\delta_{\max}} = \tanh(14.22 We_f^{0.24} We_g^{-0.47} N_{\mu_f}^{0.21})$ $We_g = \frac{\rho_g \langle j_g \rangle^2 D}{\sigma \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_g} \right)^{1/4}} \text{ and } N_{\mu} = \frac{\mu_f}{\sqrt{\rho_f \sigma} \sqrt{g \Delta\rho}}$

### บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะเป็นการสรุปทฤษฎีการไหลสองเฟส, ลักษณะ, ประเภทของการไหลสองเฟสในท่อกลมแนวตั้ง, แบบจำลองคณิตศาสตร์, ประเภทของแบบจำลองคณิตศาสตร์ และแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางกายภาพของขนาดความหนาฟิล์ม

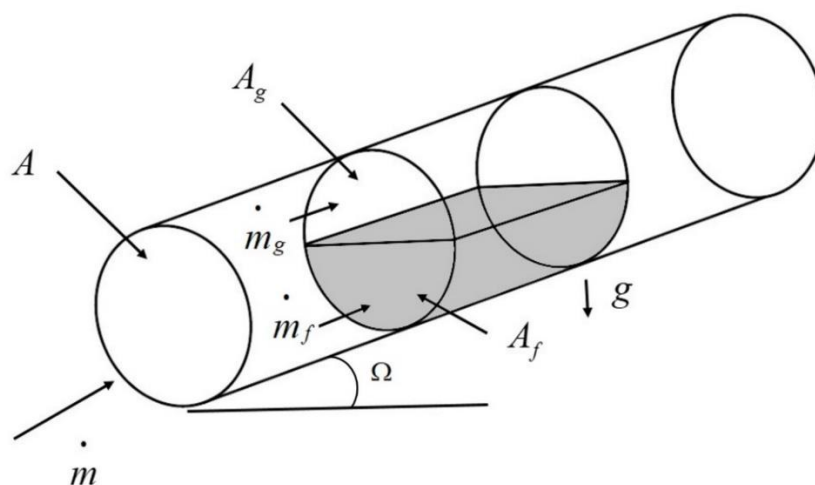
#### 3.1 การไหลสองเฟส [27]

การไหลสองเฟส (Two-phase flow) เป็นการไหลของของไหลสองสถานะไปพร้อมกัน ซึ่งสามารถจำแนกได้ 4 ลักษณะ คือ การไหลของแก๊ส-ของเหลว, แก๊ส-ของแข็ง, ของเหลว-ของเหลว และ ของเหลว-ของแข็ง

การไหลของแก๊ส-ของเหลว เป็นการไหลที่พบได้มากในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การระบายความร้อนด้วยน้ำของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์, เครื่องระเหย, หม้อไอน้ำ, การแลกเปลี่ยนความร้อน และโรงงานปิโตรเคมี เป็นต้น

การไหลของแก๊ส-ของเหลว เป็นการไหลที่มีความซับซ้อนมากที่สุด ลักษณะการไหลการไหลของแก๊สและของเหลวไหลไปพร้อมกันภายในท่อ โดยฟิสิกส์การไหลของการไหลสองเฟสจะมีความซับซ้อนมากกว่าการไหลเฟสเดียว (Single-phase flow) อย่างเช่น ในการไหลเฟสเดียวจะมีผลกระทบมาจาก แรงเฉื่อย (Inertia force), แรงหนืด (Viscous force) และ แรงเนื่องจากความดัน (Pressure force) แต่ในการไหลสองเฟสนอกจากผลกระทบจากแรงข้างต้นแล้วยังมี interfacial tension force, ลักษณะเปียก (Wetting characteristics) ของของเหลวบนผนังท่อ และการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ระหว่างเฟสของของเหลวกับเฟสของแก๊สในการไหล

พิจารณาการไหลสองเฟสง่าย ๆ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2 แบบจำลองการไหลสองเฟสในท่อกลมเอียง (วาดใหม่โดยอ้างอิงจาก [27])

เพื่อให้เข้าใจการไหลสองเฟสมากขึ้นจึงต้องเรียนรู้นิยามและคำศัพท์เฉพาะของการไหลสองเฟสก่อน อัตราการไหลเชิงมวลผ่านท่อทั้งหมด  $\dot{m}$  เท่ากับผลรวมของอัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว  $\dot{m}_f$  และแก๊ส  $\dot{m}_g$

$$\dot{m} = \dot{m}_f + \dot{m}_g \quad (3.1)$$

อัตราส่วนอัตราการไหลของแก๊สต่อทั้งหมด

$$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}} \quad (3.2)$$

เรียก  $x$  ว่า Quality หรือ Dryness fraction และในทางเดียวกัน  $1-x = \dot{m}_f / \dot{m}$  เรียกว่า wetness fraction สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัด  $A$  โดยที่ mass flux หรือ mass velocity  $G$  หาได้จาก

$$G = \frac{\dot{m}}{A} \quad (3.3)$$

Void fraction  $\alpha$  หาได้จากอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของแก๊ส  $A_g$  ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด  $A$

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad (3.4)$$

โดยที่

$$A = A_g + A_f \quad (3.5)$$

Liquid area fraction  $\alpha_f$  หาได้จาก  $\alpha_f = 1 - \alpha = \frac{A_f}{A}$  (3.6)

ให้สมมุติฐานว่า  $\alpha$  และ  $\alpha_f$  เป็นค่าเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งค่าทั้งสองนี้เป็นประโยชน์มากสำหรับการนำไปหาค่า superficial gas flux,  $j_g$  และ superficial liquid flux,  $j_f$  สามารถคำนวณได้จาก

$$j_g = \frac{Gx}{\rho_g} \quad (3.7)$$

$$j_f = \frac{G(1-x)}{\rho_f} \quad (3.8)$$

### 3.2 รูปแบบการไหลขึ้นในท่อแนวตั้ง

การสังเกตการไหลขึ้นในท่อกลมแนวตั้งพบว่ามีการไหลแบ่งออกเป็น 5 แบบ คือ bubbly flow, slug flow, churn flow, wispy annular flow และ annular flow ดังรูปที่ 1 Hewitt และ Roberts [28] ทำการศึกษาลักษณะการไหล และได้เสนอ flow regime map ดังรูปที่ 3 โดยที่แนวแกน  $y$  เป็น superficial momentum flux ของแก๊ส และแนวแกน  $x$  เป็น superficial momentum flux ของเหลว ซึ่ง flow regime map เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบลักษณะการไหลระหว่างแต่ละรูปแบบการไหล สร้างขึ้นมาจากการสังเกตและการทดลอง

จากทฤษฎีที่ใช้พิจารณาเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงการไหลสองเฟส Taitel และ Dukler [29] ได้ทำการเสนอว่า การเปลี่ยนแปลงจาก bubbly flow เป็น slug flow มีความเป็นไปได้อย่างมากที่ void fraction น้อยกว่า 0.3 ( $\alpha < 0.3$ ) โดยอยู่บนพื้นฐานของสมการ (3.9) ในการกำหนดเงื่อนไข

$$\frac{j_f}{j_g} = 2.34 - 1.07 \frac{[g(\rho_f - \rho_g)\sigma]^{1/4}}{j_g \rho_f^{1/2}} \quad (3.9)$$

การเปลี่ยนแปลงการไหลแบบ Slug flow เป็นการไหลแบบ Churn flow Porteus [30] ได้ทำการศึกษาและเสนอว่า เมื่อค่าอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อทั้งหมด (Quality) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อ slug bubble และ พิล์มของของเหลว ระหว่าง slug กับผนัง โดยฟิล์มของของเหลว จะเคลื่อนที่ขึ้น แต่ slug จะเคลื่อนที่ลงด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วเฉลี่ยของการไหลสองเฟส เมื่ออัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อทั้งหมด (Quality) และ void fraction เพิ่มขึ้น จะเกิดการไหลทวนกระแสกลายเป็นการไหลที่ไม่เสถียร ฟองแก๊สขนาดใหญ่จะถูกทำลาย slug ถูกทำลาย เกิดเป็นการไหลแบบ churn ตามเงื่อนไขสมการ (3.10)

$$\frac{j_f}{j_g} = 0.105 \frac{[gD(\rho_f - \rho_g)]^{1/2}}{j_g \rho_g^{1/2}} - 1 \quad (3.10)$$

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

อีกทางหนึ่ง Taitel และ Dukler [29] ได้เสนอว่า เมื่อ  $(j_f + j_g) / (gD)^{1/2}$  มีค่ามากกว่า 50 การไหลแบบ slug flow จะเปลี่ยนเป็นการไหลแบบ Churn flow ภายใต้เงื่อนไข  $j_f / j_g = 0.16$

Wallis [12] ได้เสนอว่าการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบ Churn flow เป็นการไหลแบบ annular flow เกิดขึ้นจากเงื่อนไข shear stress ของแก๊สบวกกับ imposed pressure gradient เท่ากับ gravitational force บนฟิล์มของของเหลว ทำการกำหนดความเร็วของแก๊สให้คงที่ โดยสามารถประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงได้จาก

$$\left[ \frac{j_g^2 \rho_g}{gD(\rho_f - \rho_g)} \right]^{0.5} = 0.9 \quad (3.11)$$

ในอีกทางหนึ่ง Taitel และ Dukler [29] ได้เสนอการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบ Churn flow เป็นการไหลแบบ annular flow อยู่ภายใต้เงื่อนไขสมการนี้

$$\frac{j_g \rho_g^{0.5}}{[g(\rho_f - \rho_g)\sigma]^{0.25}} = 3.09 \frac{(1 + 20X + X^2)^{0.5} - X}{(1 + 20X + X^2)^{0.5}} \quad (3.12)$$

โดย X คือ Martinelli parameter  $X = \left( \frac{(dP/dz)_f}{(dP/dz)_g} \right)^{1/2}$  (3.13)

$(dP/dz)_f$  และ  $(dP/dz)_g$  คือ pressure gradient ของของเหลวและแก๊สสามารถคำนวณได้จาก

$$\left( \frac{dP}{dz} \right)_l = - \frac{2f_l(1-x)^2}{\rho_l D} \quad (3.14)$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_g = -\frac{2f_g G^2 x^2}{\rho_g D} \quad (3.15)$$

$$f_f = B \text{Re}_f^{-n} \quad \text{Re}_f = \frac{G(1-x)D}{\mu_f} \quad (3.16)$$

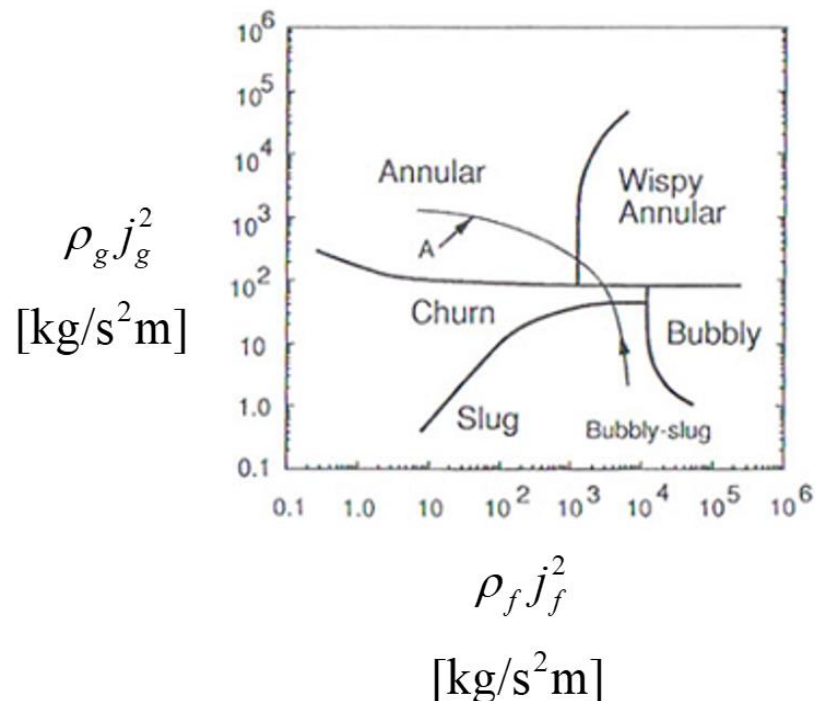
$$f_g = B \text{Re}_g^{-n} \quad \text{Re}_g = \frac{GxD}{\mu_g} \quad (3.17)$$

$f$  คือ Friction factor ของท่อกลมจะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ โดยสามารถคำนวณจาก  $B=16$  และ  $n=1$  สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ที่  $\text{Re}_f$  or  $\text{Re}_g < 2000$  และ  $B=0.079$  และ  $n=0.25$  สำหรับการไหลปั่นป่วน (Turbulent flow) ที่  $\text{Re}_f$  or  $\text{Re}_g \geq 2000$

Wallis [12] ได้เสนอว่า การเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลจาก wispy-annular flow เป็น annular flow ยากที่จะแยกจากกันอย่างชัดเจน เพราะรูปแบบการไหลทั้งสองมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมาก จากการทดลองตรวจจับ wispy ที่แกนของการไหลสามารถแยกการไหลได้ตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\frac{j_g}{j_f} = \left(7 + 0.06 \frac{\rho_f}{\rho_g}\right) \quad (3.18)$$

โดยความสัมพันธ์ข้างต้นต้องตรงตามเงื่อนไข  $j_f \rho_f^{0.5} [gD(\rho_f - \rho_g)]^{-0.5} > 0.5$



รูปที่ 3 รูปแผนที่ลักษณะการไหลในท่อแนวดิ่ง [27]

### 3.2.1 Bubbly flow

การไหลแบบ Bubbly flow มีลักษณะคือ แก๊สเฟสจะมีลักษณะเป็นฟองแก๊สขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของท่อจะไหลกระจายไปพร้อมๆกับของเหลวเฟส การไหลแบบ Bubbly flow ถูกประมาณเป็นการไหลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous) การไหลแบบ Bubbly flow จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลของของเหลวต่ำ หรือ อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อทั้งหมด (Quality) น้อยๆ และเกิดการไหลปั่นป่วนเล็กน้อย

### 3.2.2 Slug flow

การไหลแบบ Slug flow ในท่อกลมแนวดิ่ง จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อทั้งหมดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการไหลแบบ Bubbly flow จะทำให้ฟองแก๊สขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นฟองแก๊สขนาดใหญ่และมีลักษณะยาวเกือบตลอดความยาวท่อ ฟองแก๊สมีลักษณะเหมือนกระสุนปืน เรียกว่า Taylor-bubble ซึ่งขนาดของฟองแก๊สแทบจะเท่ากับขนาดของท่อ และในส่วน of หลวเฟสจะมีฟองแก๊สขนาดเล็กแทรกซึมอยู่และไหลไปพร้อมกันของเหลวเฟส

### 3.2.3 Churn flow

การไหลแบบ Churn flow จะเกิดขึ้น เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อทั้งหมดมีขนาดปานกลาง แต่มีอัตราการไหลที่ต่ำ ทำให้แรงเฉือน (Shear force) ที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวเฟสกับแก๊สเฟสมีขนาดเท่ากับ แรงที่เกิดจาก Pressure gradient รวมกับแรงอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational body force) บนฟิล์มของของเหลว ทำให้เกิดการไหลในเฟสของเหลวไม่เสถียร เกิดการสั่นในส่วน of แก๊สเฟสที่แกนท่อ และเมื่อความเร็วที่ฟิล์มของเหลวมากขึ้นอีกระดับ การไหลของของเหลวจะเกิดการปั่นป่วนเป็นการไหลที่ไม่ต่อเนื่องที่ผิวของฟิล์ม และเกิดการสั่นเป็นคลื่น

### 3.2.4 Annular flow

เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อทั้งหมดเพิ่มขึ้นมากอีกระดับหนึ่ง การไหลสองเฟสจะถูกตั้งสมมติฐานว่าเป็นการไหลแบบ Annular flow ทั้งหมด โดยจะมีลักษณะการไหลคือฟิล์มของของเหลวจะไหลในส่วนผนังท่อด้วยความเร็วต่ำ และแก๊สไหลในส่วน of แกนท่อด้วยความเร็วสูง ในบางครั้งจะมีหยดของของเหลวเล็กๆไหลไปพร้อมกับแก๊สด้วย เรียกว่า Entrainment ซึ่งเกิดจากอัตราการไหลของแก๊สสูงมาก ทำให้ความเค้นเฉือนของแก๊สที่ผิวสัมผัสสูงตามไปด้วย และเฉือนหยดของของเหลวเข้าไปในแก๊สเฟส

### 3.2.5 Wispy-annular flow

Wispy-annular flow จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อทั้งหมดมีขนาดปานกลางอยู่ระหว่าง Churn flow-annular flow แต่อัตราการไหลของของเหลวและแก๊สสูง ซึ่งการไหลสองเฟสที่สังเกตเห็นมีลักษณะคล้ายการไหลแบบ Annular flow แต่ลักษณะของหยดของเหลวจะมีขนาดใหญ่ไหลพร้อมกับแก๊สเฟสในส่วนของแกนท่อ ถึงแม้รูปแบบจะยังเป็นการไหลแบบ Annular flow แต่บางครั้งต้องแบ่งรูปแบบให้ชัดเจน จึงเรียกการไหลนี้ว่า Wispy-annular flow

### 3.3 ประเภทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองคณิตศาสตร์ คือ แบบจำลองที่ใช้อธิบายความเชื่อต่างๆที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ธรรมชาติบนโลก โดยการแปลงความเชื่อนั้นๆ ให้เป็นภาษาทางคณิตศาสตร์ การแยกประเภทของแบบจำลองมีการแยกอย่างหลากหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น Deterministic model กับ Stochastic model และ Mechanistic model กับ Empirical model ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะแยกประเภทของแบบจำลองออกเป็น Mechanistic model กับ Empirical model

1. Mechanistic model คือ แบบจำลองที่มีใช้ทฤษฎีเป็นจำนวนมากในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้น โดยจะทำการคำนวณกลไกต่างๆผ่านการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น แบบจำลองประเภทนี้จะมีความซับซ้อนมาก ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ไม่สามารถคำนวณได้โดยตรง ซึ่งหากต้องการใช้งานแบบจำลองนี้ต้อง นำแบบจำลองมาใช้โดยผ่านระเบียบวิธีทางตัวเลขด้วยกระบวนการทำซ้ำ (iteration method) ซึ่งมีความยุ่งยากในการใช้งาน แต่แบบจำลองประเภทนี้จะมีความแม่นยำเป็นอย่างมาก

2. Empirical model คือ แบบจำลองที่ไม่คำนวณตามกลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของระบบ เป็นเพียงการสังเกตและทำนายผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น และทำการทำนายผลลัพธ์จากการสังเกตผลลัพธ์นั้นๆ แบบจำลองนี้จะเป็นการลองคำนวณในเชิงปริมาณ สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวกับเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งแบบจำลองนี้จะไม่ค่อยมีความซับซ้อนมากเมื่อเทียบกับ Mechanistic model สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านระเบียบวิธีทางตัวเลขด้วยกระบวนการทำซ้ำ แต่แบบจำลองจะมีความแม่นยำที่น้อยกว่า Mechanistic model



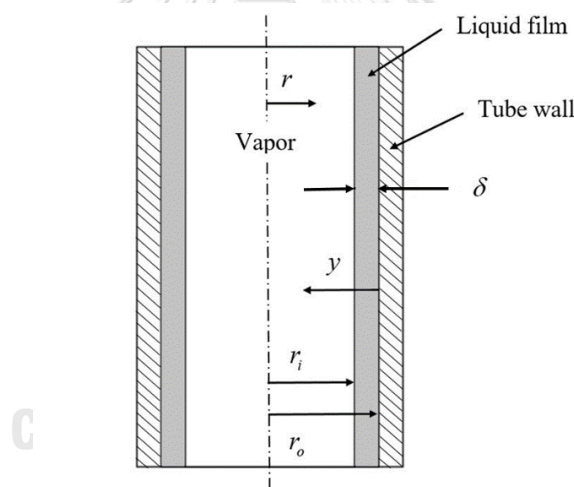
### 3.4 พิจารณา Mechanistic model ของการไหลแบบวงแหวน (Annular flow)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลแบบวงแหวนนั้นแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ 1. การไหลแบบวงแหวนที่ไม่มีหยดของเหลวไหลที่แกนท่อ และ 2. การไหลแบบวงแหวนที่มีหยดของเหลวไหลที่แกนท่อ

#### 3.4.1 Annular flow without entrainment

Hewitt และ Hall-Taylor [31] ได้ทำการพัฒนาและวิเคราะห์แบบจำลองการไหล Annular flow ในท่อกลมแนวตั้ง พิสูจน์จากรูป 4 โดยมีสมมติฐานแบบจำลองของการไหล

