



การประเมินสหสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณสัดส่วนช่องว่างของการไหลสอง
สถานะขนาดไมโคร

A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EXISTING VOID FRACTION
CORRELATIONS TO THE MICRO-SCALE TWO-PHASE FLOW

มันทนา กันทาฟัน

MANTHANA KANTHAFUN

ศักดิ์สิทธิ์ บุญดีเรก

SAKSIT BOONDIREK

ปริญญานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินสหสัมพันธ์ต่างๆ ที่ใช้คำนวณสัดส่วนช่องว่างของการไหลสอง
สถานะขนาดไมโคร

A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EXISTING VOID FRACTION
CORRELATIONS TO THE MICRO-SCALE TWO-PHASE FLOW



ปริญญาานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EXISTING VOID FRACTION
CORRELATIONS TO THE MICRO-SCALE TWO-PHASE FLOW



A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL
DEPARTMENT OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
PRINCE OF CHUMPHON

2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

DEPARTMENT OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

PRINCE OF CHUMPHON CAMPUS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การประเมินสหสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองสถานะขนาดไมโคร

PROJECT TITLE A comprehensive assessment of the existing void fraction correlations to the micro-scale two-phase flow

ชื่อนักศึกษา นางสาวมณฑนา กันทาพันธ์ รหัสนักศึกษา 62201080
นายศักดิ์สิทธิ์ บุญดีเรก รหัสนักศึกษา 62201092

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ศิระ สายสร

ปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์			ลายมือชื่อ
ดร.ศักรินทร์	ชินกุลพิทักษ์	กรรมการสอบ	
รศ.วชร	กาลาสี	กรรมการสอบ	
ผศ.ววรรษชล	วัฒน์	กรรมการสอบ	
ผศ.ดร.อดิเรก	สุริยะวงศ์	กรรมการสอบ	
รศ.ดร.ศิระ	สายสร	อาจารย์ที่ปรึกษา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 13 มิถุนายน 2566 เวลา 09.00 – 19.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง A309

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 16 มิถุนายน พ.ศ.2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การประเมินสหสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองสถานะขนาดไมโคร		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวมณฑนา กันทาพันธ์	รหัสนักศึกษา	62201080
	นายศักดิ์สิทธิ์ บุญดีเรก	รหัสนักศึกษา	62201092
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ศิระ	สายศร	
ปริญญานิพนธ์			

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการวิเคราะห์การทำนายสัดส่วนช่องว่าง รูปแบบการไหลและสหสัมพันธ์ต่าง ๆ ในข้อมูลของลักษณะในท่อตรงมีการไหลแบบสองสถานะของสารทำความเย็น R-134a ขณะที่เกิดการเดือดภายในช่องว่างขนาดไมโครที่มีรูปแบบการจัดวางในการไหล 3 แนว คือแนวระดับ แนวตั้งขณะไหลขึ้นและแนวตั้งขณะไหลลง ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในอยู่ที่ 1 mm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกอยู่ที่ 1.6 mm และความยาวท่ออยู่ที่ 500 mm เพื่อค้นคว้าหาสหสัมพันธ์ที่ทำนายได้เหมาะสมกับสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองสถานะขนาดไมโคร

คำสำคัญ : สัดส่วนช่องว่าง ,สหสัมพันธ์ ,ช่องว่างขนาดไมโคร ,รูปแบบการไหล

Project Title	A comprehensive assessment of the existing void fraction correlations to the micro-scale two-phase flow		
Student	Miss.Manthana	Kanthafun	Student ID 62201080
	Mr.Saksit	Boondirek	Student ID 62201092
Degree	Bachelor of Engineering		
Program	Mechanical Engineering		
Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Sira Saisorn		

ABSTRACT

This research is a study of gap proportion analysis. Flow patterns and their correlations in the data of two-state flow characteristics of R-134a during boiling within micro-gaps with 3 flow orientations, i.e., horizontal, vertical while going up and vertical while going down. It has an internal diameter of 1 mm, an external diameter of 1.6 mm and a tube length of 500 mm in order to find a predictable correlation with the gap ratio of the micro-flow.

Keywords : Void fraction, Correlation, Micro channel ,Flow pattern

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.ศิระ สายศร อาจารย์ที่ปรึกษา ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ และอาจารย์อดีตรก คุณภักดิ์ คุณพิระพัฒน์ ที่ปรึกษานิพนธ์ร่วม ที่ให้ คำปรึกษา คำแนะนำ แนวคิด ความรู้ต่าง ๆ ตลอดจนขั้นตอนและวิธีการในการทำปริญญาานิพนธ์

บุคคลที่ขาดมิได้คือ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณและเป็นทีเคารพรัก ที่คอยให้การสนับสนุนและ กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำเสมอคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง และขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ นักศึกษาที่คอยช่วยเหลือแนะนำและสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน รวมถึงกำลังใจซึ่งทำให้การจัดทำปริญญา นิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง คณะผู้จัดทำหวังว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ไม่มากนักน้อยต่อผู้ที่สนใจ ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินสหสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองสถานะขนาด ไมโคร

มณฑนา กันทาฝัน
ศักดิ์สิทธิ์ บุญดิเรก
มิถุนายน 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญรูป (ต่อ)	VIII
สารบัญรูป (ต่อ)	IX
รายการสัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
1.3 สมมติฐานของโครงการ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.7 แผนการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล	5
2.2 เกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกประเภทของท่อ	5
2.3 การสูญเสียจากการไหลภายในท่อ	6
2.3.1 ประเภท Major Losses	6
2.3.2 ประเภท Minor Losses	6
2.4 รูปแบบการไหล	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.5	ทฤษฎีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล	7
2.5.1	อัตราการไหล (Flow Rate)	7
2.5.2	สัดส่วนช่องว่าง (Void fraction)	7
2.5.2.1	Homogeneous model	8
2.5.2.2	Slip model	9
2.5.2.3	<i>Kah</i> model	9
2.5.2.4	Drift-flux model	10
2.5.2.5	Miscellaneous correlations	10
2.5.3	คุณภาพเชิงปริมาตร (Volumetric quality)	10
2.5.4	คุณภาพไอ (Vapor quality)	11
2.5.5	Froude number	11
2.5.6	ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของการไหลสองสถานะ (The mean density of the two-phase flow)	11
2.5.7	Mean Absolute Error (MAE)	11
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
2.7	รูปแบบการไหลสองสถานะที่พบในท่อขนาดไมโครของสารทำความเย็น R-134a	14
2.7.1	Slug flow	14
2.7.2	Throat-annular flow	15
2.7.3	Churn flow	16
2.7.4	Annular flow	17
2.7.5	Annular-rivulet flow	18
บทที่ 3 ซอฟต์แวร์และวิธีการวิเคราะห์ผล		
3.1	ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลและหน้าที่ของซอฟต์แวร์	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.2	ขั้นตอนแยกข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล	19
3.3	ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลรูปภาพ	22
3.4	วิธีหาค่าเฉลี่ยปริมาตรแก๊สที่ได้จากการวิเคราะห์	25
3.5	วิธีหาสัดส่วนช่องว่าง (void fraction) ที่ได้จากการวิเคราะห์	25
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการวิเคราะห์		
4.1	ข้อมูลการทดลองสัดส่วนช่องว่างของการไหลแบบ 2 สถานะ	26
4.1.1	รูปแบบการไหลสองสถานะที่พบในข้อมูลการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่าง	26
4.1.2	ผลจากการวิเคราะห์รูปภาพเพื่อหาค่าสัดส่วนช่องว่าง	27
4.2	ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างกับคุณภาพเชิงปริมาตร	27
4.3	ผลการทำนายสัดส่วนช่องว่างโดยสหสัมพันธ์	28
4.3.1	เทียบสหสัมพันธ์จากความต่างของอุณหภูมิ	30
4.3.2	ทิศทางการไหล	44
4.3.3	เปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างจากความต่างความดัน	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง		
5.1	สรุปผลการทดลอง	60
5.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	60
บรรณานุกรม		61
ภาคผนวก		
ประวัติผู้เขียน		69

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	Slug flow Saisorn et al. [5]	14
2.2	Throat-annular flow Saisorn et al. [5]	15
2.3	Churn flow Saisorn et al. [5]	16
2.4	Annular flow Saisorn et al. [5]	17
2.5	Annular-rivulet flow Saisorn et al. [5]	18
3.1	โปรแกรม Solidworks 2021	19
3.2	แบ่งโพลเดอร์ข้อมูลดิบในส่วนของ Flow pattern total	19
3.3	แบ่งโพลเดอร์แยกเป็นทิศทางการไหล	20
3.4	แบ่งโพลเดอร์แยกเป็นอุณหภูมิตั้ง	20
3.5	แบ่งโพลเดอร์แยกเป็นอัตราการไหล	20
3.6	แบ่งโพลเดอร์แยกตามแรงดันและกระแสไฟฟ้า	21
3.7	แบ่งแยกเป็นโพลเดอร์ตามรูปแบบการไหล	21
3.8	รูปแบบการไหลแบบ Churn flow	21
3.9	นำรูปภาพเข้าโปรแกรม Solidworks 2021	22
3.10	สร้างกรอบรอบฟองแก๊สส่วนบน	22
3.11	ลบบูภาพและเส้นที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ห่ออก	22
3.12	ใช้คำสั่ง Revolved Boss/Base ในการสร้างปริมาตรแก๊ส	23
3.13	วิเคราะห์หาปริมาตรแก๊ส	23
3.14	สร้างกรอบรอบฟองแก๊สส่วนล่าง	24
3.15	ลบบูภาพและเส้นที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ห่ออก	24
3.16	ใช้คำสั่ง Revolved Boss/Base ในการสร้างปริมาตรแก๊ส	24
3.17	วิเคราะห์หาปริมาตรแก๊ส	25
4.1	ผลการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างการไหลในแนวอนเทียบกับคุณภาพเชิงปริมาตร	27
4.2	ผลการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างการไหลลงในแนวตั้งเทียบกับคุณภาพเชิงปริมาตร	28
4.3	ผลการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างการไหลขึ้นในแนวตั้งเทียบกับคุณภาพเชิงปริมาตร	28
4.4	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลในแนวระดับที่อุณหภูมิตั้ง 30 องศาเซลเซียส	30
4.5	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลในแนวระดับที่อุณหภูมิตั้ง 35 องศาเซลเซียส	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลในแนวระดับที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	33
4.7	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลลงในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	34
4.8	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลลงในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	36
4.9	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลลงในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	37
4.10	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทขณะไหลขึ้นในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	39
4.11	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทขณะไหลขึ้นในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	40
4.12	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทขณะไหลขึ้นในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	42
4.13	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล ทำนายโดยสหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model	44
4.14	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหลทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Armand (1946) [10]	45
4.15	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล ทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Chisholm (1983) [11]	46
4.16	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล ทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Cozp et al [12]	47
4.17	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล ทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Nishino and Yamazaki [13]	48
4.18	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล ทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Guzhov et al (1967) [15]	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.19	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล ทำนายโดยสหสัมพันธ์ สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14]	50
4.20	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล ทำนายโดยสหสัมพันธ์ สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Kawahara et al.(2002) [8]	51
4.21	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดันทำนายโดยสหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model	52
4.22	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Armand (1946) [10]	53
4.23	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Chisholm (1983) [11]	54
4.24	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Cozp et al [12]	55
4.25	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Nishino and Yamazaki [13]	56
4.26	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Guzhov et al (1967) [15]	57
4.27	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14]	58
4.28	ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Kawahara et al.(2002) [8]	59
6.1	นำรูปภาพท่อที่ไม่มีกรไหลสารสารใด ๆ ภายในท่อ เข้าโปรแกรม Solidworks 2021	64
6.2	สร้างกรอบรอบท่อภายในส่วนบน	64
6.3	ลรูปภาพและเส้นที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ออก	64
6.4	ใช้คำสั่ง Revolved Boss/Base ในการสร้างปริมาตรท่อส่วนบน	65
6.5	วิเคราะห์ปริมาตรท่อภายในส่วนบน	65
6.6	สร้างกรอบรอบท่อภายในส่วนล่าง	66
6.7	ลรูปภาพและเส้นที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ออก	66
6.8	ใช้คำสั่ง Revolved Boss/Base ในการสร้างปริมาตรท่อภายในส่วนล่าง	66
6.9	วิเคราะห์หาปริมาตรท่อภายในส่วนล่าง	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมายสัญลักษณ์
A	พื้นที่หน้าตัดการไหล, m^2
V	อัตราการไหล, m^3/s
C_0	พารามิเตอร์การกระจาย
d,D	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ, m
D_h	เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก, m
Fr	Froude number
G	ฟลักซ์มวล (อัตราการไหลเชิงมวล/พื้นที่หน้าตัด), $kg/m^2.s$
L	ความยาว, mm
MAE	Mean absolute error
S	อัตราส่วนของความเร็ว
V	ปริมาตร, mm^3
x	ค่าคุณภาพไอ (Vapor quality)
K	ค่าสัมประสิทธิ์
ตัวอักษรกรีก	
α	สัดส่วนช่องว่าง (Void fraction)
β	คุณภาพไอเชิงปริมาตร (Volumetric quality)
η	ค่าความหนืด
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

γ Percentage

ตัวกำกับล่าง

avg ค่าเฉลี่ย

exp ค่าการทดลอง

pred ค่าจากการทำนาย

H,h Homogeneous volume fraction

G,g แก๊ส

L,l ของเหลว

TP สองสถาน



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาโครงการ

หลายปีที่ผ่านมาการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการไหลสองสถานะและการถ่ายเทความร้อนในช่อง การไหลขนาดเล็กหรือขนาดไมโครมีความจำเป็นมากขึ้น เนื่องจากการพัฒนาอุปกรณ์ไมโครสเกล อย่างรวดเร็ว ซึ่งอุปกรณ์พวกนี้สามารถนำไปใช้ได้กับงานทางวิศวกรรมหลายอย่าง รวมถึงอุปกรณ์ทาง การแพทย์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและระบบทำความเย็นประเภทต่าง ๆ นอกจากนี้ปรากฏการณ์ ที่น่าสนใจซึ่งเกิดจากบทบาทที่สำคัญของ SURFACE EFFECTS ฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะช่วยเราพัฒนา อุปกรณ์จิ๋วที่ทรงพลังสำหรับการทำงานในโดเมนที่ดูเหมือนจะไม่สามารถทำได้ในอดีต เห็นได้แน่ชัดว่า ภายใต้สถานะที่ครอบคลุมยังขาดแนวโน้มและพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหลในช่อง ขนาดเล็กและช่องขนาดไมโคร ดังนั้นปัญหาการถ่ายเทความร้อนพื้นฐานและลักษณะการไหลที่พบใน การพัฒนาและประมวลผลระบบไมโครอิเล็กทรอนิกส์-เครื่องกล (MEMS) จึงเป็นความท้าทายในการ ออกแบบและควบคุมระบบไมโครเหล่านี้ ตามความต้องการของโซลูชันใหม่ในการกระจายความร้อน และการรักษาอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ ในอุปกรณ์สมัยใหม่ กลไกสำคัญที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน ระดับไมโครนั้นมีความชัดเจนภายใต้สถานะและกลไกสำคัญที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนระดับไมโครนั้นมีความชัดเจนภายใต้สถานะของกลไกสำคัญที่ส่งผล การออกแบบและการควบคุมกระบวนการ ของระบบไมโครอย่างเหมาะสม ลักษณะการไหลแบบสองเฟสและการถ่ายเทความร้อนในช่องขนาด เล็ก เช่น ช่องไมโครและช่องขนาดเล็กมีแนวโน้มว่าจะขึ้นกับผลกระทบของแรงตึงผิวอย่างมาก นอกเหนือจากความหนืดและแรงเฉื่อย ทำให้เห็นความแตกต่างของช่องขนาดเล็กและขนาดปกติได้ อย่างชัดเจน โดยจะมีการนำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับช่องขนาดเล็กและขนาดไมโครที่แตกต่างกัน

ในช่องขนาดเล็กและช่องขนาดไมโครนั้นจะสะดวกต่อการประมาณสัดส่วนช่องว่างโดยการ วิเคราะห์ภาพโดยมีข้อสันนิษฐานบางประการที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างที่เกิดขึ้นจากส่วนต่อประสาน ระหว่างแก๊สและของเหลว

โดยการประเมินสหสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่ใช้ค่าสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองเฟสขนาดไมโครนี้ จะ ศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อประเมินค่าสัดส่วนช่องว่าง เนื่องจากสัดส่วนช่องว่าง เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญพารามิเตอร์หนึ่งในการประเมินความโน้มถ่วงและแรงของความดันตกรวม รวมของลักษณะ

การไหลแบบสองสถานะในช่องต่าง ๆ การวิเคราะห์ภาพได้รับการพิจารณาโดยสมมุติปริมาตรสมมาตรครอบคลุม ส่วนทรงกลมและทรงรีตลอดจนกระบอกสูบที่เกิดจากส่วนต่อประสานระหว่างแก๊สกับของเหลว หาสัดส่วนเชิงปริมาตร

Pietrzak and Placzek [7] ได้คาดการณ์สัดส่วนช่องว่างของก๊าซระหว่างการไหลแบบสองสถานะในช่องทางเป็นสิ่งสำคัญมากของการคำนวณทางวิศวกรรมเมื่อออกแบบเครื่องมือในกระบวนการ มีหลายวิธีที่รู้จักกันดีในวรรณกรรมสำหรับการคำนวณสัดส่วนช่องว่างของก๊าซที่พัฒนาขึ้นสำหรับการไหลแบบสองสถานะในช่องธรรมดา นำเสียดายที่ยังไม่มีวิธีการคำนวณสัดส่วนของก๊าซที่จะใช้ได้กับการไหลสองสถานะในช่องขนาดเล็ก จากที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อพยายามประเมินวิธีการคำนวณสัดส่วนช่องว่างของก๊าซสำหรับการไหลสองสถานะที่น่าเสนอในเอกสาร : ก๊าซ-ของเหลว และไอ-ของเหลวในช่องมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ด้วยเหตุนี้ ผลการคำนวณจึงถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง 83 ชุดสำหรับการไหลของอากาศ-น้ำ และ 171 ชุดสำหรับการไหลของไอ-ของเหลว (R717 และ R744) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ช่วยให้เราเลือกวิธีการคำนวณที่แม่นยำที่สุดซึ่งสามารถนำไปใช้กับการคำนวณสัดส่วนช่องว่างของก๊าซในการไหลแบบสองสถานะในช่องเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กได้สำเร็จ

ในปัจจุบันแม้จะมีข้อมูลบางส่วนเกี่ยวกับการไหลในช่องขนาดไมโครแต่ยังมีที่ว่างสำหรับงานวิจัยเพิ่มเติม ในเรื่องของการประเมินสหสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองสถานะขนาดไมโคร ในรูปแบบการไหลของ น้ำและอากาศ กับ การไหลเดือดสองสถานะของสารทำความเย็น ยังมีคนทำค่อนข้างน้อย

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์การวัดค่าสัดส่วนช่องว่าง
- 1.2.2 เพื่อเทียบสหสัมพันธ์กับสัดส่วนช่องว่างต่าง ๆ
- 1.2.3 เพื่อค้นหาสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับการทำนายสัดส่วนช่องว่างขนาดไมโคร

1.3 สมมติฐานของโครงการงาน

- 1.3.1 มีสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมในการทำนายสัดส่วนช่องว่างของข้อมูลของงานวิจัย

1.4 ขอบเขตของโครงการงาน

- 1.4.1 เป็นการไหลแบบสองสถานะในท่อขนาดไมโคร
- 1.4.2 จุดศูนย์กลางภายในท่อ 1 มิลลิเมตร
- 1.4.3 สารในท่อเป็นสารทำความเย็น R-134a ขณะเกิดการเดือด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ศึกษางานวิจัยสำหรับ ใช้ในการประเมินสหสัมพันธ์ต่างๆ ที่ใช้คำนวณหาสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองเฟสขนาดไมโคร

1.5.2 ได้ทราบถึงสมการที่เหมาะสมกับการทำนายสัดส่วนช่องว่างในท่อขนาดเล็ก

1.5.3 ได้ทราบถึงขนาดของสัดส่วนช่องว่างเพื่อนำไปใช้ในเทคโนโลยีสมัยใหม่ต่อไป

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 แผนผังการดำเนินงานการค้นคว้างานวิจัยและวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน									
	2565					2566				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.กำหนดหัวข้อในการทำงานวิจัย	↔									
2. ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูล	↔									
3.ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษา	↔									
4.วิเคราะห์รูปภาพและข้อมูลในการทดลอง	↔									
5.ศึกษาค้นคว้าสหพันธ์เพื่อนับมาเทียบกับข้อมูล	↔									
6.เลือกสหสัมพันธ์ ที่มีค่าเบี่ยงเบนน้อยที่สุด	↔									
7.สรุปผลการค้นคว้างานวิจัย	↔									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล

กลศาสตร์ของไหลมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อชีวิตประจำวัน รวมถึงในทางอุตสาหกรรมด้วยเครื่องอำนวยความสะดวกเครื่องจักรต่าง ๆ และกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมนั้น ก็จะประกอบไปด้วยของไหลแทบทั้งสิ้น เช่น ท่อไฮดรอลิก เป็นต้น กลศาสตร์ของไหลนี้จึงมีความจำเป็นสำหรับการคำนวณการออกแบบระบบเพื่อให้มีการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมของไหล

Fluid หมายถึงสสารที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างต่อเนื่องเมื่อถูกกระทำด้วยแรงเค้นเฉือนซึ่งนั้นหมายความว่าเมื่อได้ที่มีแรงเค้นเฉือน ซึ่งนั้นหมายความว่าเมื่อได้ที่มีแรงเค้นเฉือนมากกระทำของไหลจะเกิดการขยับตัว และเปลี่ยนรูปร่างไป เช่น เมื่อเทของไหลลงในภาชนะของไหลจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างต่อเนื่องไปชั่วขณะหนึ่งเพราะรูปร่างของของไหลในขณะนั้นไม่สอดคล้องกับรูปร่างของภาชนะจึงทำให้เกิดแรงเค้นเฉือน ซึ่งก็คือสถานะที่ของไหลมีรูปร่างเหมือนกับภาชนะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับภาชนะจะมีแต่แรงเค้นเฉือนขึ้นภายในของเหลว กระบวนการปรับตัวนี้ จะดำเนินต่อเนื่องไปจนกระทั่งแรงเค้นเฉือนหายไปซึ่งก็คือสถานะที่ของไหลที่รูปร่างเหมือนภาชนะ

2.2. เกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกประเภทของท่อ

การจำแนกประเภทท่อนั้นจะถูกกำหนดโดยนักวิจัยต่าง ๆ โดยจะมีหลักการและวิธีการที่ แตกต่างกันไป ซึ่งนักวิจัยแต่ละคนก็จะมีขนาดท่อแตกต่างกันไปยกตัวอย่าง ดังต่อไปนี้

Mehendale et al. [1] ได้ใช้วิธีการนำเสนอเกณฑ์ โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็นตัวแปรสำคัญและเป็นปัจจัยสำคัญ เพื่อใช้เป็นการให้ค่านิยามขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไว้ดังต่อไปนี้

- Micro-heat exchanger: $1 \mu\text{m} \leq D_h \leq 100 \mu\text{m}$
- Micro-heat exchanger: 100 c
- Compact heat exchanger: $1 \text{ mm} \leq D_h \leq 6 \text{ mm}$
- Conventional heat exchanger $D_h > 6 \text{ mm}$

Kadikar [2] ได้ใช้วิธีการนำเสนอเกณฑ์ โดยมีหลักการจำแนกตามประเภทของท่อที่ใช้ในทางวิศวกรรม ได้ดังต่อไปนี้ โดยที่ D) เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางท่อไฮดรอลิก (Hydraulic diameter, D_h)

- Micro-channels: $10 \mu\text{m} \leq D_h \leq 200 \mu\text{m}$
- Mini-channels: $200 \mu\text{m} \leq D_h \leq 3 \text{ mm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Conventional channels: $D_h > 3 \text{ mm}$

อย่างไรก็ตามเกณฑ์การจำแนกประเภทของท่อนั้น ถึงแม้ว่านักวิจัยแต่ละคนจะกำหนดเกณฑ์ของท่อที่มีขนาดต่างกัน แต่ในปัจจุบันก็ยังไม่มีความเห็นที่ตรงกันว่าจะสามารถจำแนกประเภทของท่อที่ชัดเจน

2.3 การสูญเสียจากการไหลภายในท่อ

การเปลี่ยนแปลงความดันมีอิทธิพลต่อการไหลในท่อกว่าการเปลี่ยนแปลงความดันอาจเกิดจากเปลี่ยนแปลงระดับของท่อความเร็วของของไหลในท่อและแรงเสียดทานการสูญเสียความดัน (Pressure Losses) เป็นปัจจัยหลัก ที่ทำให้ความดันในท่อเกิดการเปลี่ยนแปลงการสูญเสียความดันสามารถแบ่งได้ 2 ได้แก่

2.3.1 ประเภท Major Losses เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานภายในท่อ

- การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)
- การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

2.3.2 ประเภท Minor Losses เกิดจากการที่ของไหลไหลผ่านสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น Gate Valve, Elbow ท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่และทางแยกต่าง ๆ

2.4 รูปแบบการไหล

รูปแบบการไหล (Flow Pattern) ประกอบด้วยเส้นการไหล Streamline คือเส้นที่แสดง การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามการไหล เมื่อพิจารณาเส้นการไหลของอนุภาคทั้งหมดก็จะได้เส้นการไหลจำนวนมากซึ่งรูปแบบการไหลที่มีเส้นการไหลประกอบกันจำนวนมากนี้เรียกว่า สนามการไหล

- การไหล (Stream Tube) คือกลุ่มของเส้นการไหล
- เส้นทางการไหล (Path Line) คือเส้นที่แสดงให้เห็นถึงทิศทางของความเร็วของอนุภาคใดอนุภาคหนึ่งในช่วงเวลานั้น

ในการไหลคงตัว เส้นการไหลและเส้นทางการไหลจะเป็นเส้นเดียวกันเพราะอนุภาค เคลื่อนที่ตามเส้นการไหลและเส้นการไหลนี้ แสดงถึงทิศทางของการเคลื่อนที่ของอนุภาคในเวลาเดียวกันด้วยในทางตรงกันข้ามการไหลไม่คงตัวนั้นเวกเตอร์ความเร็วที่จุดต่าง ๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเส้นการไหลจึงเปลี่ยนตำแหน่งไปเรื่อย ๆ ทำให้เส้นการไหลกับเส้นทางการไหลแตกต่างกันออกไปปริมาตรควบคุม (Control Volume) คือ ขอบเขต

ปริมาตรจำกัดในสนามการไหลที่กำหนดขึ้นเพื่อพิจารณาคุณสมบัติการไหลเฉพาะใน ปริมาตรควบคุมเท่านั้น โดยปริมาตรควบคุมสามารถนำมาเพื่อวิเคราะห์การไหลได้คือ สมการสภาพต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน

- การไหลหนึ่งมิติ (One Dimensional Flow) คือการไหลตามเส้นการไหลใดๆ ที่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการไหล เช่น ความดัน ความเร็ว และอื่นๆ เฉพาะในทิศทางของเส้นการไหลเท่านั้น

- การไหลสองมิติ (Two Dimensional Flow) คือการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติใน 2 ระนาบ

2.5 ทฤษฎีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล

2.5.1 อัตราการไหล (Flow Rate)

อัตราการไหล (Flow Rate) คือ ปริมาณการเคลื่อนย้ายของเหลวจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งไปในช่วงเวลาใด ๆ มีหน่วยเป็นปริมาตรต่อเวลาเช่น ลบ.ม/ชม, ลิตร/วินาที, แกลลอน/นาที เป็นต้น การไหลก่อให้เกิดแรงเสียดทานในเส้นท่อและการไหลมีความสัมพันธ์กับขนาดพื้นที่หน้าตัดและความเร็วในการไหล โดยจะสามารถหาอัตราการไหลเชิงปริมาตร Volume (Flow Rate) มีสมการทั่วไป ดังนี้

$$\dot{V} = u \times A \quad (2.1)$$

เมื่อ \dot{V} คือ อัตราการไหล (m^3/s)

u คือ ความเร็วของการไหล (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล (m^2)

สำหรับการหาอัตราการไหลแบบสองสถานะนั้น กรณีอัตราการไหลของของเหลวนั้นจะสามารถได้มาจากการวัด แต่อัตราการไหลของแก๊สนั้นจะสามารถหาได้จากสมการของจะหาได้จาก ดังต่อไปนี้

$$\dot{V}_g = \frac{x_{avg}}{\rho_g} GA \quad (2.2)$$

เมื่อ G คือ Mass flux (kg/m^2s)

x_{avg} คือ คุณภาพไอเฉลี่ย

ρ_g คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (g/m^3)

2.5.2 สัดส่วนช่องว่าง (Void fraction)

สัดส่วนช่องว่าง หมายถึง สัดส่วนของพื้นที่ที่แก๊สครอบงำอยู่ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของช่องทางการไหลในช่วงความยาวที่พิจารณา ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการกำหนดแรงดันตกคร่อม, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลสองสถานะ, ระบบทำความเย็น, ระบบปรับอากาศ Pipeline network systems และระบบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโครงการวิจัยนี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารนี้มีความสำคัญหรือไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิวเคลียร์ ดังนั้นการวิเคราะห์ที่ถูกต้องของค่าสัดส่วนช่องว่างจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยจะสามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายเทคนิค รวมถึงมีการจำแนกรูปแบบพื้นฐานทั้ง 5 ประเภท ในการหา สหสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายสัดส่วนช่องว่าง ซึ่งจะมีเงื่อนไขการใช้รูปแบบพื้นฐานและ สหสัมพันธ์ที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับงานวิจัยนั้น ๆ โดยทั่วไปจะสัดส่วนช่องว่างหาได้จากการที่ ปริมาตรแก๊สส่วนด้วยปริมาตรแก๊สรวมกับปริมาตรของของเหลวดังสมการต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{V_G}{V_g + V_l} \quad (2.3)$$

เมื่อ α คือ สัดส่วนช่องว่าง
 V_g คือ ปริมาตรของแก๊ส (mm^3)
 V_l คือ ปริมาตรของของเหลว (mm^3)

โดยจะหาปริมาตรจากสมการต่อไปนี้

$$V = A \times L \quad (2.4)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตร (mm^3)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล (mm^2)
 L คือ ความยาว (mm)

ในกรณีของรูปแบบพื้นฐานทั้ง 5 รูปแบบจะมีเงื่อนไขในการใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนี้

2.5.2.1 Homogeneous model

ในกรณีที่จะใช้สหสัมพันธ์นี้ได้ก็ต่อเมื่อมีการรักษาสถานะของแก๊สและของของเหลวที่ผสม เป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่ความเร็วของทั้งสองสถานะมีค่าเท่ากัน

$$\alpha_h = \left[1 + \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \left(\frac{1-x}{x} \right) \right]^{-1} \quad (2.5)$$

เมื่อ α_h คือ สัดส่วนช่องว่างแบบ Homogeneous model
 ρ_g คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (g/m^3)
 ρ_l คือ ความหนาแน่นของของเหลว (g/m^3)
 x คือ คุณภาพไอ

2.5.2.2 Slip model

ในกรณีที่ใช้สหสัมพันธ์นี้ก็ต่อเมื่อมีความเร็วของทั้งสองสถานะแตกต่างกัน โดยจะมีเทอมของ S เพิ่มเข้ามาคืออัตราส่วนของความเร็วแก๊สส่วนด้วยอัตราส่วนของความเร็วของของเหลว

$$\alpha = \left[1 + S \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \left(\frac{1-x}{x} \right) \right]^{-1} \quad (2.6)$$

เมื่อ α คือ สัดส่วนช่องว่าง

S คือ อัตราส่วนของความเร็ว

ρ_g คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (g/m^3)

ρ_l คือ ความหนาแน่นของของเหลว (g/m^3)

x คือ คุณภาพไอ

และจะมีอีกสหสัมพันธ์หนึ่งที่มีการเป็นเทอมของ S เป็นความหนืดของแก๊สส่วนด้วยความหนืดของของเหลวแล้วเพิ่มเทอมค่าคงที่ A, B, C และ D เข้ามา โดยสหสัมพันธ์นี้จะขึ้นอยู่กับผู้วิจัยในการเลือกใช้ในกรณีนั้น ๆ

$$\alpha = \left[1 + A \left(\frac{\eta_g}{\eta_l} \right)^B \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^C \left(\frac{1-x}{x} \right)^D \right]^{-1} \quad (2.7)$$

เมื่อ A, B, C, D คือ ค่าคงที่

η_g คือ ความหนืดของแก๊ส (N.s/m^2)

η_l คือ ความหนืดของของเหลว (N.s/m^2)

2.5.2.3 K_{α_h} model

ในรูปแบบนี้ได้มาจากพื้นฐานของสหสัมพันธ์ที่ (2.4) โดยเพิ่มเทอมของค่า K ที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของงานวิจัยและนักวิจัยที่เลือกใช้สหสัมพันธ์นี้

$$\alpha = K\alpha_h \quad (2.8)$$

เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์

2.5.2.4 Drift-flux model

ในรูปแบบนี้จะการพิจารณาสองปัจจัยคือความเร็วดีฟในความแตกต่างระหว่างความเร็วของสถานะแก๊สและอีกปัจจัยคือสถานะที่ผสมกันกับความไม่สม่ำเสมอจะพิจารณาจากพารามิเตอร์การกระจาย (C_0)

$$\alpha = \frac{u_g}{C_0 u_m + u_{gm}} \quad (2.9)$$

เมื่อ C_0 คือ พารามิเตอร์การกระจาย

u_g คือ ความเร็วการไหลของแก๊ส (m/s)

u_m คือ ความเร็วการไหลของของผสม (m/s)

u_{gm} คือ ความแตกต่างระหว่างความเร็วของสถานะแก๊สกับของผสม (m/s)

2.5.2.5 Miscellaneous correlations

ในรูปแบบนี้จะเป็นสิ่งที่ไม่รวมอยู่ใน 4 หมวดหมู่ข้างต้น สหสัมพันธ์ประเภทนี้ส่วนใหญ่ใช้ Lockhart-Martinelli parameter X ซึ่งเป็น Square root ratio ของการไล่ระดับแรงดันของของเหลวต่อการไล่ระดับแรงดันแก๊ส โดยจะใช้ในกรณีที่สถานะของเหลวและแก๊สเกิดการปั่นป่วนในสถานการณ์การไหลแบบสองสถานะ จะแสดงดังต่อไปนี้

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{-0.9} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.1} \quad (2.10)$$

2.5.3 คุณภาพเชิงปริมาตร (Volumetric quality)

เป็นข้อมูลที่แสดงถึงปริมาณ เมื่อวัดค่าการทดลองออกมาสามารถที่จะนำไปคำนวณหรือเปรียบเทียบได้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่อธิบายลักษณะหรือสมบัติในเชิงคุณภาพ โดยจะสามารถวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของงานวิจัยการไหลแบบสองสถานะได้จากอัตราการไหลของแก๊ส (\dot{V}_g) ส่วนด้วยอัตราการไหลรวมของแก๊สและของเหลว (\dot{V}_l)

$$\beta = \frac{\dot{V}_g}{\dot{V}_g + \dot{V}_l} \quad (2.11)$$

เพื่อนำไปเทียบกับค่าสัดส่วนช่องว่างในกรณีที่ค่าสัดส่วนช่องว่างมีค่าเท่ากับคุณภาพเชิงปริมาตร ($\alpha = \beta$) จะวิเคราะห์ได้ว่าเป็นการไหลแบบเนื้อเดียวกัน

2.5.4 คุณภาพไอ (Vapor quality)

ค่าคุณภาพไอบอกถึงความเป็นไอในช่องว่างของการไหลแบบสองสถานะ

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_l} \quad (2.12)$$

2.5.5 Froude number

อัตราส่วนของแรงเนื่องจากความเฉื่อยกับแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นการหาในช่องว่างที่มีการไหลของของไหลสองสถานะ จะหาได้จากสมการที่ (2.12)

$$Fr_{TP} = \frac{G}{\sqrt{\rho_m(\rho_l - \rho_g)gD_h}} \quad (2.13)$$

2.5.6 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของการไหลสองสถานะ (The mean density of the two-phase flow)

จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.13)

$$\rho_m = \left[\frac{x}{\rho_g} + \frac{(1-x)}{\rho_l} \right]^{-1} \quad (2.14)$$

2.5.7 Mean Absolute Error (MAE)

เป็นสมการที่คำนวณค่าความเบี่ยงเบน ในส่วนของการคำนวณความเบี่ยงเบนสัดส่วนช่องว่าง นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.15)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{\alpha_{i,pred} - \alpha_{i,exp}}{\alpha_{i,exp}} \right| 100\% \quad (2.15)$$

เมื่อ $\alpha_{i,pred}$

คือ ค่าสัดส่วนช่องว่างที่ได้จากการทำนาย

$\alpha_{i,exp}$

คือ ค่าสัดส่วนช่องว่างที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gardenghi et al. [3] ได้ศึกษาสัดส่วนช่องว่างเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดสำหรับการสร้างแบบจำลองและกำหนดลักษณะของการไหลสองสถานะต้นฉบับนี้ นำเสนอภาพรวมของเทคนิคการวัดสัดส่วนช่องว่างฐานข้อมูลการทดลองและความสัมพันธ์ ทบทวนเทคนิคการวัดสัดส่วนช่องว่างและเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับไมโครสเกลการวัดถูกระบุตามลักษณะสำคัญ การทดลองสัดส่วนช่องว่างที่ได้รับการปรับปรุงได้ฐานข้อมูลสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่างขนาดเล็ก รวมทั้ง micro และ micro channel two-phase จุดข้อมูลการไหล ข้อมูลเหล่านี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องตั้งแต่ 0.5 ถึง 13.84 mm ทิศทางแนวนอนและแนวตั้ง และของเหลวเช่นอากาศ-น้ำ R410a, R404a, R134a, R290, R12 และ R22 สำหรับทั้ง diabatic และ adiabatic ความสัมพันธ์ของสัดส่วนช่องว่างที่ตีพิมพ์ใหม่รวมถึงรายการที่อ้างถึงได้รับการประเมินและเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลสัดส่วนช่องว่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กนี้ เพื่อหาจำนวนข้อผิดพลาดในการทำนายของงานวิจัย นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาสหสัมพันธ์ตรีพท์ฟลักซ์ใหม่สำหรับไมโครแชนแนล แสดงว่ายังคงสามารถปรับปรุงความสัมพันธ์ที่มีอยู่ต่อไปได้ ความสัมพันธ์ใหม่สามารถทำนายฐานข้อมูลไมโครแชนแนลด้วยค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย 9.8% สำหรับการปรับปรุงสัมพันธ์ 6% เมื่อเทียบกับความสัมพันธ์อันดับสองที่ดีที่สุดสำหรับช่องสัญญาณที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก

Saisorn and Wongwises [4] ศึกษาลักษณะการไหลของอากาศ-น้ำแบบอะเดียแบติกสองสถานะ ซึ่งรวมถึงรูปแบบการไหลของสองสถานะ เช่นเดียวกับสัดส่วนช่องว่างและแรงดันตกกระทบแบบสองสถานะ ในช่องไมโครแบบวงกลมจะได้รับการศึกษาทดลองใช้ช่องซิลิกาหลอมละลายยาว 320 mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 mm ส่วนทดสอบ การทดสอบดำเนินการที่ความเร็วผิวเฉือนของก๊าซและของเหลวในช่วงระหว่าง 0.37-16 และ 0.005-3.04 m/s ตามลำดับ แผนที่รูปแบบการไหลได้รับการพัฒนาจากรูปแบบการไหลที่สังเกตได้ เช่น การไหลของกระสุน การไหลแบบวงแหวนคอค การไหลแบบปั่นป่วนและการไหลแบบวงแหวน การทดลองแบบสถานะเดียวในปัจจุบันยังแสดงให้เห็นว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในข้อมูลจากการใช้อากาศหรือก๊าซไนโตรเจนและน้ำหรือน้ำที่ปราศจากไอออน ข้อมูลสัดส่วนช่องว่างที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพมีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกับแบบจำลองการไหลที่เป็นเนื้อเดียวกันแรงดันตกคร่อมสองสถานะยังใช้ในการคำนวณคุณสมบัติเสียดทาน ข้อมูลตัวคูณแสดงการพึ่งพารูปแบบการไหลเช่นเดียวกับฟลักซ์มวล มีการนำเสนอสหสัมพันธ์ใหม่ของตัวคูณแรงเสียดทานแบบสองสถานะสำหรับใช้งานจริง

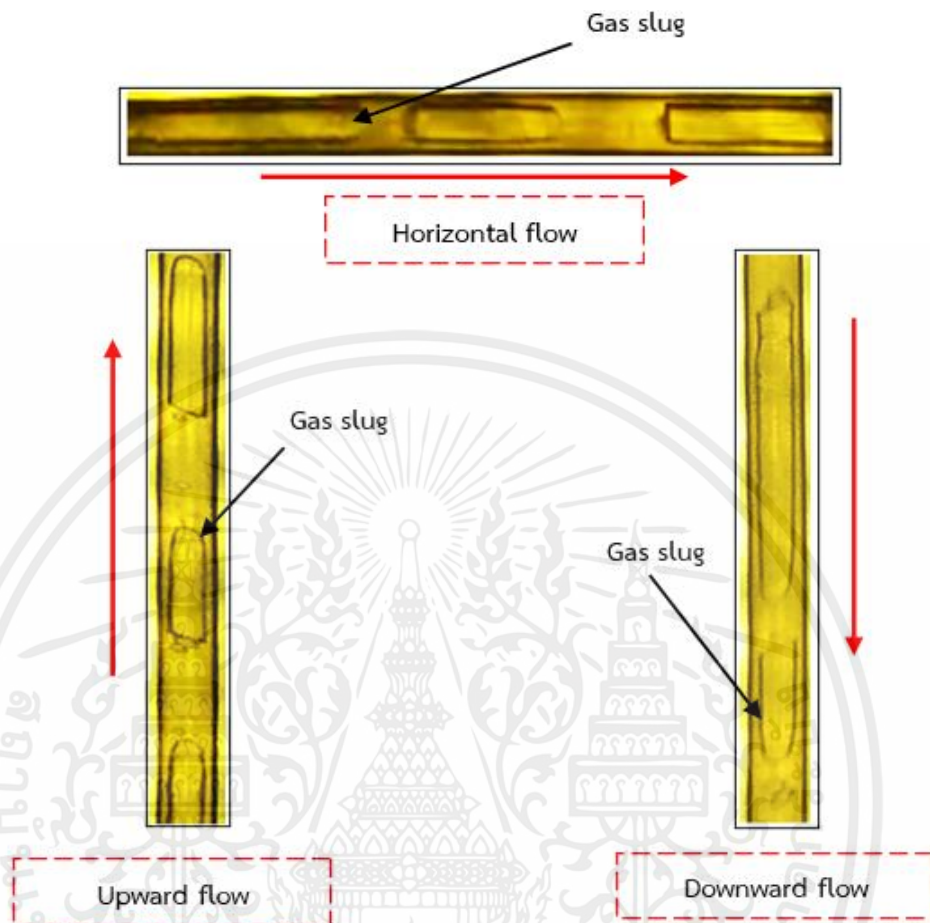
Saisorn et al. [5] ได้ศึกษาข้อมูลรูปแบบการไหล การถ่ายเทความร้อน และความดันลดลงสำหรับทิศทางการไหลที่แตกต่างกันถูกนำเสนอในสิ่งนี้ ข้อมูลได้มาจากการทดลองการไหลแบบเดือดด้วย R-134a ที่ไหลผ่านช่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ซึ่งจัดแนวในทิศทางต่างๆ เช่น การไหลในแนวนอน การไหลขึ้นในแนวตั้งและการไหลลงในแนวตั้ง สภาพการไหลของความร้อนที่พื้นผิววงที่ถูกดำเนินการภายใต้ความอึดตัวแรงดัน 8 bar ช่วงฟลักซ์ความร้อน 1-60 kW/m² และช่วงฟลักซ์มวล 250-820 kg/m²s ผลการทดลองแสดงให้เห็นความสำคัญของการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างกระสุนแก๊สระหว่างการไหลในแนวนอนดูไม่เหมือนกับในแนวตั้ง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและแรงดันตกเพิ่มขึ้นเมื่อสารทำความเย็นไหลในแนวตั้งลง ข้อมูลการทดลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการทำนายที่มีอยู่

Xu and Fang [6] ได้คำนวณสัดส่วนช่องว่างสำหรับการไหลของสารทำความเย็นแบบสองสถานะในท่อเป็นสิ่งจำเป็นในหลาย ๆ แบบแม้ว่าจะมีการเสนอสหสัมพันธ์สัดส่วนช่องว่างจำนวนมาก และมีการประเมินที่เกี่ยวข้องมากมายดำเนินการในช่วงหกทศวรรษที่ผ่านมา เกือบทั้งหมดอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่ได้รับจากการทดลองการไหลแบบสองสถานะของน้ำในอากาศหรือไอน้ำ ซึ่งนำไปใช้กับการไหลของสารทำความเย็นแบบสองสถานะจะต้องมีการประเมิน มีการดำเนินการสำรวจความสัมพันธ์และการตรวจสอบเชิงทดลองที่ทันสมัย มีการทบทวนความสัมพันธ์ 41 รายการ และจุดข้อมูลทดลอง 1574 จุด จาก 5 จุดสารทำความเย็นถูกรวบรวมโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกตั้งแต่ 0.5 ถึง 10 mm และฟลักซ์มวลตั้งแต่จาก 40 ถึง 1,000 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ จากข้อมูลที่รวบรวม การประเมินที่ครอบคลุมของการทบทวนมีการสร้างความสัมพันธ์และความสัมพันธ์ใหม่ซึ่งสามารถให้การคาดการณ์ที่ค่อนข้างดีสำหรับทั้งมหภาคและการเสนอช่องขนาดเล็ก

2.7 รูปแบบการไหลสองสถานะที่พบในท่อขนาดไมโครของสารทำความเย็น R-134a

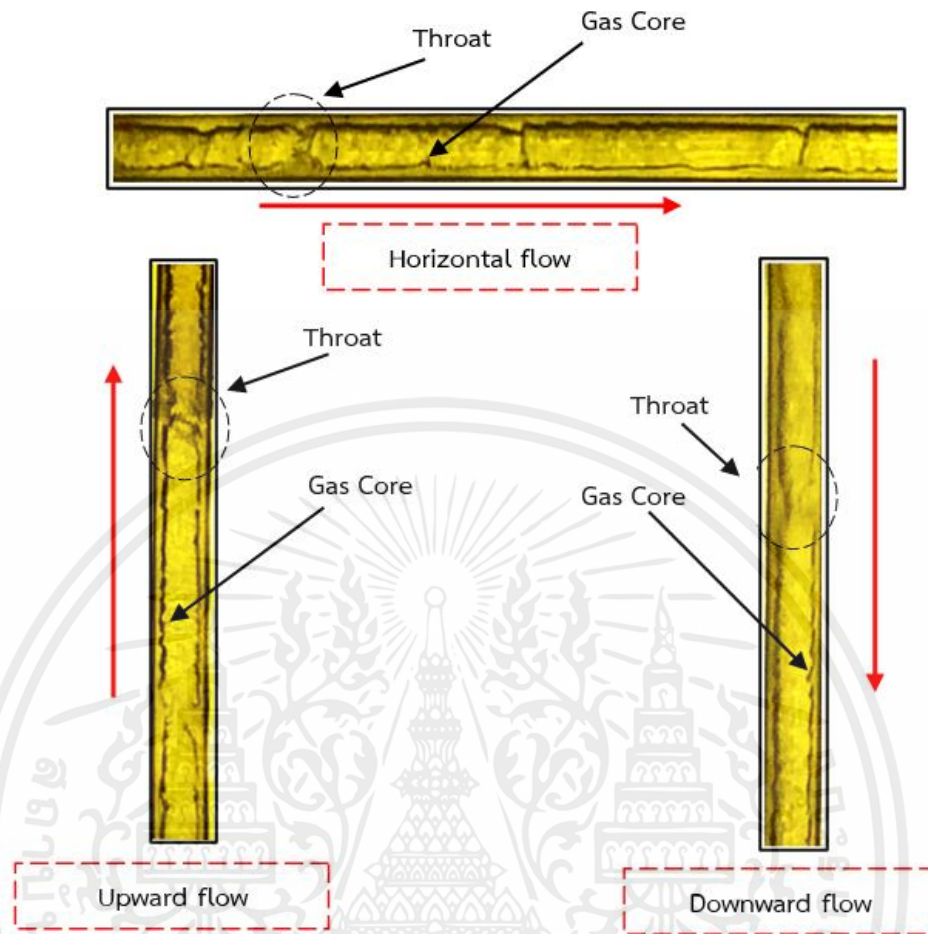
2.7.1 Slug flow



รูปที่ 2.1 Slug flow Saisorn et al. [5]

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นเกิดจากฟองอากาศยึดตัวออก ทำให้ฟองอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลางยาวกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่าง โดยฟองอากาศจะไหลอยู่ตรงกลางของช่องว่างซึ่งจะแยกออกจากผนังช่องว่างโดยผิวฟิล์มของเหลว

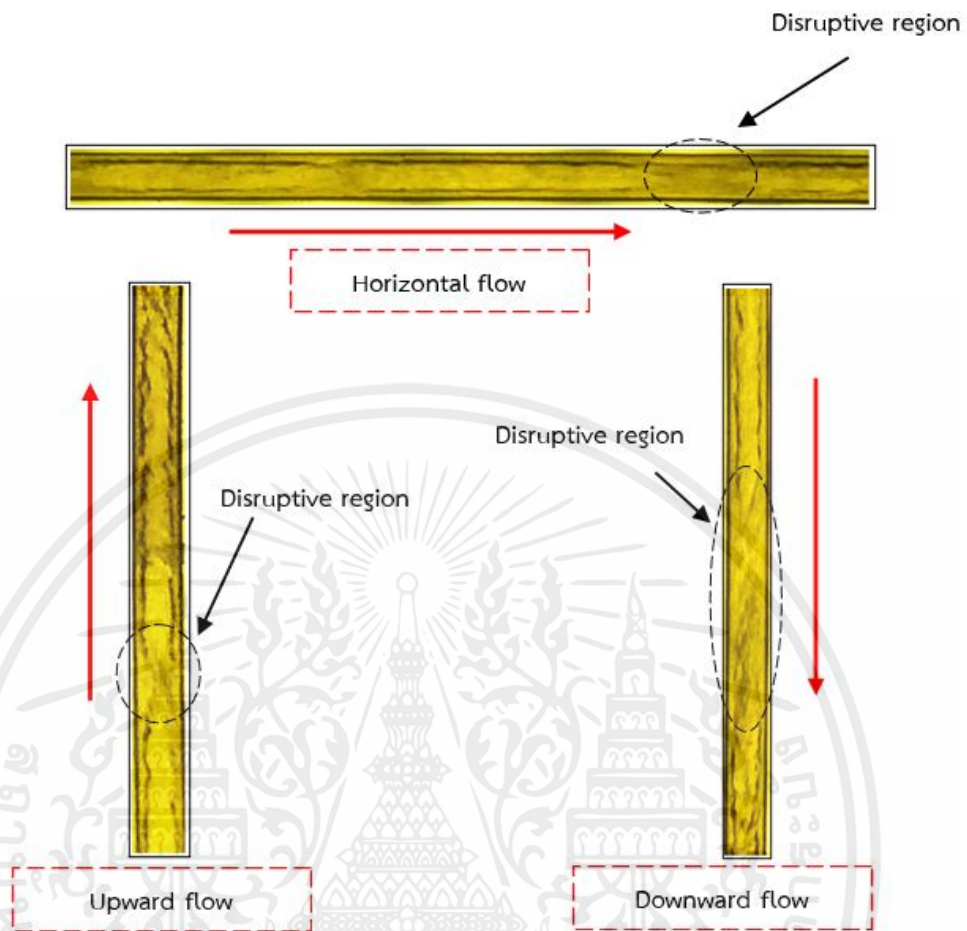
2.7.2 Throat-annular flow



รูปที่ 2.2 Throat-annular flow Saisorn et al. [5]

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นเกิดจาก Gas slugs ไหลแบบต่อเนื่องกัน รูปแบบการไหลจะมีลักษณะเป็นคองแหวน ซึ่งฟองอากาศจะไหลต่อเนื่องยาวซึ่งจะมีคอคอดเป็นช่วง ๆ ตามฟองอากาศยาวที่เกิดขึ้น

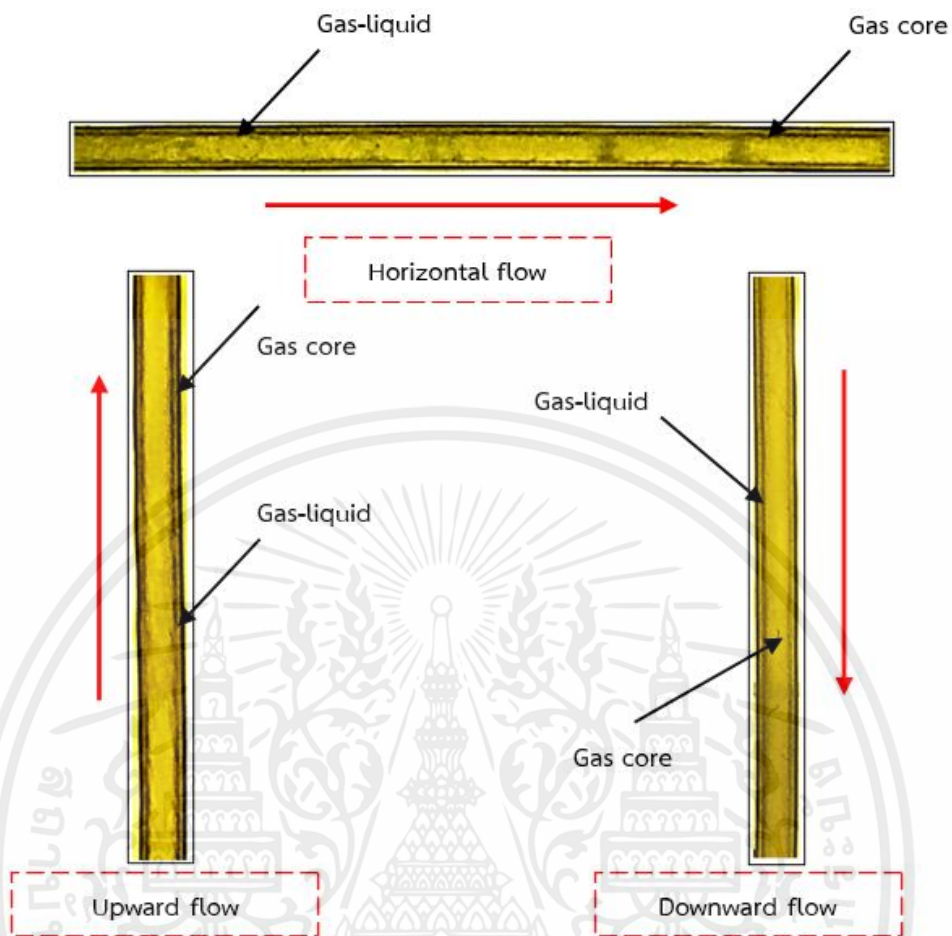
2.7.3. Churn flow



รูปที่ 2.3 Churn flow Saisorn et al. [5]

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าเกิดจากความเร็วของของไหลที่มีค่าสูง ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งจะเกิดการปั่นป่วนบริเวณปลายของฟองอากาศยาว

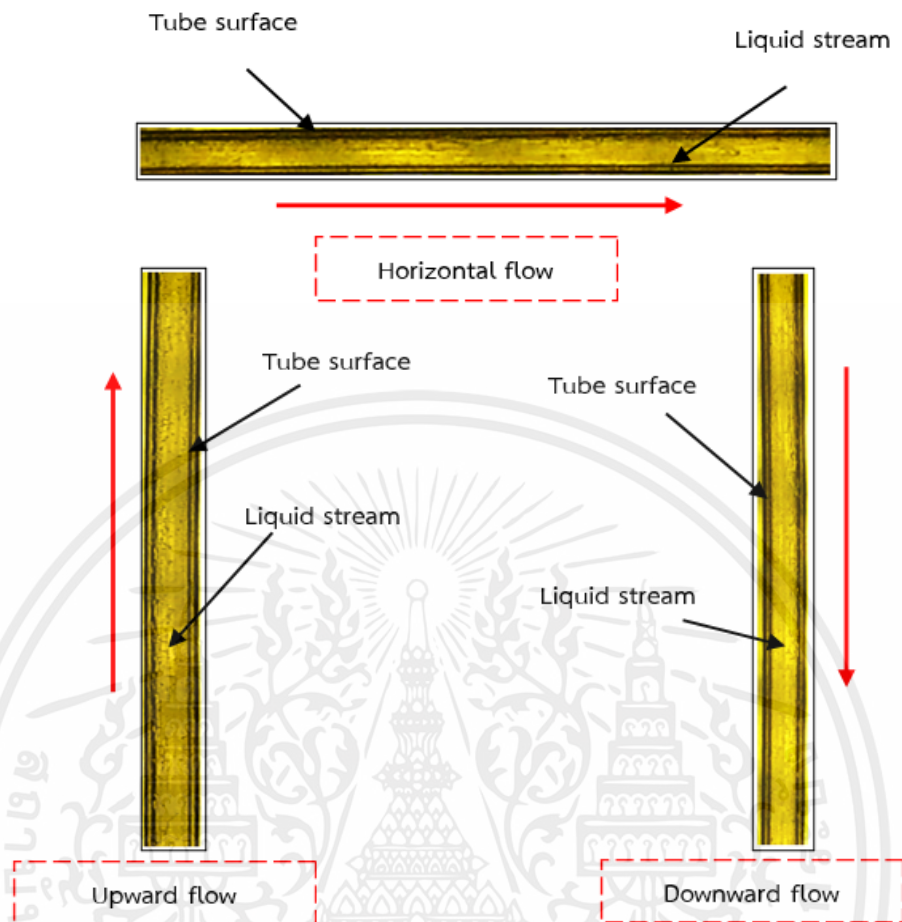
2.7.4. Annular flow



รูปที่ 2.4 Annular flow Saisorn et al. [5]

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการไหลนี้มีความเร็วค่อนข้างสูง และจะมีการไหลของฟิล์มของเหลวที่ผนังท่ออย่างต่อเนื่อง

2.7.5. Annular-rivulet flow



รูปที่ 2.5 Annular-rivulet flow Saisorn et al. [5]

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการไหลนี้คล้ายรูปแบบการไหลแบบวงแหวนแต่เป็นสายเล็ก ๆ จะเกิดขึ้นที่มีความเร็วของอากาศค่อนข้างสูง การไหลนี้จะมีการไหลของฟิล์มเหลวและไอบนผนังอย่างต่อเนื่องในแนวแกนการไหล

บทที่ 3

ซอฟต์แวร์และวิธีการวิเคราะห์ผล

3.1 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลและหน้าที่ของซอฟต์แวร์

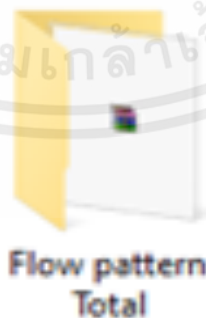
โดยการใช้ซอฟต์แวร์ Solidworks 2021 ในการทำหน้าที่วิเคราะห์หาปริมาตรแก๊ส ด้วยวิธีการสร้างปริมาตรแก๊สด้วยคำสั่ง Revolved Boss/Base และวิเคราะห์หาปริมาตรแก๊สด้วยคำสั่ง Mass Properties



รูปที่ 3.1 โปรแกรม Solidworks 2021

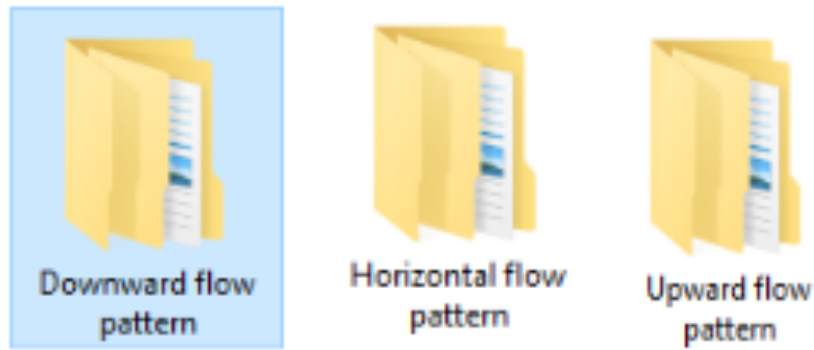
3.2 ขั้นตอนแยกข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