1. การไหลเป็นการไหลคงตัว
2. Pressure gradient ของแกนท่อกับฟิล์มของของเหลวเท่ากัน
3. ฟิล์มของของเหลวในการไหลแบบ Annular flow มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอ ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวราบเรียบ



รูปที่ 4 แบบจำลองการพิจารณาการไหลแบบวงแหวนแบบไม่มีหยดของเหลว

กรณีส่วนใหญ่จะประมาณผิวสัมผัสเป็นคลื่น ซึ่งผลของคลื่นที่ผิวสัมผัสที่ส่งผลกับการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) และความดันลด (Pressure drop) จะมีค่าน้อยมาก สามารถประมาณว่าที่ผิวสัมผัสราบเรียบไม่มีคลื่น และ Entrainment ในการไหลของแก๊สที่แกนท่อน้อยมาก ถือว่าเป็นศูนย์

การสมดุลแรงโมเมนต์สำหรับการไหลของแก๊สในแกนท่อ ประมาณได้ดังนี้

$$\tau_i = -\frac{r_i}{2} \left\{ \frac{dP}{dz} + \left( \frac{r_o}{r_i} \right)^2 \frac{d}{dz} \left[ G^2 \left( \frac{r_o}{r_i} \right)^2 \frac{x^2}{\rho_g} \right] + \rho_g g \right\} \quad (3.19)$$

$\tau_i$  คือความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส (Shear stress) จากสมการข้างต้นในวงเล็บเทอมจากซ้ายไปขวาของสมการคือ เทอมของ Pressure gradient, เทอมของความเร่ง (Acceleration) และเทอมของแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Body force) จากที่ void fraction  $\alpha = (r_i/r_o)^2$  และเมื่อขยายอนุพันธ์เทียบ  $z$  เข้าไป สามารถเขียนเทอมของความเร่งใหม่ได้

$$\left(\frac{1}{\alpha}\right) \frac{d}{dz} \left[ \frac{G^2 x^2}{\alpha \rho_g} \right] = \left( \frac{2G^2 x}{\alpha^2 \rho_g} \right) \left( \frac{dx}{dz} \right) \left[ 1 - \frac{x}{2\alpha} \left( \frac{d\alpha}{dx} \right) \right] \quad (3.20)$$

สำหรับเทอม  $(x/2\alpha)(d\alpha/dx)$  มีค่าน้อยเมื่อเทียบเทอมอื่นจึงละเทอมนี้ทิ้ง และเขียนสมการ (3.19) ใหม่ในรูป Pressure gradient ได้ดังนี้

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{4\tau_i}{D} - \frac{2xG^2}{\alpha^2 \rho_g} \left( \frac{dx}{dz} \right) - \rho_g g \quad (3.21)$$

เมื่อ  $D = 2r_o$

เมื่อผลจากความเฉือนที่สถานะคงตัว เมื่อสมดุลความเค้นเฉือน, ความดัน และแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่  $r$  ในฟิล์มของของเหลว

$$\tau(r) = \tau_i \left( \frac{r_i}{r} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{dP}{dz} + \rho_l g \right) \left( \frac{r_i^2 - r^2}{r} \right) \quad (3.22)$$

เมื่อมีรูปทรงเป็นทรงกระบอก

$$\frac{r_i}{r} = \frac{D/2 - \delta}{D/2 - y} \quad (3.23)$$

$y$  คือ ระยะจากผนังท่อไปถึงกลางท่อ

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau_i}{\mu_l + \varepsilon \rho_l} \quad (3.24)$$

ปรับปรุงสมการ (3.22) ใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau_i}{\mu_l + \varepsilon \rho_l} \left( \frac{D/2 - \delta}{D/2 - y} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{dP}{dz} + \rho_l g \right) \left( \frac{D/2 - y}{\mu_l + \varepsilon \rho_l} \right) \left[ \left( \frac{D/2 - \delta}{D/2 - y} \right)^2 - 1 \right] \quad (3.25)$$

$\mathcal{E}$  คือ eddy diffusivity สำหรับชั้นถ่ายโมเมนตัมในฟิล์มของของเหลวกรณีการไหลปั่นป่วน

เงื่อนไขการอนุรักษ์อัตราการไหลของมวลทั้งหมดของฟิล์มเท่ากับ  $\pi(D/2)^2 G(1-x)$  ซึ่งสามารถเขียนรูปคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\left( \frac{D}{4} \right) G(1-x) = \rho_f \int_0^\delta u dy \quad (3.26)$$

การอนุรักษ์พลังงานโดย  $dx/dz$  เป็นความสัมพันธ์กับฟลักซ์ความร้อนที่ผนัง

$$\frac{dx}{dy} = \frac{4q''}{GDh_{fg}} \quad (3.27)$$

เงื่อนไขขอบเขตของฟิล์มของของเหลว

$$\text{ที่ } y=0 : u=0 \quad (3.28)$$

$$Y=\delta : \frac{du}{dy} = \frac{\tau_i}{\mu_f - \varepsilon \rho_f} \quad (3.29)$$

สำหรับค่าของ  $q''$ , G, x, D และ fluid property จากสมการ (3.25) และเงื่อนไขขอบสมการ (3.28) สามารถหาค่ารูปลักษณะของความเร็ว (Velocity profile) ในฟิล์มได้เท่านั้น แต่ถ้าหากมีความสัมพันธ์ที่เพียงพอสามารถหาค่า  $(dP/dz)$ ,  $\tau_i$ ,  $\varepsilon$  และ  $\delta$  ไปพร้อมกัน สำหรับสมการ (3.21) และสมการ (3.27) สามารถคำนวณหา  $dx/dz$

ความเค้นเฉือนโดยทั่วไปจะเขียนในเทอมของ interfacial friction factor  $f_i$  ดังนี้

$$\tau_i = \frac{f_i G^2 x^2}{2 \rho_g \alpha^2} \quad (3.30)$$

Interfacial friction factor  $f_i$  เป็นฟังก์ชันของ ฟิล์มของของเหลว, อัตราส่วนอัตรการไหลของแก๊สต่อทั้งหมด, พลิกซ์ของมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

$$f_i = f_i(\delta, x, G, D) \quad (3.31)$$

Willis [12] เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ง่ายๆเพื่อทำนาย interfacial friction factor ได้ดังนี้

$$f_i = 0.005 \left( 1 + 300 \frac{\delta}{D} \right) \quad (3.32)$$

Eddy diffusivity ในฟิล์มของของเหลวของการณเป็นการไหลแบบปั่นป่วนหาได้จาก

$$\varepsilon = n^2 u y \left( 1 + e^{-\rho_f n^2 u y / \mu_f} \right) \quad (3.33)$$

Blanghetti และ Schlunder [32] เสนอว่า เมื่อกำหนดให้  $n=0.1$  และ Eddy diffusivity จะมีค่าเป็นศูนย์จากผนังท่อจนถึงผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและฟิล์ม ผลเนื่องมาจากผลของผิวสัมผัสในการไหลปั่นป่วนจะมีค่าลดลง ดังความสัมพันธ์นี้

$$\frac{\varepsilon}{v_f} = -0.5 + 0.5 \left[ 1 + 0.64 (y^+)^2 \left( 1 - e^{-(y^+)^2 / 26} \right) \right]^{1/2} \quad (y \leq \delta^+) \quad (3.34)$$

$$\frac{\varepsilon}{v_f} = 0.0161 Ka^{1/3} Re_f^{1.34} \left[ \frac{\tau}{g(\rho_f - \rho_g)(v_f^2/g)^{1/3}} + \frac{\delta}{(v_f^2/g)^{1/3}} \left( 1 - \frac{y^+}{\delta^+} \right) \right] (\delta^+ - y^+) \quad (y > \delta^+) \quad (3.35)$$

โดยที่

$$Ka = \frac{\rho_f^3 g^3 (v_f^2/g)^2}{\sigma}, \quad y^+ = \frac{y(\tau_w \rho_f)^{1/2}}{v_f}, \quad \delta^+ = \frac{\delta(\tau_w \rho_f)^{1/2}}{v_f} \quad (3.36)$$

เมื่อ  $Re_f$  คือ Reynolds number,  $\tau_w$  คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง (wall shear stress) ที่  $y=0$  สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.24) และ (3.25) ที่  $y=\delta'$  ค่าพจน์  $\varepsilon/v_f$  จากสมการ (3.34) และ (3.35) และแทนค่า  $\varepsilon/v_f$  ในสมการ (3.24) ประมาณค่า  $\tau$  และ  $\frac{du}{dy}$

สำหรับความสัมพันธ์ของ  $f_i$  และ  $\varepsilon/v_f$  หาได้จากสมการคุณสมบัติของของไหล และค่าของ  $G$ ,  $q$  และ  $D$  ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ประมาณค่า  $\delta$
2. ค่าพจน์  $\tau$  จากสมการ (3.30) และ (3.32)
3. ค่าพจน์  $dP/dz$  จากสมการ (3.21) และ (3.27)
4. ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (3.33) และ (3.25) สามารถคำนวณค่า  $u$  จากการอินทิเกรตค่า  $u$  จาก  $y=0$  ถึง  $y=\delta$
5. หากค่า  $u$  ที่อินทิเกรตได้มา กับสมการ (3.26) ไม่สอดคล้องกัน ให้กำหนดค่า  $\delta$  ใหม่และเริ่มขั้นตอนจากข้อ 2 อีกครั้ง กระทำจนถึงสมการ (3.26)

### 3.4.2 Annular flow with entrainment

Hewitt และ Hall-Taylor [31] พิจารณาการไหลแบบ Annular flow ที่มีหยดของของเหลวไหลไปพร้อมกับแก๊สที่แกนท่อ พิจารณา 3 ส่วนประกอบของการไหลแบบแยก (Separate flow) คือ

1. फिल्मของของเหลวไหลที่ผนังท่อ
2. แก๊สจะไหลในส่วนของแกนท่อ
3. หยดของของเหลวไหลในส่วนของแกนท่อพร้อมกันแก๊ส

การไหลแบบ Annular flow ออกแบบให้  $\beta_f$  เป็นปริมาณของฟิล์มที่ไหลที่ผนังท่อ,  $E$  คือ มวลของหยดของของเหลวที่ไหลในส่วนของแกนท่อ, ความเร็วของแก๊ส ( $u_g$ ), ความเร็วของฟิล์ม ( $u_{ff}$ ) และความเร็วของหยดของของเหลว ( $u_{le}$ ) หาค่าได้ดังนี้

$$u_g = \frac{Gx}{\alpha\rho_g} \quad (3.37)$$

$$u_{ff} = \frac{G(1-x)(1-E)}{\beta_f\rho_f} \quad (3.38)$$

$$u_{le} = \frac{G(1-x)E}{(1-\alpha-\beta_f)\rho_f} \quad (3.39)$$

การกระจายของความเร่งทั้งหมดของ Pressure gradient เขียนในรูปของความเร่งได้

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_{acc} = \frac{d}{dz} \left[ \alpha\rho_g u_g^2 + \beta_f\rho_f u_{ff}^2 + (1-\alpha-\beta_f)\rho_f u_{le}^2 \right] \quad (3.40)$$

แทนค่า  $u$  ความเร็วลงในสมการได้

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_{acc} = G^2 \frac{d}{dz} \left[ \frac{x^2}{\alpha \rho_g} + \frac{(1-E)^2 (1-x)^2}{\beta_f \rho_f} + \frac{E^2 (1-x)^2}{(1-\alpha-\beta_f) \rho_f} \right] \quad (3.41)$$

สมมติฐานว่าความเร็วยกของของเหลวเท่ากันความเร็วของแก๊ส  $u_{le} = u_g$  ความสัมพันธ์ของ  $\beta_f$  เขียนได้ดังนี้

$$\beta_f = 1 - \alpha - \frac{\alpha E (1 - x \rho_g)}{x \rho_f} \quad (3.42)$$

จากสมการ (3.41) แทนค่า  $\beta_f$  ลงไปเขียนใหม่ได้

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_{acc} = G^2 \frac{d}{dz} \left[ \frac{x^2}{\alpha \rho_g} + \frac{(1-E)^2 (1-x)^2 x}{\rho_f (1-\alpha) - \rho_g \alpha E (1-x)} + \frac{E(1-x)x}{\alpha \rho_g} \right] \quad (3.43)$$

Magiros และ Dukler [33] เสนอเงื่อนไขเพื่อประมาณค่าการกระจายความเร่งอย่างง่าย

1.) ความเร่งของฟิล์มไม่มีสำคัญเมื่อเทียบกับความเร่งของการไหลที่แกนท่อ 2.) void fraction ประมาณค่าเป็น 1 จากสมการ (3.43) สามารถเขียนในรูปอย่างง่ายได้

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_{acc} = \left(\frac{G^2}{\rho_g}\right) \frac{d}{dz} [x^2 + x(1-x)E] \quad (3.44)$$

จากสมการ 10.30 ในหนังสือ Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena แทนเทอมสุดท้ายทางขวาของสมการด้วย เทอมของการกระจายของความเร่งสมการ (3.43) จะได้สมการ Pressure gradient ดังนี้

$$\begin{aligned} -\left(\frac{dP}{dz}\right) &= \phi_l^2 \left(\frac{dP}{dz}\right) + [(1-\alpha)\rho_f + \alpha\rho_g] g \sin \Omega \\ &+ G^2 \frac{d}{dz} \left[ \frac{x^2}{\alpha \rho_g} + \frac{(1-E)^2 (1-x)^2 x}{\rho_f (1-\alpha) - \rho_g \alpha E (1-x)} + \frac{E(1-x)x}{\alpha \rho_g} \right] \end{aligned} \quad (3.45)$$

สำหรับการไหลในแกนท่อ การสมดุลแรงโมเมนต์เพื่อปรับปรุงสมการ (3.19) สำหรับการไหลที่มีหยดของของเหลวไหลในแกนท่อได้

$$\begin{aligned} -\left(\frac{dP}{dz}\right) &= \frac{4\tau_i}{D} + \frac{\rho_g g [x - E(1-x)]}{x + E(1-x)\rho_g/\rho_f} \\ &+ G^2 \frac{d}{dz} \left[ \frac{x^2}{\alpha \rho_g} + \frac{(1-E)^2 (1-x)^2 x}{\rho_f (1-\alpha) - \rho_g \alpha E (1-x)} + \frac{E(1-x)x}{\alpha \rho_g} \right] \end{aligned} \quad (3.46)$$

สำหรับภายใต้เงื่อนไขของการเกิดหยดของของเหลวไหลในแกนท่อ การอนุรักษ์มวลในฟิล์มหาได้จาก

$$\left(\frac{D}{4}\right) G(1-x)(1-E) = \rho_f \int_0^\delta u dy \quad (3.47)$$

Govan และคณะ [34] เสนอแบบจำลองเพื่อประมาณค่าฟลักซ์ของมวลอย่างน้อยที่หยดของของเหลว  $G_{lfo}$  คำนวณได้ดังนี้

$$\frac{G_{lfo}D}{\mu_f} = \exp \left\{ 5.8504 + 0.429 \left( \frac{\mu_g}{\mu_f} \right) \left( \frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.5} \right\} \quad (3.48)$$

อัตราการไหลหยดของของเหลว  $E''$  (มวลของหยดของของเหลวต่อวินาที) คำนวณได้จาก

$$\frac{E''}{Gx} = 5.75 \times 10^{-5} \left[ (G_{lf} - G_{lfo})^2 \left( \frac{D\rho_f}{\sigma\rho_g^2} \right) \right]^{0.316} \quad \text{สำหรับ } G_{lf} > G_{lfo} \quad (3.49)$$

โดยที่  $G_{lf}$  ฟลักซ์ของมวลที่ฟิล์ม

$$G_{lf} = G(1-x)(1-E) \quad (3.50)$$

Govan และคณะ [34] ตั้งสมมติฐานให้การไหลเป็นการไหลที่สมดุล โดยที่อัตราการไหลของหยดของเหลวเท่ากับอัตราการเกิดของหยดของเหลว  $k_d$  เป็นสัมประสิทธิ์การเกิดหยดของเหลว และ  $C_e$  คือความเข้มข้นของหยดของเหลว

$$E' = k_d C_e \quad (3.51)$$

สามารถคำนวณ  $k_d$  ได้ดังนี้

$$k_d \sqrt{\frac{\rho_g D}{\sigma}} = 0.18 \quad \text{สำหรับกรณี } \left( \frac{C_d}{\rho_g} \right) < 0.3 \quad (3.52)$$

$$k_d \sqrt{\frac{\rho_g D}{\sigma}} = 0.083 \left( \frac{C_e}{\rho_g} \right)^{-0.65} \quad \text{สำหรับกรณี } \left( \frac{C_d}{\rho_g} \right) \geq 0.3 \quad (3.53)$$

$E$  คือ Entrainment fraction มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของหยดของเหลว  $C_e$  ดังนี้

$$E = \frac{C_e x / \rho_g}{(1-x)[1 - C_e / \rho_f]} \quad (3.54)$$

สมการ (3.49), (3.50) และ (3.51) รวมกันเป็น

$$\frac{k_d C_e}{Gx} = 5.75 \times 10^{-5} \left[ [G(1-x)(1-E) - G_{lfo}]^2 \left( \frac{D\rho_f}{\sigma\rho_g^2} \right) \right]^{0.316} \quad (3.55)$$

$G_{lfo}$  คำนวณได้จากสมการ (3.48) ระบบสมการไม่เป็นเส้นตรงของสมการ (3.52), (3.53) และ (3.55) สามารถแก้ปัญหาก็พร้อมๆ กันจะสามารถคำนวณค่า  $k_d$ ,  $C_e$  และ  $E$  ได้ ระบบการแก้ปัญหแบบนี้ใช้สำหรับการทำนายหยดของเหลวในแกนท่อที่ตำแหน่งใดๆ

Fu และ Klausner [35] เสนอแบบจำลองที่เป็นทางเลือกสำหรับผลของหยดของเหลวในการไหลแบบวงแหวน สำหรับการระเหยในการไหลแบบวงแหวน ควรใช้สมการนี้

$$E = \left[ 1 - \frac{\alpha}{(1 - \alpha/r_o)^2} \right] \frac{x}{1-x} \left( \frac{\rho_f}{\rho_g} \right) \quad (3.56)$$

Zuber และ Findlay [36] เสนอสมการของ void fraction สำหรับกรณีเกิดหยดของเหลวไหลที่แกนท่อ

$$\alpha = \frac{1}{C_o \left[ 1 + \frac{1-x}{x} \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right) \right] + V_{gj} \frac{\rho_g}{Gx}} \quad (3.57)$$

กำหนดให้  $C_o = 0.98$  และ  $V_{gj} = 1.12$  m/s กรณีไหลขึ้น และ  $C_o = 1.02$  และ  $V_{gj} = -0.11$  m/s กรณีไหลลง สมการ (3.56) และ (3.57) สามารถคำนวณหาค่าหยดของเหลวที่ตำแหน่งภายใต้เงื่อนไข

วิธีการคำนวณหา Pressure gradient, void fraction สำหรับคุณสมบัติของไหลจำเพาะ และค่าของ  $q''$ ,  $G$ ,  $x$  และ  $D$  ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ประมาณค่า  $\delta$
2. คำนวณค่า  $\tau$  จากสมการ (3.30) และ (3.32)
3. จากสมการ (3.52), (3.53) และ (3.55) สามารถแก้สมการไปพร้อมๆกันโดยการทำให้ซ้ำ จะได้ค่า  $k_d$ ,  $C_e$  และ  $E$
4. คำนวณค่า  $dP/dz$  จากสมการ (3.27) และ (3.46)
5. ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (3.33) และ (3.25) สามารถคำนวณค่า  $u$  จากการอินทิเกรตค่า  $u$  จาก  $y=0$  ถึง  $y=\delta$
6. หากค่า  $u$  ที่อินทิเกรตได้มา กับสมการ (3.47) ไม่สอดคล้องกัน ให้กำหนดค่า  $\delta$  ใหม่และเริ่มขั้นตอนจากข้อ 2 อีกครั้ง จนถึงสมการ (3.47)

## บทที่ 4 การสร้างฐานข้อมูลผลการทดลอง

ผลการทดลองมีความสำคัญมากสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หากผลการทดลองมีความแม่นยำ และมีจำนวนผลการทดลองที่เป็นจำนวนมาก จากต่างกลุ่มการทดลอง เมื่อนำผลการทดลองเหล่านี้มาสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ จะทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำและสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง การรวบรวมผลการทดลองที่ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองขนาดความหนาฟิล์มนี้ การทดลองเป็นการไหลสองเฟสในท่อกลมแนวดิ่ง โดยการไหลจะเป็นการไหลแบบวงแหวน การทดลองทั้งหมดที่รวบรวมมาจะอยู่ภายใต้การทดลองที่มีเงื่อนไขเดียวกัน สามารถรวบรวมผลการทดลองต่างกลุ่มการทดลองได้ทั้งหมด 8 กลุ่มการทดลอง คือ Bousman และ McQuillen [1], Fukano และ Furukawa [2], Gill และคณะ [3], MacGillivray [4], Sawant [5], Ashwood และคณะ [6], Schubring และคณะ [8] และ Alamu [9] เป็นต้น