แบ่งโฟลเดอร์ข้อมูลดิบในส่วนของ Flow pattern total



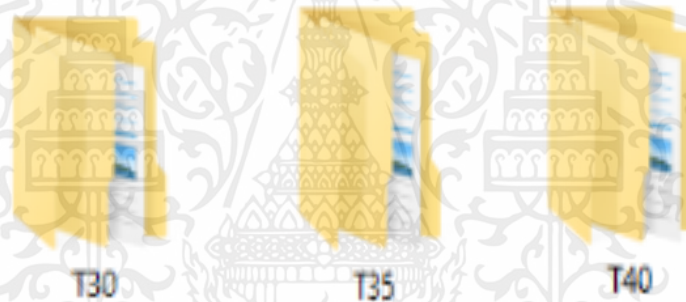
รูปที่ 3.2 แบ่งโฟลเดอร์ข้อมูลดิบในส่วนของ Flow pattern total

หลังจากที่ทำการดาวน์โหลดชุดข้อมูลดิบให้ทำการจัดแยกโฟลเดอร์เพื่อง่ายต่อการนำชุดข้อมูลไปวิเคราะห์ โดยในโฟลเดอร์นี้จะเป็นการรวมชุดข้อมูลรูปแบบการไหลทั้งหมดไว้ ดังรูปที่ 3.2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

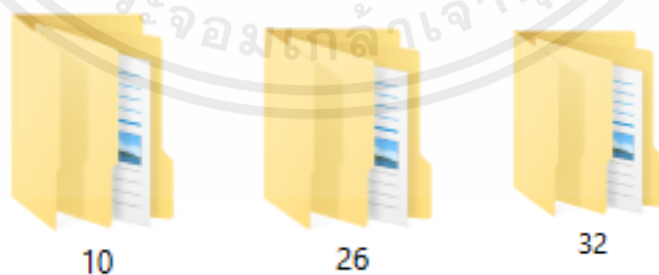


รูปที่ 3.3 แบ่งโฟลเดอร์แยกเป็นทิศทางการไหล

โดยภายในของโฟลเดอร์ Flow pattern total จะทำการแบ่งแต่ละโฟลเดอร์แยกเป็นทิศการไหลทั้ง 3 ทิศทาง โดยจะแบ่งตามทิศทางการจัดวางท่อโดยจะมีรูปแบบการไหลในแนวนอน รูปแบบการไหลขึ้นในแนวตั้ง และ รูปแบบการไหลลงในแนวตั้ง ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.3



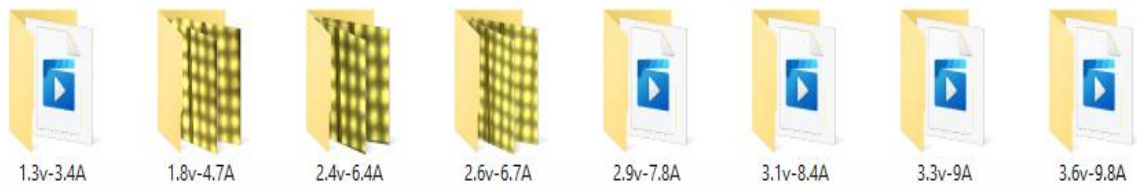
รูปที่ 3.4 แบ่งโฟลเดอร์แยกเป็นอุณหภูมิ



รูปที่ 3.5 แบ่งโฟลเดอร์แยกเป็นอัตราการไหล

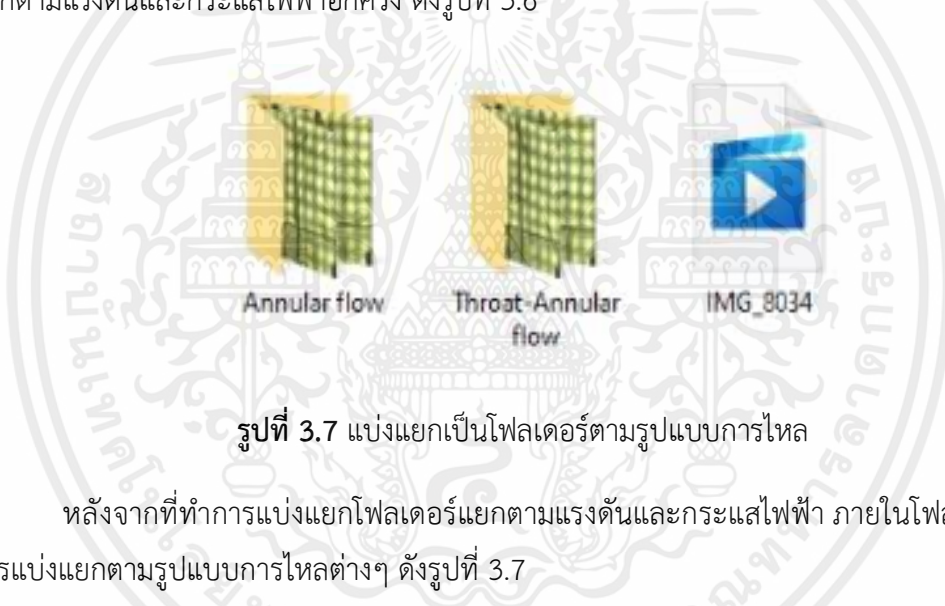
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยภายในโพลเดอร์ที่ทำการแบกแยกเป็นทิศทางการไหล จะทำการแบกแยกโพลเดอร์แยกเป็น
อุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.4 และภายในโพลเดอร์ที่ทำการแบกแยกอุณหภูมิจะทำการแบกแยกโพลเดอร์ แยก
เป็นแต่ละอัตราการไหลอีกครั้ง ดังรูปที่ 3.5



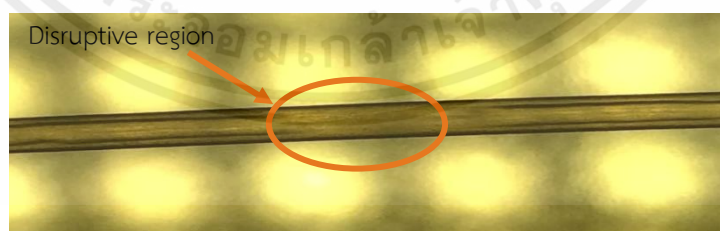
รูปที่ 3.6 แบ่งโพลเดอร์แยกตามแรงดันและกระแสไฟฟ้า

หลังจากที่ทำการแบกแยกโพลเดอร์อัตราการไหล ภายในโพลเดอร์นี้จะทำการแบ่งโพลเดอร์
แยกตามแรงดันและกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.7 แบ่งแยกเป็นโพลเดอร์ตามรูปแบบการไหล

หลังจากที่ทำการแบกแยกโพลเดอร์แยกตามแรงดันและกระแสไฟฟ้า ภายในโพลเดอร์จะทำ
การแบกแยกตามรูปแบบการไหลต่างๆ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 รูปแบบการไหลแบบ Churn flow

จากรูปที่ 3.8 ในกรณีที่เป็นการไหลแบบ Churn flow ซึ่งในกรณีนี้จะไม่นำข้อมูลมา
วิเคราะห์หาสัดส่วนช่องว่างเนื่องจากสถานะทั้งสองสถานะมีความเร็วในการไหลที่ไม่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

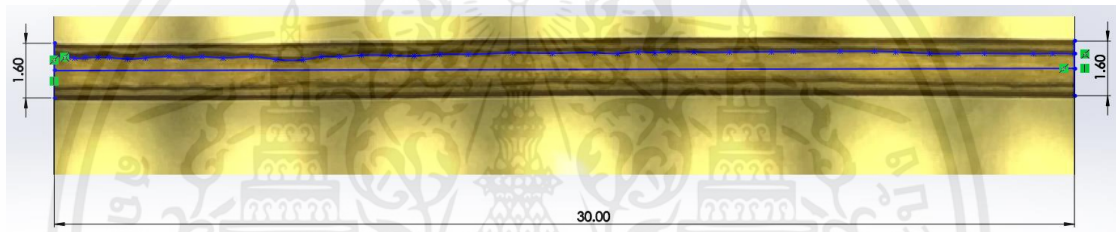
3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลรูปภาพ

3.3.1 วิธีการวิเคราะห์หาปริมาตรแก๊ส



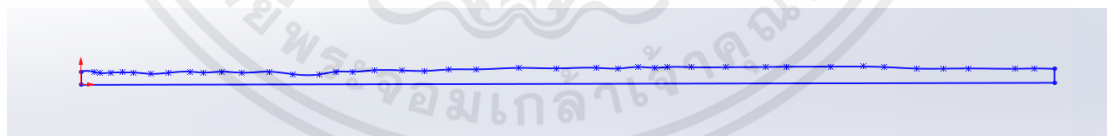
รูปที่ 3.9 นำรูปภาพเข้าโปรแกรม Solidworks 2021

จากรูปที่ 3.9 เป็นการนำรูปภาพเข้าโปรแกรม Solidworks 2021 โดยกำหนดขนาดท่ออยู่ที่ 1.6 mm และกำหนดความยาวท่ออยู่ที่ 30 mm



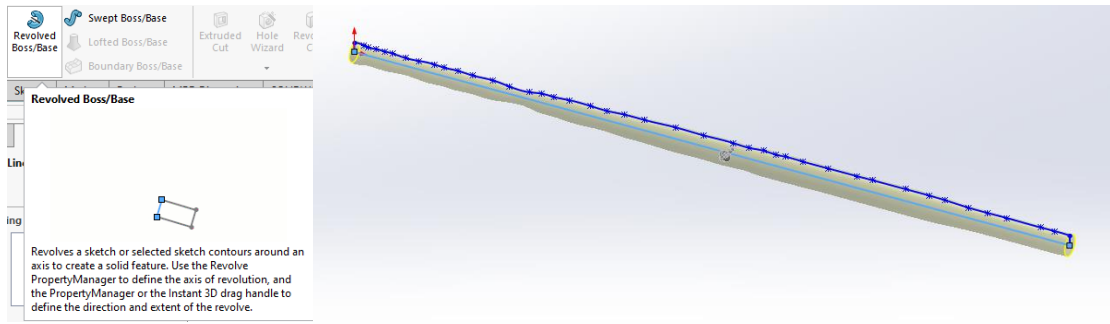
รูปที่ 3.10 สร้างกรอบรอบฟองแก๊สส่วนบน

จากรูปที่ 3.10 เป็นการใช้คำสั่ง Spline ในการในการสร้างกรอบรอบฟองแก๊สที่ต้องการวิเคราะห์ โดยจะแบ่งการวิเคราะห์เป็นสองส่วน คือ ปริมาตรแก๊สส่วนบน และ ปริมาตรแก๊สส่วนล่าง

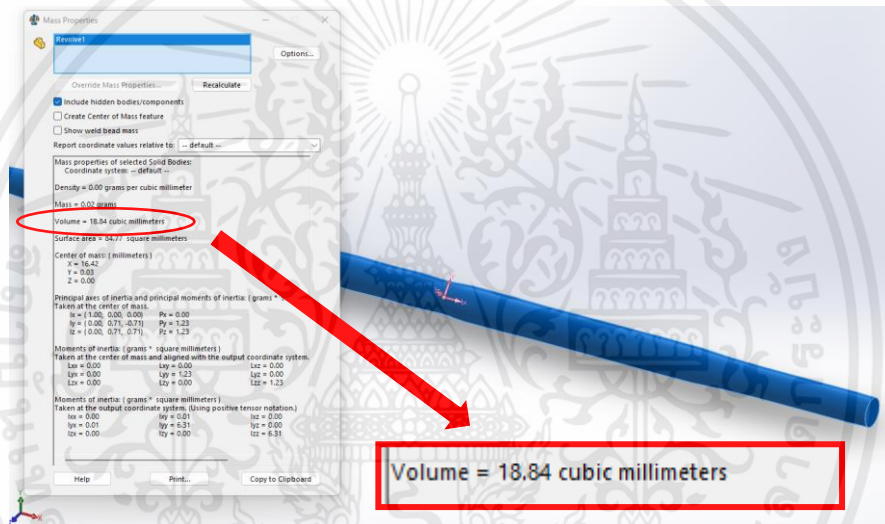


รูปที่ 3.11 ลบรูปภาพและเส้นที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ออก

จากรูปที่ 3.11 เป็นการลบรูปภาพและเส้นที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ออก ให้เหลือแต่ส่วนที่ต้องการวิเคราะห์

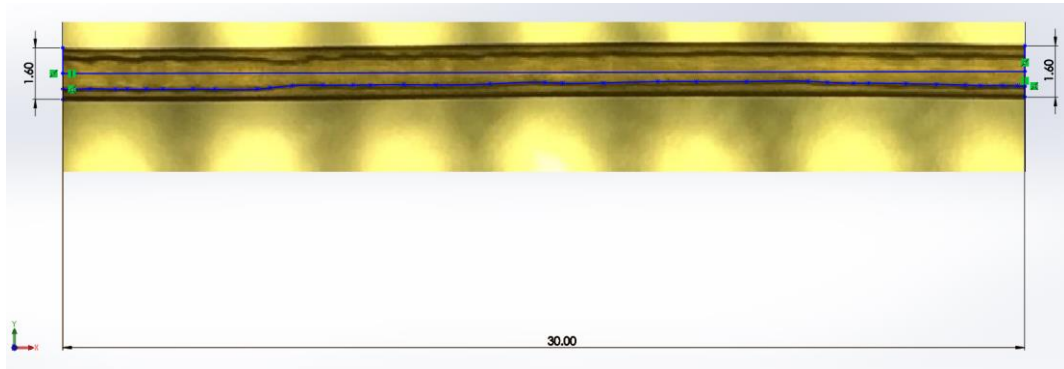


รูปที่ 3.12 ใช้คำสั่ง Revolved Boss/Base ในการสร้างปริมาตรแก๊ส
 จากรูปที่ 3.12 เป็นการใช้คำสั่ง Revolved Boss/Base ในการสร้างปริมาตรแก๊สส่วนบน



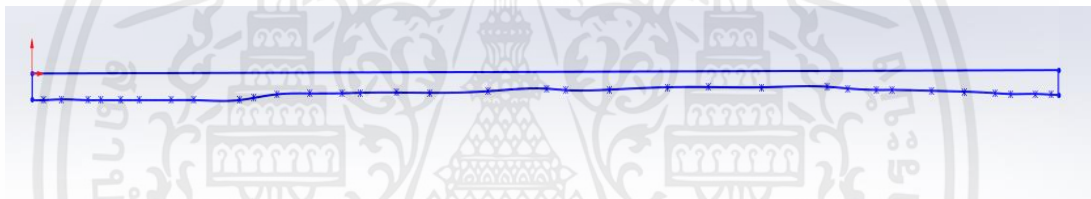
รูปที่ 3.13 วิเคราะห์หาปริมาตรแก๊ส
 จากรูปที่ 3.13 เป็นการใช้คำสั่ง Mass Properties ในการวิเคราะห์หาปริมาตรแก๊ส โดยในรูปที่ 3.13 จะได้ปริมาตรของแก๊สอยู่ที่ 18.84 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



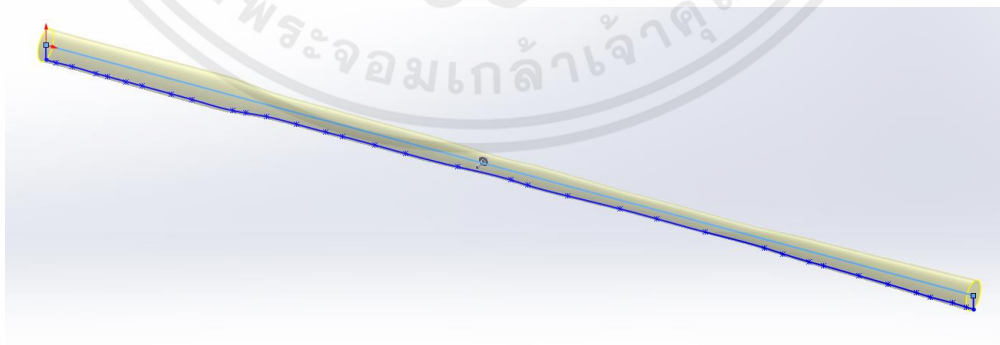
รูปที่ 3.14 สร้างกรอบรอบฟองแก๊สส่วนล่าง

จากรูปที่ 3.14 เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาตรแก๊สส่วนบนเสร็จให้ทำการวิเคราะห์หาปริมาตรแก๊สส่วนล่าง ใช้คำสั่ง Spline ในการสร้างกรอบรอบฟองแก๊สส่วนล่างที่ต้องการวิเคราะห์



รูปที่ 3.15 ลบรูปภาพและเส้นที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ห่ออก

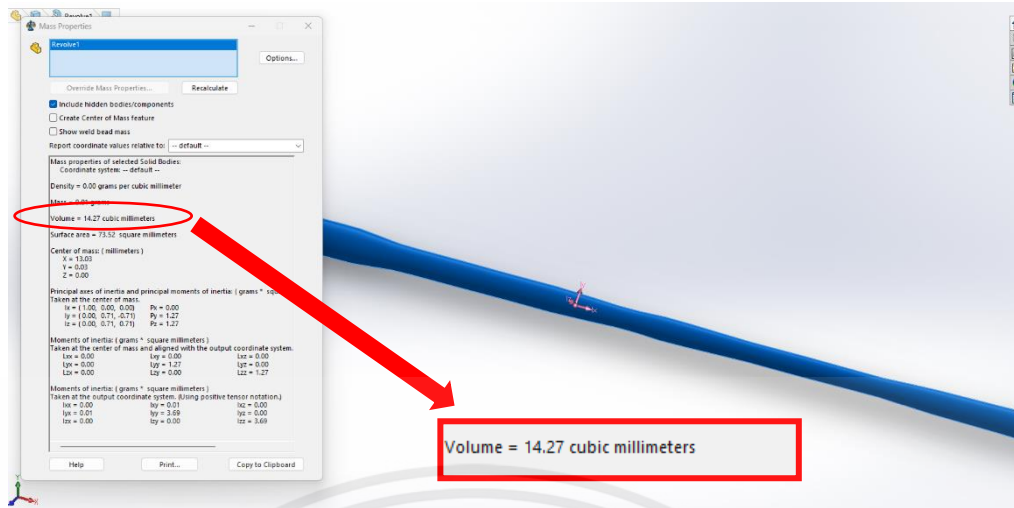
จากรูปที่ 3.15 จะทำการลบรูปภาพและเส้นที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ห่ออกให้เหลือแต่ส่วนที่ต้องการวิเคราะห์



รูปที่ 3.16 ใช้คำสั่ง Revolved Boss/Base ในการสร้างปริมาตรแก๊ส

จากรูปที่ 3.16 เป็นการ ใช้คำสั่ง Revolved Boss/Base ในการสร้างปริมาตรแก๊สส่วนล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 วิเคราะห์หาปริมาตรแก๊ส

ใช้คำสั่ง Mass Properties ในการวิเคราะห์หาปริมาตรแก๊สส่วนกลาง โดยในรูปที่ 3.17 จะได้ปริมาตรของแก๊สอยู่ที่ 14.27 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

3.4 วิธีหาค่าเฉลี่ยปริมาตรแก๊สที่ได้จากการวิเคราะห์

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์หาปริมาตรแก๊สทั้งสองส่วนด้วยโปรแกรม Solidworks 2021 จะทำการหาค่าเฉลี่ยของปริมาตรแก๊สโดยจะนำปริมาตรแก๊สที่ได้ มาหาค่าเฉลี่ยดังสมการที่ 3.1

$$V_{Gavg} = \frac{\text{ปริมาตรแก๊สส่วนบน} + \text{ปริมาตรแก๊สส่วนล่าง}}{2} \quad (3.1)$$

3.5 วิธีหาสัดส่วนช่องว่าง (void fraction) ที่ได้จากการวิเคราะห์

ในวิธีการหาสัดส่วนช่องว่างที่ได้จากการวิเคราะห์ เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาตรแก๊สเฉลี่ยเสร็จ ก็ทำการหาสัดส่วนช่องว่าง โดยจะนำปริมาตรแก๊สเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Solidworks 2021 มาหาสัดส่วนช่องว่าง ดังสมการที่ 3.2

$$\alpha = \frac{V_G}{V_g + V_l} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิเคราะห์

4.1 ข้อมูลการทดลองสัดส่วนช่องว่างของการไหลแบบ 2 สถานะ

ข้อมูลการทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างของการไหลแบบสองสถานะนี้เป็นข้อมูลการไหลในท่อตรงที่มีการไหลของสารทำความเย็น R-134a ในขณะที่เกิดการเดือด มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายใน 1 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อนอก 1.6 มิลลิเมตร และมีความยาวท่อในการวิเคราะห์อยู่ที่ 500 มิลลิเมตร ซึ่งจะแบ่งความดันที่ 8 , 9 , 10 บาร์ และทุก ๆ ความดันจะแบ่งอัตราการไหลที่ 10 , 26 , 32 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที โดยมีจุดข้อมูลของสัดส่วนช่องว่างทั้งหมดอยู่ที่ 157 จุด ซึ่งมีข้อมูลสัดส่วนช่องว่างในการไหลแต่ละแนวการจัดวางท่อดังนี้

ตาราง 4.1 แสดงจุดข้อมูลสัดส่วนช่องว่างแต่ละการจัดวางท่อ

แนวการจัดวางท่อ	จุดข้อมูล
การไหลในแนวระนาบ	49
การไหลขึ้นในแนวตั้ง	53
การไหลลงในแนวตั้ง	55

4.1.1 รูปแบบการไหลสองสถานะที่พบในข้อมูลการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่าง

นอกจากนั้นจากข้อมูลรูปภาพผลการทดลองจะมีการปรับทิศทางการจัดวางตัวท่อในทิศทางต่าง ๆ ทั้ง 3 ทิศทาง เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ค่าสัดส่วนช่องว่างของท่อขนาดไมโครที่มีขนาด 1 มิลลิเมตร ขณะที่เกิดการเดือด พบว่าเกิดรูปแบบการไหลทั้ง 5 รูปแบบการไหลซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. Slug flow : เกิดจากการรวมตัวของฟองแก๊สทำให้มีฟองขนาดใหญ่เท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและมีรูปร่างคล้ายลูกกระสุน

2. Annular flow : เกิดจากการที่การไหลแบบกระสุนรวมตัวกัน ทำให้ฟองแก๊สยาวต่อกันอย่างต่อเนื่องล้อมรอบด้วยฟิล์มของเหลวอย่างต่อเนื่องที่ไหลผ่านผนังท่อ

3. Throat-annular flow : เกิดจากการไหลแบบลูกกระสุนฟองแก๊สทั้งสองที่ต่อเนื่องกันขยายตัวตามแนวแกน มีแนวโน้มที่จะทะลุผ่านของเหลวเชื่อมกันและการรวมตัวกันของฟองแก๊สเป็นแกนก๊าซที่มีลักษณะคล้ายคอคอด

4. Annular rivulet flow : จากการสังเกตเป็นการไหลแบบวงแหวนสลับกับการไหลแบบเป็นเส้นของของเหลว ลักษณะนี้มีลักษณะของการไหลของกระแสของเหลวที่มีลักษณะเป็นลำธารบนพื้นผิวของท่อ

5. Churn flow : เกิดจากความปั่นป่วนเนื่องจากรูปแบบการไหลที่มีความเร็วของแก๊สสูงมาก ทำให้ฟองแก๊สแคบลงไม่เป็นรูปทรง เนื่องจากเกิดการแตกตัวจากความเร็วของน้ำและอากาศค่อนข้างสูง

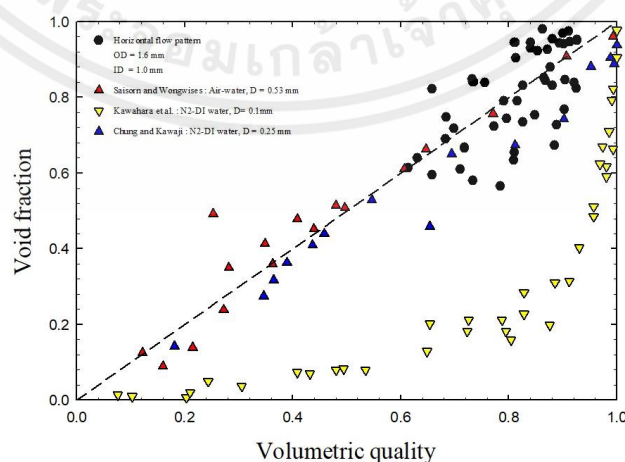
ทั้ง 5 รูปแบบการไหลนี้เราจะวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างเพื่อนำไปทำนายหาสัมพันธ์เพียง 4 รูปแบบเท่านั้น คือ Slug flow, Annular flow, Throat-annular flow และ Annular rivulet flow เนื่องจากการไหลแบบ Churn flow นั้นรูปแบบการไหลปั่นป่วนจนฟองแก๊สไม่เป็นรูปทรงจึงไม่นำมาวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่าง

4.1.2 ผลจากการวิเคราะห์รูปภาพเพื่อหาค่าสัดส่วนช่องว่าง

จากการวิเคราะห์หาค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อขนาดไมโครที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 1 มิลลิเมตร ของสารทำความเย็น R-134a ทั้ง 3 แนวทิศทางการไหล คือ ไหลในแนวระดับ ไหลลงในแนวตั้งและไหลขึ้นในแนวตั้ง พบว่า รูปแบบการไหลส่วนใหญ่จะเป็น Annular flow และ Throat-annular flow ส่วน Slug flow จะพบในช่วงเริ่มต้นของการป้อนกระแสและแรงดันของข้อมูลการทดลองในแต่ละอัตราการไหล ส่วน Annular rivulet flow นั้นจะพบในช่วงความดันที่ 10 บาร์เป็นส่วนใหญ่

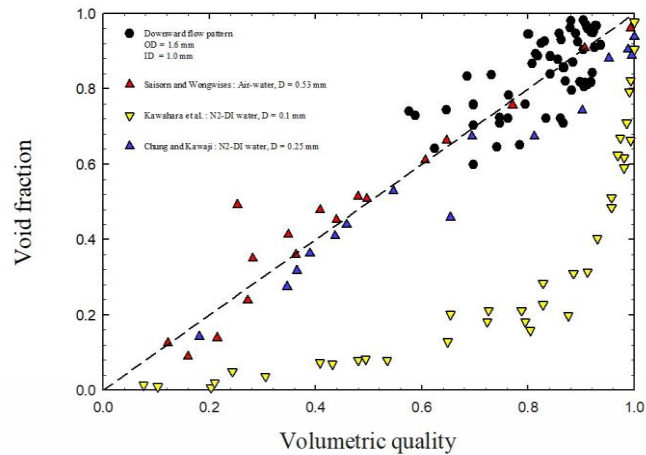
4.2 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างกับคุณภาพเชิงปริมาตร

จากการวิเคราะห์ข้อมูลสัดส่วนช่องว่างของสารทำความเย็นในท่อขนาดไมโครออกมาได้ทั้งหมด 157 จุดข้อมูล จะนำมาวิเคราะห์เทียบกับข้อมูลคุณภาพเชิงปริมาตรของนักวิจัย Saisorn and Wongwises. [4], Kawahara et al. [8] และ Chung and Kawaji. [9] เพื่อดูแนวโน้มของการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่าง

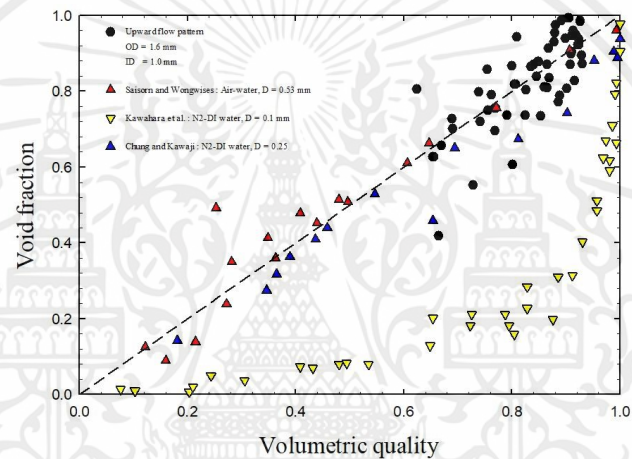


รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างการไหลในแนวนอนเทียบกับคุณภาพเชิงปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างการไหลลงในแนวตั้งเทียบกับคุณภาพเชิงปริมาตร



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างการไหลขึ้นในแนวตั้งเทียบกับคุณภาพเชิงปริมาตร

จากรูปที่ 4.1 - 4.3 จะเห็นได้ว่าข้อมูลการสัดส่วนช่องว่างของวิจัยนี้จะอยู่ในเส้นตรงซึ่งมีแนวโน้มว่าส่วนใหญ่จะเป็นการไหลแบบเนื้อเดียวกัน ($\alpha = \beta$) ดังนั้นจึงวิเคราะห์สหสัมพันธ์ที่เป็น Homogeneous flow model

4.3 ผลการทำนายสัดส่วนช่องว่างโดยสหสัมพันธ์

จากงานวิจัยที่ทำการศึกษาจะนำรูปแบบพื้นฐานและสหสัมพันธ์นักวิจัยทั้ง 7 สหสัมพันธ์เพื่อทำนายสัดส่วนช่องว่างของงานวิจัย โดยจะอ้างอิงในการจัดรูปแบบสหสัมพันธ์จากงานวิจัยของ Guodong Xia (2018) [14] :สหสัมพันธ์ที่น่าสนใจมีดังต่อไปนี้

สหสัมพันธ์พื้นฐาน

- Homogeneous flow model (จากสมการที่ 2.5)

$$\alpha_h = \left[1 + \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \left(\frac{1-x}{x} \right) \right]^{-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สหสัมพันธ์ของนักวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับ Homogeneous flow model

- Armand (1946) [10] :

$$\alpha = 0.833\alpha_H \quad (4.1)$$

- Chisholm (1983) [11] :

$$\alpha = \frac{\alpha_H}{\alpha_H + (1 - \alpha_H)^{0.5}} \quad (4.2)$$

- Cozup et al. [12] :

$$\alpha = -0.285 + 1.097\alpha_H \quad (4.3)$$

- Nishino and Yamazaki [13] :

$$\alpha = 1 - \left(\frac{1-x}{x} \frac{\rho_G}{\rho_L} \alpha_H \right)^{0.5} \quad (4.4)$$

- Guzhov et al [15] :

$$\alpha = 0.81\alpha_H [1 - \exp(-2.2\sqrt{Fr})] \quad (4.5)$$

- Massena (1960) [14] :

$$\alpha = \begin{cases} 0.833\alpha_h, & \text{for } \alpha_h < 0.9 \\ [0.833 + (1 - 0.833)x]\alpha_h, & \text{for } \alpha_h \geq 0.9 \end{cases} \quad (4.6)$$

และสหสัมพันธ์อื่น ๆ

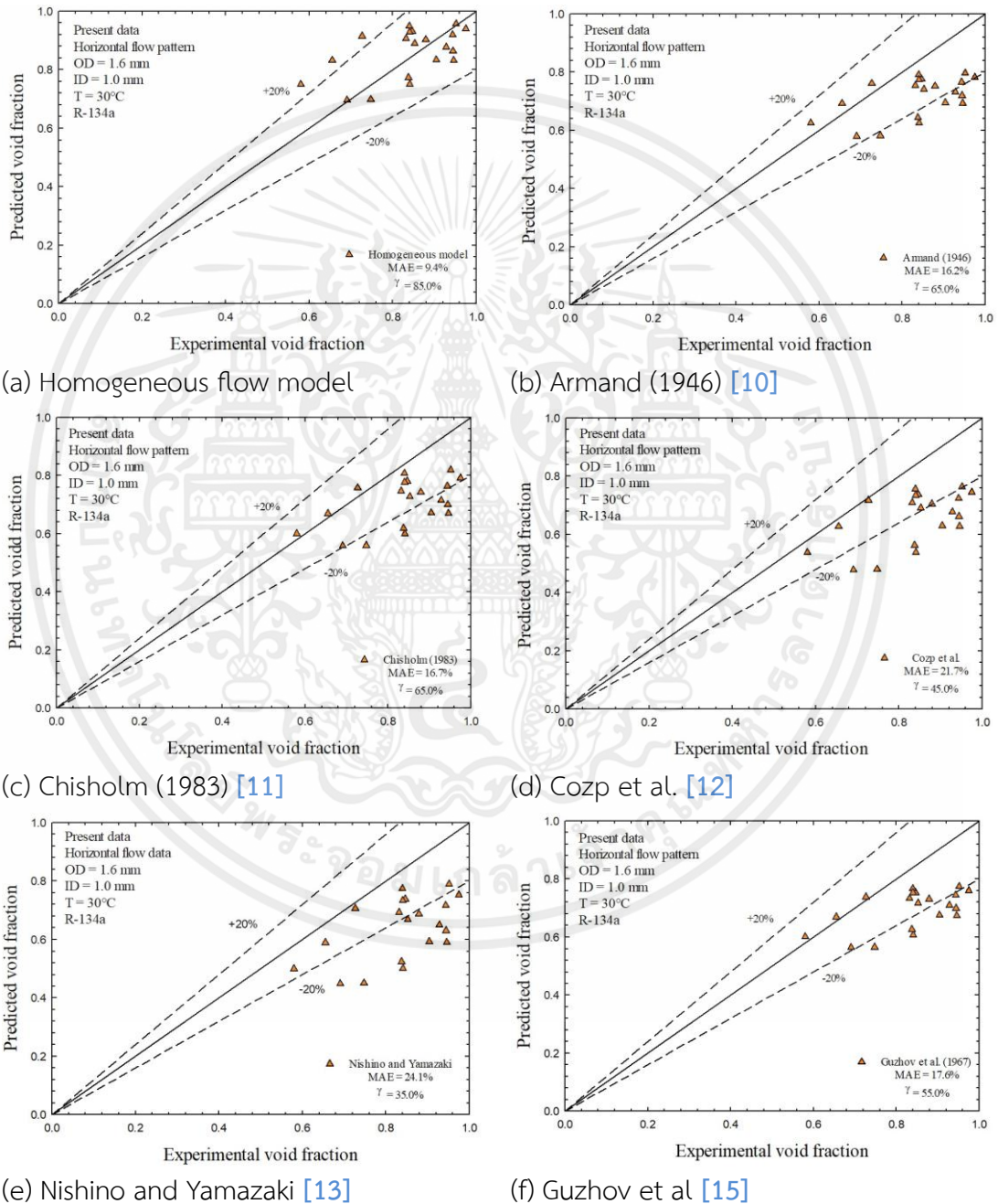
- Kawahara et al. (2002) [8] :

$$\alpha = \frac{0.03\beta^{0.5}}{1 - 0.97\beta^{0.5}} \quad (4.7)$$

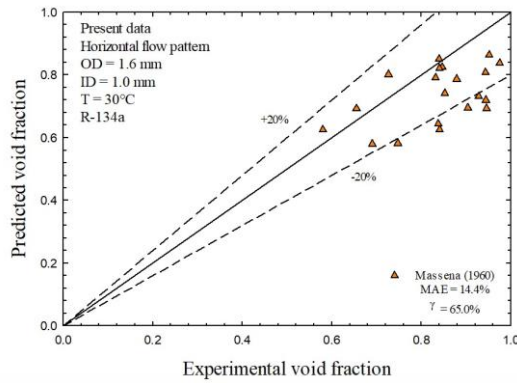
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 เทียบสหสัมพันธ์จากความต่างของอุณหภูมิ

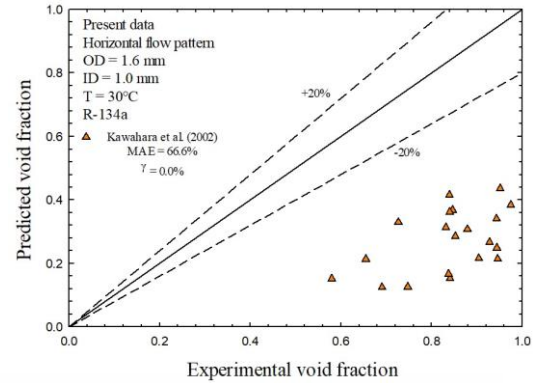
โดยในส่วนของผลการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างของการไหลภายในท่อขนาด 1 มิลลิเมตรกับ สหสัมพันธ์ข้างต้น ที่อุณหภูมิเนื่องมาจากในงานวิจัยมีการให้ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 30 ,35 ,40 องศาเซลเซียส ที่มีทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทาง คือไหลในแนวระนาบ ไหลลงในแนวตั้ง และไหลขึ้นในแนวตั้ง ซึ่งจะวิเคราะห์ที่ค่าความเบี่ยงเบน MAE \pm 20% เพื่อวิเคราะห์ว่าอุณหภูมิมิผลมากนักเพียงใดในการทำนายสัดส่วนช่องว่างในงานวิจัยนี้ จะแสดงดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



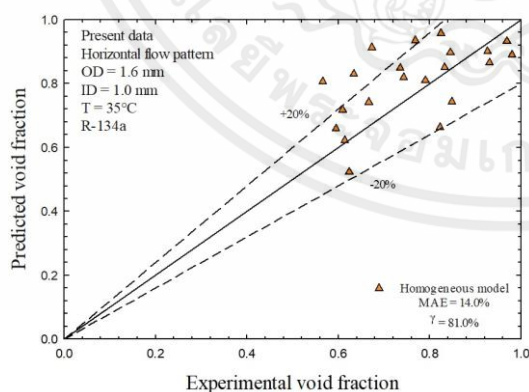
(g) Massena (1960) [14]



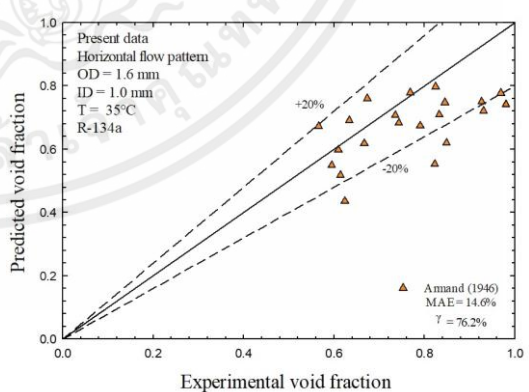
(h) Kawahara et al. (2002) [8]

รูปที่ 4.4 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลในแนวระดับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (a) Homogeneous flow model ,(b) Armand (1946) [10] ,(c) Chisholm (1983) [11] ,(d) Cozp et al. [12] ,(e) Nishino and Yamazaki [13] ,(f) Guzhov et al [15] ,(g) Massena (1960) [14] ,(h) Kawahara et al. (2002) [8]

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดในทิศทางกรไหลในแนวระดับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กับสหสัมพันธ์ทั้ง 8 พบว่าสหสัมพันธ์ที่ทำนายแม่นยำที่สุด คือ สหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model ที่มีค่าความแม่นยำถึง 85% และมีค่าเบี่ยงเบนเพียง 9.4% และสหสัมพันธ์ที่ทำนายได้ตรงลงมาคือสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Armand (1946) [10] , Chisholm (1983) [11] , Massena (1960) [14] , Guzhov et al [15] , Cozp et al. [12] , Nishino and Yamazaki [13] และ Kawahara et al. (2002) [8] ตามลำดับ

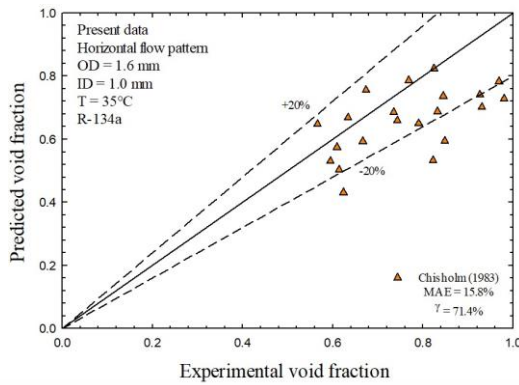


(a) Homogeneous flow model

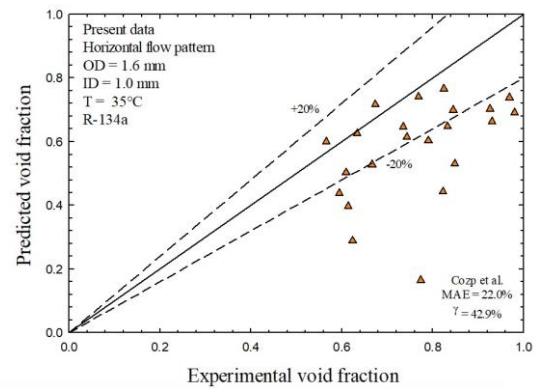


(b) Armand (1946) [10]

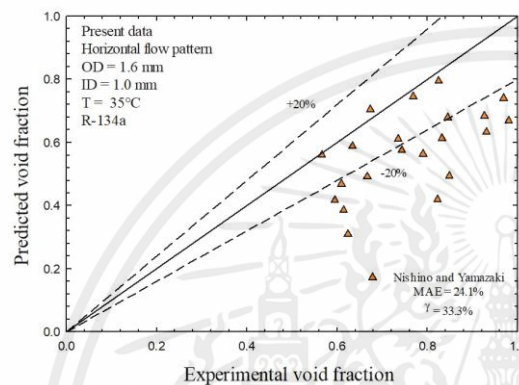
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



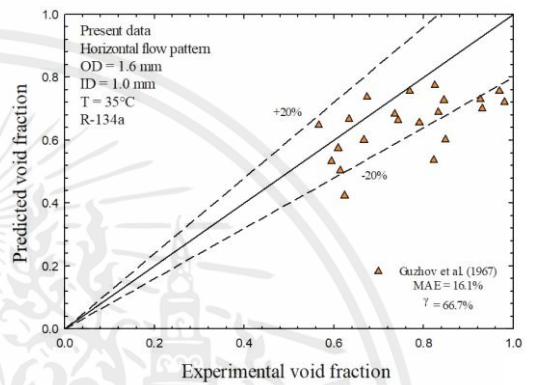
(c) Chisholm (1983) [11]



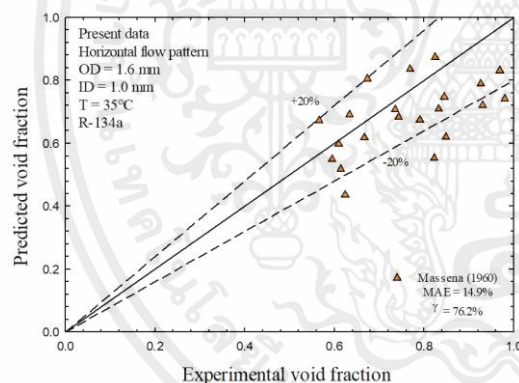
(d) Cozp et al. [12]



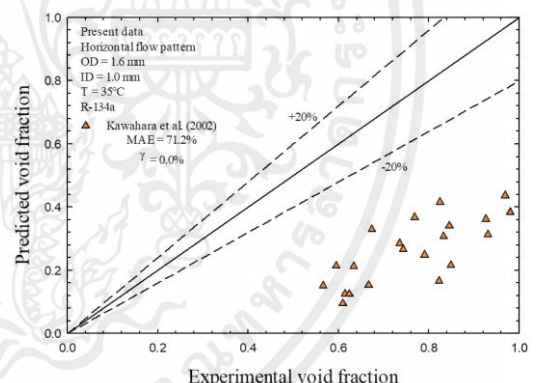
(e) Nishino and Yamazaki [13]



(f) Guzhov et al [15]



(g) Massena (1960) [14]

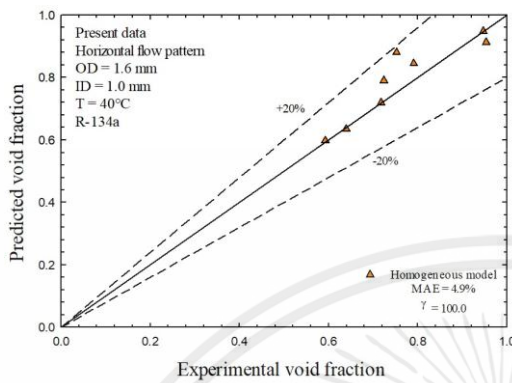


(h) Kawahara et al. (2002) [8]

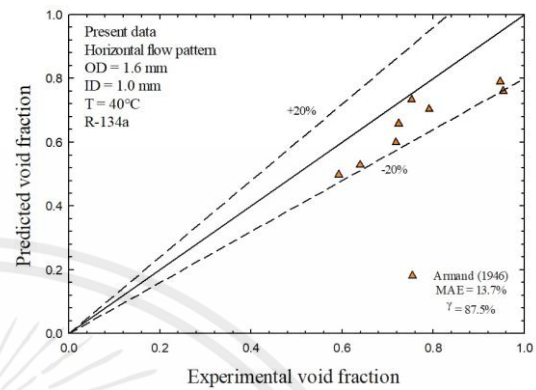
รูปที่ 4.5 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลในแนวระดับที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (a) Homogeneous flow model ,(b) Armand (1946) [10] ,(c) Chisholm (1983) [11] ,(d) Cozp et al. [12] ,(e) Nishino and Yamazaki [13] ,(f) Guzhov et al [15] ,(g) Massena (1960) [14] ,(h) Kawahara et al. (2002) [8]

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดในทิศทางไหลในแนวระดับที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส กับสหสัมพันธ์ทั้ง 8 พบว่าสหสัมพันธ์ที่ทำนายแม่นยำที่สุด คือ สหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model ที่มีค่าความแม่นยำถึง 81% และมีค่าเบี่ยงเบนเพียง 14% และสหสัมพันธ์ที่ทำนายได้ตีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

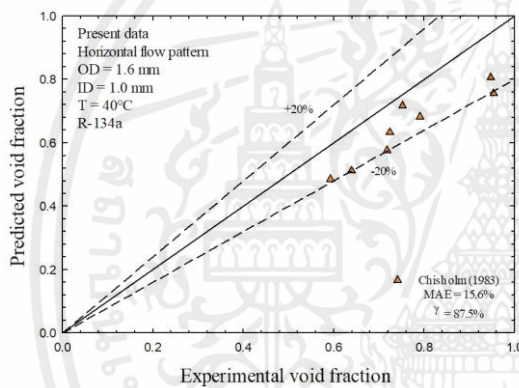
รองลงมาคือสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Armand (1946) [10] , Massena (1960) [14] , Chisholm (1983) [11] , Guzhov et al [15] , Cozp et al. [12] , Nishino and Yamazaki [13] และ Kawahara et al. (2002) [8] ตามลำดับ



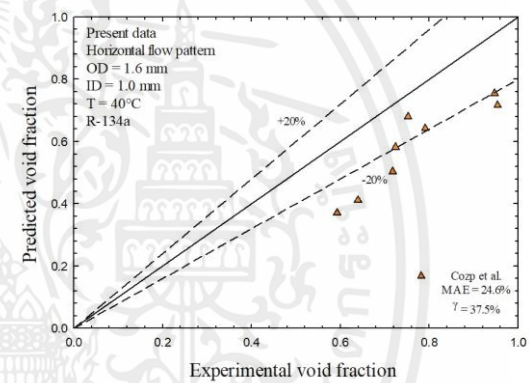
(a) Homogeneous flow model



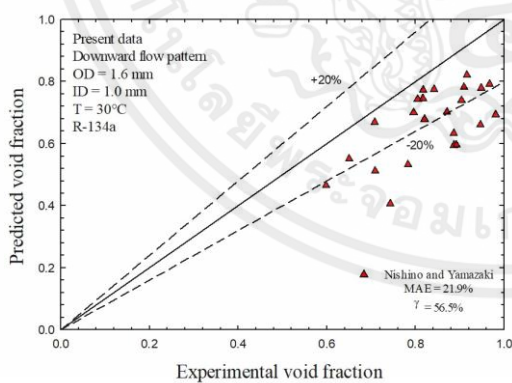
(b) Armand (1946) [10]



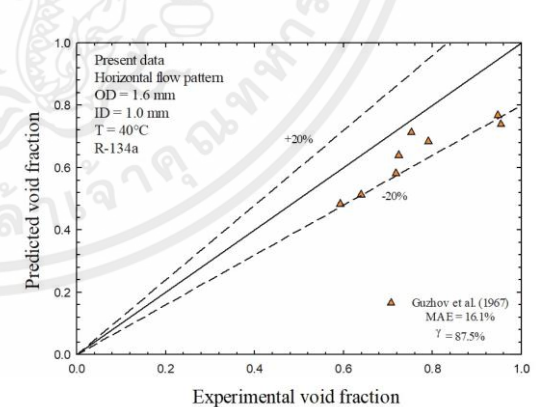
(c) Chisholm (1983) [11]



(d) Cozp et al. [12]

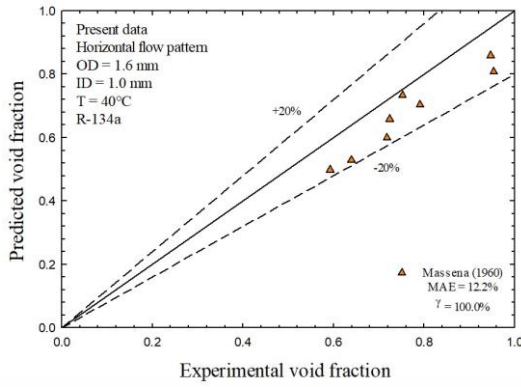


(e) Nishino and Yamazaki [13]

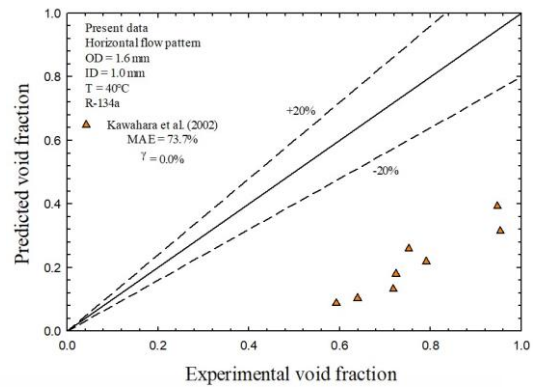


(f) Guzhov et al [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g) Massena (1960) [14]

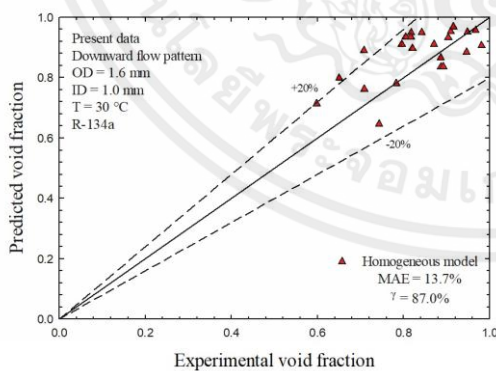


(h) Kawahara et al. (2002) [8]

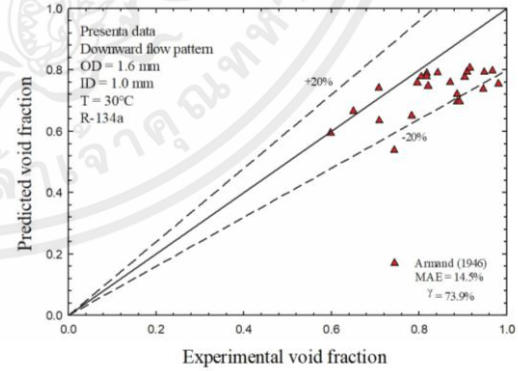
รูปที่ 4.6 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลในแนวระดับที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

(a) Homogeneous flow model ,(b) Armand (1946) [10] ,(c) Chisholm (1983) [11] ,(d) Cozp et al. [12] ,(e) Nishino and Yamazaki [13] ,(f) Guzhov et al [15] ,(g) Massena (1960) [14] ,(h) Kawahara et al. (2002) [8]

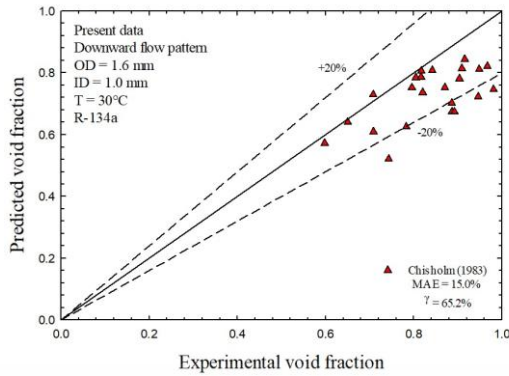
จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดในทิศทางการไหลในแนวระดับที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส กับสหสัมพันธ์ทั้ง 8 พบว่าสหสัมพันธ์ที่ทำนายแม่นยำที่สุด คือ สหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model และ Massena (1960) [14] ที่มีค่าความแม่นยำถึง 100% และมีค่าเบี่ยงเบนเพียง 4.9% และ 12.2% ตามลำดับ และสหสัมพันธ์ที่ทำนายได้ตรงลงมาคือสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Armand (1946) [10] , Chisholm (1983) [11] , Guzhov et al [15], Nishino and Yamazaki [13] , Cozp et al. [12] และ Kawahara et al. (2002) [8] ตามลำดับ



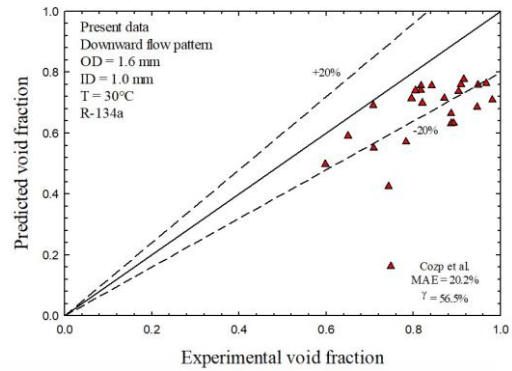
(a) Homogeneous flow model



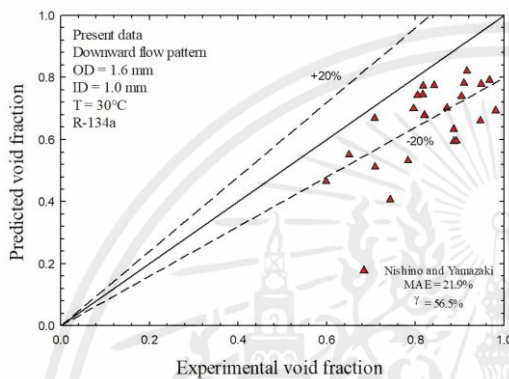
(b) Armand (1946) [10]



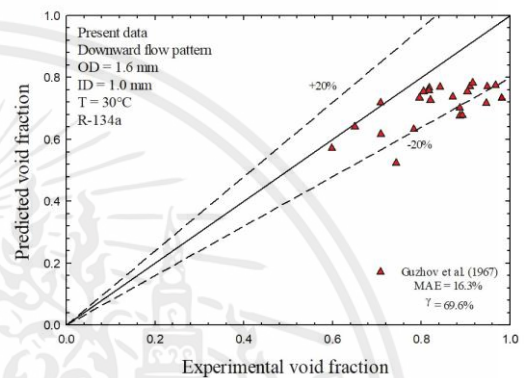
(c) Chisholm (1983) [11]



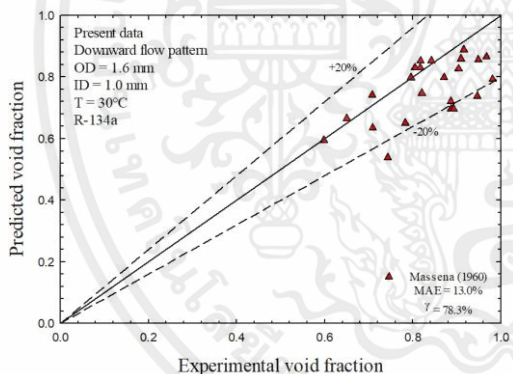
(d) Cozp et al. [12]



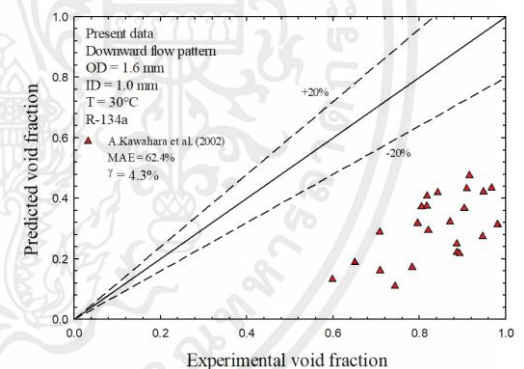
(e) Nishino and Yamazaki [13]



(f) Guzhov et al [15]



(g) Massena (1960) [14]



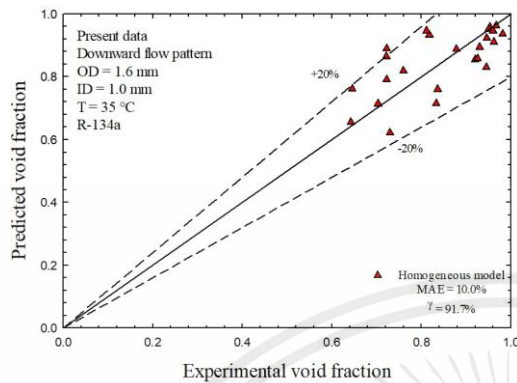
(h) Kawahara et al. (2002) [8]

รูปที่ 4.7 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลลงในแนวตั้งที่อุณหภูมิตั้งที่ 30 องศาเซลเซียส

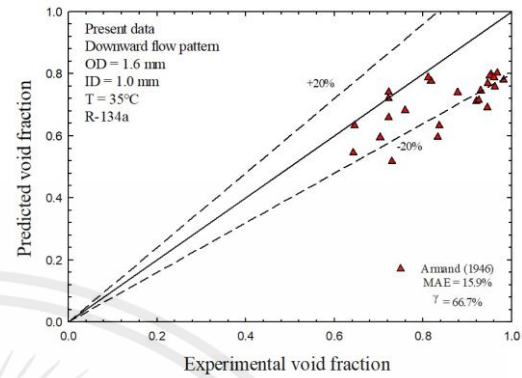
(a) Homogeneous flow model ,(b) Armand (1946) [10] ,(c) Chisholm (1983) [11] ,(d) Cozp et al. [12] ,(e) Nishino and Yamazaki [13] ,(f) Guzhov et al [15] ,(g) Massena (1960) [14] ,(h) Kawahara et al. (2002) [8]

จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดในทิศทางไหลลงในแนวตั้งที่อุณหภูมิตั้งที่ 30 องศาเซลเซียส กับสหสัมพันธ์ทั้ง 8 พบว่าสหสัมพันธ์ที่ทำนายแม่นยำที่สุด คือ สหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model และ ที่มีค่าความแม่นยำถึง 87% และมีค่าเบี่ยงเบนเพียง 13.7% และสหสัมพันธ์ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

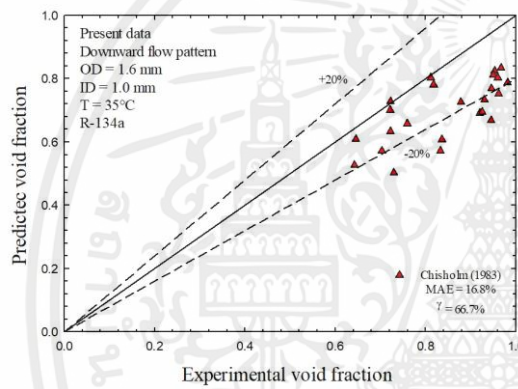
ทำนายได้ตรงลงมาคือสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14] , Armand (1946) [10] , Guzhov et al [15], Chisholm (1983) [11] , Cozp et al. [12] , Nishino and Yamazaki [13] และ Kawahara et al. (2002) [8] ตามลำดับ



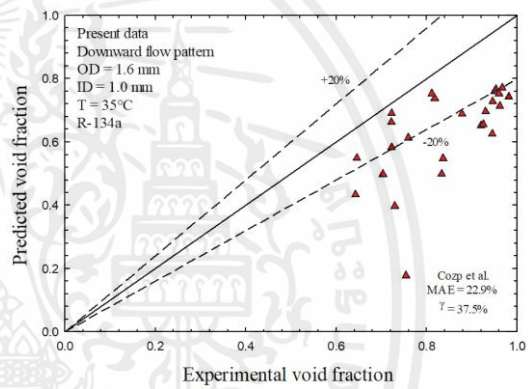
(a) Homogeneous flow model



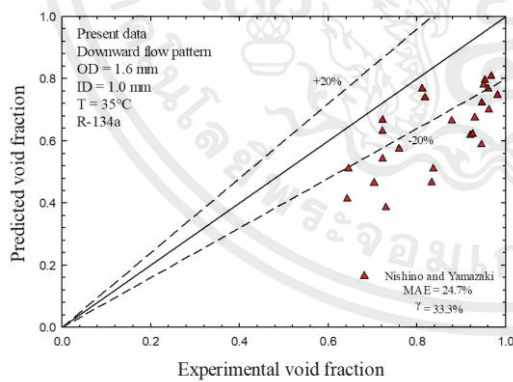
(b) Armand (1946) [10]