### 4.1 การเก็บรวบรวมผลการทดลองขนาดความหนาของฟิล์ม

การเก็บรวบรวมผลการทดลองของขนาดความหนาของฟิล์มของการไหลแบบวงแหวนในท่อกลมแนวดิ่ง โดยรวบรวมผลการทดลองที่มีเงื่อนไขการทดลองที่เหมือนกัน และจัดเก็บผลการทดลองเป็นไฟล์เอ็กเซลล์ การเก็บผลการทดลองเรียงตามข้อมูลตามลำดับดังนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, mass flux, Quality, อัตราส่วนขนาดความหนาฟิล์มต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เป็นต้น ดังรูปที่ 5 โดยมากแล้วการแสดงผลผลการทดลองต่างๆ จะแสดงผลในรูปแบบของกราฟผลการทดลอง เพื่อให้สะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูลจึงได้ใช้โปรแกรม Data Thief III ในการช่วยเก็บข้อมูล

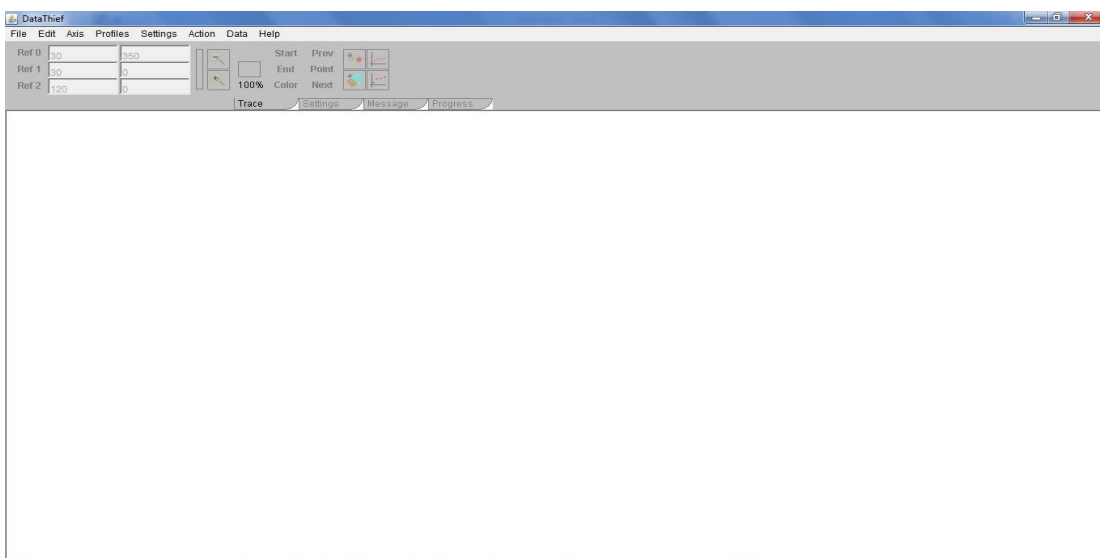
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	ผลการทดลองของ Fukano											
2	D(m)	G(kg/m <sup>2</sup> s)	X	thickness/D	$\mu_{liquid}$ (Pa.s)	$\rho_{liquid}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu_{Air}$ (Pa.s)	$\rho_{Air}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ (N/m)	Jg(m/s)	Jl(m/s)	thickness
3	0.026	0.10793055	2.55E-02	0.0008483	998	0.00001845	1.176	0.072	10.2676	0.1	6.62E-04	
4	0.026	0.14926216	1.83E-02	0.0008483	998	0.00001845	1.176	0.072	14.8894	0.1	4.76E-04	
5	0.026	0.19541286	1.49E-02	0.0008483	998	0.00001845	1.176	0.072	20.6112	0.1	3.88E-04	
6	0.026	0.25791923	9.67E-03	0.0008483	998	0.00001845	1.176	0.072	29.4955	0.1	2.51E-04	
7	0.026	0.32234803	6.23E-03	0.0008483	998	0.00001845	1.176	0.072	40.3684	0.1	1.62E-04	
8	0.026	0.36019267	4.63E-03	0.0008483	998	0.00001845	1.176	0.072	47.7759	0.1	1.20E-04	
9	0.026	0.09813576	2.84E-02	0.003784	1113	0.00001845	1.176	0.065	10.2985	0.1	7.39E-04	
10	0.026	0.13741753	2.18E-02	0.003784	1113	0.00001845	1.176	0.065	15.0775	0.1	5.67E-04	
11	0.026	0.17583439	1.83E-02	0.003784	1113	0.00001845	1.176	0.065	20.1919	0.1	4.75E-04	
12	0.026	0.24057984	1.27E-02	0.003784	1113	0.00001845	1.176	0.065	29.9823	0.1	3.31E-04	
13	0.026	0.29835063	8.74E-03	0.003784	1113	0.00001845	1.176	0.065	40.2434	0.1	2.27E-04	
14	0.026	0.34531827	6.85E-03	0.003784	1113	0.00001845	1.176	0.065	49.9203	0.1	1.78E-04	
15	0.026	0.09714816	3.44E-02	0.0064344	1149	0.00001845	1.176	0.062	10.5131	0.1	8.95E-04	
16	0.026	0.13651354	2.81E-02	0.0064344	1149	0.00001845	1.176	0.062	15.4466	0.1	7.30E-04	
17	0.026	0.17577247	2.19E-02	0.0064344	1149	0.00001845	1.176	0.062	20.8361	0.1	5.69E-04	

รูปที่ 5 รูปการเรียงตารางข้อมูล



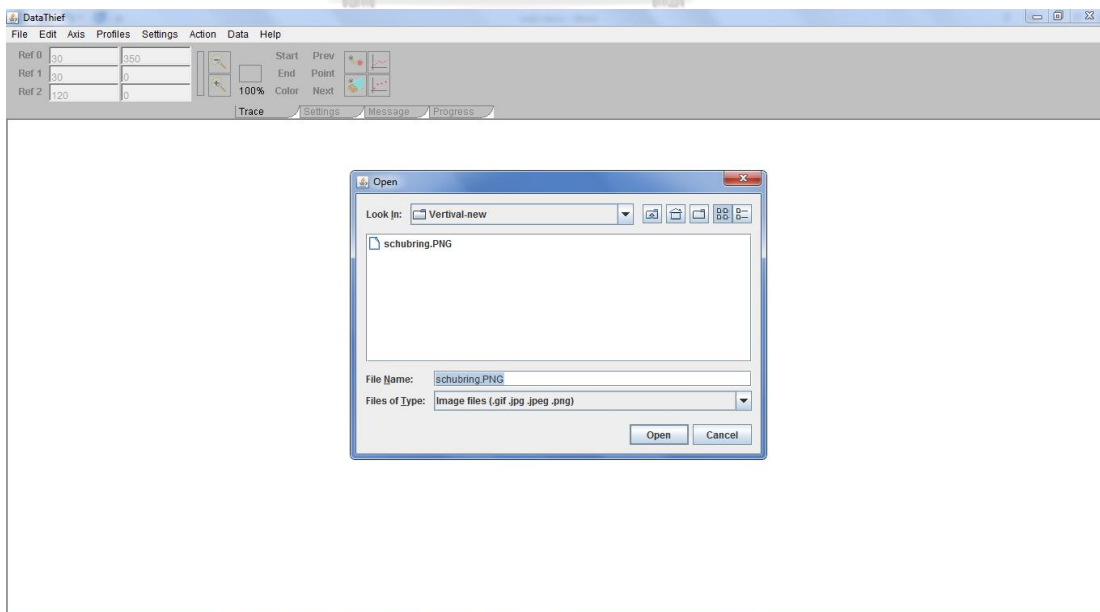
### การใช้งานโปรแกรม Data Thief III

- 1.) การเปิดใช้งานโปรแกรม Data Thief III ดับเบิลคลิกที่ Datathief.jar โปรแกรมจะเปิดขึ้นดังรูปที่ 6



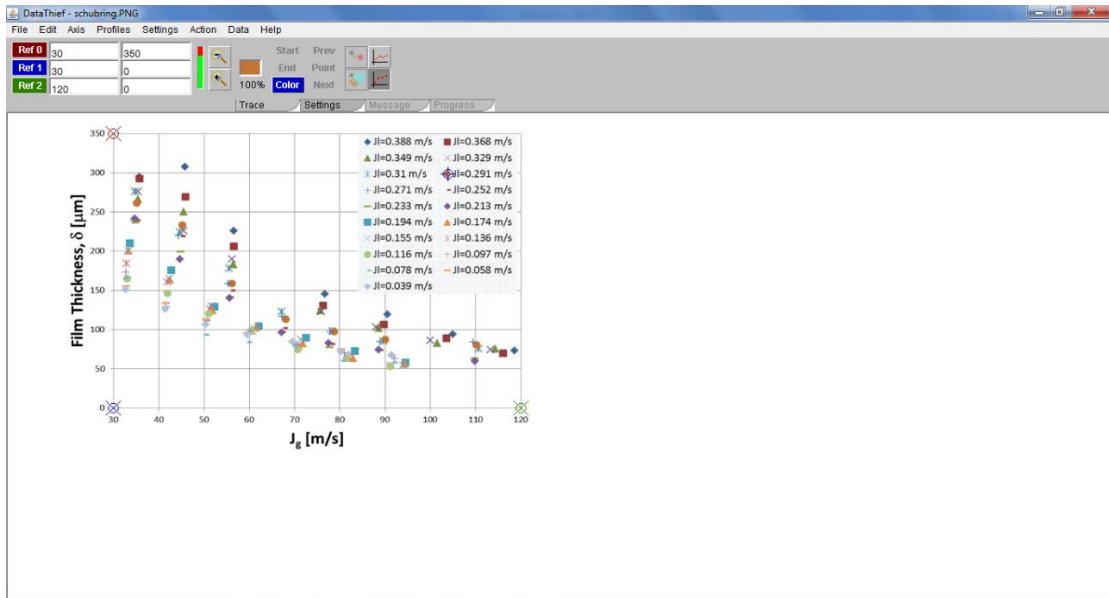
รูปที่ 6 รูปโปรแกรม Data Thief

- 2.) เปิด file และเลือกที่ open โดยในตัวอย่างนี้ใช้ไฟล์ schubring.PNG ดังรูปที่ 7 โดย ไฟล์ตัวนี้จะ เป็นไฟล์รูปภาพผลการทดลองซึ่งต้องทำการคัดลอกแล้วเซฟเป็นไฟล์รูปภาพก่อน



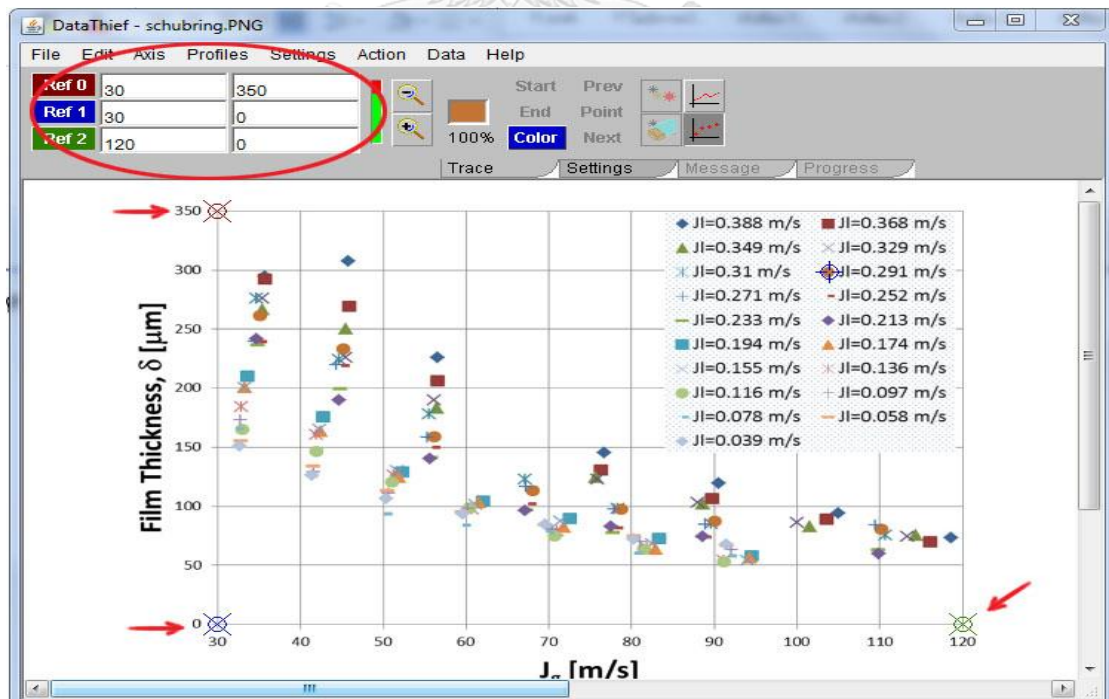
รูปที่ 7 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief

3.) เปิดข้อมูลแล้ว ให้เลือก  point mode เพื่อเลือกเก็บข้อมูลเป็นจุดดังรูปที่ 8



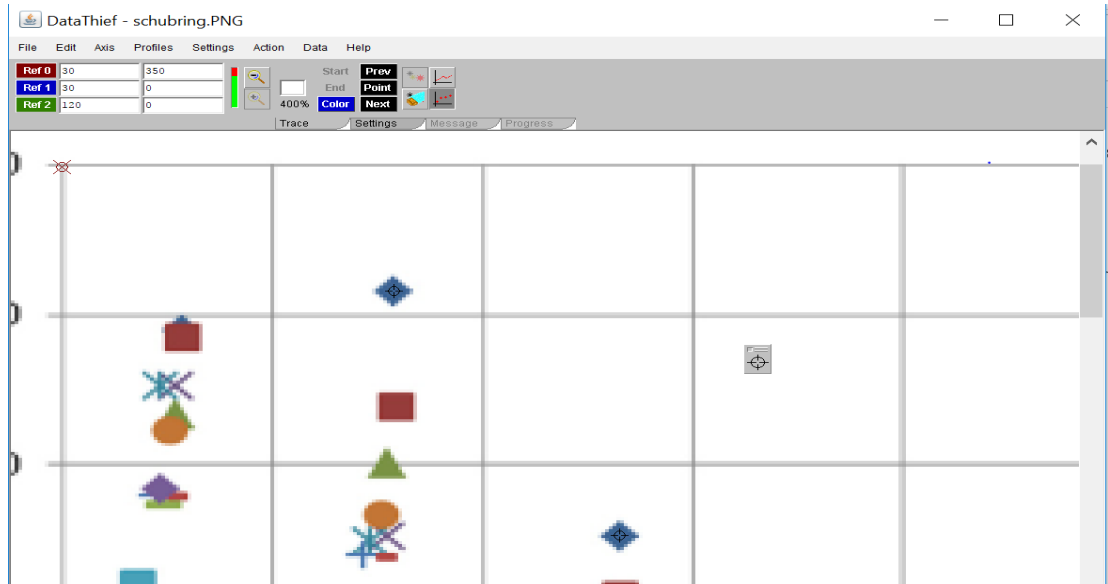
รูปที่ 8 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief

4.) เลือกการตั้งค่าข้อมูล 3 จุดตามแนวแกนของกราฟโดยวาง dump ที่จุด 3 จุด dump สีแดง กำหนดแกน x, y เป็น 30, 350 dump สีน้ำเงินกำหนดแกน x, y เป็น 30, 0 และ dump สีเขียว กำหนดแกน x, y เป็น 120, 0 ดังรูปที่ 9



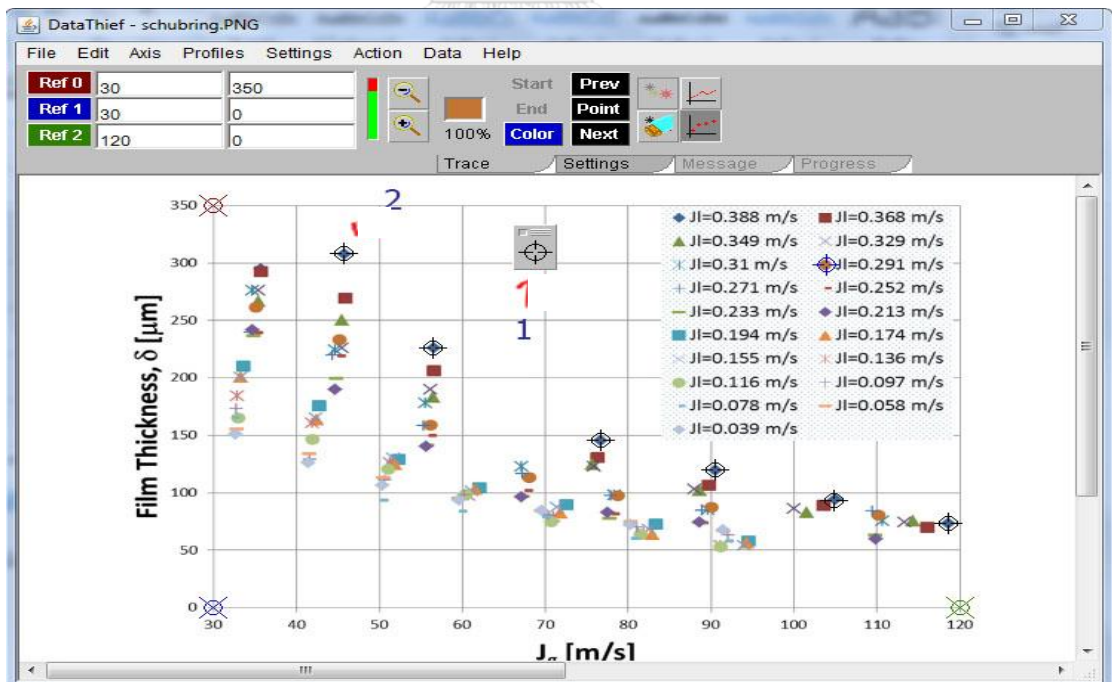
รูปที่ 9 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief

- 5.) เพื่อให้วาง dump ให้ตรงจุดและมีความแม่นยำที่มากขึ้น ให้ทำการขยายภาพก่อน และวาง dump ให้อยู่ตรงกลางจุดการทดลองดังรูปที่ 10



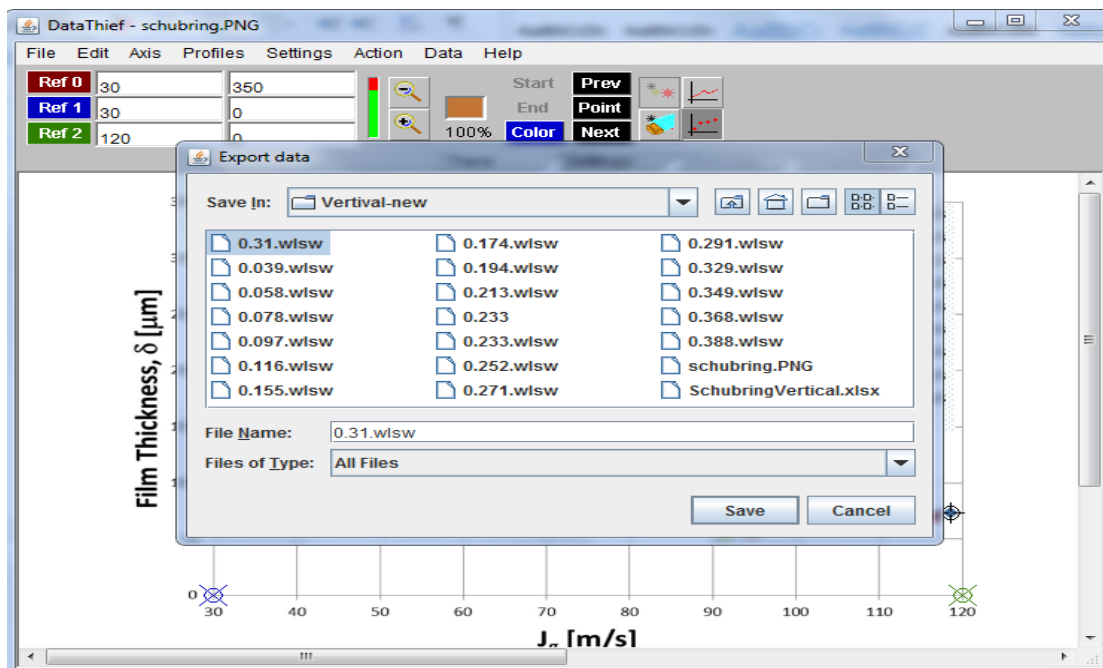
รูปที่ 10 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief

- 6.) ใช้ dump วางที่จุดข้อมูลที่เลือกโดยควรวางตรงกลางของจุดเพื่อความแม่นยำวางให้ครบทุกจุดตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief

- 7.) วาง dump จนครบแล้วให้เลือก File เลือก Export data และ save เป็นไฟล์นามสกุล.wlsw ตามรูปที่ 12



รูปที่ 12 รูปหน้าต่างโปรแกรม Data Thief

- 8.) หลังจากได้ไฟล์ 0.31.wlsw แล้วนำไปเปิดในโปรแกรม excel ก็จะได้ข้อมูลตามรูปที่ 12 ทำแบบนี้เรื่อยๆจนกว่าจะเก็บรวบรวมผลการทดลองจนครบ ในแต่ละผลการทดลองให้ทำแบบนี้ซ้ำ 5 ครั้ง เมื่อได้ผลการทดลองแล้วให้ทำการเฉลี่ย เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำมากขึ้น และสร้างตารางผลการทดลองของแต่ละผลการทดลองตาม รูปที่ 5

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	#DataThie entrainmer	วันจันทร์	6-มิ.ย.-59	1:18:41	ก่อนเที่ยง						
2	44.6025,	224.8185									
3	55.5058,	178.1982									
4	67.1314,	122.9223									
5	78.157,	97.4383									
6	89.6056,	85.2678									
7	110.666,	75.4096									
8											
9											

รูปที่ 13 รูปการเปิด Data ในโปรแกรมเอ็กซ์เซล

## 4.2 สรุปผลการทดลองที่รวบรวม

ผลการทดลองที่ทำการทดลองการไหลแบบวงแหวนในท่อแนวตั้งที่รวบรวมได้ทั้งหมด 8 การทดลองจากต่างกลุ่มการทดลองแสดงในตารางที่ 2 พิสัยของผลการทดลองที่รวบรวม ท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 9.4-31.75 mm ความเร็วการไหลตามผิวของแก๊สอยู่ระหว่าง 2-80.65 m/s ความเร็วการไหลตามผิวของของเหลวระหว่าง 0.04-0.542 m/s และผลการทดลองที่รวบรวมมีทั้งหมด 782 จุดการทดลอง ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดสามารถมาสร้างเป็นฐานข้อมูลผลการทดลองเพื่อทำนายขนาดความหนาฟิล์มของการไหลแบบวงแหวนในท่อกลมแนวตั้งได้



ตารางที่ 2 สรุปการทดลองการวัดขนาดความหนาฟิล์มของการไหลแบบวงแหวนที่เก็บรวบรวม

Author	Fluids	D (mm)	$j_l$ (m/s)	$j_g$ (m/s)	Data point
Bousman and McQuillen [1]	Air-water	12.7	0.07-0.5	4-26.1	26
Fukano and Furukawa [2]	Air-water	26	0.04-0.1	9.7-49.9	17
	Air- 45 wt%/glycerol	26	0.04-0.1	9.7-49.9	18
	Air- 53 wt%/glycerol	26	0.04-0.1	9.7-49.9	18
	Air- 60 wt%/glycerol	26	0.04-0.1	9.7-49.9	18
	Air- 60 wt%/glycerol	26	0.04-0.1	9.7-49.9	18
Gill et al.[3]	Air-water	31.75	0.043-0.16	13.44-80.65	58
MacGillivray[4]	Air-water	9.5	0.076-0.32	13-29.4	221
	Helium-water	9.5	0.098-0.3	22.2-62.4	108
Sawant[5]	Air-water	9.4	0.05-0.542	2-97	95
Ashwood et al. [6]	Air-water	23.4	0.063-0.338	32.57-77.95	46
Schubring et al. [8]	Air-water	23.4	0.04-0.34	32.8-114.3	122
Alamu[9]	Air-water/glycerol	19	0.05-0.15	13.82-42.9	37
				Total data point	782

## บทที่ 5 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ศึกษาผ่านมา

หลังจากบทที่ 4 สร้างฐานข้อมูลผลการทดลองแล้ว ในบทที่ 5 นี้จะนำฐานข้อมูลผลการทดลองที่สร้างมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้ศึกษามาแล้วในอดีต การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ศึกษาผ่านมากับผลการทดลองที่รวบรวมในตารางที่ 1 โดยใช้การคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Relative Absolute Error) ในการเปรียบเทียบซึ่งสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$MRAE = \frac{1}{N} \sum_i \left| \frac{\delta_{\text{model},i} - \delta_{\text{exp},i}}{\delta_{\text{exp},i}} \right| \times 100\%, \quad (5.1)$$

เพื่อจะพิจารณาแบบจำลองต่างๆในเอกสารและงานที่เกี่ยวข้อง ที่มีผลสอดคล้องกับผลการทดลองในตารางที่ 2 โดยการพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแต่ละแบบจำลอง ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแต่ละแบบจำลองแสดงในตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแบบจำลองมีค่าน้อย หมายความว่าแบบจำลองนั้นสามารถทำนายผลการทดลองขนาดความหนาของฟิล์มได้แม่นยำกว่าแบบจำลองอื่น เมื่อได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลองอื่นแล้ว จึงต้องทำการศึกษาแบบจำลองนั้นๆ โดยศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลอง แนวคิดโดยพื้นฐานของแบบจำลอง ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกับแบบจำลองทำนายขนาดความหนาของฟิล์ม และแบบจำลองขนาดความหนาของฟิล์มเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ใดบ้าง เพื่อให้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายผลขนาดความหนาของฟิล์มได้แม่นยำมากขึ้นจากแบบจำลองทั้งหมด 7 แบบได้แยกพิจารณาดังต่อไปนี้

แบบจำลองของ Henstock และ Hanratty [10] เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมจำนวน 8 ผลการทดลองจากต่างแล็บการทดลอง กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henstock และ Hanratty [10] พบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ทั้งหมดเท่ากับ 40.26% ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาแต่ละผลการทดลองพบว่า ผลการทดลอง Ashwood และ คณะ [6], Schubring และ คณะ [8] และ Alamu [9] ทั้งหมดผลจากการเปรียบเทียบเป็น over predict ดังจะเห็นในรูปที่ 14 แบบจำลองของ Henstock และ Hanratty [10] สามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์มของผลการทดลอง Fukano และ Furukawa [2] และ Sawant [5] ผลค่อนข้างแม่นยำ โดยแต่ละผลการทดลองมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ดังนี้ 21.92% และ 22.7%

แบบจำลองของ Tatterson และคณะ [19] แบบจำลองสร้างจากผลการทดลองของเขาเองเป็นพื้นฐาน ซึ่งแบบจำลองของ Tatterson และคณะ [19] ได้รับการปรับปรุงมาจากแบบจำลองของ Henstock และ Hanratty [10]

การเปรียบเทียบแบบจำลองของ Tatterson และคณะ [14] กับผลการทดลองที่รวบรวมทั้ง 8 ผลการทดลองพบว่า Tatterson และคณะ [19] สามารถทำนายผลการทดลองของ MacGillivray [4] ผลการทดลองของ อากาศกับน้ำ, Gill และคณะ [3] และ Sawant [5] ซึ่งผลพบว่าย่ำ ค่อยข้างแม่นยำ โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ที่มีค่าน้อยดังนี้ 17.39%, 19.37% และ 20.87% จากรูปที่ 15 ผลการทดลองของ Ashwood และคณะ [6], Schubring และคณะ [8] และ Alamu [9] พบว่าผลการเปรียบเทียบเป็น over predict และผลกาทดลองของ MacGillivray [4] ของอากาศกับน้ำ, Gill และคณะ [3] และ Sawant [5] ผลการเปรียบเทียบเป็น under predict และมีบางส่วนของผลการทดลองอยู่ในเส้น  $\pm 40\%$  ความคลาดเคลื่อน การเปรียบเทียบผลโดยรวมพบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ทั้งหมดเท่ากับ 49.54%

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมทั้ง 8 ผลการทดลองพบว่า แบบจำลอง Hori และคณะ [19] ไม่สามารถทำนายผลการทดลองได้ทั้งหมด ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 16 ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ทั้งหมดเท่ากับ 443.44% เมื่อพิจารณาแต่ละผลการทดลองพบว่า ผลการทดลองของ Sawant [5] ผลการเปรียบเทียบเป็น under predict ทั้งหมด และผลการทดลองของ Ashwood และคณะ [6], Bousman [1], Fukano และ Furukawa [2], Schubring และคณะ [8], MacGillivray [4] ของอากาศกับน้ำ และ ฮีเลียมกับน้ำ, Gill และคณะ [3] และ Alamu [9] ผลการเปรียบเทียบเป็น over predict ทั้งหมด

Fukano และ Furukawa [2] เป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานมาจากผลการทดลองของเขาเองจากการเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง ทำให้สามารถทำนายความหนาฟิล์มผลการทดลองของเขาเองได้ดีมาก มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 7.52% แบบจำลอง Fukano และ Furukawa [2] สามารถทำนายผลการทดลองของ Ashwood และคณะ [6], Schubring และคณะ [8], และ MacGillivray [4] ของฮีเลียมกับน้ำ ได้ค่อนข้างแม่นยำ โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ดังนี้ 17.63%, 23.62% และ 9.02% จากรูปที่ 17 พบว่า ผลการทดลองของ Alamu [9] ผลการเปรียบเทียบเป็น over predict ทั้งหมด และผลการทดลองของ MacGillivray [4] ของอากาศและน้ำ, Sawant [5], บางส่วนของผลการทดลองของ Gill และคณะ [3] และบางส่วนของผลการทดลองของ Schubring และคณะ [8] ผลการเปรียบเทียบเป็น under predict ผลการ



เปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมดของแบบจำลองมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 31.05%

แบบจำลอง MacGillivary [4] มีพื้นฐานมาจากผลการทดลองของเขาเอง ทดลองภายใต้เงื่อนไข normal gravity, microgravity และ hypergravity กำหนด ฟลักซ์มวลของเหลว (liquid mass flux)  $76-314 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ , ฟลักซ์มวลของอากาศ (air mass flux)  $14.3-47.7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  และฟลักซ์มวลของฮีเลียม  $5-11.6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองของ MacGillivary [4] กับผลการทดลองที่รวบรวมจำนวน 8 ผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองของ MacGillivary [4] จะทำนายผลการทดลองของเขาเองได้แม่นยำมากทั้งผลการทดลองของ อากาศกับน้ำ และ ฮีเลียมกับน้ำ โดยที่ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 7.49% และ 12.46% นอกจากผลการทดลองของเขาเองแล้ว แบบจำลองของ MacGillivary[4] สามารถทำนายผลการทดลองของ Bausman [1] ได้ค่อนข้างแม่นยำ โดยที่ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 19.58% และจากรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองสามารถทำนายผลการทดลองของ Fukano และ Furukawa [2] และ Alamu [9] ผลการเปรียบเทียบเป็น over predict ทั้งหมด และผลการทดลองของ Gill และคณะ [3] ทั้งหมด, บางส่วนของผลการทดลอง Ashwood และคณะ [6], Schubring และคณะ [8] และ Sawant [5] ผลการเปรียบเทียบเป็น under predict และมีบางส่วนที่จะอยู่ระหว่างเส้นความคลาดเคลื่อน  $\pm 40\%$  จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมดกับแบบจำลองพบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 38.31%

แบบจำลองของ Berna และคณะ [21] มีพื้นฐานมาจากผลการทดลองของ Tatterson และคณะ [19], Paras และ Karabelas [22] ซึ่งทั้งสองผลการทดลองเป็นการทดลองในท่อแนวนอน และผลการทดลองของ Cousins และ Hewitt [23], Alamu [9] และ Schubring และคณะ [8] เป็นผลการทดลองในท่อแนวตั้ง พิสัยของผลการทดลอง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 9.5-50.8 mm ความเร็วการไหลของแก๊ส 60-52 m/s

จากการเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองที่รวบรวมทั้ง 8 ผลการทดลอง พบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 93.13% เมื่อแยกพิจารณาแต่ละผลการทดลองพบว่าแบบจำลองของ Berna และคณะ [21] สามารถทำนายผลการทดลองของ Bausman [1], Gill และคณะ [3] และ Alamu [9] ได้ผลค่อนข้างดี มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ดังนี้ 21.99%, 16.37% และ 12.49% จากรูปที่ 19 จะเห็นได้ว่าผลการทดลองของ Ashwood และคณะ [6], Schubring และคณะ [8] และ MacGillivary [4] ของฮีเลียมกับน้ำ ผลการเปรียบเทียบเป็น over predict ทั้งหมด และ ผลการทดลองของ Fukano และ Furukawa [2] ผลการเปรียบเทียบเป็น under predict ทั้งหมด

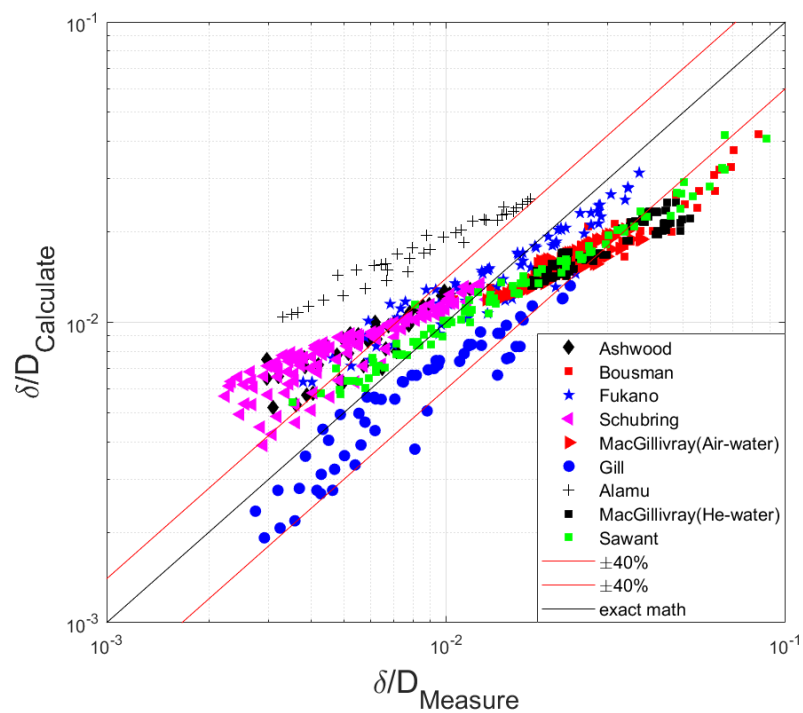
แบบจำลองของ Ju และคณะ [25] มีพื้นฐานมาจากผลการทดลองของ Sawant [5], Whalley และคณะ [13] และ Fukano และ Furukawa [2] มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.4-31.8 mm ความเร็วของแก๊ส 3-98 m/s และมีความเร็วของของเหลว 0.008-0.71 m/s

การเปรียบเทียบแบบจำลองของ Ju และคณะ [24] กับผลการทดลองที่รวบรวมทั้งหมด 8 ผลการทดลอง แบบจำลองสามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์มของผลการทดลองของ Bousman [1], Fukano และ Furukawa [2], MacGillivray [4] ของอากาศกับน้ำ และ ฮีเลียมกับน้ำ และ Sawant[5] ได้ผลค่อนข้างแม่นยำ โดยที่ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 16.32%, 12.63%, 13.11%, 24.26% และ 12.86% จะเห็นได้ว่าแบบจำลองของ Ju และคณะ [24] ทำนายผลของความหนาฟิล์มของผลการทดลองของ Fukano และ Furukawa [2] และ Sawant [5] ได้แม่นยำมากเพราะ แบบจำลองของ Ju และคณะ [24] มีพื้นฐานการสร้างมาจากผลการทดลองของ Fukano และ Furukawa [2] และ Sawant [5] จากรูปที่ 20 เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองของ Alamu [9] เป็น over predict ทั้งหมด และผลการทดลองทั้งหมดของ Gill และคณะ [3] เป็น under predict ผลการทดลองของ Ashwood และคณะ [6] และ Schubring และคณะ [8] บางส่วนเป็น over predict และบางส่วนอยู่ระหว่างเส้นความคลาดเคลื่อน  $\pm 40\%$  และผลการทดลองของ MacGillivray [4] ของฮีเลียมกับน้ำ บางส่วนเป็น under predict และบางส่วนอยู่ระหว่างเส้นความคลาดเคลื่อน  $\pm 40\%$  ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมดกับแบบจำลองพบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 27.89%

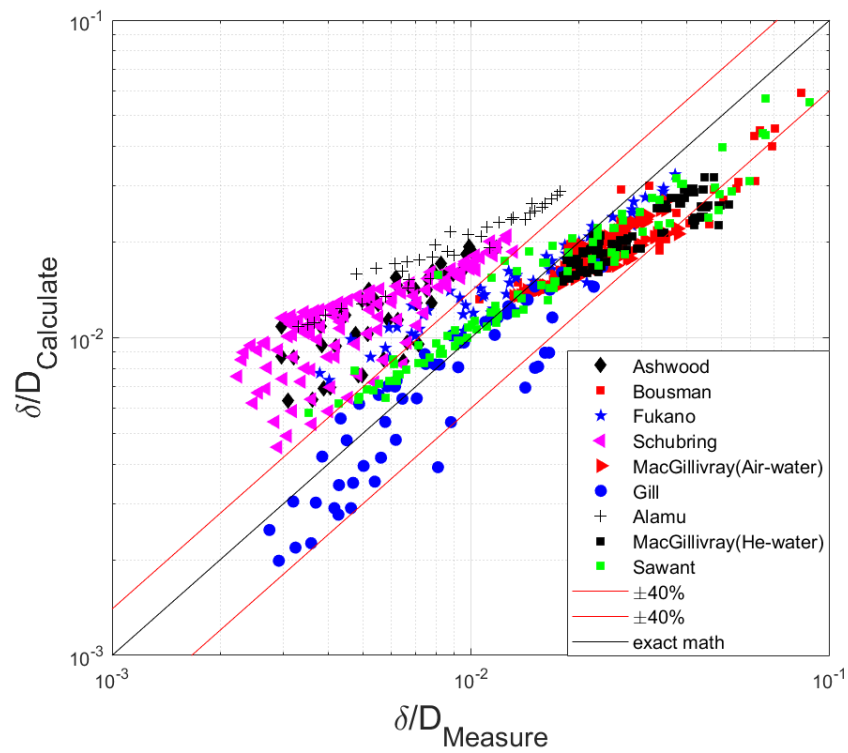
#### 5.8 สรุปผลการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ผ่านมากับผลการทดลองที่รวบรวม

จากการเปรียบเทียบพบว่าแบบจำลองของ Fukano และ Furukawa [2], MacGillivray [4] และ Ju และคณะ [24] สามารถทำนายผลการทดลองที่รวบรวมทั้งหมดได้ค่อนข้างดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ดังนี้ 31.31%, 38.31% และ 27.89% ซึ่งที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าและจำลอง Fukano และ Furukawa [2] เป็นแบบจำลองที่สร้างมาจากผลการทดลองของตัวเองจึงสามารถทำนายผลการทดลองของเขาเองได้ดีมาก แสดงในตารางที่ 3 จึงทำให้มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ที่ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น รวมทั้งแบบจำลองของ MacGillivray [4] เป็นแบบจำลองที่สร้างมาจากผลการทดลองของเขาเอง จึงสามารถทำนายผลการทดลองของเขาเองได้ดีมาก และในวิทยานิพนธ์ที่ได้ใช้ผลการทดลองของ MacGillivray [4] เป็นจำนวนที่ค่อนข้างมาก เป็นจำนวน 329 จุด แบบจำลอง MacGillivray [4] สร้างแบบจำลองโดยคำนึงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของแก๊สที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม จึงทำให้แบบจำลองสามารถทำนายผลการทดลองของ Sawant [5] ได้ค่อนข้างดี และแบบจำลองของ Ju และคณะ [24] เป็นแบบจำลองที่สามารถทำนายผลการทดลองขนาดความหนาฟิล์มได้แม่นยำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขผลการทดลอง 8 ผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆที่ผ่านมาก เพราะแบบจำลองของ Ju และคณะ [24] มีพื้นฐานมาจากผล