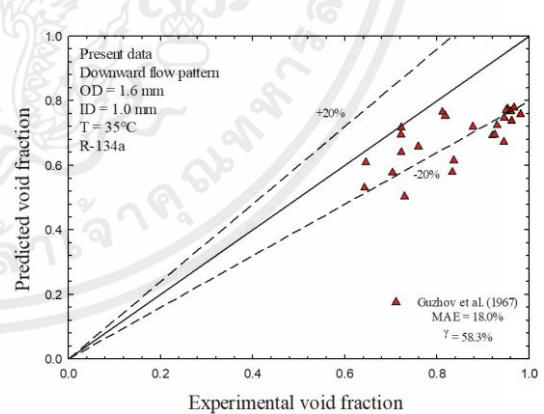
(c) Chisholm (1983) [11]



(d) Cozp et al. [12]

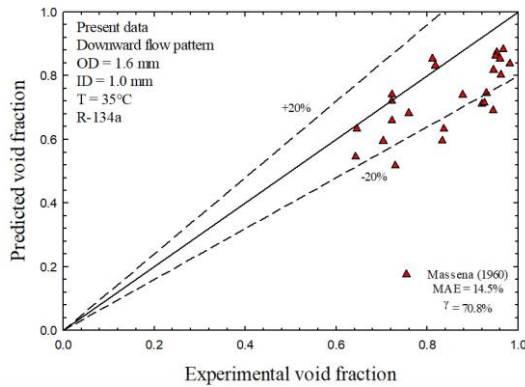


(e) Nishino and Yamazaki [13]

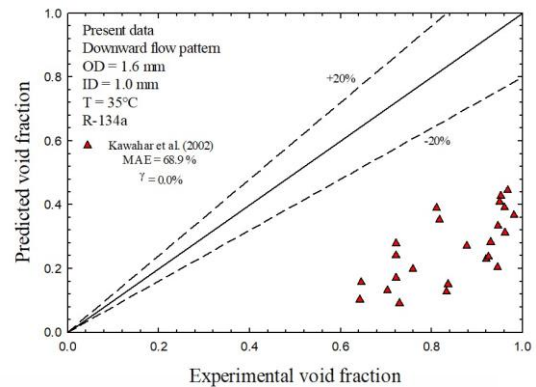


(f) Guzhov et al [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g) Massena (1960) [14]

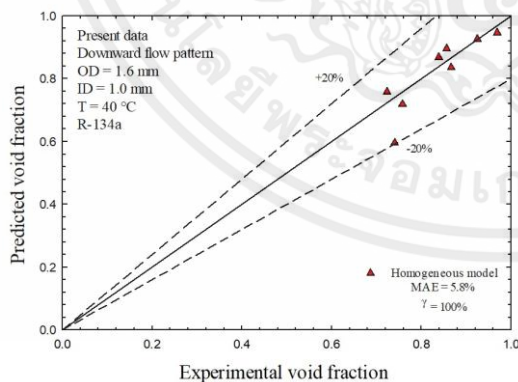


(h) Kawahara et al. (2002) [8]

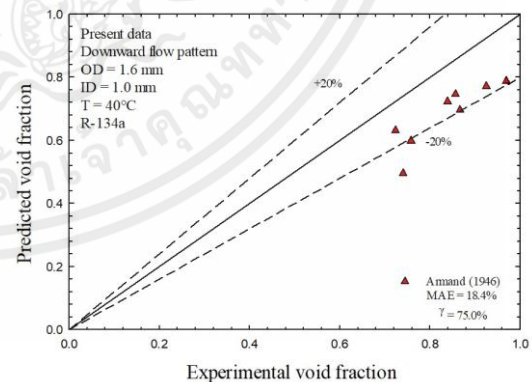
รูปที่ 4.8 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลลงในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

(a) Homogeneous flow model ,(b) Armand (1946) [10] ,(c) Chisholm (1983) [11] ,(d) Cozp et al. [12] ,(e) Nishino and Yamazaki [13] ,(f) Guzhov et al [15] ,(g) Massena (1960) [14] ,(h) Kawahara et al. (2002) [8]

จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดในทิศทางลงไหลลงในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส กับสหสัมพันธ์ทั้ง 8 พบว่าสหสัมพันธ์ที่ทำนายแม่นยำที่สุด คือ สหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model และ ที่มีค่าความแม่นยำถึง 91.7% และมีค่าเบี่ยงเบนเพียง 10% และสหสัมพันธ์ที่ทำนายได้ตรงลงมาคือสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14] , Armand (1946) [10] , Chisholm (1983) [11] , Guzhov et al [15], Cozp et al. [12] , Nishino and Yamazaki [13] และ Kawahara et al. (2002) [8] ตามลำดับ

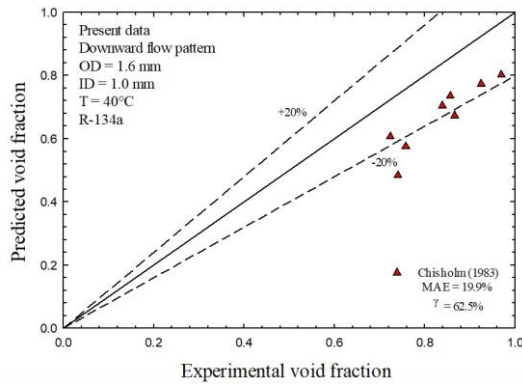


(a) Homogeneous flow model

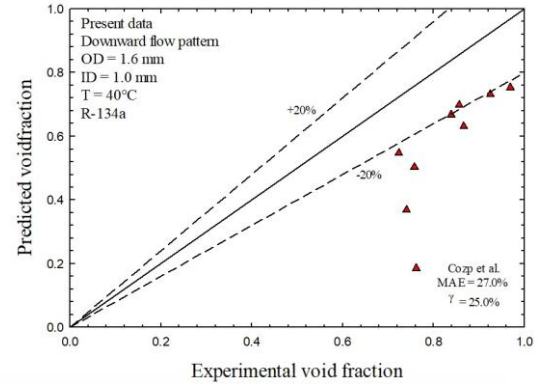


(b) Armand (1946) [10]

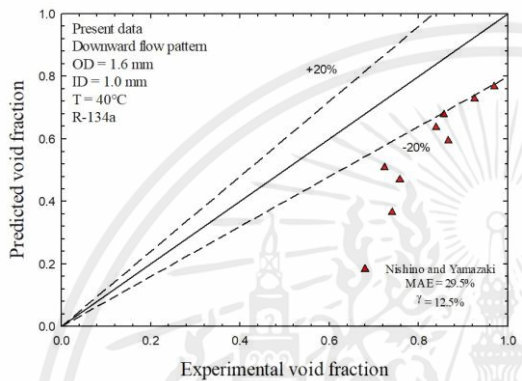
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



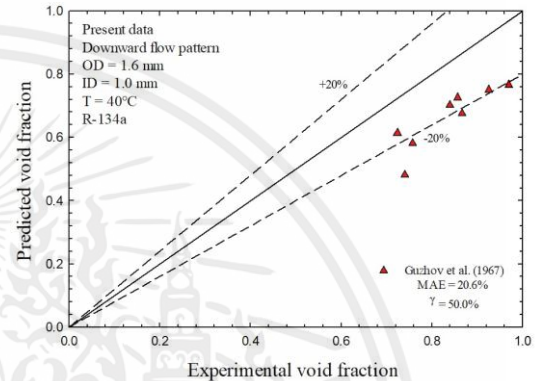
(c) Chisholm (1983) [11]



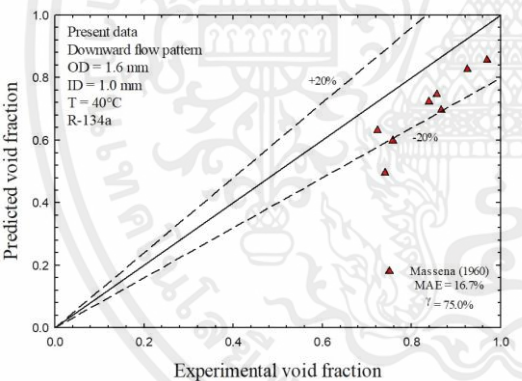
(d) Cozp et al. [12]



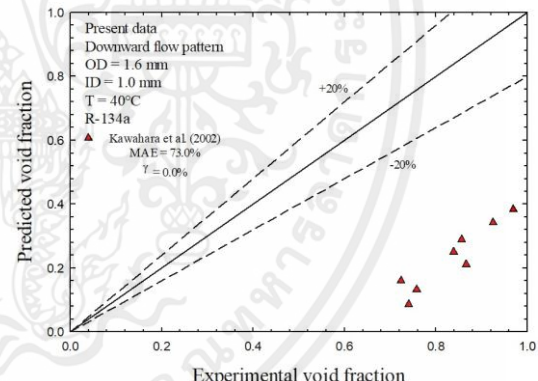
(e) Nishino and Yamazaki [13]



(f) Guzhov et al [15]



(g) Massena (1960) [14]



(h) Kawahara et al. (2002) [8]

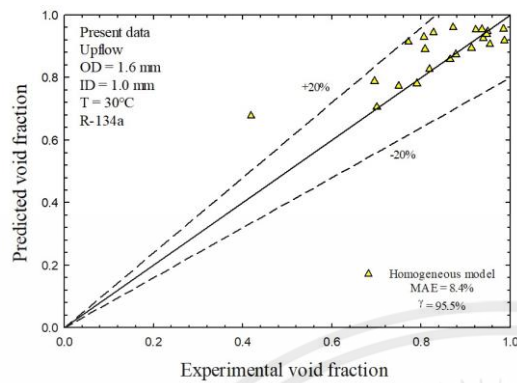
รูปที่ 4.9 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างขณะไหลลงในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

(a) Homogeneous flow model ,(b) Armand (1946) [10] ,(c) Chisholm (1983) [11] ,(d) Cozp et al. [12] ,(e) Nishino and Yamazaki [13] ,(f) Guzhov et al [15] ,(g) Massena (1960) [14] ,(h) Kawahara et al. (2002) [8]

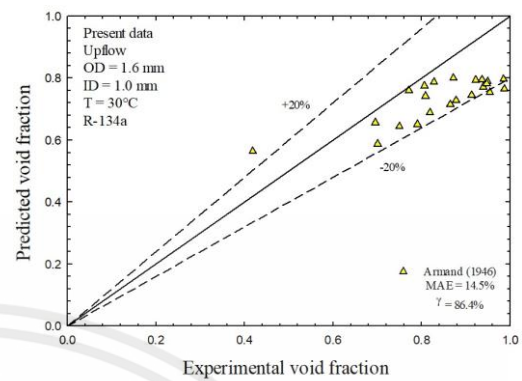
จากรูปที่ 4.9 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดในทิศทางไหลลงในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส กับสหสัมพันธ์ทั้ง 8 พบว่าสหสัมพันธ์ที่ทำนายแม่นยำที่สุด คือ สหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model และ ที่มีค่าความแม่นยำถึง 100% และมีค่าเบี่ยงเบนเพียง 5.8% และสหสัมพันธ์ที่ทำนายได้ตรงลงมาคือสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14] , Armand (1946) [10] ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารนั้นจะถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารนั้นจะถือว่าผิดกฎหมาย

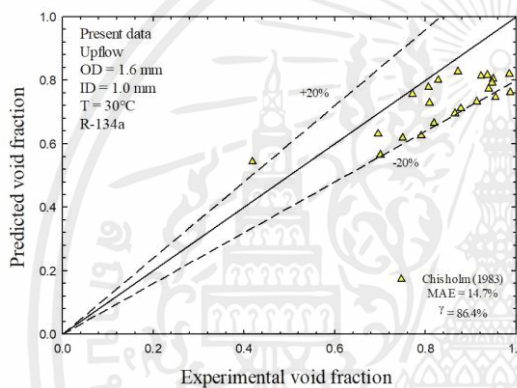
Chisholm (1983) [11], Guzhov et al [15], Cozp et al. [12], Nishino and Yamazaki [13] และ Kawahara et al. (2002) [8] ตามลำดับ



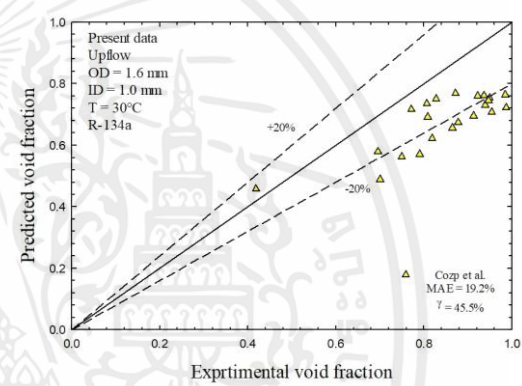
(a) Homogeneous flow model



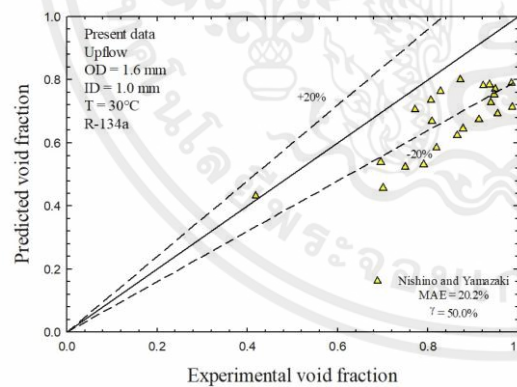
(b) Armand (1946) [10]



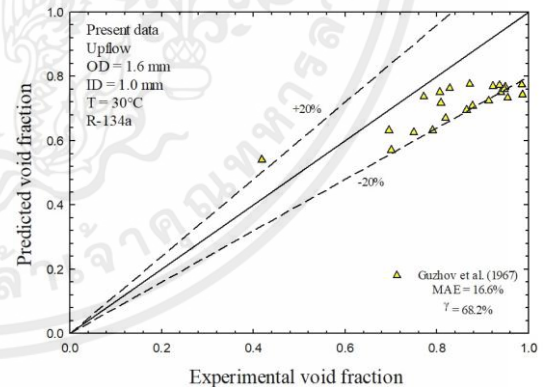
(c) Chisholm (1983) [11]



(d) Cozp et al. [12]

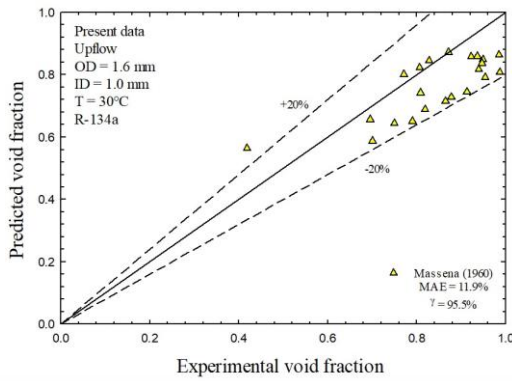


(e) Nishino and Yamazaki [13]

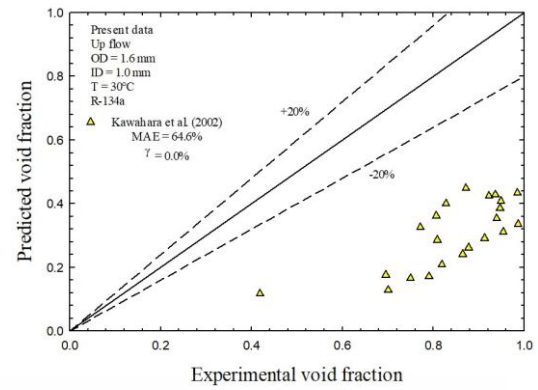


(f) Guzhov et al [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



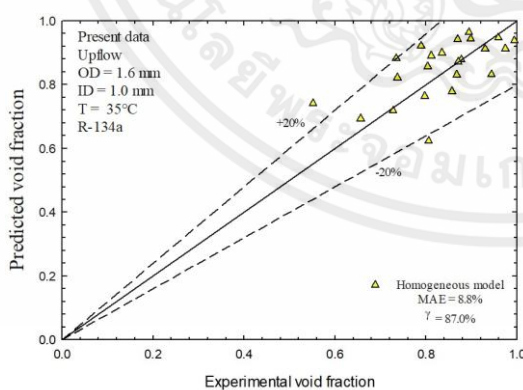
(g) Massena (1960) [14]



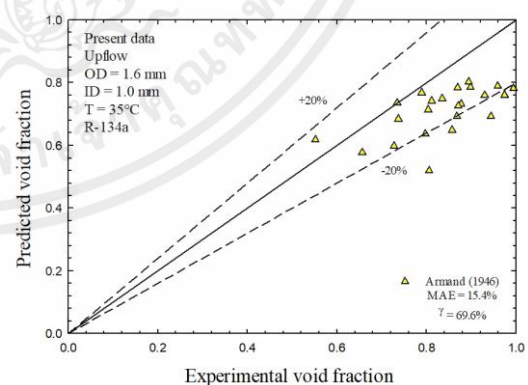
(h) Kawahara et al. (2002) [8]

รูปที่ 4.10 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่าง ขณะไหลขึ้นในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (a) Homogeneous flow model ,(b) Armand (1946) [10] ,(c) Chisholm (1983) [11] ,(d) Cozp et al. [12] ,(e) Nishino and Yamazaki [13] ,(f) Guzhov et al [15] ,(g) Massena (1960) [14] ,(h) Kawahara et al. (2002) [8]

จากรูปที่ 4.10 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดในทิศทางไหลขึ้นในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กับสหสัมพันธ์ทั้ง 8 พบว่าสหสัมพันธ์ที่ทำนายแม่นยำที่สุด คือ สหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model และ ที่มีค่าความแม่นยำถึง 95.5% และมีค่าเบี่ยงเบนเพียง 8.4% และสหสัมพันธ์ที่ทำนายได้ตรงลงมาคือสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14] , Armand (1946) [10] , Chisholm (1983) [11] , Guzhov et al [15], Nishino and Yamazaki [13] , Cozp et al. [12] และ Kawahara et al. (2002) [8] ตามลำดับ

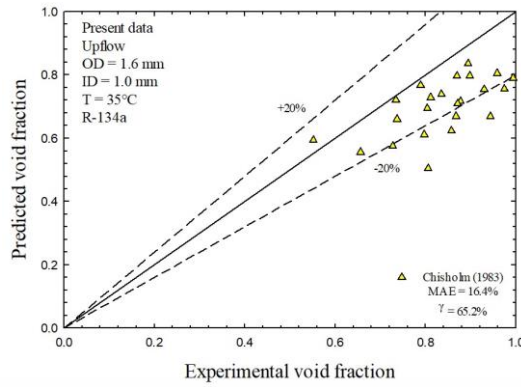


(a) Homogeneous flow model

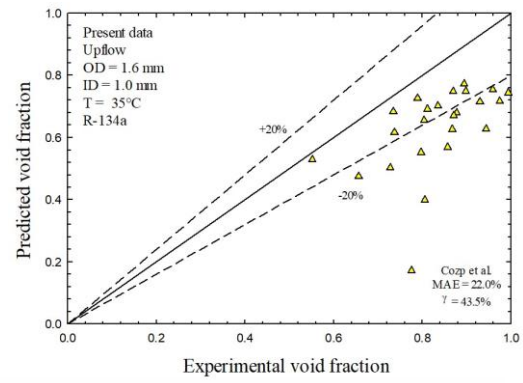


(b) Armand (1946) [10]

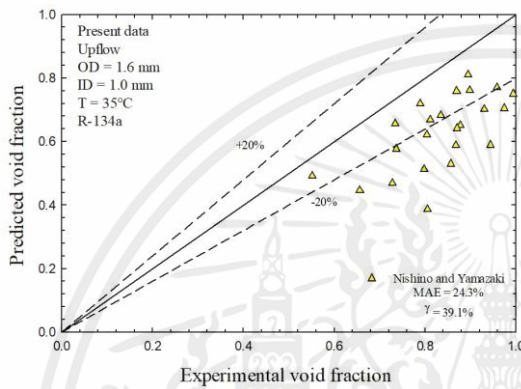
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



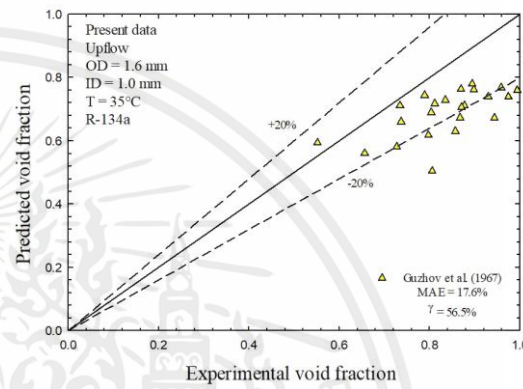
(c) Chisholm (1983) [11]



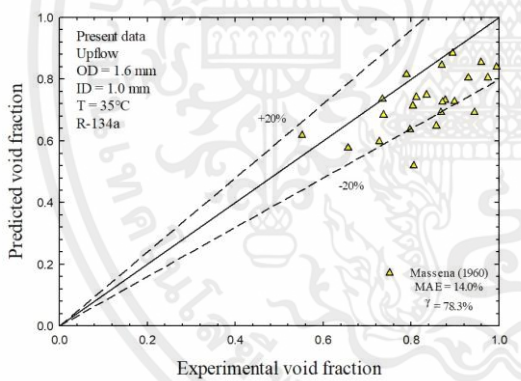
(d) Cozp et al. [12]



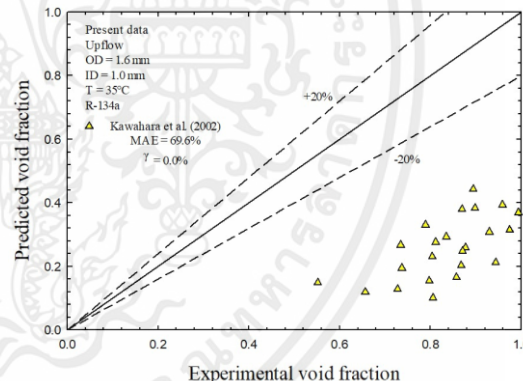
(e) Nishino and Yamazaki [13]



(f) Guzhov et al. [15]



(g) Massena (1960) [14]

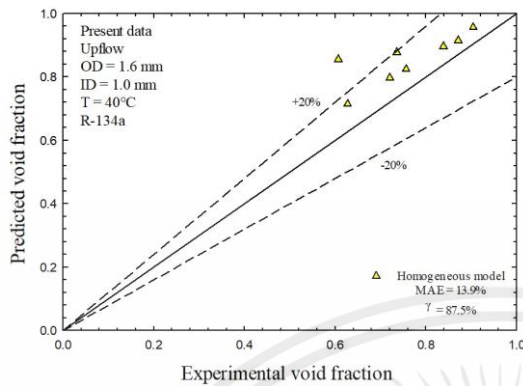


(h) Kawahara et al. (2002) [8]

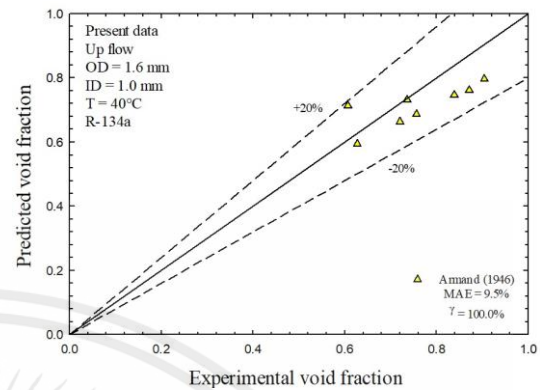
รูปที่ 4.11 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่าง ขณะไหลขึ้นในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (a) Homogeneous flow model ,(b) Armand (1946) [10] ,(c) Chisholm (1983) [11] ,(d) Cozp et al. [12] ,(e) Nishino and Yamazaki [13] ,(f) Guzhov et al [15] ,(g) Massena (1960) [14] ,(h) Kawahara et al. (2002) [8]

จากรูปที่ 4.11 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดในทิศทางกรไหลขึ้นในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส กับสหสัมพันธ์ทั้ง 8 พบว่าสหสัมพันธ์ที่ทำนายแม่นยำที่สุด คือ สหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model และ ที่มีค่าความแม่นยำถึง 87% และมีค่าเบี่ยงเบนเพียง 8.8% และสหสัมพันธ์ที่ทำนายได้ตรงลงมาคือสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14] , Armand (1946) [10] , เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

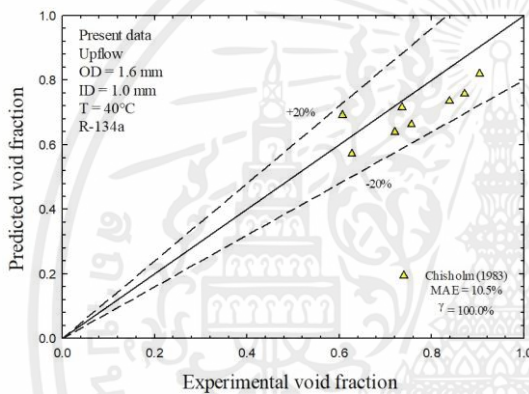
Chisholm (1983) [11], Guzhov et al [15], Cozp et al. [12], Nishino and Yamazaki [13] และ Kawahara et al. (2002) [8] ตามลำดับ



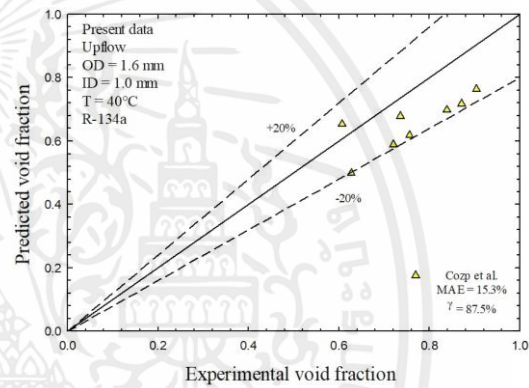
(a) Homogeneous flow model



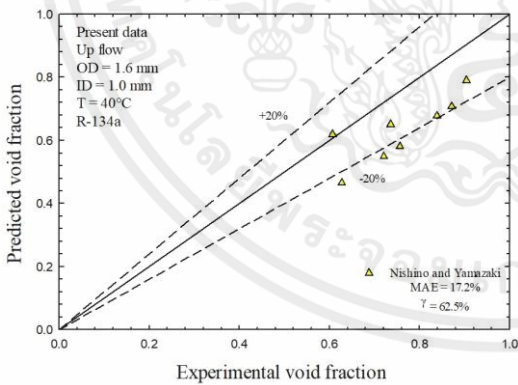
(b) Armand (1946) [10]



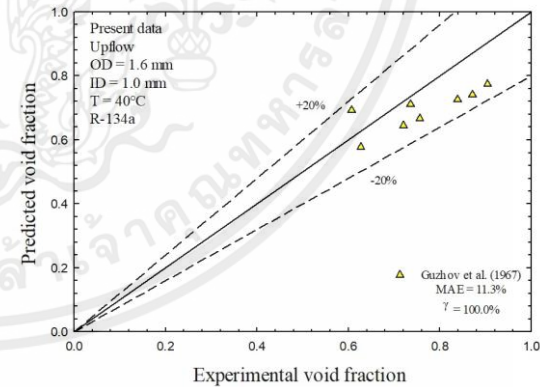
(c) Chisholm (1983) [11]



(d) Cozp et al. [12]

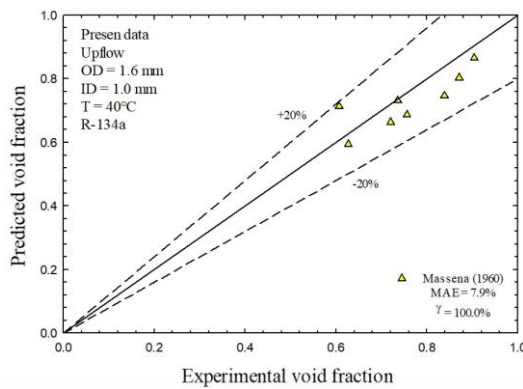


(e) Nishino and Yamazaki [13]

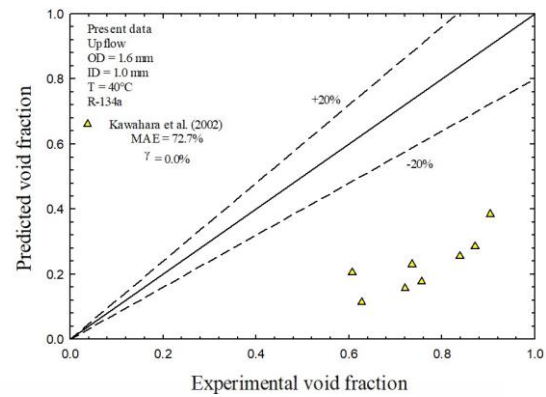


(f) Guzhov et al [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g) Massena (1960) [14]



(h) Kawahara et al. (2002) [8]

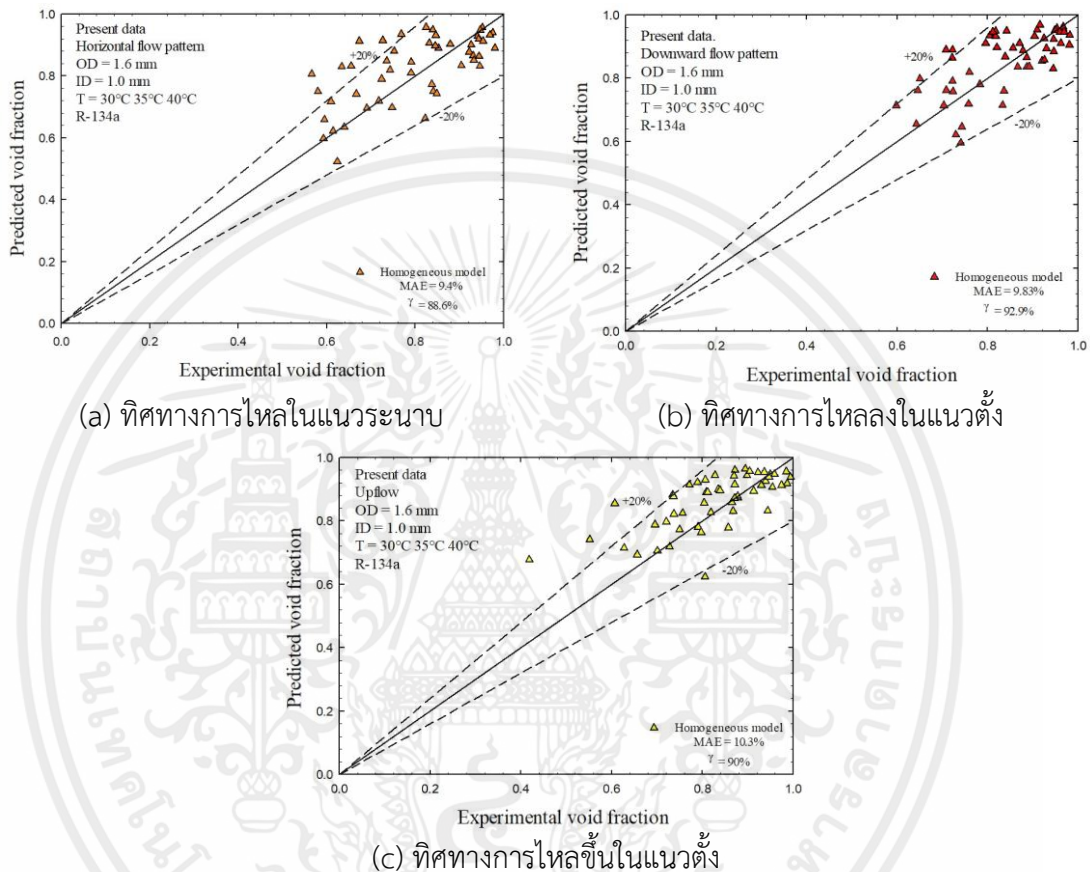
รูปที่ 4.12 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่าง ขณะไหลขึ้นในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

(a) Homogeneous flow model ,(b) Armand (1946) [10] ,(c) Chisholm (1983) [11] ,(d) Cozp et al. [12] ,(e) Nishino and Yamazaki [13] ,(f) Guzhov et al [15] ,(g) Massena (1960) [14] ,(h) Kawahara et al. (2002) [8]

จากรูปที่ 4.12 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดในทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส กับสหสัมพันธ์ทั้ง 8 พบว่าสหสัมพันธ์ที่ทำนายแม่นยำดีที่สุด ซึ่งมีค่าความแม่นยำในการทำนายถึง 100% คือสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14] , Armand (1946) [10] , Chisholm (1983) [11] , Guzhov et al [15] และมีค่าเบี่ยงเบนอยู่ที่ 7.9% , 9.5% , 10.5% และ 11.3% ตามลำดับ และสหสัมพันธ์ที่ทำนายได้ตรงลงมาคือสหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model และ สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Cozp et al. [12] , Nishino and Yamazaki [13] และ Kawahara et al. (2002) [8] ตามลำดับ

4.3.2 ทิศทางการไหล

ในส่วนนี้เราจะวิเคราะห์การทำนายสัดส่วนช่องว่างที่มีทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทาง คือไหลในแนวระนาบ ไหลลงในแนวตั้ง และไหลขึ้นในแนวตั้ง ตามลำดับ โดยจะดูว่าการไหลในทิศทางที่แตกต่างกันนั้นมีผลต่อการทำนายสัดส่วนช่องว่างมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะวิเคราะห์ที่ค่าความเบี่ยงเบน MAE \pm 20% จะแสดงดังต่อไปนี้



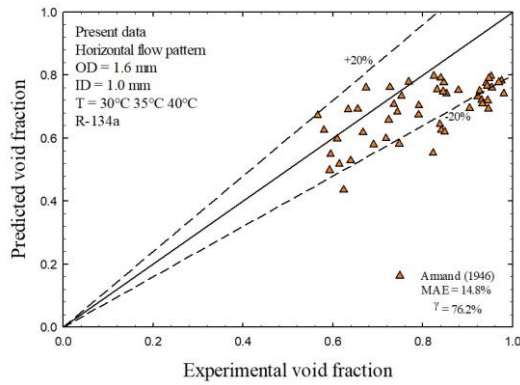
รูปที่ 4.13 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล

ทำนายโดยสหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model

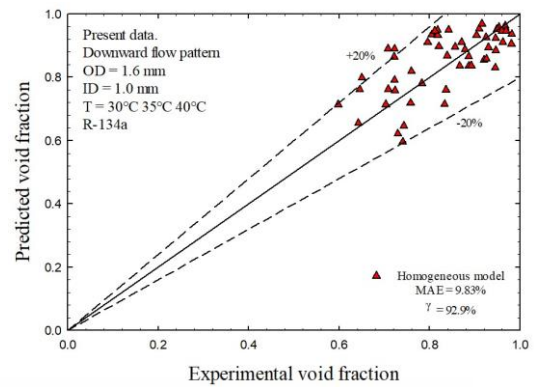
(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ , (b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง , (c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

จากรูป 4.13 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไม่โครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือด โดยจะเปรียบเทียบในทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทาง ซึ่งจะเป็นการทำนายโดยสหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model พบว่าสหสัมพันธ์นี้ทำนายทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทางได้แม่นยำ และมีค่าเบี่ยงเบนค่อนข้างต่ำ

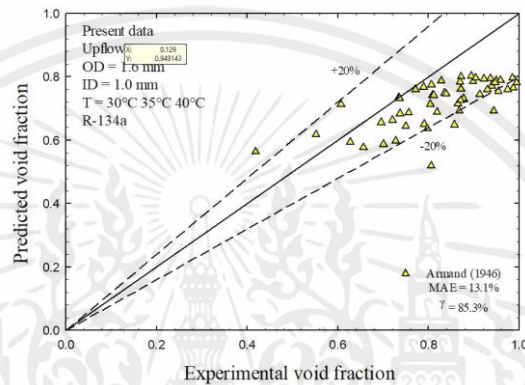
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ



(b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง

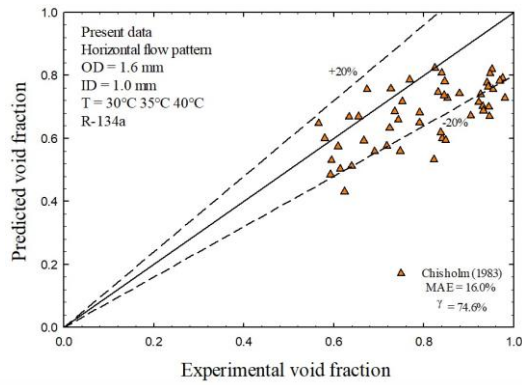


(c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

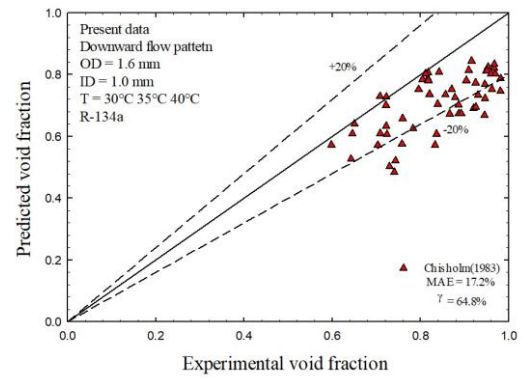
รูปที่ 4.14 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล
ทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Armand (1946) [10]

(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ , (b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง , (c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

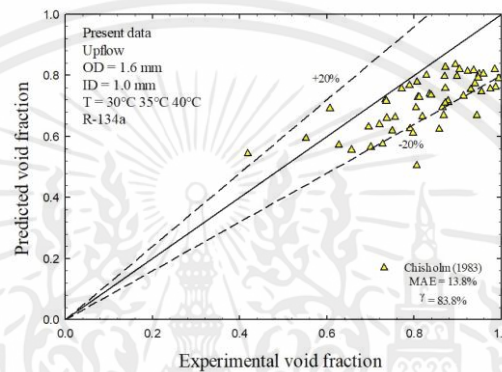
จากรูป 4.14 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือด โดยจะเปรียบเทียบในทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทาง ซึ่งจะเป็นการทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Armand (1946) [10] สหสัมพันธ์นี้ทำนายทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทางได้แม่นยำ และมีค่าเบี่ยงเบนน้อย



(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ



(b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง



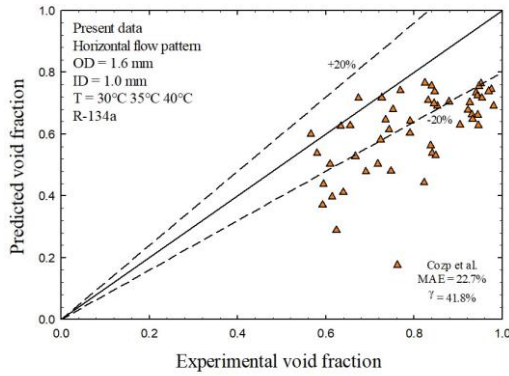
(c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

รูปที่ 4.15 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล

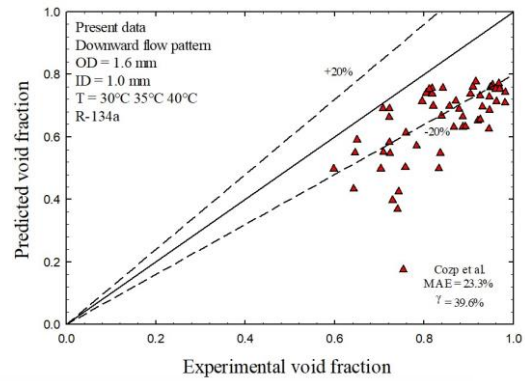
ทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Chisholm (1983) [11]

(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ , (b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง , (c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

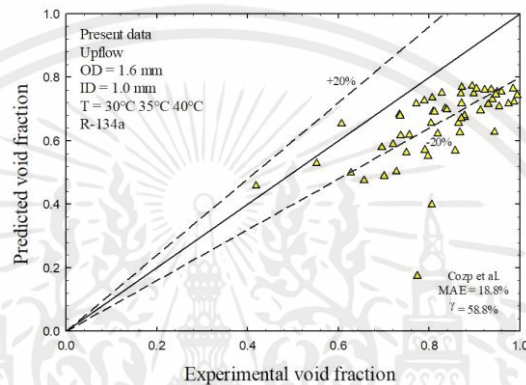
จากรูป 4.15 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือด โดยจะเปรียบเทียบในทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทาง ซึ่งจะเป็นการทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Chisholm (1983) [11] สหสัมพันธ์นี้ทำนายทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทางการไหลได้แม่นยำ และมีค่าเบี่ยงเบนน้อย



(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ



(b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง

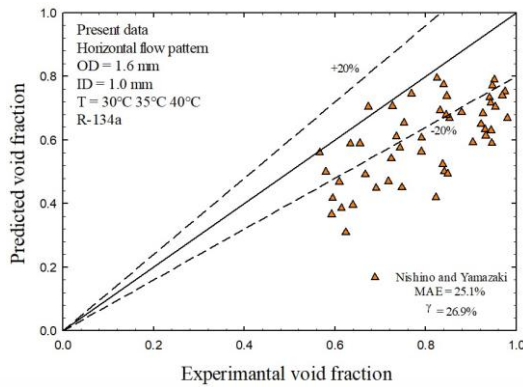


(c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

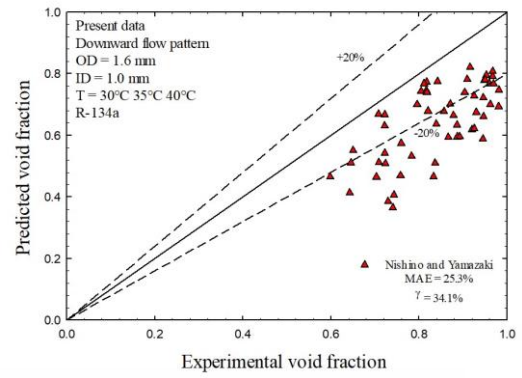
รูปที่ 4.16 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล
ทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Cozp et al [12]

(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ , (b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง , (c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

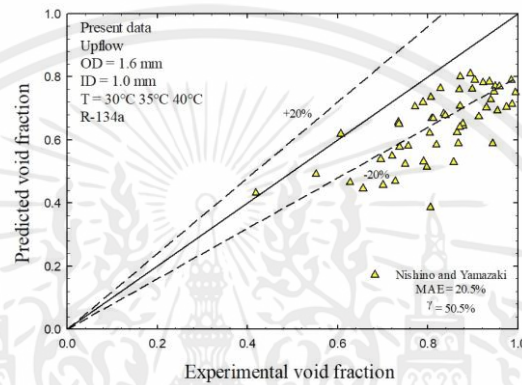
จากรูป 4.16 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือด โดยจะเปรียบเทียบในทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทาง ซึ่งจะเป็นการทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Cozp et al [12] สหสัมพันธ์นี้ทำนายทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทางการไหลโดยเฉพาะทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง ได้ค่อนข้างแม่นยำ และมีค่าเบี่ยงเบนน้อย



(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ



(b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง



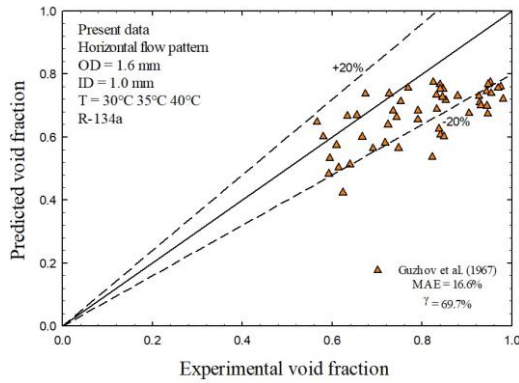
(c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

รูปที่ 4.17 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล

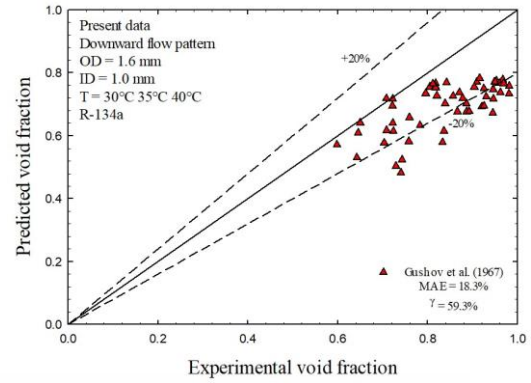
ทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Nishino and Yamazaki [13]

(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ , (b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง , (c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

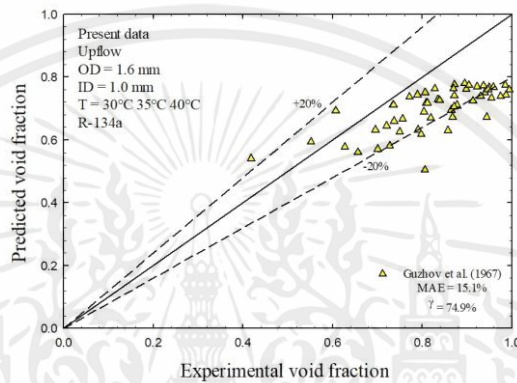
จากรูป 4.17 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือด โดยจะเปรียบเทียบในทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทาง ซึ่งจะเป็นการทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Cozp et al [12] สหสัมพันธ์นี้ทำนายทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทางการไหลโดยเฉพาะทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง ได้ค่อนข้างแม่นยำ และมีค่าเบี่ยงเบนน้อย



(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ



(b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง



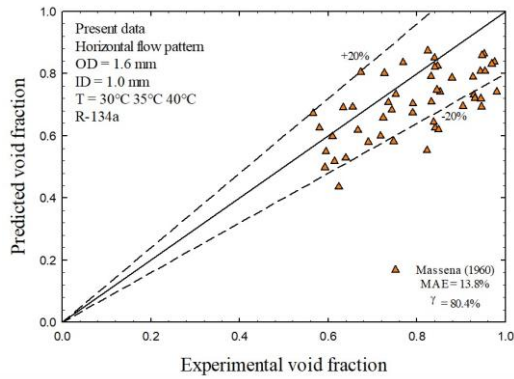
(c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

รูปที่ 4.18 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล

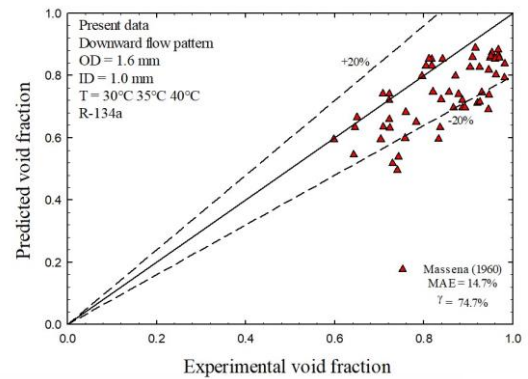
ทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Guzhov et al (1967) [15]

(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ , (b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง , (c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

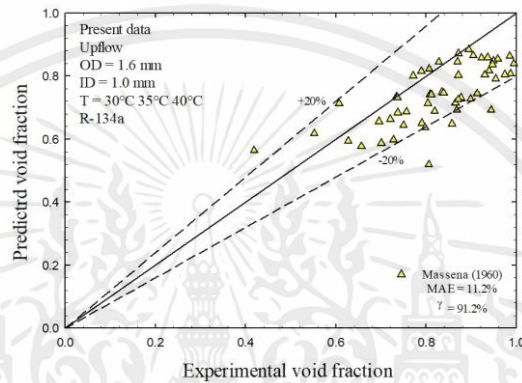
จากรูป 4.20 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือด โดยจะเปรียบเทียบในทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทาง ซึ่งจะเป็นการทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Guzhov et al (1967) [15] สหสัมพันธ์นี้ทำนายทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทางการไหลโดยเฉพาะทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง ได้ค่อนข้างแม่นยำ และมีค่าเบี่ยงเบนน้อย



(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ



(b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง



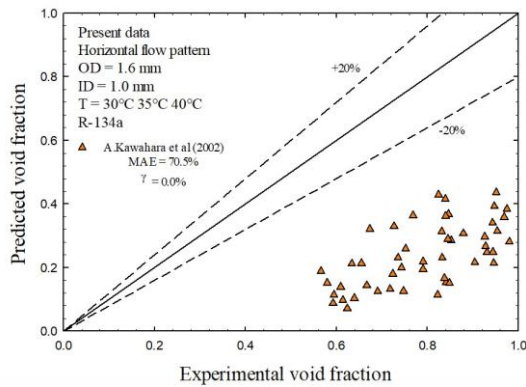
(c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

รูปที่ 4.19 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล

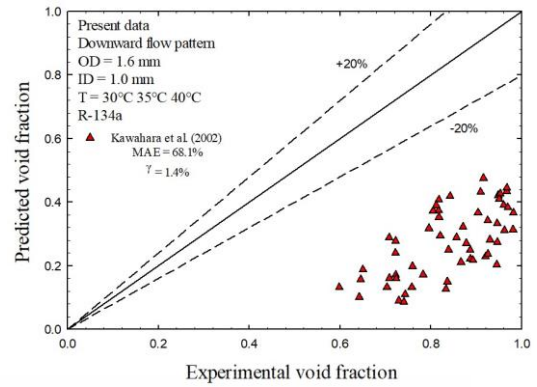
ทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14]

(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ , (b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง , (c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

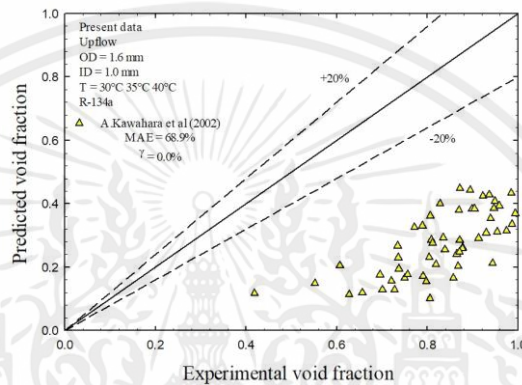
จากรูป 4.19 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือด โดยจะเปรียบเทียบในทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทาง ซึ่งจะเป็นการทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14] สหสัมพันธ์นี้ทำนายทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทางการไหลโดยเฉพาะทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง ได้ค่อนข้างแม่นยำ และมีค่าเบี่ยงเบนน้อย



(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ



(b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง



(c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

รูปที่ 4.20 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหล

ทำนายโดยสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ของนักวิจัย Kawahara et al.(2002) [8]

(a) ทิศทางการไหลในแนวระนาบ , (b) ทิศทางการไหลลงในแนวตั้ง , (c) ทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง

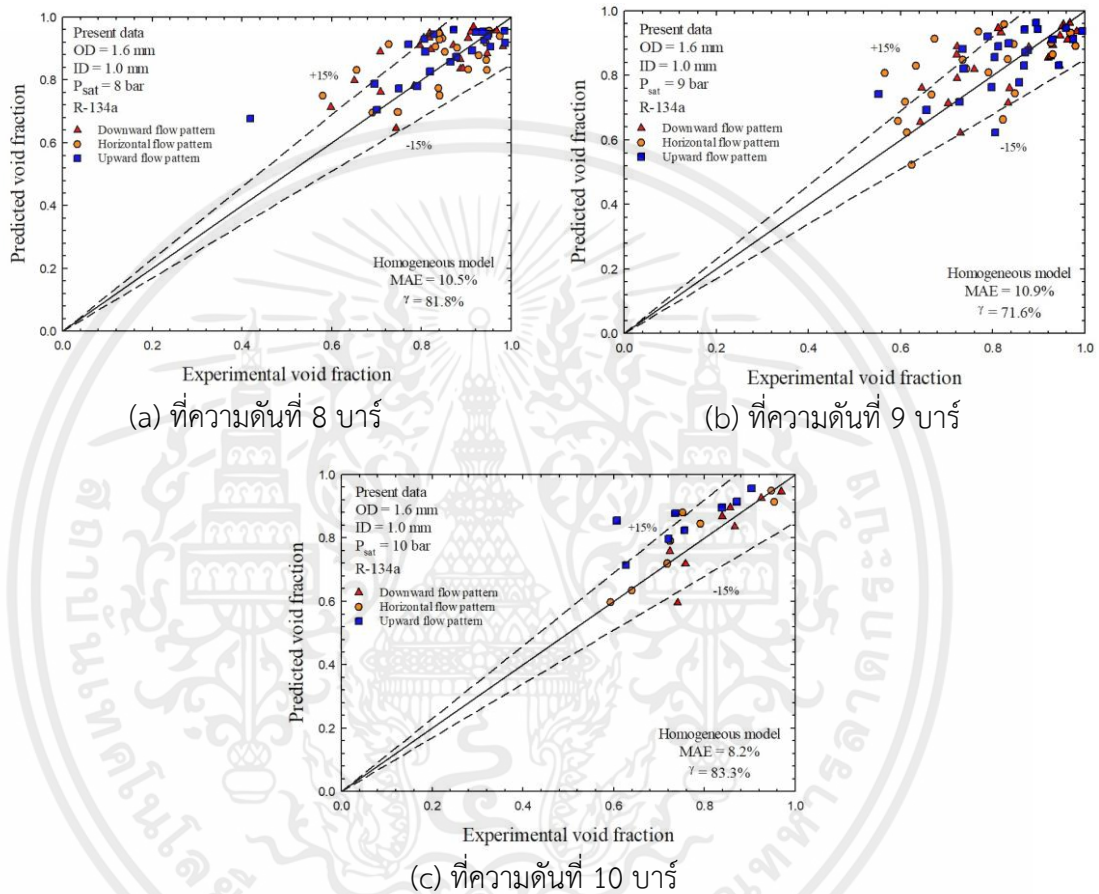
จากรูป 4.18 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือด โดยจะเปรียบเทียบในทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทาง ซึ่งจะเป็นการทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Kawahara et al.(2002) [8] สหสัมพันธ์นี้ทำนายทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทางการไหล พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนค่อนข้างมากและไม่มีความแม่นยำในการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างสำหรับงานวิจัยนี้

ดังนั้นจากรูปที่ 4.13-4.20 จากการเทียบสหสัมพันธ์ในการทำนายสัดส่วนช่องว่างของท่อขนาดไมโครที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 1 มิลลิเมตรขณะเกิดการเดือดทั้ง 3 ทิศทางการไหล คือ ไหลในแนวระนาบ ไหลลงในแนวตั้ง และไหลขึ้นในแนวตั้ง ตามลำดับ สหสัมพันธ์ที่มีความแม่นยำที่สุด คือ สหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model และสหสัมพันธ์ที่ทำนายได้แม่นยำรองลงมาคือสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena(1960) [14], Armand (1946) [10], Chisolm(1983) [11], Guzhov et al [15], Cozp et al. [12], Nishino and Yamazaki [13], และ Kawahara et al. (2002) [8], ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 เปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างจากความต่างความดัน

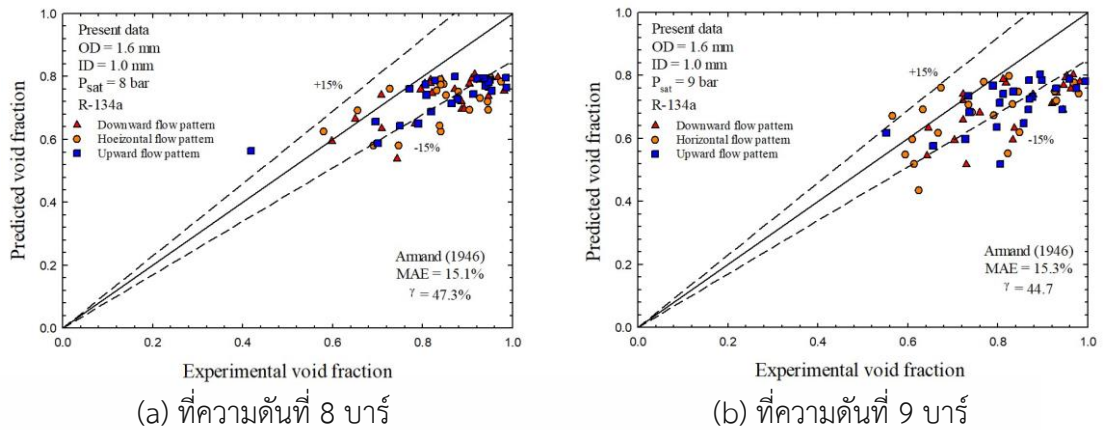
ในส่วนนี้เราจะวิเคราะห์การทำนายสัดส่วนช่องว่างโดยแบ่งตามค่าของความดัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแบ่งความดันเป็น 8, 9, 10 bar มีทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทาง คือไหลในแนวระนาบ ไหลลงในแนวตั้ง และไหลขึ้นในแนวตั้ง โดยจะดูว่าความต่างของความดันในทิศทางการไหลที่แตกต่างกันนั้นมีผลการทำนายสัดส่วนช่องว่างมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะวิเคราะห์ที่ค่าความเบี่ยงเบน $MAE \pm 15\%$ จะแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.21 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน
ทำนายโดยสหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model

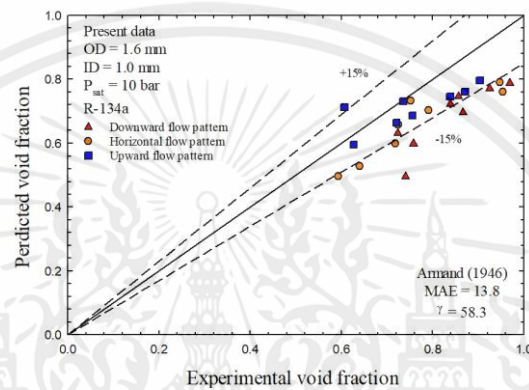
(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์ ,(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์ ,(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

จากรูปที่ 4.21 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไม่โครขณะเกิดการเดือดที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ทั้ง 3 ทิศทางสหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model จากผลการวิเคราะห์พบว่าสหสัมพันธ์นี้ทำนายได้ค่อนข้างแม่นยำมาก จากการวิเคราะห์ค่า $MAE \pm 15\%$ จะเห็นได้ว่าที่ความดันที่ (a) 8 บาร์ ,(b) 9 ,(c) 10 บาร์ จะมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 81.8%, 71.6% ,83.3% ตามลำดับ



(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์

(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์



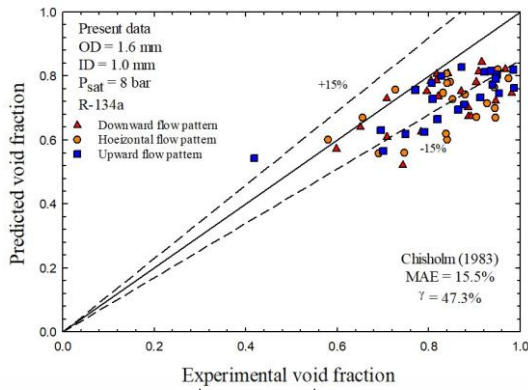
(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

รูปที่ 4.22 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน

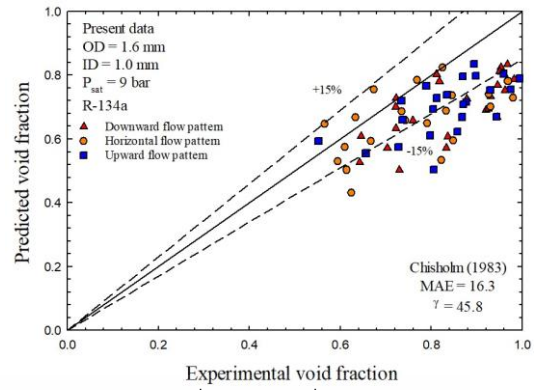
ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Armand (1946) [10]

(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์ ,(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์ ,(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

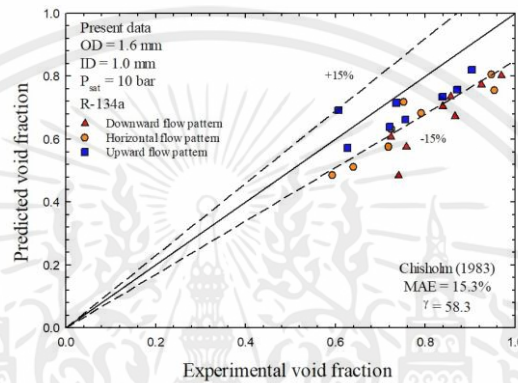
จากรูปที่ 4.22 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครขณะเกิดการเดือดที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ทั้ง 3 ทิศทางสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Armand (1946) [10] จากการวิเคราะห์ค่า MAE $\pm 15\%$ จะเห็นได้ว่าที่ความดันที่ (a) 8 บาร์ ,(b) 9 ,(c) 10 บาร์ จะมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 47.3% , 44.7% , 58.3% ตามลำดับ