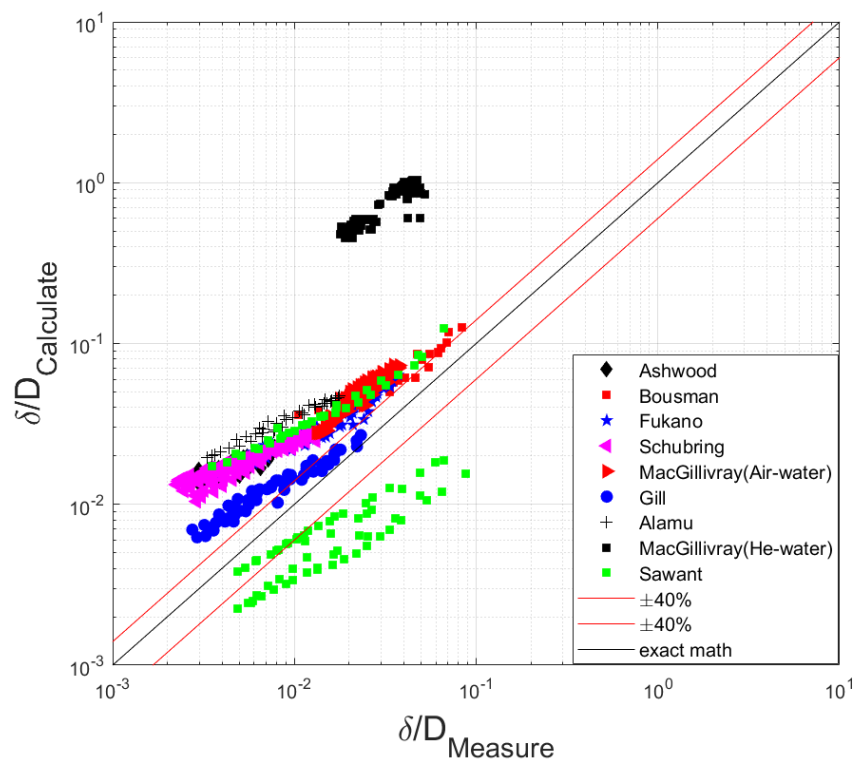
การทดลองของ Fukano และ Furukawa [2] และ Sawant [5] จึงทำให้แบบจำลองสามารถทำนายผลการทดลองของ Fukano และ Furukawa [2] และ Sawant [5] ได้ค่อนข้างดี ทั้ง 3 แบบจำลองเป็นแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่น่าสนใจ ทำหรับการพัฒนาแบบจำลองใหม่สำหรับการทำนายขนาดความหนาฟิล์ม และแบบจำลองของ Henstock และ Hanratty [10] และ Tatterson และคณะ [18] ถึงแม้ว่าจะเป็นแบบจำลองที่ทำนายผลการทดลองรวมทั้ง 8 ผลการทดลองได้ไม่ค่อยแม่นยำ แต่แบบจำลองของ Henstock และ Hanratty [10] และ Tatterson และคณะ [18] เป็นแบบจำลองประเภท Semi-empirical model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานการสร้างมาจากทฤษฎีรวมกับการพยากรณ์จากผลการทดลอง ซึ่งทั้ง 2 แบบจำลองมีความน่าสนใจในการศึกษาเพื่อพัฒนาแบบจำลองใหม่ที่มีความแม่นยำมากขึ้น



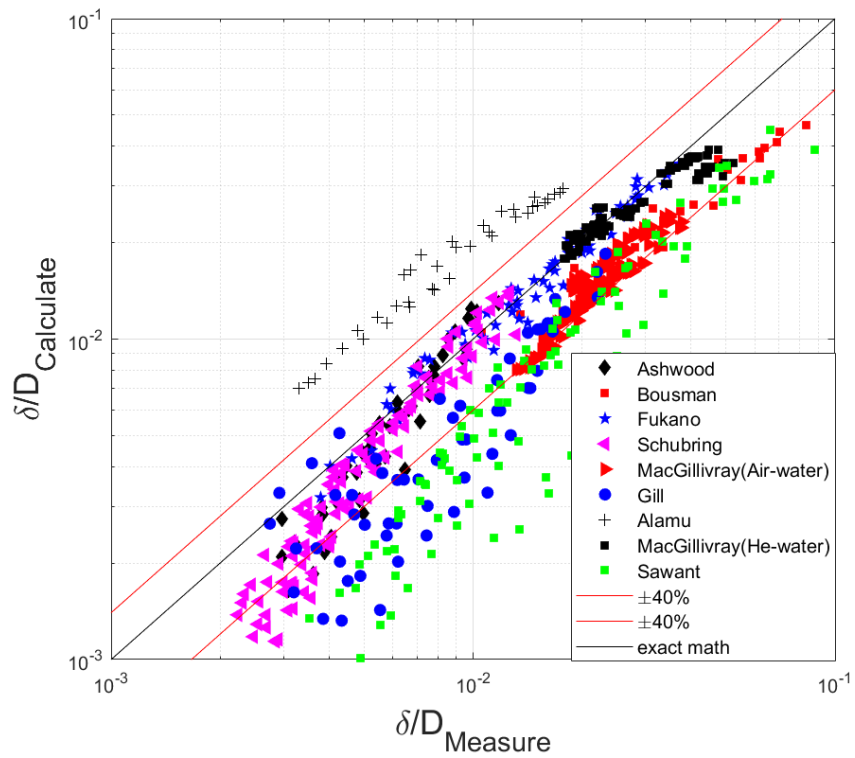
รูปที่ 14 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Henstock และ Hanratty



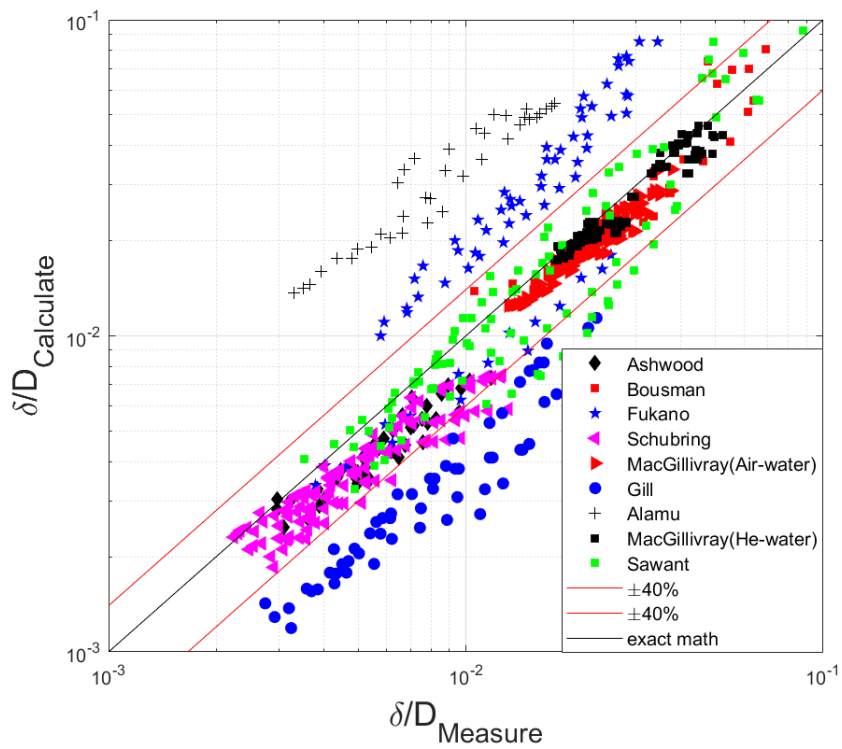
รูปที่ 15 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Tatterson และคณะ



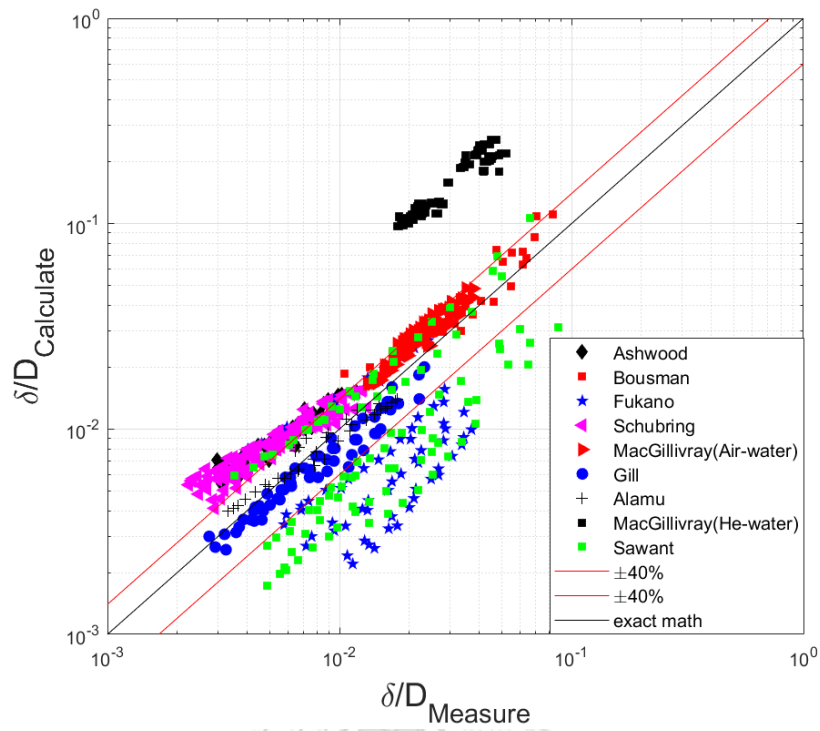
รูปที่ 16 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Hori และคณะ



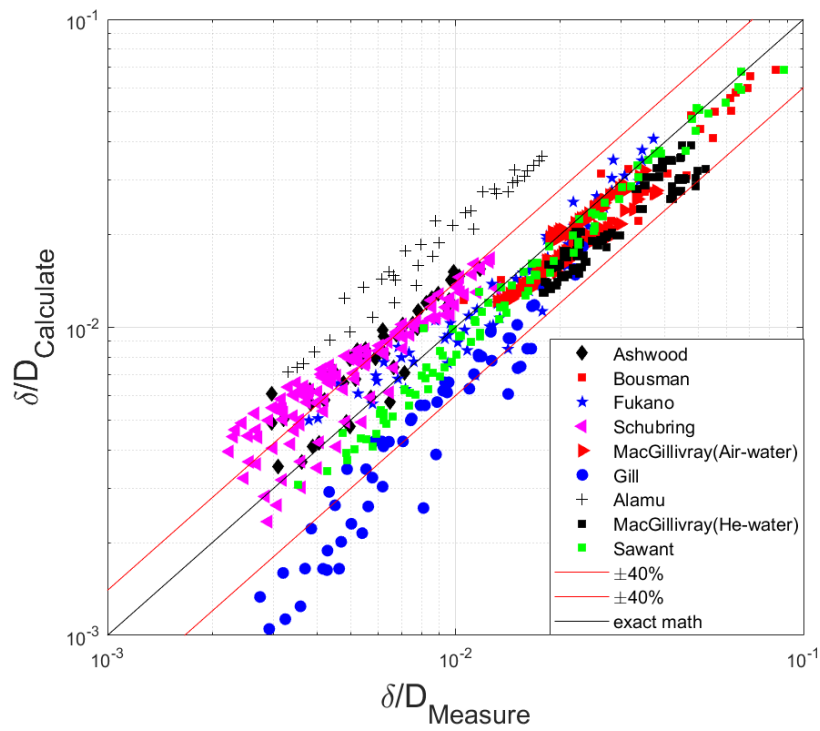
รูปที่ 17 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Fukano และ Furukawa



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ MacGillivray



รูปที่ 19 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Berna และคณะ



รูปที่ 20 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่รวบรวมกับแบบจำลองของ Ju และคณะ

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแบบจำลองขนาดความหนาฟิล์มของการไหลแบบวงแหวนเมื่อเทียบกับผลการทดลองในฐานข้อมูลที่สร้างขึ้น

Model	Mean absolute percentage error									
	Bousman's data	Fukano's data	Gill's data	MacGillivray's data		Sawant's data	Ashwood's data	Schubring's data	Alamu's data	total
				Air-water	He-water					
Henstock and Hanratty [10]	19.59%	69.31%	15.46%	17.23%	13.16%	27.26%	125.34%	144.96%	246.01%	60.88%
Tatterson et al. [19]	33.53%	24.96%	19.37%	17.39%	24.69%	20.87%	109.46%	138.59%	124.51%	49.54%
Hori et al.[20]	76.89%	122.81%	64.06%	122.47%	2254.47%	99.04%	236.99%	270.97%	289.75%	443.44%
Fukano and Furukawa [2]	30.28%	7.52%	42.8%	33.01%	9.09	51.75%	17.63%	23.62%	98.88%	31.05%
MacGillivray [4]	19.58%	90.16%	58.79%	12.46%	7.49%	22.05%	24.37%	25.02%	266.17%	38.31%
Berna et al. [21]	21.99%	59.29%	16.37%	27.35%	417.24%	48.16%	61.71%	66.92%	12.49%	93.13%
Ju et al. [25]	16.32%	11.6%	42.03%	13.11%	24.26%	9.19%	38.39%	44.45%	122.41%	27.89%

## บทที่ 6 พารามิเตอร์ที่มีผลกับขนาดความหนาฟิล์ม

จากบทที่ 4 และ 5 เป็นการสร้างฐานข้อมูลผลการทดลอง และการเปรียบเทียบแบบจำลองในอดีตกับฐานข้อมูลที่สร้าง ในบทนี้จะกล่าวถึงการพิจารณาพารามิเตอร์ไร้มิติที่จะเป็นตัวแทนแสดงถึง ผลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม และทำการพิจารณาพารามิเตอร์ตัวที่เหมาะสมที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลอง

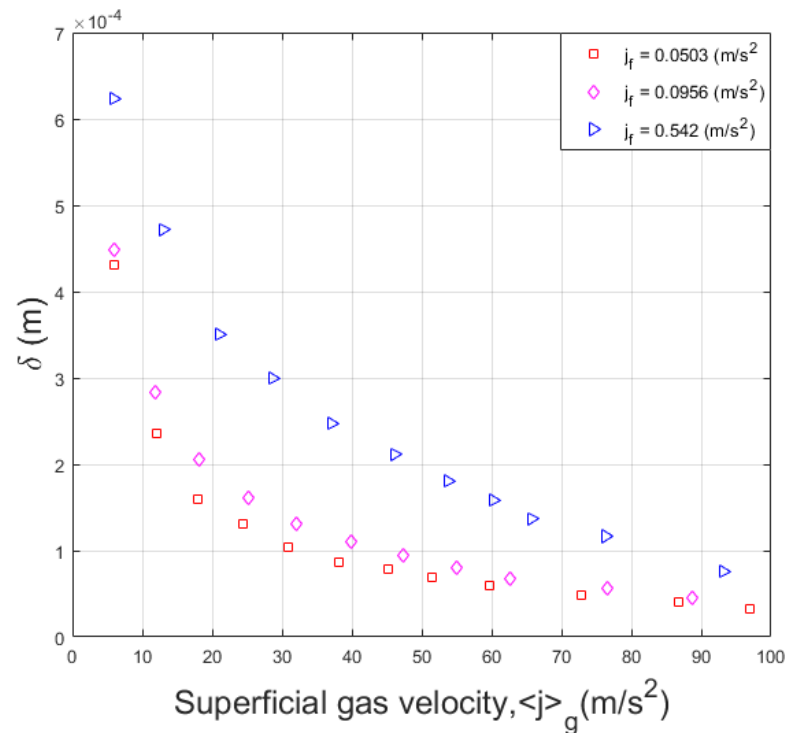
### 6.1 พารามิเตอร์ที่มีผลกับขนาดความหนาฟิล์ม

การศึกษาผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆที่ผ่านมาพบว่า มีตัวแปรหลากหลายตัวที่มีผลกับขนาดความหนาฟิล์ม เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, ความเร็วของแก๊ส, ความเร็วของของเหลว, ความหนาแน่น และ ความหนืดพลวัต เป็นต้น ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้งานได้กับทุกของไหลได้อย่างกว้างขวาง จึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองที่เป็นสมการไร้มิติ (Dimensionless) ในการพิจารณาผลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม จะต้องหาพารามิเตอร์ไร้มิติเพื่อเป็นตัวแทนแสดงถึงตัวแปรนั้นๆ ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆ ที่น่าสนใจมีดังนี้

#### 6.1.1 ผลของความเร็วของแก๊สและของเหลว

ผลของความเร็วของแก๊สและของเหลวที่ส่งผลต่อขนาดความหนาฟิล์ม จากผลการทดลองทั้งหมดที่รวบรวมพบว่า เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้น ขนาดความหนาของฟิล์มจะลดลงที่ความเร็วของของเหลวเดียวกัน ดังรูปที่ 21 ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ขนาดความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น พารามิเตอร์ที่น่าสนใจที่จะแสดงถึงผลของความเร็วของแก๊สและของเหลวที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม คือ เลขเรย์โนลด์, เลขเว็บบอร์ และเลขฟรูด เป็นต้น





รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ของความเร็วสัมผัสของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของผลการทดลองของ Sawant

### 1. เลขเรย์โนลด์

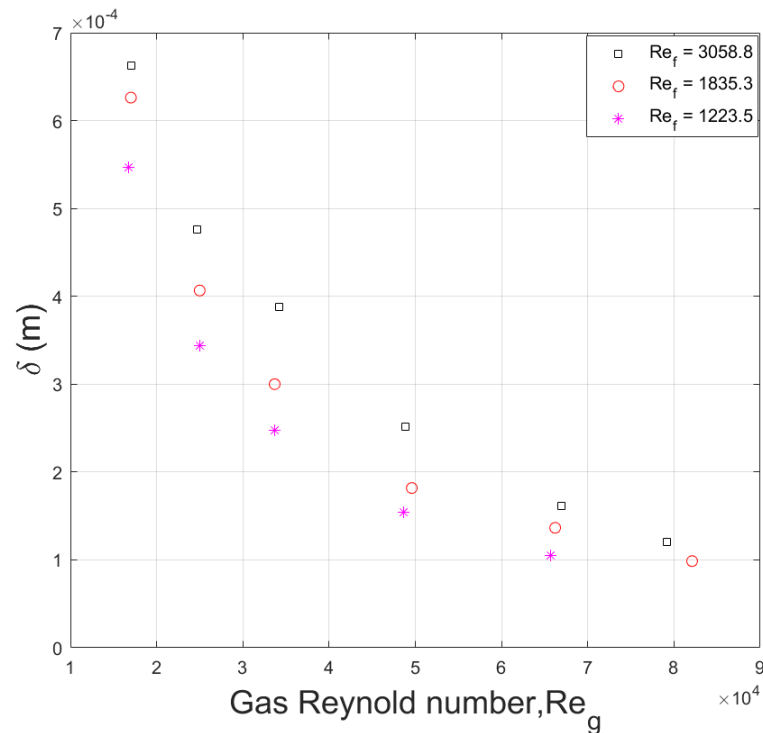
เลขเรย์โนลด์เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติที่แสดงถึงอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงหนืด ซึ่งในทางกายภาพ เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงเฉื่อยของแก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อแรงเฉื่อยของแก๊สเพิ่มขึ้น แรงที่เพิ่มขึ้นนี้จะพยายามจะเปลี่ยนรูปร่างที่ผิวของฟิล์มและพยายามจะลดขนาดความหนาฟิล์ม และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นมากๆ แรงเฉื่อยที่มากขึ้นจะเฉือนที่ผิวของฟิล์มมากขึ้น ทำให้ผิวของของเหลวที่ถูกเฉือนกลายเป็นหยดของของเหลวไหลในส่วนของแกนท่อ เรียกว่า Droplet entrainment สามารถคำนวณเลขเรย์โนลด์ของแก๊สหาได้ดังนี้

$$Re_g = \frac{\rho_g j_g D}{\mu_g} \quad (6.1)$$

กล่าวอีกทางหนึ่ง เมื่อความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงเฉื่อยของของเหลวเพิ่มขึ้น เมื่อแรงเฉื่อยของของเหลวเพิ่มขึ้น แรงเฉื่อยนั้นจะพยายามคงสภาพผิวของฟิล์มและเพิ่มขนาดความหนาฟิล์ม กล่าวคือ เมื่อแรงเฉื่อยของของเหลวมากขึ้นจะพยายามดึงหยดของของเหลวที่ไหลในส่วนของแก๊สเฟสเข้ามารวมตัวกันที่ผิวของฟิล์ม ทำให้ขนาดของฟิล์มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับแรงหนืดของของเหลว เมื่อความหนืดของของเหลวเพิ่มขึ้น แรงหนืดของของเหลวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาด

ความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ของแก๊สและของเหลวกับขนาดความหนาฟิล์ม แสดงในรูปที่ 22 สามารถคำนวณเลขเรย์โนลด์ของของเหลวหาได้ดังนี้

$$Re_f = \frac{\rho_f j_f D}{\mu_f} \quad (6.2)$$



รูปที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของการทดลอง Ashwood และคณะ ที่เลขเรย์โนลด์ของเหลว 3058.8, 1835.3 และ 1223.5

## 2. เลขเว็บบอร์

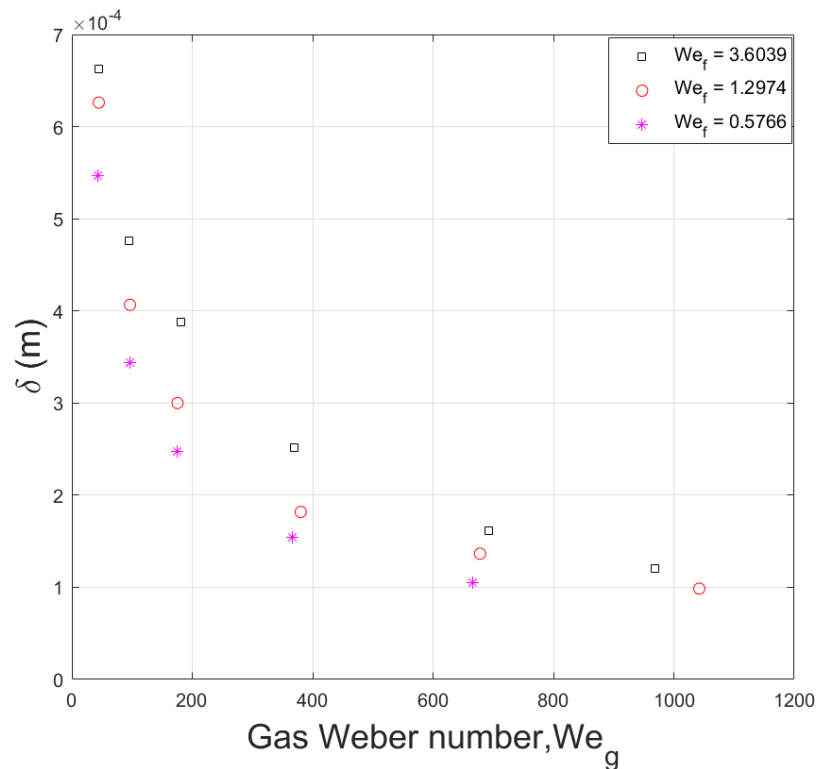
เลขเว็บบอร์ แสดงถึงอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงตึงผิว ซึ่งเมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แรงเฉื่อยของแก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อแรงเฉื่อยของแก๊สเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดความหนาฟิล์มลดลง และเมื่อแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น แรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้นจะพยายามต้านแรงเฉื่อย อันเนื่องมาจากแรงเฉื่อยจากความเร็วของแก๊ส แรงตึงผิวจะพยายามคงสภาพผิวของของเหลวและเพิ่มขนาดความหนาของฟิล์ม จึงส่งผลให้ขนาดความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดที่รวบรวม โดยมากแรงตึงผิวเป็นค่าคงที่ บ่งบอกว่าแรงตึงผิวมีผลน้อยมากกับแบบจำลองขนาดความหนาฟิล์มที่สร้างเลขเว็บบอร์ของแก๊สสามารถคำนวณได้จาก

$$We_g = \frac{\rho_g (j_g)^2 D}{\sigma} \quad (6.3)$$

อีกทางหนึ่งเมื่อความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แรงเฉื่อยของของเหลวเพิ่มขึ้น ซึ่งแรงเฉื่อยของของเหลวจะพยายามต้านแรงเฉื่อยของแก๊ส จะส่งผลให้ขนาดความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น

ผลของเลขเว็บบอร์ของแก๊สและของเหลวที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์มแสดงในรูปที่ 23 สามารถคำนวณเลขเว็บบอร์ของเหลวได้ดังนี้

$$We_f = \frac{\rho_g (j_f)^2 D}{\sigma} \quad (6.4)$$



รูปที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเว็บบอร์ของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของการทดลอง Ashwood และคณะ ที่เลขเว็บบอร์ของเหลว 3.6039, 1.2974 และ 0.5766

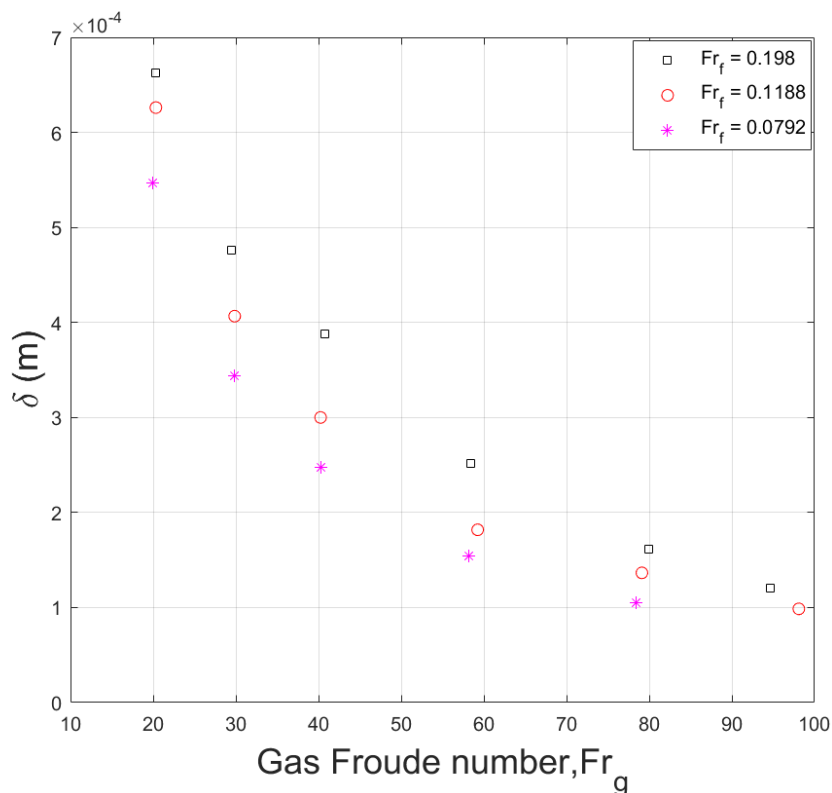
### 3. เลขฟรูดของแก๊ส

เลขฟรูดของแก๊ส แสดงถึงอัตราส่วนแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งเมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงเฉื่อยของแก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อแรงเฉื่อยของแก๊สเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ ขนาดความหนาฟิล์มลดลง และผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกไม่มีผลกับการไหลในท่อแนวตั้ง สามารถหาเลขฟรูดของแก๊สได้จาก

$$Fr_g = \frac{j_g}{\sqrt{gD}} \quad (6.5)$$

เมื่อความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงเฉื่อยของของเหลวเพิ่มขึ้น เมื่อแรงเฉื่อยของของเหลวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีแรงต้านแรงเฉื่อยของแก๊สมาก ทำให้ขนาดความหนาฟิล์มเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ความสัมพันธ์ของเลขฟรูดของแก๊สและของเหลวกับขนาดความหนาฟิล์มในรูปที่ 24 สามารถหาเลขฟรูดของแก๊สได้ดังนี้

$$Fr_f = \frac{j_f}{\sqrt{gD}} \quad (6.6)$$

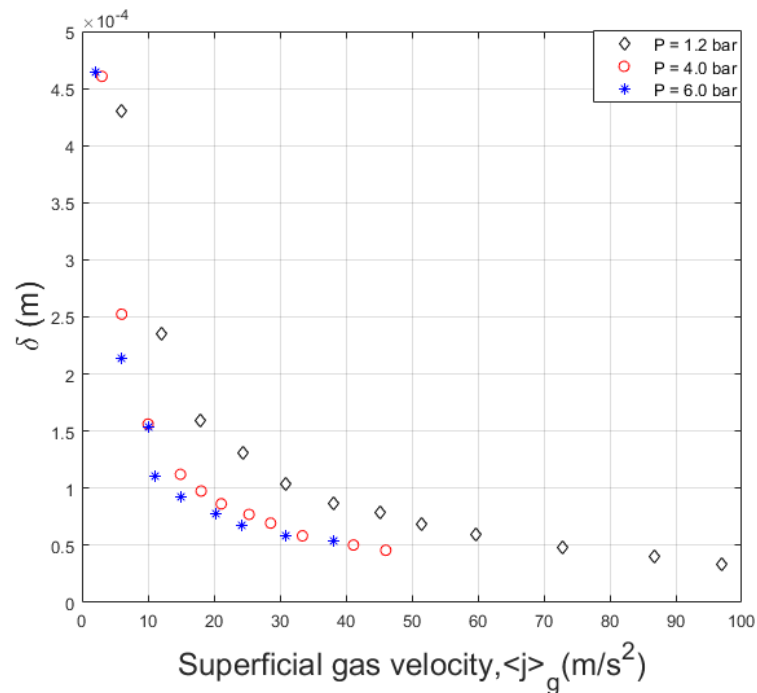


รูปที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขฟรูดของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของการทดลอง

Ashwood และคณะ ที่เลขฟรูดของเหลว 0.198, 0.1188 และ 0.0792

### 6.1.2 ผลของความหนาแน่น

จากการศึกษาผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นของของไหลมีผลกับขนาดความหนาฟิล์ม เมื่อความหนาแน่นของแก๊สเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดความหนาฟิล์มลดลง ซึ่งแสดงในรูปที่ 25 ในทางตรงกันข้ามเมื่อความหนาแน่นของของเหลวเพิ่มขึ้น ขนาดความหนาฟิล์มจะเพิ่มขึ้น จากการทดลองของ MacGillivray [4] ได้ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าความหนาแน่นของแก๊สมีผลกับขนาดความหนาของฟิล์มโดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง อากาศ-น้ำ และ ฮีเลียม-น้ำ และผลการทดลองของ Sawant [5] ทำการทดลองระหว่าง อากาศ-น้ำ และทำการเปลี่ยนความดันในการทดลองเพิ่มขึ้นจาก 1.2-6 บาร์ ซึ่งเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของแก๊สเพิ่มขึ้น ตามลำดับ พารามิเตอร์ที่จะแสดงผลของความหนาแน่นของแก๊สและของเหลวได้ดี คือ อัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างแก๊สและของเหลว



รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ของความเร็วสัมผัสของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของผลการทดลองของ Sawant ที่ความดัน 1.2, 4 และ 6 bar

### 6.1.3 ผลของความหนืดพลวัต

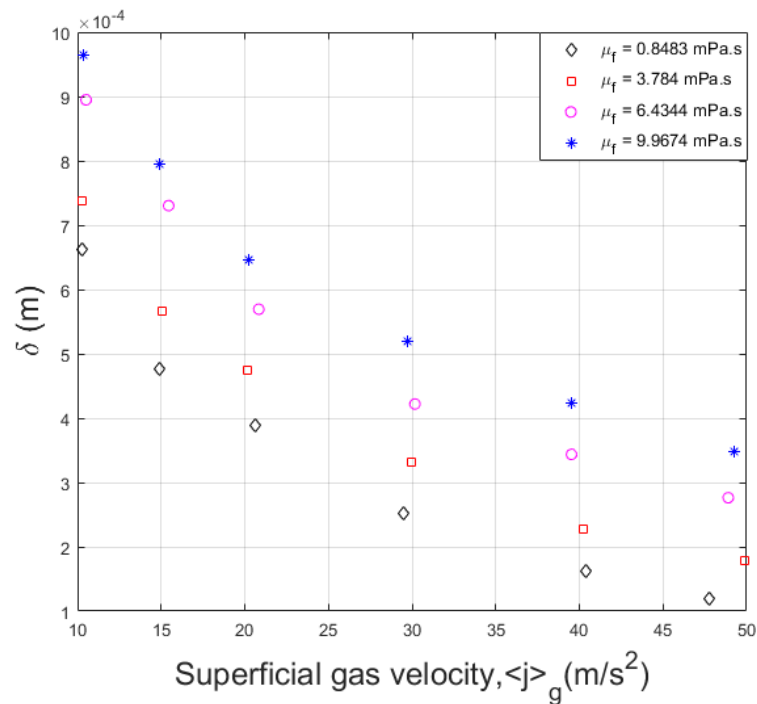
การศึกษาความหนืดพลวัตที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม จากการทดลองของ Fukano and Furukawa [2] พบว่าเมื่อทำการทดลองเปลี่ยนแปลงของเหลวในการทดลองที่ไม่ใช่น้ำ เมื่อความหนืดพลวัตของเหลวเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงต้านการเปลี่ยนขนาดความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น พารามิเตอร์ที่จะแสดงถึงผลของความหนืดพลวัตได้ดีคือ อัตราส่วนความหนืดระหว่างของเหลวและแก๊ส และ non-dimensional viscosity number เป็นต้น

Non-dimensional viscosity number

พารามิเตอร์นี้ถูกเสนอโดย Ishii and Golmes [26] ซึ่งแสดงถึงผลของความหนืดพลวัตของของเหลวที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม เมื่อความหนืดของของเหลวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น สามารถคำนวณ Non-dimensional viscosity number ได้ดังนี้

$$N_\mu = \frac{\mu_f}{\sqrt{\rho_f \sigma} \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}}} \quad (6.7)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นพารามิเตอร์นี้มีผลของ ความตึงผิว และแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงด้วย



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ของความเร็วสัมผัสของแก๊สกับขนาดความหนาฟิล์มของผลการทดลองของ Fukano และ Furukawa ที่ความหนืด 0.8483, 3.784, 6.4344 และ 9.9674 mPa.s

#### 6.1.4 ผลของฟลักซ์เชิงมวล

ฟลักซ์เชิงมวลเป็นผลที่แสดงถึงอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สและของเหลว ทางกายภาพแล้วเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สเพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดความหนาฟิล์มลดลง เพราะเมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้น แรงเฉื่อยที่มากขึ้นจะเฉือนที่ผิวของฟิล์ม ทำให้ผิวของของเหลวที่ถูกเฉือนกลายเป็นหยดของเหลวไหลในส่วนของแก๊สเฟส และเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของของเหลวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ขนาดความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้น แรงเฉื่อยของของเหลวจะพยายามคงที่ของขนาดฟิล์มและทำให้หยดของของเหลวมารวมตัวกันที่ฟิล์มเป็นการเพิ่มขนาดฟิล์ม พารามิเตอร์ที่แสดงถึงผลของฟลักซ์เชิงมวล คือ อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่ออัตราการไหลเชิงมวลของเหลว สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{x}{1-x} = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_f} \quad (6.8)$$

$$\text{โดยที่ } x = \frac{\langle j_g \rangle \rho_g}{\langle j_g \rangle \rho_g + \langle j_f \rangle \rho_f} \quad (6.9)$$

$\dot{m}_g$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส และ  $\dot{m}_f$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว

## 6.2 สรุปพารามิเตอร์ไร้มิติที่ใช้สร้างแบบจำลอง

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ไร้มิติที่เหมาะสมจะเป็นตัวแทนแสดงถึงผลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม เลขเรย์โนลด์ของแก๊สและของเหลวเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ ที่เหมาะสมที่สุดที่แสดงถึงผลของความเร็วของแก๊สและของเหลวที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม เพราะเลขเรย์โนลด์แสดงถึงทั้งผลของความเร็วและผลของความหนืด ซึ่งเหมาะกับฐานข้อมูลผลการทดลองที่เก็บรวบรวมมากกว่า เลขเว็บบอร์ซึ่งแสดงถึงผลของความเร็วกับแรงตึงผิว ซึ่งแรงตึงผิวจะมีผลน้อยมากกับขนาดความหนาฟิล์ม และเลขฟรูดแสดงถึงผลของความเร็วกับผลของแรงอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก แบบจำลองที่สร้างเป็นแบบจำลองในแนวตั้งซึ่งผลของแรงจากแรงโน้มถ่วงของโลกจะไม่มีผลกับขนาดความหนาฟิล์ม พารามิเตอร์ไร้มิติที่แสดงถึงผลของความหนาแน่นที่ส่งผลกับความหนาแน่นที่เหมาะสมเป็น อัตราส่วนความหนาแน่นของแก๊สต่อของเหลว พารามิเตอร์ไร้มิติที่แสดงถึงผลของความหนืดคือ อัตราส่วนความหนืดของของเหลวต่อแก๊ส และ Non-dimensional viscosity number และผลของฟลักซ์เชิงมวลใช้พารามิเตอร์ อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อของเหลว แสดงผลของฟลักซ์เชิงมวลที่ส่งผลต่อขนาดความหนาฟิล์ม การหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ไร้มิติเหล่านี้กับขนาดความหนาฟิล์ม ต้องทดลองทุกพารามิเตอร์กับขนาดความหนาฟิล์ม เพื่อจะได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมมากที่สุด พิสัยของแต่ละพารามิเตอร์ไร้มิติของฐานข้อมูลที่สร้างแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พิสัยของพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม

Property	$Re_g$	$Re_f$	$We_g$	$We_f$	$Fr_g$	$Fr_f$	$N_{\mu_f}$	$\left(\frac{\mu_f}{\mu_g}\right)$	$\left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)$
Author									
Bousman and McQuilen [1]	3294.2-20900	886.333-6330.9	3.4714-139.744	0.8863-45.22	11.3891-72.2605	0.1983-1.4166	0.0023	54.4959	0.0012
Fukano and Furukawa [2]	16223-82730	120.9302-3058.8	43.238-1196	0.5766-4.8184	19.3832-98.8453	0.0792-0.198	0.0019-0.0232	45.9783-540.2385	0.001-0.0012
Gill et al. [3]	27536-165210	155.684-7220.8	97.021-3492.8	0.0082-17.745	24.084-144.5037	0.0077-0.3549	0.002	47.3243	0.0012
MacGillivray[4] (Air-water)	7433.1-24534	828.9199-3435.7	24.461-184.757	0.7598-13.0529	42.5841-96.3055	0.249-1.0318	0.002	47.0678	0.0011-0.0016
MacGillivray[4] (He-water)	2415.6-5582.3	1068.9-3402.9	14.743-95.714	1.2634-12.8055	72.7205-204.4035	0.321-1.022	0.002	43.8741	1.5978e-4-2.2738e-4
Sawant [5]	4028.3-214860	471.4015-5079.5	3.6404-3169.2	0.3293-38.2375	6.5857-319.449	0.1656-1.7848	0.0023	55.56	0.0013-0.007
Ashwood et al. [6]	49437-117510	1558.2-9080.5	424.3404-2397.7	1.1212-38.076	68.3408-162.4498	0.1211-0.7055	0.002	47.3243	0.0012
Schubring et al. [8]	49220-178920	1047.7-10424	420.614-5558.4	0.5069-50.1737	68.04-247.3414	0.0814-0.8098	0.002	47.3243	0.0012
Alamu [9]	19403-63398	173.6917-1124.9	64.588-689.5411	0.2642-11.0827	30.4126-99.3704	0.0695-0.4501	0.008	200	0.0013



## บทที่ 7 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากบทที่แล้วทำการพิจารณาพารามิเตอร์ไร้มิติที่จะแสดงถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม ในบทนี้จะเป็นการหาพิจารณาฟังก์ชันที่จะใช้สร้างแบบจำลอง และวิธีการสร้างแบบจำลอง แบบจำลองที่สร้างมีทั้งหมด 2 แบบจำลอง โดยแบบจำลองที่ 1 จะเป็นแบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical model) และแบบจำลองที่ 2 จะเป็นแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ (Semi-empirical model)

### 7.1 การสร้างแบบจำลองเชิงประจักษ์ของขนาดความหนาฟิล์ม

การศึกษาผลการทดลองและแบบจำลองคณิตศาสตร์ต่างๆที่ผ่านมา พบว่าแบบจำลอง Ju และคณะ [24] จากการเปรียบเทียบแบบจำลองกับฐานข้อมูลผลการทดลองที่สร้างพบว่ามีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และเป็นแบบจำลองที่สามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์มได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ ภายใต้เงื่อนไขผลการทดลองที่รวบรวม 8 ผลการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 27.89% โดยในที่นี้จะสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ ประเภทแบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical model) โดยทำการพัฒนาแบบจำลองใหม่ที่มีพื้นฐานมาจากแบบจำลองของ Ju และคณะ [24] จากการศึกษาแบบจำลองของ Ju และคณะ [24] พบว่าแบบจำลองของ Ju และคณะ [24] ใช้ฟังก์ชัน  $\tanh$  ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งฟังก์ชัน  $\tanh$  ไม่สามารถอธิบายออกมาทางกายภาพได้ แต่ฟังก์ชัน  $\tanh$  สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของขนาดความหนาฟิล์มได้เป็นอย่างดี ฟังก์ชัน  $\tanh$  เป็นฟังก์ชันที่ใช้จำกัดขนาดความหนาของฟิล์มให้มีขนาดไม่ใหญ่เกินกว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของขนาดความหนาฟิล์มให้อยู่ระหว่าง 0-1 การสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองไร้มิติเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง จากการศึกษาผลการทดลองต่างๆ เพื่อพิจารณาผลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม ซึ่งตัวแปรที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์มมีดังนี้ ขนาดความหนาท่อ, ความเร็วแก๊ส, ความเร็วของของเหลว, ความหนาแน่น และความหนืด เป็นต้น สามารถเขียนฟังก์ชันของแบบจำลองใหม่ได้เป็น

$$\frac{\delta}{D} = c_1 \tanh \left( c_2 \operatorname{Re}_g^{n_1} \left( \frac{x}{1-x} \right)^{n_2} N_{\mu_f}^{n_3} \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{n_4} \right) \quad (7.1)$$