(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์



(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์



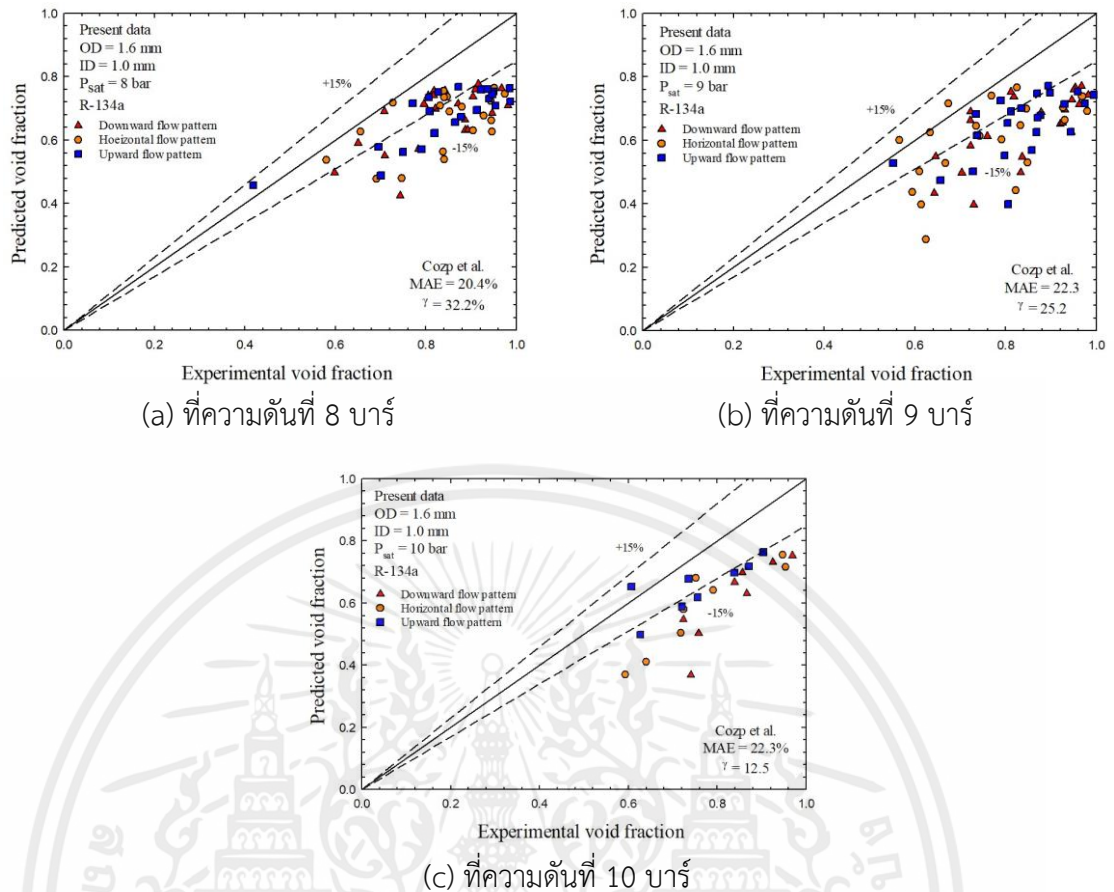
(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

รูปที่ 4.23 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน

ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Chisholm (1983) [11]

(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์ ,(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์ ,(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

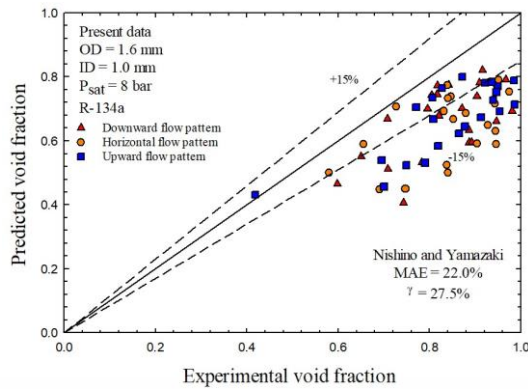
จากรูปที่ 4.23 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดทั้ง 3 ทิศทางสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Chisholm (1983) [11] จากการวิเคราะห์ค่า MAE $\pm 15\%$ จะเห็นได้ว่าที่ความดันที่ (a) 8 บาร์ ,(b) 9 ,(c) 10 บาร์ จะมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 47.3% ,45.8% ,58.3% ตามลำดับ



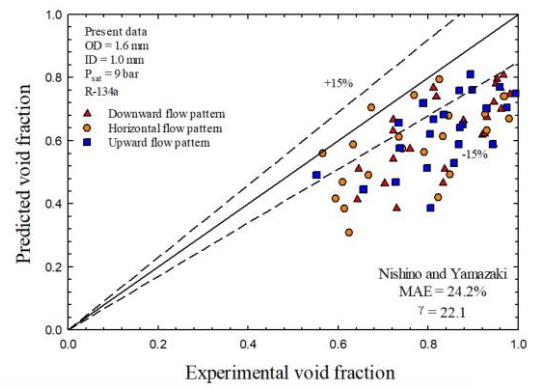
รูปที่ 4.24 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน
ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Cozp et al [12]

(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์ ,(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์ ,(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

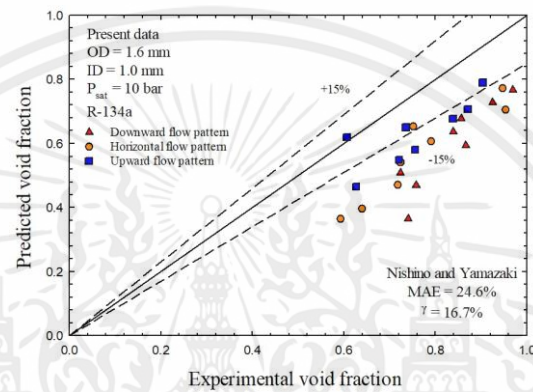
จากรูปที่ 4.24 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดทั้ง 3 ทิศทางสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Cozp et al [12] จากการวิเคราะห์ค่า MAE \pm 15% จะเห็นได้ว่าที่ความดันที่ (a) 8 บาร์ ,(b) 9 ,(c) 10 บาร์ จะมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 32.2% , 25.2% , 12.5% ตามลำดับ



(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์



(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์



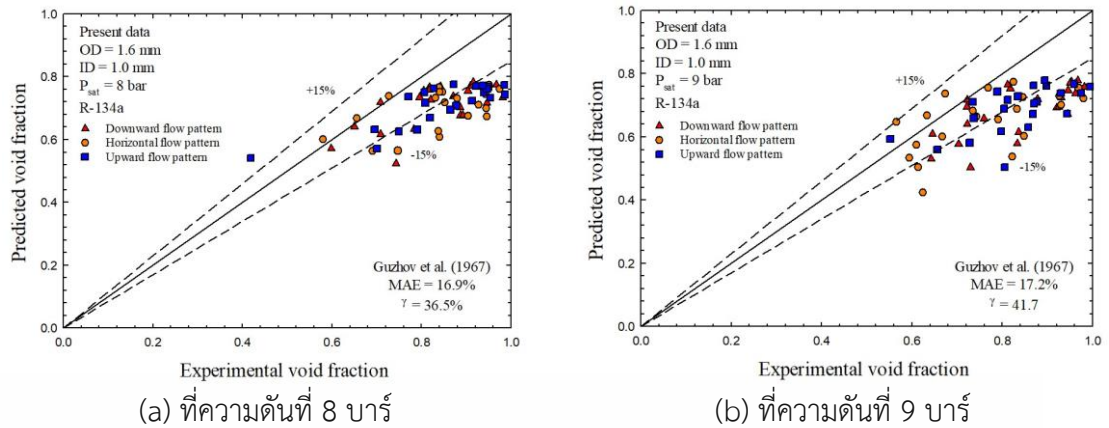
(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

รูปที่ 4.25 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน

ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Nishino and Yamazaki [13]

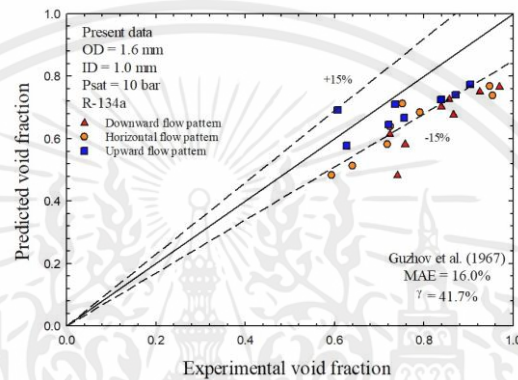
(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์ ,(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์ ,(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

จากรูปที่ 4.25 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดทั้ง 3 ทิศทางสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Cozp et al [12] จากการวิเคราะห์ค่า MAE $\pm 15\%$ จะเห็นได้ว่าที่ความดันที่ (a) 8 บาร์ ,(b) 9 ,(c) 10 บาร์ จะมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 27.5% , 24.2% , 16.7% ตามลำดับ



(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์

(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์



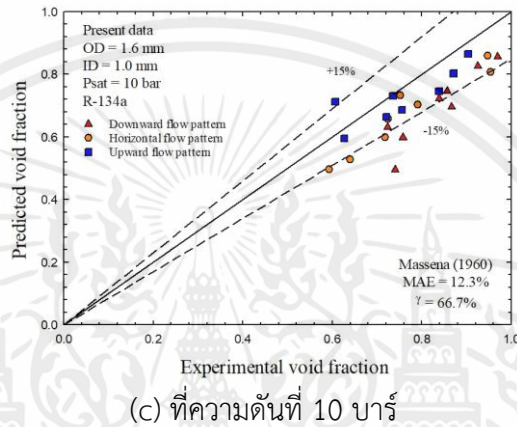
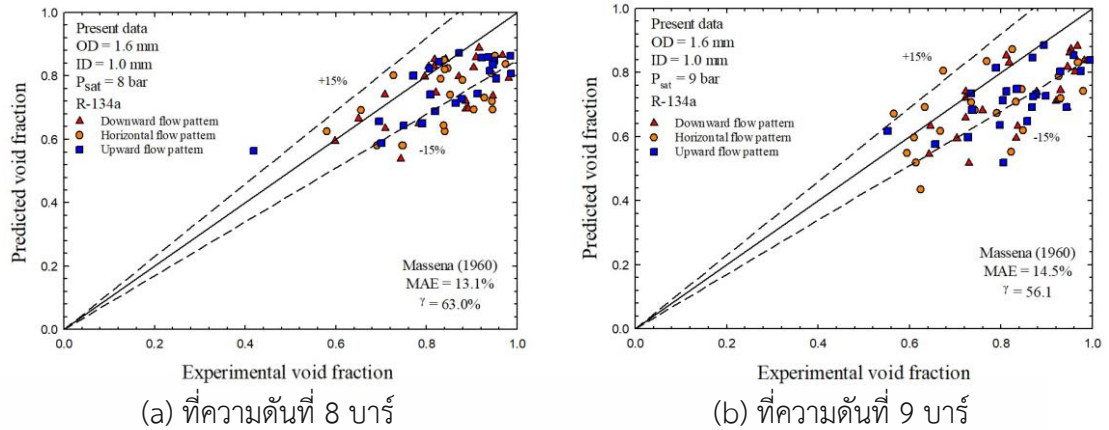
(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

รูปที่ 4.26 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน
ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Guzhov et al (1967) [15]

(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์ ,(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์ ,(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

จากรูปที่ 4.28 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดทั้ง 3 ทิศทางสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Guzhov et al (1967) [15] จากการวิเคราะห์ค่า MAE $\pm 15\%$ จะเห็นได้ว่าที่ความดันที่ (a) 8 บาร์ ,(b) 9 ,(c) 10 บาร์ จะมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 36.5% ,41.7% ,41.7% ตามลำดับ

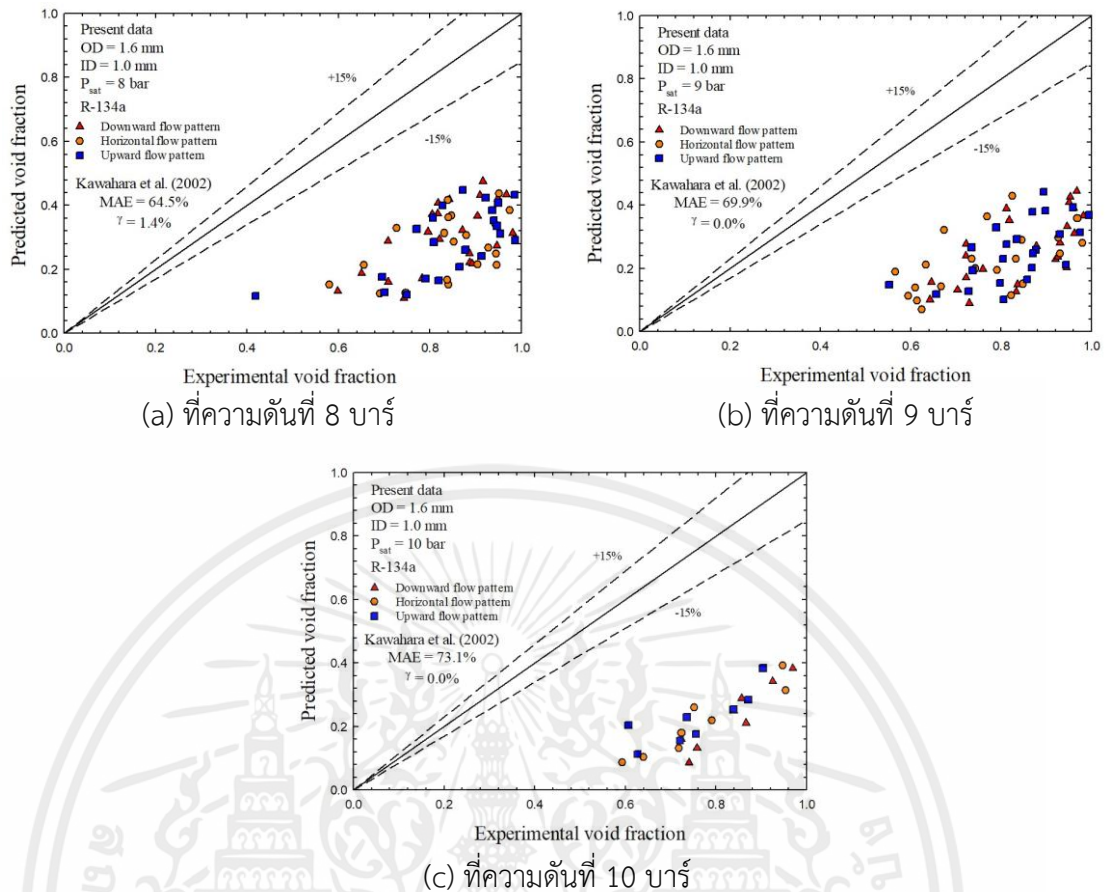
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน
 ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14]

(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์ ,(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์ ,(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

จากรูปที่ 4.27 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดทั้ง 3 ทิศทางสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14] จากการวิเคราะห์ค่า MAE $\pm 15\%$ จะเห็นได้ว่าที่ความดันที่ (a) 8 บาร์ ,(b) 9 ,(c) 10 บาร์ จะมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 63%, 51.1% ,66.7% ตามลำดับ



(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์

(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์

(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

รูปที่ 4.28 ข้อมูลการทำนายสัดส่วนช่องว่างแบ่งตามความดัน
ทำนายโดยสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Kawahara et al.(2002) [8]

(a) ที่ความดันที่ 8 บาร์ ,(b) ที่ความดันที่ 9 บาร์ ,(c) ที่ความดันที่ 10 บาร์

จากรูปที่ 4.26 แสดงถึงการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในท่อตรงขนาดไมโครที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขณะเกิดการเดือดทั้ง 3 ทิศทางสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Kawahara et al.(2002) [8] จากการวิเคราะห์ค่า MAE \pm 15% จะเห็นได้ว่าที่ความดันที่ (a) 8 บาร์ ,(b) 9 ,(c) 10 บาร์ จะมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 1.4% ,0.0% ,0.0% ตามลำดับ พบว่ามีค่าความเบี่ยงเบนค่อนข้างสูงจึงทำให้ไม่มีค่าความแม่นยำการทำนายสัดส่วนช่องว่างในงานวิจัยนี้

ดังนั้นจากรูปที่ 4.21-4.28 นั้นในการเทียบสหสัมพันธ์กับสัดส่วนช่องว่างในท่อขนาดไมโครที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรขณะเกิดการเดือดโดยแบ่งจากความต่างของความดันทั้ง 8, 9 และ 10 บาร์พบว่าสหสัมพันธ์ที่ดีที่สุดทั้ง 3 ความดันในการทำนายสัดส่วนช่องว่างทั้ง 3 ทิศทางการไหลที่มีความแม่นยำดีที่สุดคือสหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model และสหสัมพันธ์ที่ทำนายได้แม่นยำรองลงมาคือสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Massena (1960) [14], Chisolm (1983) [11] , Armand (1946) [10], Guzhov et al [15], Cozp et al. [12] , Nishino and Yamazaki [13] และ Kawahara et al. (2002) [8] ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจากการวิเคราะห์การหาค่าสัดส่วนช่องว่างเพื่อทำนายกับสหสัมพันธ์ ทั้ง 8 คือสหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model และสหสัมพันธ์ของนักวิจัย Armand (1946), Chisholm (1983), Cozp et al., Nishino and Yamazaki, Kawahara (2002), Massena (1960), Guzhov et al. โดยจะวิเคราะห์กับข้อมูลสัดส่วนช่องว่าง 157 ชุดข้อมูลของการไหลสองสถานะภายใต้สภาวะการไหลแบบเดือด R-134a ภายในขนาดท่อ 1 มิลลิเมตร ในทิศทางการไหลทั้ง 3 ทิศทางการไหลคือ การไหลในแนวนอน การไหลขึ้นในแนวตั้ง และการไหลลงในแนวตั้ง สำหรับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เทียบกับสหสัมพันธ์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

จากการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างจากการทำนายกับสหสัมพันธ์ทั้ง 8 สหสัมพันธ์ โดยแบ่งการเทียบในเงื่อนไขอุณหภูมิ ทิศทางการไหลและความดันเพื่อดูความแม่นยำของการทำนายว่าแต่ละเงื่อนไขมีผลกับการทำนายหรือไม่ พบว่า สหสัมพันธ์ที่สามารถทำนายสัดส่วนช่องว่างได้ดีที่สุดทั้ง 3 เงื่อนไข คือสหสัมพันธ์พื้นฐาน Homogeneous flow model เนื่องจากในการเปรียบเทียบค่า MAE ± 15 นั้นมีค่า MAE เฉลี่ยอยู่ที่ 9.8% และมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 78.89% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ามีค่าเบี่ยงเบนน้อยมาก และมีค่าความแม่นยำมากที่สุดในการทำนายสัดส่วนช่องว่างของงานวิจัยนี้ เมื่อเทียบกับอีก 7 สหสัมพันธ์

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. ควรทำการศึกษาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างเพิ่มเติม เพื่อสะดวกต่อการวิเคราะห์
2. หากมีสหสัมพันธ์ ใหม่เกิดขึ้นในอนาคตควรนำสหสัมพันธ์ใหม่เปรียบเทียบเพิ่มเติม

บรรณานุกรม

- [1] Mehendale, S. S., Jacobim A. M., and Shah, R. K. (2000). Fluid flow and heat transfer at micro and meso-scales with application to heat exchanger design. **Applied Mechanical Review** 53, 7 (July): 175-193.
- [2] Kandlikar, S. G. (2002). Fundamental issues related to flow boiling in mini-channels and microchannels. **Experimental Thermal and Fluid Science** 26,2-4 (June): 389-407.
- [3] Gardenghi et al. (2020). Overview of Void fraction Measurement Techniques, Databases and Correlations for Two-Phase Flow in Small Diameter Channels. **Fluids** 2020, 5(4) 216.
- [4] Sira Sairsorn, Somchai Wongwises (2015). Adiabatic two-phase flow gas-liquid flow behaviors during upward flow in a vertical circular micro-channel. **Experimental Thermal and Fluid Science** 69 (2015) 158-168.
- [5] Saisorn et al (2021). An investigation of horizontal and vertical flow boiling in a single channel with a confinement number beyond the threshold of micro-scale flow. **Physics of Fluids** 33, 113302 (2021).
- [6] Yu Xu, Xiande Fang (2014). Correlations of void fraction for two-phase refrigerant flow in pipes. **Applied Thermal Engineering** 64 (2014) 242-251.
- [7] Marcin Pietrzak, Malgorzata Placzek (2019). Void fraction predictive methods in two-phase flow across a small diameter channel. **International Journal of Multi phase Flow** 121 (2019) 103115.

- [8] A. Kawahara, P.M.-Y. Chung, M. Kawaji (2002). Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in microchannel. **International Journal of Multiphase Flow** 28 (2002) 1411–1435
- [9] P.M.-Y. Chung, M. Kawaji, The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannels, *Int. J. Multiphase Flow* 30 (2004) 735-761.
- [10] Armand, A.A. (1946). The Resistance During The Movement of a Two-Phase System in Horizontal Pipes. **Izvestia Vses. Teplotekh.** Inst., 1, 16-23.
- [11] D. Chisholm (1972). Pressure gradients due to friction during the flow of evaporation two-phase mixtures in smooth tubes and channels. **Int.J. Heat Mass Trans/er.** Vol. 16. pp. 347-358. Pergamon Press 1973. Printed in Great Britain
- [12] V. Czop, D. Barbier, S. Dong (1994). Pressure drop, void fraction and shear stress measurements in an adiabatic two-phase flow in a coiled tube. **Nuclear Engineering and Design** 149 (1994) 323-333
- [13] Haruo Nishino and Yasaburo Yamazaki (1963). A New Method of Evaluating Steam Volume Fractions in Boiling Systems.
- [14] Guodong Xia, Bo Cai, Lixin Cheng, Zhipeng Wang, Yuting Jia (2018). Experimental study and modelling of average void fraction of gas-liquid two-phase flow in a helically coiled rectangular channel. **Experimental thermal and Fluid Science** 94 (2018) 9-22

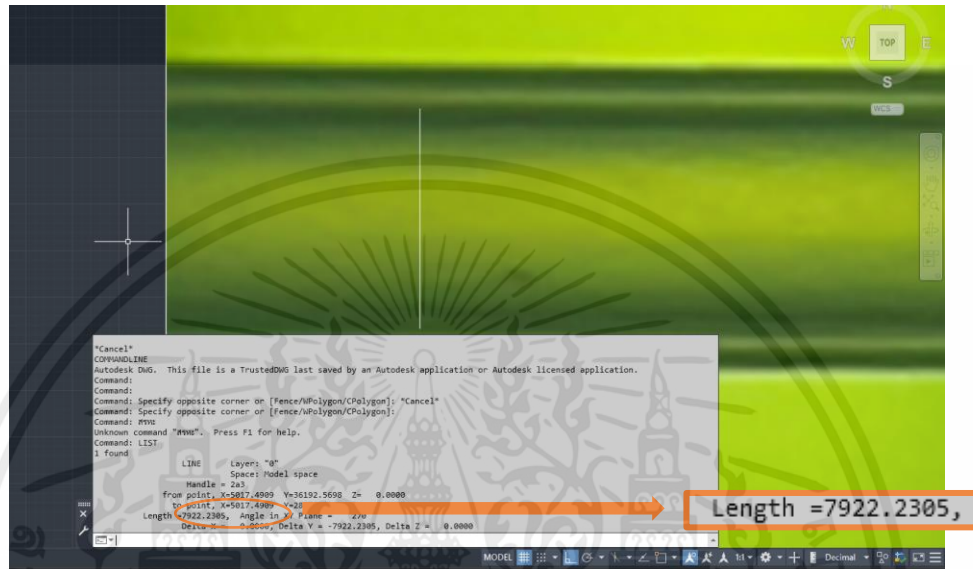
ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

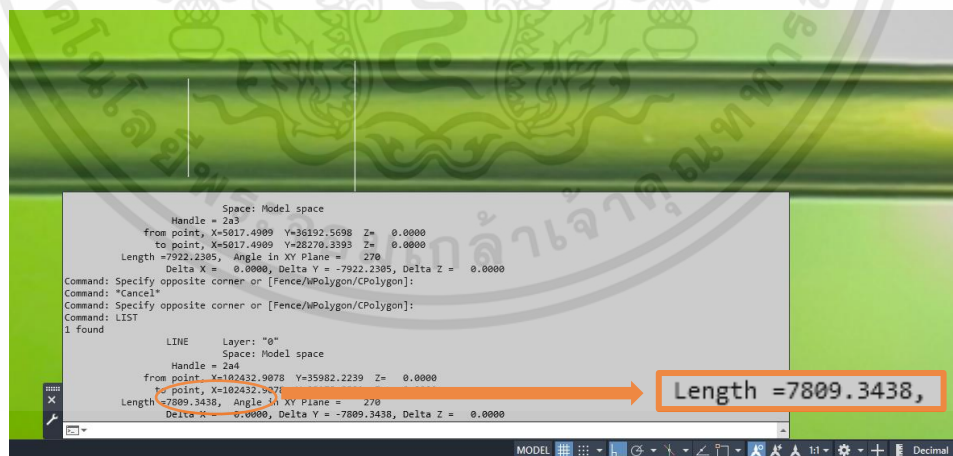
ข้อเสนอแนะเรื่องผลของการหักเหของแสงที่เกิดในท่อทรงกระบอก

การวิเคราะห์ uncertainty ของความยาวในแนวรัศมีท่อในกรณีที่เป็นท่อเปล่า (มีเฉพาะอากาศอยู่ภายในท่อซึ่งไม่มีการหักเหของแสงภายในท่อ)



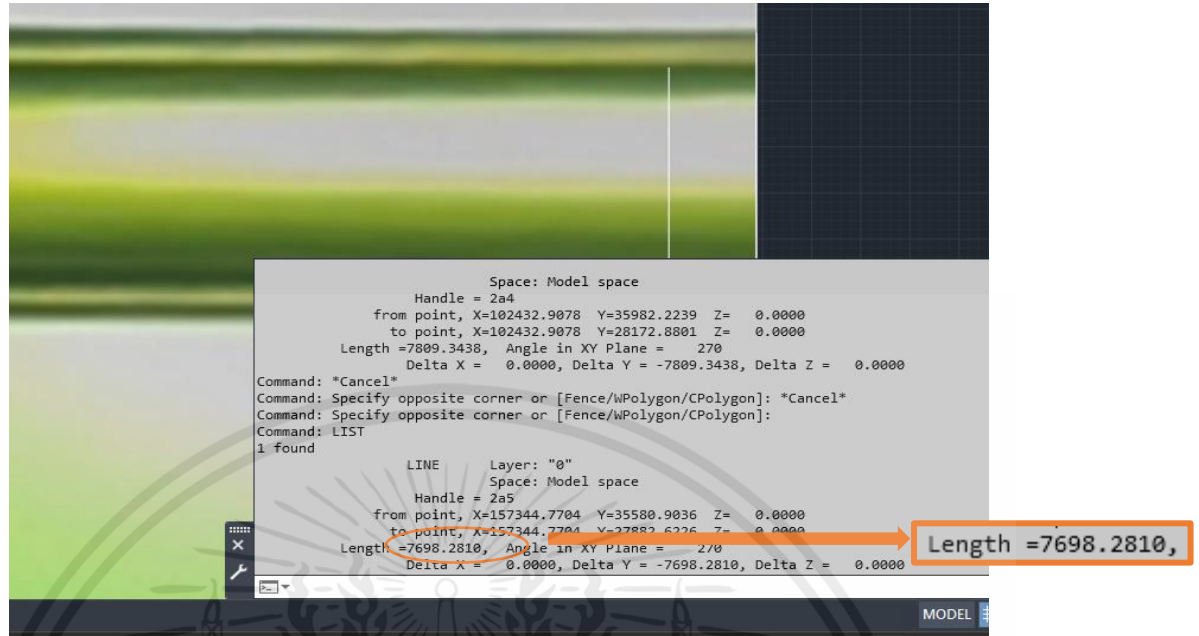
รูปที่ 1 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกส่วนหัว

จากรูปที่ 1 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกส่วนหัว ในกรณีที่เป็นท่อเปล่า โดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ที่ 7922.2305



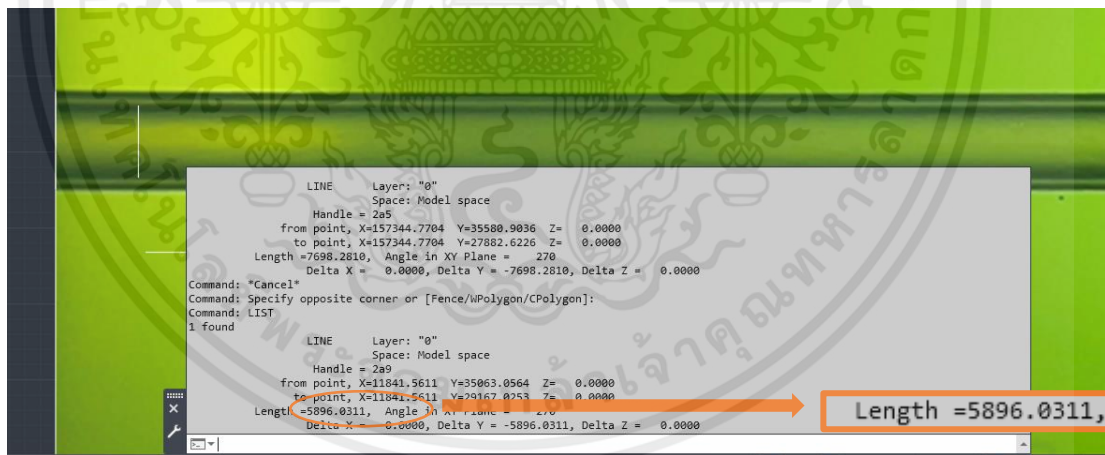
รูปที่ 2 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกบริเวณกลางท่อ

จากรูปที่ 2 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกบริเวณกลางท่อ ในกรณีที่เป็นท่อเปล่า โดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ที่ 7809.3438



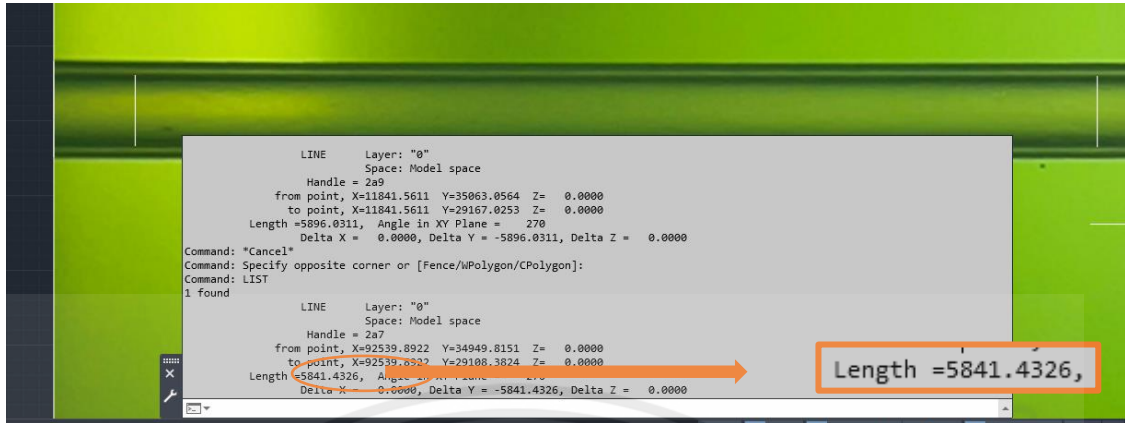
รูปที่ 3 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกบริเวณท้ายท่อ