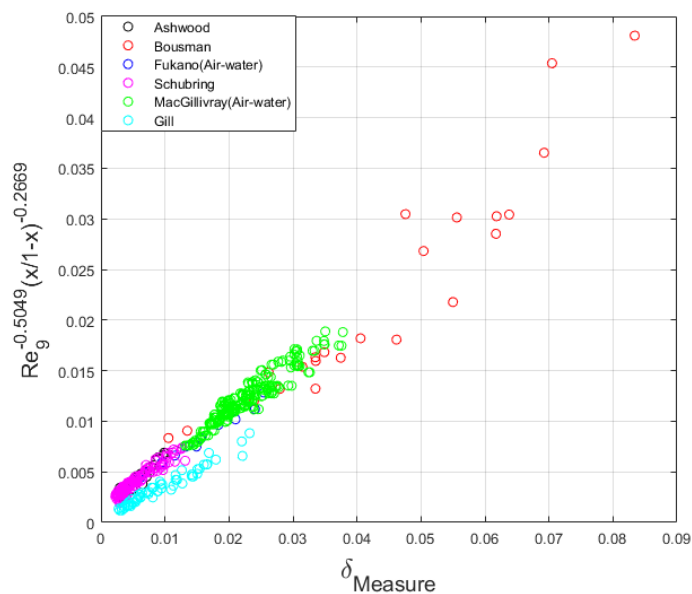
#### 7.1.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

ขั้นตอนที่ 1 หลังจากหาฟังก์ชันของแบบจำลองที่จะสร้างแล้ว และเลือกพารามิเตอร์ไร้มิติที่จะส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์มแล้ว ต่อมาให้หาความสัมพันธ์ของเรย์โนลด์ของแก๊สและอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อของเหลว กับขนาดความหนาฟิล์ม โดยในการหาความสัมพันธ์นี้จะคิด

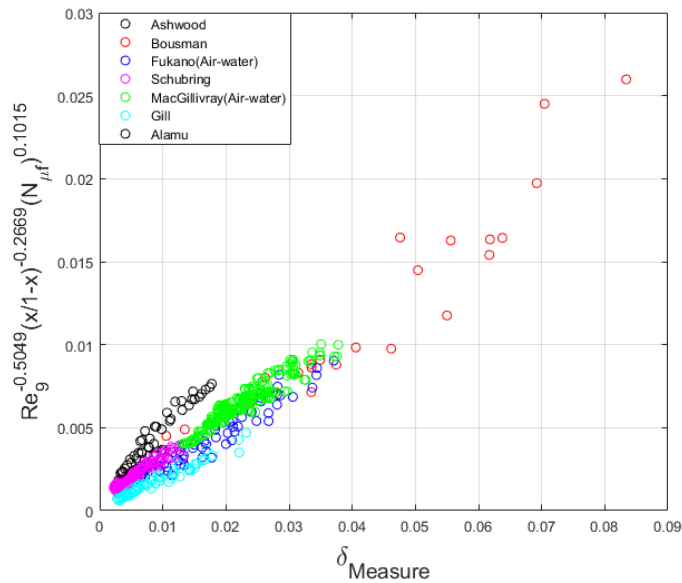
เฉพาะผลอันเนื่องมาจากความเร็วของของเหลวและความเร็วของแก๊ส โดยการกำหนดให้ผลจากตัวแปรอื่นๆคงที่ ผลการทดลองที่ใช้หาความสัมพันธ์นี้จะเป็นผลการทดลองของ อากาศ-น้ำ ที่ความดันและอุณหภูมิห้องเท่านั้น ซึ่งหาความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 27

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อหาความสัมพันธ์ของเรย์โนลด์ของแก๊สและอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อของเหลว กับขนาดความหนาฟิล์ม ซึ่งเป็นการตัดผลของความเร็วของแก๊สกับของเหลว ออก ต่อมาเพื่อจะพิจารณาผลของความหนืดที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม โดยการหาความสัมพันธ์ในขั้นตอนที่ 1 และ Non-dimensional viscosity number กับขนาดความหนาฟิล์ม พารามิเตอร์ Non-dimensional viscosity number เป็นพารามิเตอร์ที่ถูกเสนอโดย Ishii and Grolmes [26] เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงผลของความหนืดของของเหลว จากการศึกษาจากผลการทดลองพบว่าผลของความหนืดของของเหลวจะส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์มมากกว่า ผลของความหนืดของแก๊ส การหาความสัมพันธ์ในขั้นตอนที่ 2 จะใช้ผลการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของเหลวเพิ่มเข้ามา ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 28

ขั้นตอนที่ 3 หาความสัมพันธ์ในขั้นตอนที่ 2 และ Non-dimensional viscosity number กับขนาดความหนาฟิล์ม ในขั้นตอนสุดท้ายนี้จะให้ฐานข้อมูลผลการทดลองทั้งหมดในการหาความสัมพันธ์ เพราะเป็นการหาผลของตัวแปรทั้งหมดที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม คือ ความเร็วของแก๊สและของเหลว, ความหนืดของแก๊สและของเหลว และความหนาแน่นของแก๊สและของเหลว ซึ่งความสัมพันธ์นี้ได้แสดงในรูปที่ 29



รูปที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดความหนาฟิล์มกับเลขเรย์โนลด์ของแก๊สและอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อของเหลว



รูปที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดความหนาฟิล์มกับเลขเรย์โนลด์ของแก๊ส, อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อของเหลวและ Non-dimensional viscosity number

### 7.1.2 แบบจำลองใหม่

แบบจำลองใหม่ที่สร้างดังสมการดังนี้

$$\frac{\delta}{D} = 23.32 \tanh \left( 1.493 \text{Re}_g^{-0.5049} \left( \frac{x}{1-x} \right)^{-0.2669} N_{\mu_f}^{0.1015} \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.3506} \right) \quad (7.2)$$

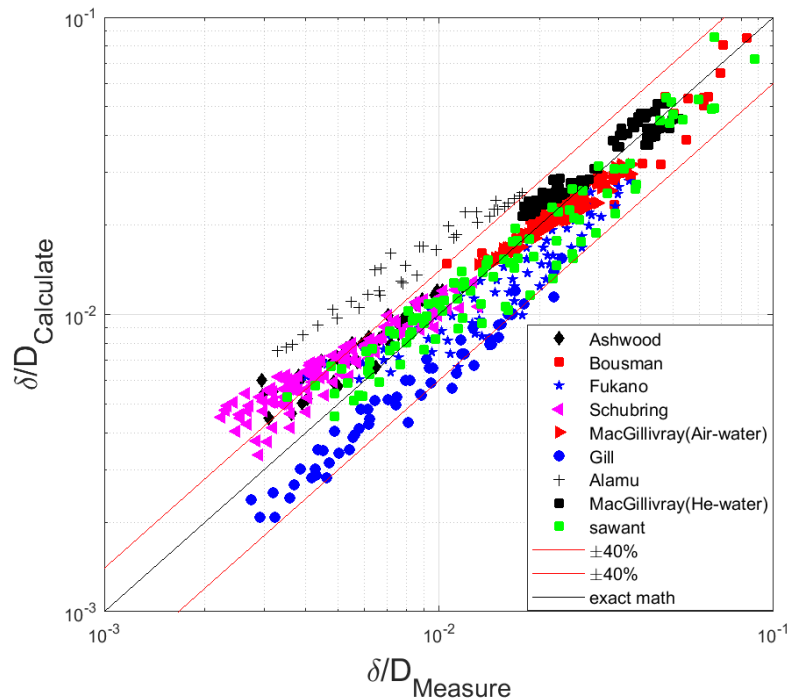
### 7.1.3 การเปรียบเทียบแบบจำลองใหม่กับผลการทดลองที่รวบรวม

จากการเปรียบเทียบแบบจำลองใหม่กับผลการทดลองที่รวบรวมได้ 8 ผลการทดลอง โดยใช้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Relative Absolute Error) ในการเปรียบเทียบ สามารถคำนวณตามสมการนี้

$$\text{MRAE} = \frac{1}{N} \sum_i \left| \frac{\delta_{\text{model},i} - \delta_{\text{exp},i}}{\delta_{\text{exp},i}} \right| \times 100\%, \quad (7.3)$$

จากรูปที่ 29 จะเห็นได้เลยว่าแบบจำลองใหม่สามารถทำนายผลการทดลองขนาดความหนาฟิล์มจากฐานข้อมูลผลการทดลองที่รวบรวมได้ดี 6 ผลการทดลอง ซึ่งผลการทดลองส่วนมากอยู่ในเส้นเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนบวก 40% แต่มีผลการทดลองของ Alamu [9] จากการเปรียบเทียบแล้วพบว่าผลการทดลองทั้งหมดเป็น over predict และผลการทดลองของ Gill และคณะ [3] จากการเปรียบเทียบพบว่าผลเป็น under predict ทั้งหมด จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมดแล้วมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 22.55% จากการเปรียบเทียบแบบจำลองใหม่กับผลการทดลองที่รวบรวมทั้ง 8 ผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองใหม่ไม่สามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์มของแบบจำลอง Alamu [9] และ Gill และคณะ [3] จึงคิดว่าทั้งสอง

ผลการทดลองต้องมีปัจจัยอื่นที่แตกต่างจากผลการทดลองที่รวบรวมอื่นอีก 6 ผลการทดลองที่สามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์มได้



รูปที่ 29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดความฟิล์มที่รวบรวมกับแบบจำลองใหม่

#### 7.1.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองใหม่กับแบบจำลองอื่นๆ

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่กับแบบจำลองอื่นๆที่ผ่านมาพบว่าแบบจำลองใหม่สามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์มได้แม่นยำกว่าแบบจำลองอื่น โดยแสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ในตารางที่ 5 โดยรวมทั้งหมดแบบจำลองใหม่มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 22.55% ซึ่งจากตารางที่ 5 พบว่าแทบทุกแบบจำลองไม่สามารถทำนายผลของผลการทดลองของ Alamu [9] และ Gill และคณะ [3] ได้ ซึ่งทั้ง 2 การทดลองต้องมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม

#### 7.1.5 สรุปแบบจำลองเชิงประจักษ์ใหม่

แบบจำลองเชิงประจักษ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่เพื่อทำนายขนาดความหนาฟิล์มของการไหลแบบวงแหวน พบว่าสามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์มได้แม่นยำมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ ภายใต้เงื่อนไขฐานข้อมูลที่สร้างขึ้น โดยแบบจำลองมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 22.55% และมีจำนวนจุดผลการทดลองที่อยู่ภายใต้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 20%, 30% และ 40% ดังนี้ 59.85%, 74.3% และ 83.5%

ตารางที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแต่ละแบบจำลอง

Model	Mean absolute percentage error									
	Bousman's data	Fukano's data	Gill's data	MacGillivray's data		Sawant's data	Ashwood's data	Schubring's data	Alamu's data	total
				Air-water	He-water					
Henstock and Hanratty [10]	42.15%	21.92%	28.45%	29.38%	36.73%	22.7%	51.36%	67.48%	109.62%	40.26%
Tatterson et al. [19]	33.53%	24.96%	19.37%	17.39%	24.69%	20.87%	109.46%	138.59%	124.51%	49.54%
Hori et al. [20]	76.89%	122.81%	64.06%	122.47%	2254.47%	99.04%	236.99%	270.97%	289.75%	443.44%
Fukano and Furukawa [2]	30.28%	7.52%	42.8%	33.01%	9.09%	51.75%	17.63%	23.62%	98.88%	31.05%
MacGillivray [4]	19.58%	90.16%	58.79%	12.46%	7.49%	22.05%	24.37%	25.02%	266.17%	38.31%
Berna et al. [21]	21.99%	59.29%	16.37%	27.35%	417.24%	48.16%	61.71%	66.92%	12.49%	93.13%
Ju et al. [25]	16.32%	11.6%	42.03%	13.11%	24.26%	9.19%	38.39%	44.45%	122.41%	27.89%
New	18%	29.06%	50.96%	6.28%	11.92%	17.92%	23.65%	26.47%	43.6%	22.55%

ตารางที่ 6 สรุปจำนวนจุดผลการทดลองที่อยู่ภายใต้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 20%, 30% และ 40% ของแต่ละแบบจำลอง

Model	Percentage of data points within $\pm X\%$ error		
	20	30	40
Henstock and Hanratty [10]	20.72%	44.63%	67.01%
Tatterson et al. [19]	40.66%	57.93%	66.24%
Hori et al. [20]	1.02%	2.69%	3.84%
Fukano and Furukawa [2]	33.89%	50.64%	73.27%
MacGillivray [4]	54.99%	68.93%	76.47%
Berna et al. [21]	19.57%	36.96%	49.1%
Ju et al. [25]	50.26%	69.05%	80.69%
New	59.85%	74.3%	83.5%

## 7.2 การสร้างแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ (Semi-Empirical model) ของขนาดความหนาฟิล์ม

แบบจำลองคณิตศาสตร์ประเภทกึ่งเชิงประจักษ์ (Semi-Empirical model) เป็นแบบจำลองของการรวมกันของ Mechanistic model และ Empirical model ที่มีพื้นฐานของทฤษฎีรวมกับการพยากรณ์จากผลการทดลอง ทำให้โดยหลักการแล้วมีความน่าเชื่อถือกว่าแบบจำลองเชิงประจักษ์ล้วน การพัฒนาแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ในครั้งนี้ประยุกต์จากหลักการพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองโดย Henstock และ Henratty [10]

แบบจำลองของ Henstock และ Henratty [10] ได้พัฒนาแบบจำลองจากสมการ Interfacial shear stress จึงทำให้ทราบว่า dimensionless film thickness เป็นฟังก์ชันของขนาดความหนาฟิล์ม, ความหนืดไคเนเมติกของของเหลว (kinematic viscosity) และ friction velocity และได้หาความสัมพันธ์ของ dimensionless film thickness กับ interfacial friction factor ภายใต้เงื่อนไขผิวท่อเป็นผิวเรียบ แบบจำลองของ Henstock and Henratty [10] เป็นแบบจำลองไร้มิติที่เป็นฟังก์ชันของ เลขเรย์โนลด์ของฟิล์มที่ผนังท่อ, แรงเฉือนเนื่องจากความเร็ว (friction velocity) และความหนืดไคเนเมติก (kinematic viscosity) สามารถหาแบบจำลองได้จากการแก้สมการ ขนาดความหนาฟิล์มไร้มิติ (dimensionless film thickness) กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction factor) ได้ดังนี้

$$\frac{\delta}{D} = \frac{6.59 \sqrt{\frac{\tau_i}{\tau_c}}}{\sqrt{\frac{f_i}{f_s}}} \quad (7.4)$$

จากสมการข้างต้น Henstock and Henratty [10] ได้หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ F เป็นฟังก์ชันของ  $f_i/f_s$  โดยที่  $f_i$  คือ interfacial friction factor สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$f_i = \frac{\tau_c}{1/2 \rho_g j_g^2} \text{ และ } f_s \text{ คือ smooth tube friction factor สามารถหาค่าได้ดังนี้ } f_s = 0.046 \text{Re}_g^{-0.5}$$

จึงได้พารามิเตอร์ F ดังนี้

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\text{Re}_f^{0.5} \mu_f \rho_g^{0.5}}{\text{Re}_g^{0.4} \text{Re}_g^{0.5} \mu_g \rho_f^{0.5}} \quad (7.5)$$

แทนที่จะคิดแบบ Henstock and Henratty [10] เสนอ ในอีกทางหนึ่ง interfacial friction factor เป็นฟังก์ชันของขนาดความหนาฟิล์ม, อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อการไหลทั้งหมด, พลิกซ์เชิงมวลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ พารามิเตอร์ F จะขึ้นอยู่กับรูปแบบสมการ

interfacial friction factor และเงื่อนไขอัตราการไหลของไหลและคุณสมบัติของของไหล จะกำหนดขอบเขตของขนาดความหนาฟิล์มจาก 0 ถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ จึงได้เสนอแบบจำลองใหม่ในฟังก์ชันของพารามิเตอร์  $F$  ดังนี้

$$\frac{\delta}{D} = \frac{c_1 F}{1 + c_2 F} \quad (7.6)$$

โดย  $c_1$  คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองตัวที่ 1  $c_2$  คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองตัวที่ 2 และพารามิเตอร์  $F$  คือพารามิเตอร์ที่เราจะพัฒนาโดยมีแนวคิดที่ว่า  $F$  มีพื้นฐานมาจากสมการ interfacial friction factor ซึ่งเป็นฟังก์ชันเลขเรย์โนลด์ของแก๊ส, อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อการไหลทั้งหมด, อัตราส่วนความหนืดของเหลวต่อแก๊ส และอัตราส่วนความหนาแน่นของแก๊สต่อของเหลว เขียนฟังก์ชันใหม่ได้ดังนี้

$$F = \left( \text{Re}_g^{n_1} \left( \frac{x}{1-x} \right)^{n_2} \left( \frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{n_3} \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{n_4} \right) \quad (7.7)$$

#### 7.2.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

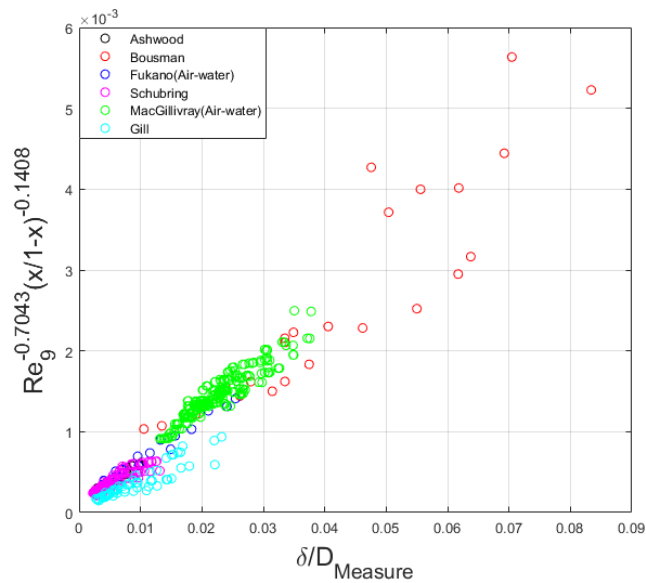
การสร้างแบบจำลองขนาดความหนาฟิล์ม เริ่มแรกให้ทำการพิจารณาตัวแปรที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม โดยตัวแปรที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์มที่ต้องพิจารณาตามลำดับ ดังนี้ ความเร็วของแก๊สและของเหลว, ความหนืดของเหลวและแก๊ส และ ความหนาแน่นของแก๊สและของเหลว เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อการไหลของเหลว กับขนาดความหนาฟิล์ม ในขั้นตอนนี้จะทำการพิจารณาผลของความเร็วของแก๊สและความเร็วของของเหลว โดยตัดผลเนื่องจากความหนืดและความหนาแน่นของแก๊สและของเหลว ผลการทดลองที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์จะเป็นผลการทดลองเฉพาะ อากาศ-น้ำ ที่ความดันและอุณหภูมิห้อง ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 42

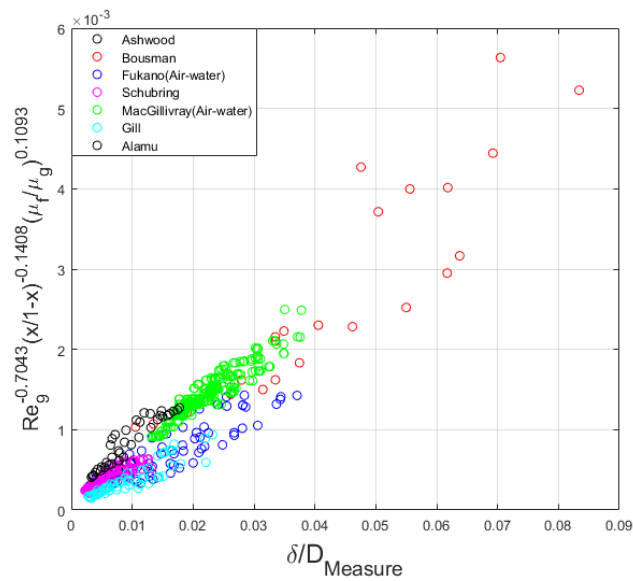
ขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้ความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของแก๊สต่อการไหลของเหลว ซึ่งเป็นผลของความเร็วของแก๊สและของเหลวที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์มแล้ว ให้ทำการพิจารณาความหนืดของของเหลวและแก๊สที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม โดยทำการพิจารณาความสัมพันธ์ในขั้นตอนที่ 1 และอัตราส่วนความหนืดของของเหลวต่อแก๊ส กับขนาดความหนาฟิล์ม ผลการทดลองที่ใช้พิจารณาหาความสัมพันธ์จะเพิ่มผลของความหนืดของของเหลวและแก๊ส ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 43



ขั้นตอนที่ 3 ทำการพิจารณาผลของความเร็วก๊าซและของเหลว, ผลของความหนืดของ ก๊าซและของเหลว และผลของความหนาแน่นแก๊สและของเหลว โดยใช้ฐานข้อมูลผลการทดลอง ทั้งหมดในการหาความสัมพันธ์ โดยหาความสัมพันธ์ในขั้นตอนที่ 2 และอัตราส่วนความหนาแน่น ของแก๊สต่อของเหลว กับขนาดความหนาฟิล์ม หาความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 43



รูปที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ขนาดความหนาฟิล์มกับเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของ แก๊สต่อของเหลว



รูปที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดความหนาฟิล์มกับเลขเรย์โนลด์ของแก๊ส, อัตราการไหลเชิงมวล และอัตราส่วนความหนืด

### 7.2.2 แบบจำลองใหม่

ภายใต้เงื่อนไขของผลการทดลองทั้ง 8 ผลการทดลองที่รวบรวม และจากคุณสมบัติของของไหล สามารถสร้างแบบจำลองใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\delta}{D} = \frac{210F}{1 + 454.2F} \quad (7.8)$$

โดยที่ F หาได้จาก

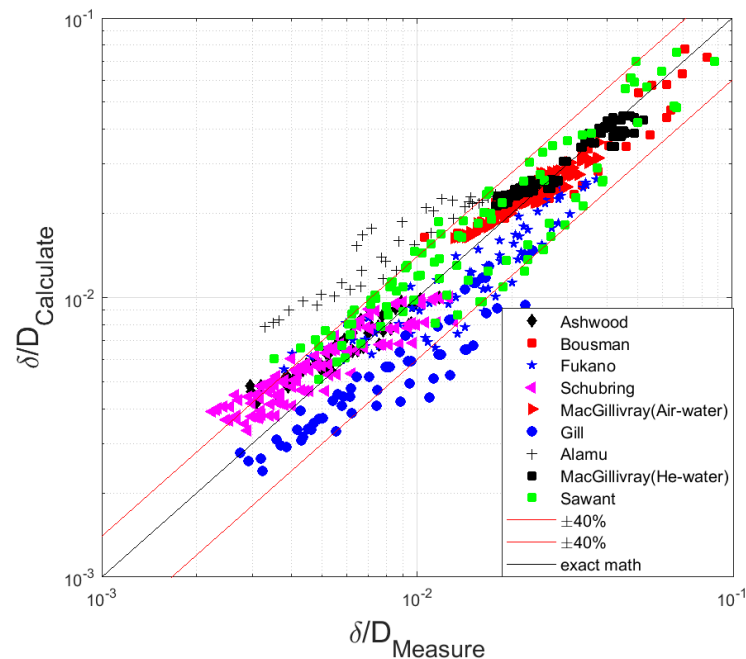
$$F = \text{Re}_g^{-0.7043} \left( \frac{x}{1-x} \right)^{-0.1408} \left( \frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0.1093} \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.4428} \quad (7.9)$$

### 7.2.3 การเปรียบเทียบแบบจำลองใหม่กับผลการทดลองที่รวบรวม

จากการเปรียบเทียบแบบจำลองใหม่กับผลการทดลองที่รวบรวมได้ 8 ผลการทดลอง โดยใช้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Relative Absolute Error) ในการเปรียบเทียบสามารถคำนวณตามสมการนี้

$$MRAE = \frac{1}{N} \sum_i^N \left| \frac{\delta_{\text{model},i} - \delta_{\text{exp},i}}{\delta_{\text{exp},i}} \right| \times 100\%, \quad (7.10)$$

การเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 43 จะเห็นได้ว่าโดยรวมแล้วแบบจำลองใหม่สามารถทำนายผลการทดลองได้แม่นยำมาก มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ทั้งหมดเท่ากับ 20.78% และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแต่ละผลการทดลองแสดงในตารางที่ 6 แบบจำลองเชิงประจักษ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สามารถทำนายขนาดความหนาของฟิล์มของผลการทดลองของ Bousman และ McQuillen [1], Fukano และ Furukawa [2], MacGillivray [4], Sawant [5], Ashwood และคณะ [6], Schubring และคณะ [8] ได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ดังต่อไปนี้ 16.28%, 23.43%, 8.45%, 10.3%, 27.2%, 18.06% และ 24% แต่จะมีผลการทดลองของ Gill และคณะ [3], และ Alamu [9] มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์มากกว่า 30% ซึ่งผลการทดลองของ Gill และคณะ [3] ผลเป็น under predict และผลการทดลองของ และ Alamu [9] ผลเป็น over predict จากการศึกษาสันนิฐานว่าทั้ง 2 ผลการทดลองอาจมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม



รูปที่ 32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดความฟิล์มที่รวบรวมกับแบบจำลองใหม่  
7.2.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองใหม่กับแบบจำลองอื่นๆ

จากการเปรียบเทียบแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่กับแบบจำลองอื่นๆ ภายใต้เงื่อนไขฐานข้อมูลผลการทดลอง 8 การทดลอง พบว่าแบบจำลองใหม่สามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์มได้ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแต่ละแบบจำลองกับฐานข้อมูลผลการทดลอง แบบจำลองใหม่มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 20.78% ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแบบจำลองใหม่ของแต่ละผลการทดลองส่วนมากน้อยกว่า 30% แต่จะมีของผลการทดลองของ Gill และคณะ [3] และ Alamu [9] ที่มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์มากกว่า 30% ซึ่งจากแบบจำลองอื่นๆ ก็ไม่สามารถทำนายผลของ Gill และคณะ [3] และ Alamu [9] ได้นอกจากแบบจำลองของ Henstock และ Hanratty[10] ที่มีพื้นฐานการสร้างแบบจำลองมาจากผลการทดลองของ Gill และคณะ[3] และแบบจำลองของ Berna และคณะ [21] แบบจำลองมีพื้นฐานการสร้างมาจากผลการทดลองของ Alamu[9] จึงเกิดการสันนิษฐานว่าผลการทดลองของ Gill และคณะ [3] และ Alamu [9] ต้องมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์มที่เราไม่ได้นำมาคิด ซึ่งผลการทดลองของ Gill และคณะ [3] เป็นผลการทดลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมากที่สุด ถึงแม้เราจะตัดผลของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโดยการหารขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกับขนาดความหนาฟิล์มแล้ว แต่เนื่องจากท่อมีขนาดที่ใหญ่มากจึงทำให้ผลของขนาดท่อยังคงอยู่

ตารางที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแต่ละแบบจำลอง

Model	Mean absolute percentage error									
	Bousman's data	Fukano's data	Gill's data	MacGillivray's data		Sawant's data	Ashwood's data	Schubring's data	Alamu's data	total
				Air-water	He-water					
Henstock and Hanratty [10]	42.15%	21.92%	28.45%	29.38%	36.73%	22.7%	51.36%	67.48%	109.62%	40.26%
Tatterson et al. [19]	33.53%	24.96%	19.37%	17.39%	24.69%	20.87%	109.46%	138.59%	124.51%	49.54%
Hori et al. [20]	76.89%	122.81%	64.06%	122.47%	2254.47%	99.04%	236.99%	270.97%	289.75%	443.44%
Fukano and Furukawa [2]	30.28%	7.52%	42.8%	33.01%	9.09%	51.75%	17.63%	23.62%	98.88%	31.05%
MacGillivray [4]	19.58%	90.16%	58.79%	12.46%	7.49%	22.05%	24.37%	25.02%	266.17%	38.31%
Berna et al. [21]	21.99%	59.29%	16.37%	27.35%	417.24%	48.16%	61.71%	66.92%	12.49%	93.13%
Ju et al. [25]	16.32%	11.6%	42.03%	13.11%	24.26%	9.19%	38.39%	44.45%	122.41%	27.89%
New	16.28%	23.43%	32.16%	8.45%	10.3%	27.2%	18.06%	24%	81.41%	20.78%

ตารางที่ 8 สรุปจำนวนจุดผลการทดลองที่อยู่ภายใต้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 20%, 30% และ 40% ของแต่ละแบบจำลอง

Model	Percentage of data points within $\pm X\%$ error		
	20	30	40
Henstock and Hanratty [10]	20.72	44.63	67.01
Tatterson et al. [19]	40.66	57.93	66.24
Hori et al. [20]	1.02	2.69	3.84
Fukano and Furukawa [2]	33.89	50.64	73.27
MacGillivray [4]	54.99	68.93	76.47
Berna et al. [21]	19.57	36.96	49.1
Ju et al. [25]	50.26	69.05	80.69
New	61.89	77.62	87.6

#### 7.2.5 สรุปผลแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ใหม่

แบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ใหม่ที่ได้รับการพัฒนามาจากแบบจำลองของ Henstock และ Hanratty [10] พบว่าสามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์มได้ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ ภายใต้เงื่อนไขฐานข้อมูลผลการทดลองทั้ง 8 ผลการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 20.78% และมีจำนวนจุดผลการทดลองที่อยู่ภายใต้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 20%, 30% และ 40% ดังนี้ 61.89%, 77.62% และ 87.6%

## บทที่ 8 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 8.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สร้างฐานข้อมูลของผลการทดลองที่ทำการวัดขนาดความหนาฟิล์มของการไหลสองเฟสแบบการไหลแบบวงแหวนในท่อกลมแนวตั้งจากการทดลองจาก 8 กลุ่มการทดลอง ได้แก่ Bousman และ McQuillen [1], Fukano และ Furukawa [2], Gill และคณะ [3], MacGillivray [4], Sawant [5], Ashwood และคณะ [6], Schubring และคณะ [8] และ Alamu [9] รวมทั้ง 782 จุดการทดลอง ซึ่งฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นนี้มีความละเอียดและค่อนข้างครบถ้วนมากกว่าฐานข้อมูลอื่นที่เคยทำมาในอดีต จึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่ดีในการพัฒนาแบบจำลองที่น่าเชื่อถือต่อไป จากการพิจารณาผลการทดลองพบว่าโดยทั่วไปแล้ว ขนาดความหนาฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของแก๊สลดลง, ความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้น, ความหนืดของของเหลวเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของแก๊สเพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบแบบจำลองที่พัฒนาในอดีตเมื่อนำมาใช้กับฐานข้อมูลที่พัฒนาขึ้นพบว่า แบบจำลองในอดีตยังมีความคลาดเคลื่อนสูง งานวิจัยนี้จึงอาศัยฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นใหม่ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายขนาดความหนาฟิล์มในการไหลแบบวงแหวน 2 แบบจำลองทั้งแบบจำลองเชิงประจักษ์ และแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ โดยการพัฒนาแบบจำลองเชิงประจักษ์ เริ่มต้นจากการพิจารณาพารามิเตอร์ไร้มิติที่สำคัญที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์มแล้วจึงเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาสร้างเป็นฟังก์ชันของแบบจำลอง โดยอิงกับข้อมูลผลการทดลองจากฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นเพื่อสร้างแบบจำลองเชิงประจักษ์ใหม่ที่มีความสมบูรณ์ เมื่อทำการเปรียบเทียบโดยใช้ข้อมูลในฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นพบว่าแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์ม โดยมีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 23% ซึ่งดีกว่าแบบจำลองที่มีมาในอดีตอื่นๆที่นำมาเปรียบเทียบอย่างเห็นได้ชัด

ในกรณีของแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์จะนำเอาลักษณะทางกายภาพของการไหลแบบวงแหวนมาประกอบการสร้างฟังก์ชันของแบบจำลอง โดยอาศัยทฤษฎีที่เสนอโดย Henstock และ Hanratty [10] ที่ว่าขนาดความหนาฟิล์มมีความเกี่ยวเนื่องกับ อัตราส่วน friction factor ของไหลทั้งสองเฟสซึ่งแทนด้วย interfacial friction factor เมื่อทำการเปรียบเทียบโดยใช้ข้อมูลในฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นพบว่าแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สามารถทำนายขนาดความหนาฟิล์ม โดยมีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ประมาณ 21% ซึ่งดีกว่าแบบจำลองที่มีมาในอดีตอื่นๆที่นำมาเปรียบเทียบอย่างเห็นได้ชัด

## 8.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากข้อจำกัดของผลการทดลองที่รวบรวม ผลการทดลองโดยส่วนมากเป็นการทดลองของ อากาศ-น้ำ จึงทำให้แบบจำลองที่สร้างมีผลของความหนืดและความหนาแน่นที่มีใช้น้ำและอากาศน้อย จึงทำให้แบบจำลองใหม่มีแนวโน้มในการทำนายผลการทดลองที่ไม่ใช่ อากาศ-น้ำ ได้แม่นยำน้อย ซึ่งแบบจำลองที่ดีควรมีผลการทดลองของของไหลอื่นๆ เป็นพื้นฐานในการสร้างด้วย

2. แบบจำลองที่ใหม่ที่สร้างไม่ได้คิดผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วง เพื่อให้ทราบว่าผลของแรงโน้มถ่วงของโลกมีผลกับขนาดความหนาฟิล์มอย่างชัดเจนมากขึ้น จึงความพิจารณาผลของแรงโน้มถ่วงของโลกด้วย ในการสร้างแบบจำลอง โดยจะมีผลการทดลองที่เป็น Microgravity และ Hypergravity ซึ่งเป็นการพิจารณาผลของแรงโน้มถ่วงที่ส่งผลกับขนาดความหนาฟิล์ม



## รายการอ้างอิง

- [1] W. S. Bousman and J. B. McQuillen, "Characterization of annular two-phase gas-liquid flows in microgravity," 1994.
- [2] T. Fukano and T. Furukawa, "Prediction of the effects of liquid viscosity on interfacial shear stress and frictional pressure drop in vertical upward gas-liquid annular flow," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 24, no. 4, pp. 587-603, 1998/06/01/ 1998.
- [3] L. Gill and G. F. Hewitt, "Sampling probe studies of the gas core in annular two-phase flow—II: Studies of the effect of phase flow rates on phase and velocity distribution," *Chemical Engineering Science*, vol. 19, no. 9, pp. 665-682, 1964.
- [4] R. M. MacGillivray, "Gravity and gas density effects on annular flow average film thickness and frictional pressure drop," 2004.
- [5] P. H. Sawant, "Dynamics of annular two-phase flow," Purdue University, 2008.
- [6] A. C. Ashwood, D. Schubring, and T. A. Shedd, "Direct measurements of liquid film roughness for the prediction of annular flow pressure drop," in *ECI International Conference on Boiling Heat Transfer Florianopolis-SC-Brazil*, 2009, pp. 3-7.
- [7] E. T. Hurlburt and T. A. Newell, "Prediction of the Circumferential Film Thickness Distribution in Horizontal Annular Gas-Liquid Flow," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 122, no. 2, pp. 396-402, 2000.
- [8] D. Schubring, A. C. Ashwood, T. A. Shedd, and E. T. Hurlburt, "Planar laser-induced fluorescence (PLIF) measurements of liquid film thickness in annular flow. Part I: Methods and data," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 36, no. 10, pp. 815-824, 2010/10/01/ 2010.
- [9] M. B. Alamu, "Investigation of periodic structures in gas-liquid flow," University of Nottingham, 2010.
- [10] W. H. Henstock and T. J. Hanratty, "The interfacial drag and the height of the wall layer in annular flows," *AIChE Journal*, vol. 22, no. 6, pp. 990-1000, 1976.



- [11] R. Lockhart and R. Martinelli, "Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 45, no. 1, pp. 39-48, 1949.
- [12] G. B. Wallis, "One-dimensional two-phase flow," 1969.
- [13] P. Whalley, "Experimental wave and entrainment measurements in vertical annular two-phase flow," in *Multi-phase Flow Systems Symp., Strathclyde., 1974*, 1974.
- [14] J. Collier, "Data on the vertical flow of air-water mixtures in the annular and dispersed flow regions. Part II: Film thickness and entrainment data and analysis of pressure drop measurements," *Trans. Inst. Chem. Eng.*, vol. 39, pp. 127-136, 1961.
- [15] S.-F. Chien and W. Ibele, "Pressure drop and liquid film thickness of two-phase annular and annular-mist flows," *Journal of Heat Transfer*, vol. 86, no. 1, pp. 89-96, 1964.
- [16] D. Charvonia, "A Study of the Mean Thickness of the Liquid Film and the Characteristics of the Interfacial Surface in Annular, Two-Phase Flow in a Vertical Pipe," PURDUE UNIV LAFAYETTE IN JET PROPULSION CENTER 1959.
- [17] D. Butterworth, "A comparison of some void-fraction relationships for co-current gas-liquid flow," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 1, no. 6, pp. 845-850, 1975.
- [18] R. W. Swanson, "Characteristics of the gas-liquid interface in two-phase annular flow," *Ph. D. Thesis, Univ. of Delaware, USA*, 1966.
- [19] D. F. Tatterson, J. C. Dallman, and T. J. Hanratty, "Drop sizes in annular gas-liquid flows," *AIChE Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 68-76, 1977.
- [20] K. Hori, M. Nakasamomi, K. Nishikawa, and K. Sekoguchi, "Study of ripple region in annular two-phase flow (Third report, effect of liquid viscosity on gas-liquid interfacial character and friction factor)," *Trans. Jap. Soc. Mech. Eng.*, vol. 44, no. 387, pp. 3847-56, 1978.
- [21] C. Berna, A. Escrivá, J. L. Muñoz-Cobo, and L. E. Herranz, "Review of droplet entrainment in annular flow: Interfacial waves and onset of entrainment," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 74, pp. 14-43, 2014/07/01/ 2014.

- [22] S. Paras and A. Karabelas, "Properties of the liquid layer in horizontal annular flow," *International journal of multiphase flow*, vol. 17, no. 4, pp. 439-454, 1991.
- [23] L. Cousins, "Liquid mass transfer in annular two-phase flow," in *Proceedings of Symposium on Two-Phase Flow, Exeter, 1965*, 1965.
- [24] M. Ishii and M. A. Grolmes, "Inception criteria for droplet entrainment in two-phase concurrent film flow," *AIChE Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 308-318, 1975.
- [25] P. Ju, C. S. Brooks, M. Ishii, Y. Liu, and T. Hibiki, "Film thickness of vertical upward co-current adiabatic flow in pipes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 89, pp. 985-995, 2015/10/01/ 2015.
- [26] M. Ishii and M. Grolmes, "Inception criteria for droplet entrainment in two-phase concurrent film flow," *AIChE Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 308-318, 1975.
- [27] V. P. Carey, "Liquid-vapor phase-change phenomena," 1992.
- [28] G. F. Hewitt and D. Roberts, "Studies of two-phase flow patterns by simultaneous x-ray and fast photography," Atomic Energy Research Establishment, Harwell, England (United Kingdom)1969.
- [29] A. Dukler and Y. Taitel, "Flow regime transitions for vertical upward gas liquid flow: A preliminary approach through physical modelling," in *Workshop held in Houston, TX*, 1977.
- [30] A. Porteus, "Prediction of the Upper Limit of the Slug Flow Regimes," *British Chemistry Engineering*, vol. 14, no. 9, pp. 117-119, 1969.
- [31] G. Hewitt, *Annular two-phase flow*. Elsevier, 2013.
- [32] E. Schlünder, "LOCAL HEAT TRANSFER COEFFICIENTS ON CONDENSATION IN A VERTICAL TUBE."
- [33] P. Magiros and A. Dukler, "Entrainment and pressure drop in concurrent gas-liquid flow," in *Proceedings of the 7th Midwestern Mechanics Conference*, 1961, vol. 1, pp. 532-553.
- [34] A. Govan, G. Hewitt, D. Owen, and T. Bott, "An improved CHF modelling code, 2nd UK National Heat Transfer Conf," *Glasgow, UK*, 1988.

- [35] F. Fu and J. F. Klausner, "A separated flow model for predicting two-phase pressure drop and evaporative heat transfer for vertical annular flow," *International journal of heat and fluid flow*, vol. 18, no. 6, pp. 541-549, 1997.
- [36] N. Zuber and J. Findlay, "Average volumetric concentration in two-phase flow systems," *Journal of heat transfer*, vol. 87, no. 4, pp. 453-468, 1965.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเนตรชนก เทียบสี เกิดเมื่อวันที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมอากาศยาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2556 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบริหารบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2558