จากรูปที่ 3 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกบริเวณท้ายท่อ ในกรณีที่เป็นท่อเปล่า โดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ที่ 7698.2810



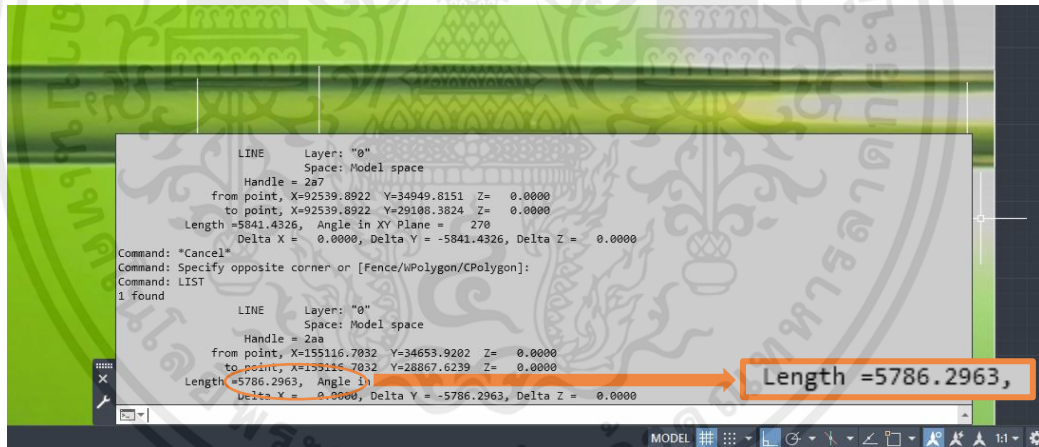
รูปที่ 4 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณส่วนหัว

จากรูปที่ 4 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณหัว ของท่อในกรณีที่เป็นท่อเปล่า โดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ที่ 5896.0311



รูปที่ 5 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณกลางท่อ

จากรูปที่ 5 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณกลางท่อ ของท่อในกรณีที่เป็นท่อเปล่า โดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ที่ 5841.4326



รูปที่ 6 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณท้ายท่อ

จากรูปที่ 6 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณท้ายท่อ ของท่อในกรณีที่เป็นท่อเปล่าโดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ที่ 5786.2963

หาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อทั้ง 3 ช่วงในกรณีที่เป็นท่อเปล่า

จากการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อทั้ง 3 ช่วงด้วยโปรแกรม AutoCAD ในกรณีที่เป็นท่อเปล่าให้ทำการหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางที่ได้จากการวัดทั้ง 3 ช่วง

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยภายนอกท่อจาก AutoCAD

$$OD_{avg} = \frac{7922+7809+7698}{3}$$

$$OD_{avg} = 7809 \text{ mm}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยภายในท่อจาก AutoCAD

$$ID_{avg} = \frac{5896+5841+5786}{3}$$

$$ID_{avg} = 5841 \text{ mm}$$

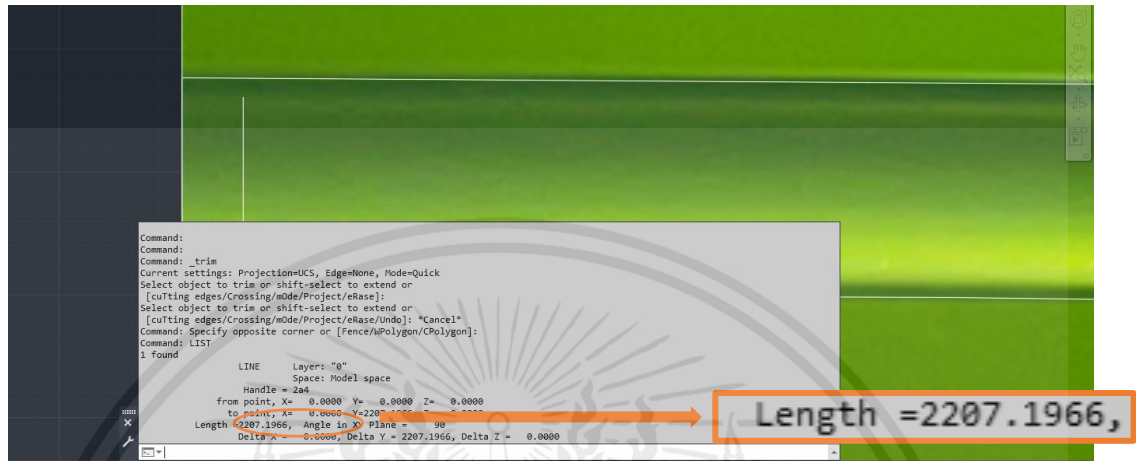
เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อที่ได้จากการวัดด้วยซอฟต์แวร์ AutoCAD เทียบกับขนาดจริง

$$ID_t = \frac{ID_{avg} \times 1.6}{OD_{avg}}$$

$$ID_t = \frac{5841 \times 1.6}{7809}$$

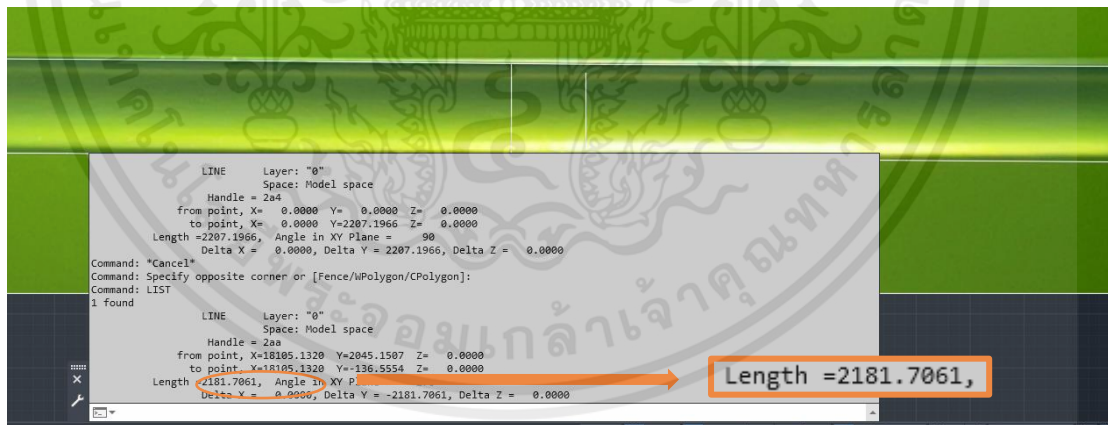
$$ID_t = 1.196 \text{ mm}$$

การวิเคราะห์ Uncertainty ของความยาวในแนวรัศมีท่อ ในกรณีที่เป็นท่อที่มีน้ำ (ซึ่งจะมีการหักเหของแสงภายในท่อ)



รูปที่ 7 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกส่วนหัว

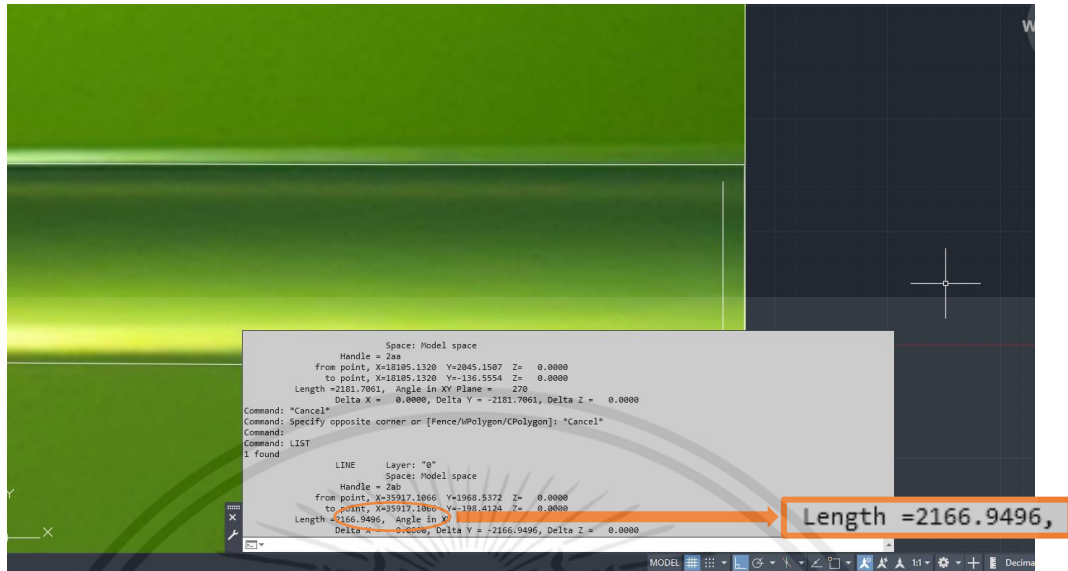
จากรูปที่ 7 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกส่วนหัว ในท่อที่มีการเติมน้ำเข้าไป โดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ที่ 2207.1966



รูปที่ 8 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกบริเวณกลางท่อ

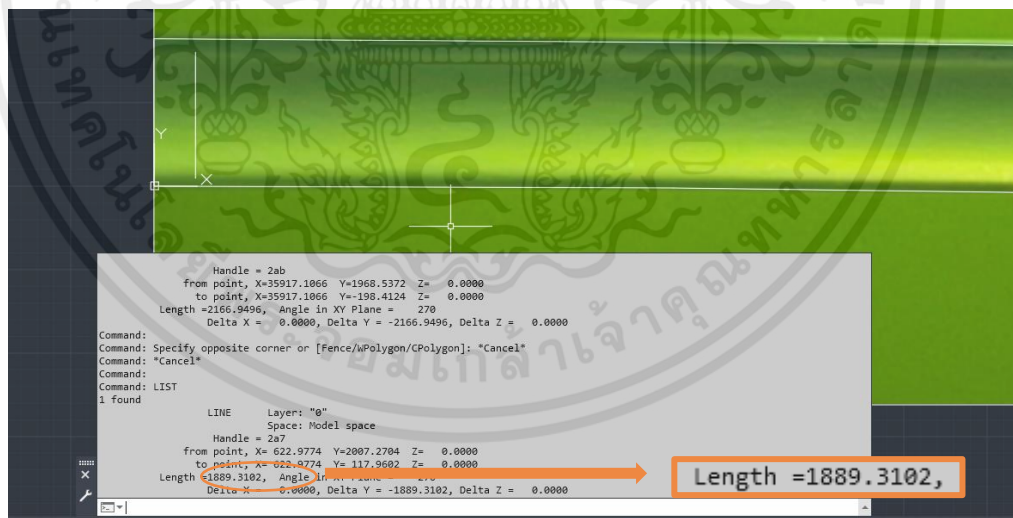
จากรูปที่ 8 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกบริเวณกลางท่อ ในท่อที่มีการเติมน้ำเข้าไป โดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ที่ 2181.7061

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกบริเวณท้ายของท่อ

จากรูปที่ 9 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกบริเวณท้ายของท่อ ในท่อที่มีการเติมน้ำเข้าไปโดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ ที่ 2166.9496



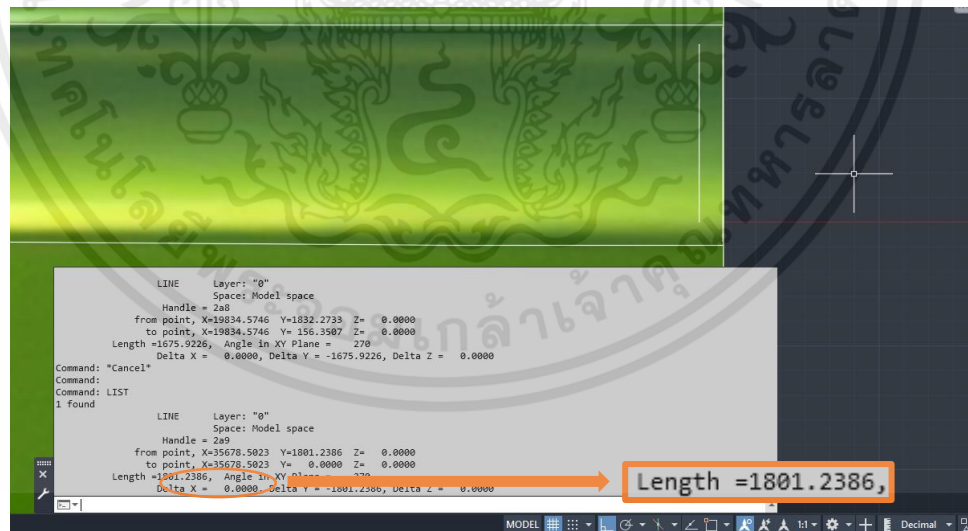
รูปที่ 10 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในส่วนหัว

จากรูปที่ 10 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในส่วนหัวของท่อ ในท่อที่มีการเติมน้ำเข้าไปโดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ที่ 1889.3102



รูปที่ 11 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณกลางท่อ

จากรูปที่ 11 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณกลางท่อ ในท่อที่มีการเติมน้ำเข้าไป โดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ที่ 1675.9226



รูปที่ 12 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณท้ายท่อ

จากรูปที่ 12 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณท้ายของท่อ ในท่อที่มีการเติมน้ำเข้าไป โดยในตัวอย่างนี้จะได้อยู่ที่ 1801.2386

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อทั้ง 3 ช่วง

จากการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อทั้ง 3 ช่วงด้วยโปรแกรม AutoCAD ให้ทำการหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางที่ได้จากการวัดทั้ง 3 ช่วง

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยภายนอกท่อจาก AutoCAD

$$OD_{avg} = \frac{2207 + 2181 + 2166}{3}$$

$$OD_{avg} = 2184 \text{ mm}$$

$$ID_{avg} = \frac{1889 + 1675 + 1801}{3}$$

$$ID_{avg} = 1788 \text{ mm}$$

เส้นผ่าศูนย์กลางที่ได้จากการวัดด้วยซอฟต์แวร์ AutoCAD เทียบกับขนาดจริง

$$ID_t = \frac{ID_{avg} \times 1.6}{OD_{avg}}$$

$$ID_t = \frac{1788 \times 1.6}{2184}$$

$$ID_t = 1.309 \text{ mm}$$

ดังนั้น การหักเหของแสงที่ผ่านท่อและของเหลว ทำให้ขนาดภาพในแนวนอนมี ขยายใหญ่ขึ้น “1.309 เท่า” เนื่องด้วย การวิเคราะห์ในงานของผู้เขียน ไม่ได้พิจารณาประเด็นที่เกี่ยวข้องกับผลของการหักเหของแสงที่มีต่อภาพถ่าย ดังนั้นจึงขอเสนอแนะว่าควรนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ในอนาคตด้วย โดยการใช้สเกล 1:1.3 สำหรับความยาวในแนวนอนท่อ แต่อย่างไรก็ตาม ผู้เขียนได้วิเคราะห์ค่า uncertainty เพื่อประกอบเป็นข้อมูลดังนี้

ค่าจริงได้จากการวัดจาก Vernier Caliper

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ : $D_{ID} = 1 \text{ mm}$

ความยาวท่อที่วิเคราะห์ : $L = 30 \text{ mm}$

Uncertainty

- ท่อจริงที่ได้จากการวัดจาก Vernier Caliper

$$\text{ปริมาตร ของท่อจริง} : V_{t,ID} = \left(\frac{\pi D_{t,ID}^2}{4} \right) \times L = \frac{\pi(1)^2}{4} \times 30 = 23.5619 \text{ mm}^3$$

Uncertainty ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจริง : $\omega_{D,t} = \pm 0.05 \text{ mm}$

Uncertainty ของความยาวท่อ : $\omega_L = \pm 0.05 \text{ mm}$

- ท่อเปล่าที่ไม่มีการหักเหของแสงผ่านของเหลวภายในท่อ (จากการวัดใน AutoCAD)

$$\text{ปริมาตร} : V_{g,ID} = \left(\frac{\pi D_{g,ID}^2}{4} \right) \times L = \frac{\pi(1.196)^2}{4} \times 30 = 33.7034 \text{ mm}^3$$

Uncertainty ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเปล่า : $\omega_{D,g,ID} = \pm 0.196 \text{ mm}$

ค่า Uncertainty ของ ความยาวในแนวรัศมีท่อ คือ 0.196 mm หรือ $\left(\frac{0.196}{1} \right) \times 100\% = 19.6\%$

- ท่อที่มีน้ำอยู่ภายในท่อ (จากการวัดใน AutoCAD)

$$\text{ปริมาตรของท่อที่มีน้ำ} : V_{l,ID} = \left(\frac{\pi D_{l,ID}^2}{4} \right) \times L = \frac{\pi(1.309)^2}{4} \times 30 = 40.3729 \text{ mm}^3$$

Uncertainty ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีน้ำ : $\omega_{D,L,ID} = \pm 0.309 \text{ mm}$

ค่า Uncertainty ของ ความยาวในแนวรัศมีท่อ คือ 0.309 mm หรือ $\left(\frac{0.309}{1} \right) \times 100\% = 30.9\%$

Uncertainty ของปริมาตรท่อจริง ($\omega_{V_{t,ID}}$)

จาก

$$\omega_{V_{t,ID}} = \left[\left[\left(\frac{\partial V_{t,ID}}{\partial D_{ID}} \times \omega_{D,t} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{t,ID}}{\partial L} \times \omega_L \right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}$$
$$\therefore \omega_{t,ID} = \left[\left[\left(\frac{\pi D_{ID} \times L}{2} \right) (\omega_{D,t}) \right]^2 + \left[\left(\frac{\pi D_{ID}^2}{4} \right) (\omega_L) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

แทนค่า

$$\omega_{t,ID} = \left[\left[\left(\frac{\pi(1) \times (30)}{2} \right) (0.05) \right]^2 + \left[\left(\frac{\pi(1)^2}{4} \right) (0.05) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$
$$\omega_{t,ID} = [5.5517 + 0.0015421]^{\frac{1}{2}}$$
$$\omega_{t,ID} = \pm 2.3565 \text{ mm}^3 \quad (1)$$

ดังนั้น Uncertainty ของปริมาตรท่อจริงคือ $\pm 2.3565 \text{ mm}^3$ หรือ $\left(\frac{2.3565}{23.5619} \right) \times 100\% = 10.00\%$

Uncertainty ของปริมาตรท่อเปล่าที่ไม่มีการหักเหของแสง

จาก

$$\omega_{V_{g,ID}} = \left[\left(\frac{\partial V_{g,ID}}{\partial D_{g,ID}} \times \omega_{D_{g,ID}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{g,ID}}{\partial L} \times \omega_L \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \omega_{V_{g,ID}} = \left[\left[\left(\frac{\pi D_{ID}}{2} \times L \right) (\omega_{D_{g,ID}}) \right]^2 + \left[\left(\frac{\pi D_{ID}^2}{4} \right) (\omega_L) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

แทนค่า

$$\omega_{V_{g,ID}} = \left[\left[\left(\frac{\pi(1) \times (30)}{2} \right) (0.196) \right]^2 + \left[\left(\frac{\pi(1)^2}{4} \right) (0.05) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\omega_{V_{g,ID}} = [85.3089 + 0.0015421]^{\frac{1}{2}}$$

$$\omega_{V_{g,ID}} = \pm 9.2364 \text{ mm}^3 \quad (2)$$

ดังนั้น Uncertainty ของปริมาตรท่อเปล่าที่ไม่มีการหักเหของแสง คือ $\pm 9.2364 \text{ mm}^3$ หรือ

$$\left(\frac{9.2364}{23.5619} \right) \times 100\% = 39.2\%$$

Uncertainty ของปริมาตรท่อมีน้ำที่มีการหักเหของแสงผ่านของเหลวภายในท่อ

จาก

$$\omega_{V_{l,ID}} = \left[\left[\left(\frac{\partial V_{l,ID}}{\partial D_{ID}} \times \omega_{D_{l,ID}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{l,ID}}{\partial L} \times \omega_L \right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}$$
$$\therefore \omega_{V_{l,ID}} = \left[\left[\left(\frac{\pi D_{ID} \times L}{2} \right) (\omega_{D_{l,ID}}) \right]^2 + \left[\left(\frac{\pi D_{ID}^2}{4} \right) (\omega_L) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

แทนค่า

$$\omega_{v_{l,ID}} = \left[\left[\left(\frac{\pi(1) \times (30)}{2} \right) (0.309) \right]^2 + \left[\left(\frac{\pi(1)^2}{4} \right) (0.05) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$
$$\omega_{v_{l,ID}} = [212.0309 + 0.0015421]^{\frac{1}{2}}$$
$$\omega_{v_{l,ID}} = \pm 14.5613 \text{ mm}^2 \quad (3)$$

ดังนั้น Uncertainty ของปริมาตรท่อที่มีน้ำซึ่งมีการหักเหของแสงผ่านของเหลวภายในท่อ คือ $\pm 14.5613 \text{ mm}^3$ หรือ $\left(\frac{14.5613}{23.5619} \right) \times 100\% = 61.8\%$

Uncertainty Void fraction ของท่อเปล่าที่ไม่มีกักเก็บภายในท่อ

สมการ Void fraction ของท่อเปล่า (α_g)

$$\alpha_g = \frac{V_{g,ID}}{V_{t,ID}}$$

เมื่อ $\omega_{V_{t,ID}} = \pm 2.3565 \text{ mm}^3$ จาก (1)

$\omega_{V_{g,ID}} = \pm 9.2364 \text{ mm}^3$ จาก (2)

จะสามารถหาค่า Uncertainty α_g

จาก

$$\omega_{\alpha_t} = \left[\left(\frac{\partial \alpha_g}{\partial V_{g,ID}} \times \omega_{V_{g,ID}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_g}{\partial V_{t,ID}} \times \omega_{V_{t,ID}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \omega_{\alpha_g} = \left[\left[\left(\frac{1}{V_{t,ID}} \right) (\omega_{V_{t,ID}}) \right]^2 + \left[\left(\frac{V_{g,ID}}{V_{t,ID}} \right) (\omega_{t,ID}) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

แทนค่า

$$\omega_{\alpha_g} = \left[\left[\left(\frac{1}{23.5619} \right) (9.2364) \right]^2 + \left[\left(\frac{33.7034}{23.5619^2} \right) (2.3565) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\omega_{\alpha_g} = [0.1537 + 0.0205]^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \omega_{\alpha_g} = \pm 0.4174$$

ดังนั้น Uncertainty ของ Void fraction ท่อเปล่าที่ไม่มีกักเก็บของแสงภายในท่อ คือ ± 14.5613

Uncertainty Void fraction ของท่อน้ำซึ่งมีการหักเหของแสงผ่านของเหลวภายในท่อ

สมการ Void fraction (α_l)

$$\alpha_l = \frac{V_{l,ID}}{V_{t,ID}}$$

เมื่อ $\omega_{V_{l,ID}} = \pm 2.3565 \text{ mm}^3$ จาก (1)

$\omega_{V_{g,ID}} = \pm 14.5613 \text{ mm}^3$ จาก (3)

จะสามารถหาค่า Uncertainty α_l

จาก

$$\omega_{\alpha_l} = \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial V_{l,ID}} \times \omega \right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial V_{t,ID}} \times \omega_V \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \omega_{\alpha_l} = \left[\left[\left(\frac{1}{V_{t,ID}} \right) (\omega_{V_{t,ID}}) \right]^2 + \left[\left(\frac{V_{g,ID}}{V_{t,ID}} \right) (\omega_{t,ID}) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

แทนค่า

$$\omega_{\alpha_l} = \left[\left[\left(\frac{1}{23.5619} \right) (14.5613) \right]^2 + \left[\left(\frac{40.3729}{23.5619^2} \right) (2.3565) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\omega_{\alpha_l} = [0.3819 + 0.0294]^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \omega_{\alpha_l} = \pm 0.6413$$

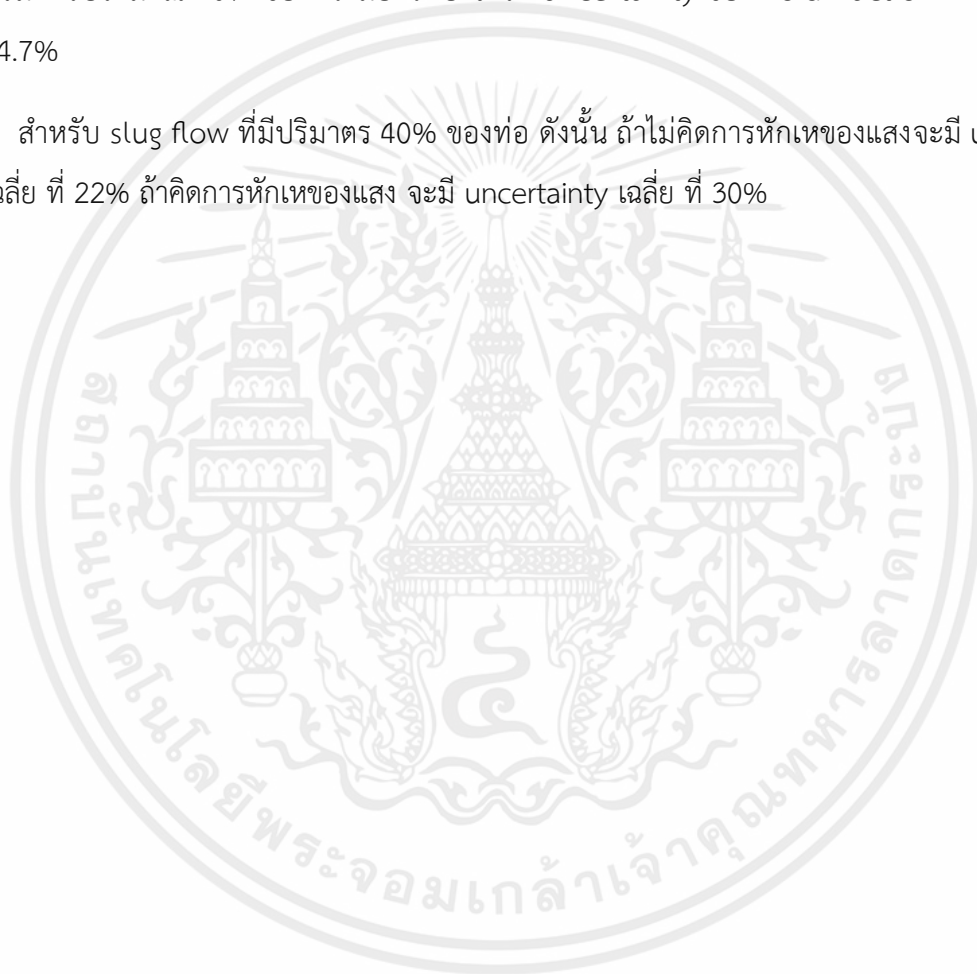
ดังนั้น Uncertainty ของ Void fraction ท่อน้ำซึ่งการหักเหของแสงภายในท่อ คือ ± 14.5613

จากสมการข้างต้นพบว่าหาก Slug flow มีปริมาตรประมาณ 40% นั้น

ถ้าไม่คิดการหักเหของแสง หรือดูเฉพาะความเพี้ยนของสายตา คิด uncertainty ของ void fraction ต่ำสุด สำหรับกรณีที่ slug flow มีปริมาตรประมาณ 40% ของความยาวท่อ จะได้ uncertainty ของ void fraction ต่ำสุดประมาณ 15.68%

ถ้าคิดการหักเหของแสงคิด uncertainty ของ void fraction ต่ำสุด สำหรับกรณีที่ slug flow มีปริมาตรประมาณ 40% ของความยาวท่อ จะได้ uncertainty ของ void fraction ต่ำสุดประมาณ 24.7%

สำหรับ slug flow ที่มีปริมาตร 40% ของท่อ ดังนั้น ถ้าไม่คิดการหักเหของแสงจะมี uncertainty เฉลี่ย ที่ 22% ถ้าคิดการหักเหของแสง จะมี uncertainty เฉลี่ย ที่ 30%



ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล	นางสาวมันทนา กันทาพันธ์
วัน เดือน ปี	19 ธันวาคม พ.ศ. 2543
ภูมิลำเนา	จังหวัดนราธิวาส
ที่อยู่	99/30 ถนน ประชาวิวัฒน์ ซอย17/11 ตำบล สุโหงโกลก อำเภอ สุโหงโกลก จังหวัดนราธิวาส 96120

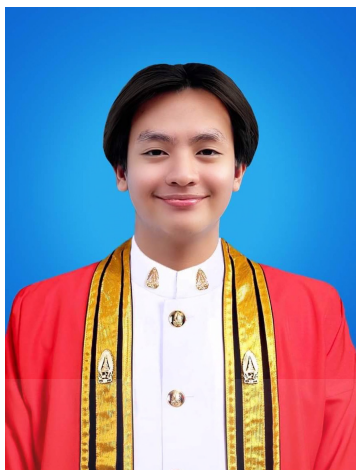
ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2562 จากโรงเรียนสุโหงโกลก
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2565 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ผลงานและกิจกรรม

- เข้าร่วมโครงการศึกษาดูงาน ณ บริษัท แมคคานิคัล แอนด์ ฟู้ด โพรเซส เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด 51/14 หมู่ 1 ถนนบางนา - ตราด (กม.36) ตำบลหอมศีล อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา 24180 โทร. 038-989606 ถึง 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-นามสกุล	นายศักดิ์สิทธิ์ บุญดีเรก
วัน เดือน ปี	21 กรกฎาคม พ.ศ. 2543
ภูมิลำเนา	จังหวัดตรัง
ที่อยู่	4/5 ถนน พัทลุง ตำบล ทับเที่ยง อำเภอ เมือง จังหวัดตรัง 92000

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2562 จากโรงเรียนวิเชียรมาตุ จังหวัดตรัง
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2565 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ผลงานและกิจกรรม

- เข้าร่วมโครงการศึกษาดูงานบริษัท จีไอเอส กรุ๊ป จำกัด ณ บริษัท จีไอเอส กรุ๊ป จำกัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้