

แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายความหนาของฟิล์มน้ำ
บนพื้นผิวสัมผัสอาหาร

A CFD MODEL TO SIMULATE THE THICKNESS OF FALLING WATER FILM
ON FOOD CONTACT SURFACE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายความหนาของฟิล์มน้ำ
บนพื้นผิวสัมผัสอาหาร

A CFD MODEL TO SIMULATE THE THICKNESS OF FALLING WATER FILM
ON FOOD CONTACT SURFACE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A CFD MODEL TO SIMULATE THE THICKNESS OF FALLING WATER FILM
ON FOOD CONTACT SURFACE



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2560

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายความหนาของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวสัมผัส
อาหาร

A CFD model to simulate the thickness of falling water film on food contact
surface

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติศักดิ์ ศรีชัยอํารง รหัสประจำตัว 57010105
2. นางสาวณัฐนรี พรหมมา รหัสประจำตัว 57010428
3. นางสาวนภาพร สุธนรัชช์ รหัสประจำตัว 57010671



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ดร.นวกัทร่า หนูนาค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายความหนาของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวสัมผัสอาหาร
นักศึกษา	นายกิตติศักดิ์ ศรีชัยธำรง นางสาวณัฐนรี พรหมมา นางสาวนวพร สุธนรักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.นวกัทธา หนูนา
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD) เพื่อทำนายความหนาของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวสัมผัสอาหารที่วางตัวในมุม 30 และ 60 องศา กับแนวราบ ที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง (ฟิล์มมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ) และ 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง (ฟิล์มมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน) โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นตัวแทนของพื้นผิว ทำการจำลองการไหลของฟิล์มน้ำโดยใช้แบบจำลอง SST k- ω ร่วมกับแบบจำลอง VOF และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบความเร็วของฟิล์มน้ำที่ได้จากการจำลองและความหนาฟิล์มที่คำนวณได้จากผลการจำลองความเร็วกับความหนาของฟิล์มน้ำที่ได้จากชุดทดลอง ผลการจำลองปรากฏว่าแบบจำลองสามารถจำลองความเร็วเฉลี่ยของฟิล์มน้ำที่ระยะ 25 ถึง 50 เซนติเมตรได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.791%

Project Title	A CFD model to simulate the thickness of falling water film on food contact surface	
Students	Mr.Kittisak	Srichaitamrong
	Ms.Natnaree	Phromma
	Ms.Nawaporn	Suthanarak
Project Advisor	Assoc. Prof. Dr.Navaphattra Nunak	
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Food Engineering	
Academic Year	2017	

ABSTRACT

This project proposes the computational fluid dynamic (CFD) to simulate the thickness of falling water film occurred on the surface inclination at 30 and 60 degrees at the flow rate of 100 liters per hour (laminar film flow) and 200 and 300 liters per hour (turbulent film flow). The aluminum plate was used as a representative of surface. The film thickness was calculated from the film velocity simulated by the CFD using the SST k- ω model with VOF model and was compared with the result obtained from the experimental unit. It was found that the film velocity simulated from the CFD with a proposed model and the film thickness gave a good agreement with the experimental data at the distance of 25 to 50 centimeters from the original point, especially, in the laminar film flow with the maximum relative error 0.791%.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความรู้และความอนุเคราะห์จาก รศ. ดร. นวภัทรา หนูนาท อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหา รวมถึงอุปสรรคต่าง ๆ ในระหว่างการทำโครงการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภายในสาขาวิศวกรรมอาหารทุกคน ที่ได้ให้ความสะดวกในการยื่นอุปกรณ์และห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณนางสาวเมธินี สงไทย ที่ให้คำปรึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลการทดลอง

ขอขอบคุณ รศ. ดร. ทวีพล ชื้อสัจย์ และภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุมที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ รวมถึงอุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย จนคณะผู้วิจัยสามารถทำปริญญาบัตรฉบับนี้ได้เสร็จสิ้น

ขอขอบคุณนายพนธกร ศิริปริญญาพันธ์ ที่ให้คำปรึกษาการใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT สำหรับงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจให้การสนับสนุนตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาทุกคนที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือจนโครงการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

คณะผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บททำ	1
1.1 หลักการ เหตุผล และที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร	3
2.1 การไหลของฟิล์มของเหลว	3
2.1.1 การไหลผ่านแผ่นราบ	3
2.1.2 การก่อตัวและลักษณะการไหลของฟิล์ม	4
2.2 ความหนาฟิล์ม	6
2.3 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	6
2.3.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ	7
2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ω	7
2.3.3 แบบจำลองหลายสถานะ	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.4.1 การทำความสะอาดโดยฟิล์มของเหลว	8
2.4.2 การวัดความหนาของฟิล์มของเหลว	9
2.4.3 การจำลองฟิล์มของเหลว	9
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และการทดลอง	11
3.1 ชุดทดลอง	11
3.1.1 อุปกรณ์ทดลอง	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 การทดสอบการทำงานของชุดทดลอง	12
3.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	13
3.2.1 การหาความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายที่เหมาะสม	17
3.2.2 การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน	19
3.3 การทดลอง	20
3.3.1 การวัดความเร็วของฟิล์มน้ำโดยใช้หุ่นลอยน้ำ	20
3.3.2 การวัดความหนาของฟิล์มน้ำจากชุดทดลอง	21
3.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเร็วและความหนาของฟิล์มน้ำจากผลการจำลอง	23
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	
3.4 การเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	25
4.1 ความถูกต้องของแบบจำลองจากการเปรียบเทียบความเร็ว	25
4.2 ความหนาฟิล์มที่คำนวณจากผลการจำลอง	28
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	31
5.1 สรุปผลการวิจัย	31
5.2 ข้อเสนอแนะ	31
บรรณานุกรม	32
ภาคผนวก	34

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลอง	12
3.2 รายละเอียดการสร้างโครงสร้างตาข่าย	14
3.3 พารามิเตอร์ที่ป้อนในโปรแกรม ANSYS FLUENT	17
3.4 การเปรียบเทียบระดับความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายในการทำนายความหนาของฟิล์มน้ำด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	19
3.5 การเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนในการทำนายความหนาของฟิล์มน้ำด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	20
4.1 ความเร็วเฉลี่ยของฟิล์มน้ำจากการจำลองและชุดทดลอง	27
4.2 การเปรียบเทียบความหนาเฉลี่ยของฟิล์มน้ำจากการจำลองและชุดทดลอง	30



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การไหลชั้นขอบเขต	3
2.2 การก่อตัวของฟิล์ม	4
2.3 ลักษณะการไหลของฟิล์ม	5
3.1 ชุดทดลอง	11
3.2 การวางตัวของพื้นผิวทดสอบทำมุมกับแนวราบ และระยะการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับ ภาพ	13
3.3 โครงสร้างตาข่ายและรูปทรงแบบจำลองการไหลของฟิล์มน้ำ	16
3.4 โครงสร้างตาข่าย (ก) โครงสร้างตาข่ายไร้ระเบียบมีความละเอียดระดับ 1 (ข) โครงสร้างตาข่ายชนิด Tetrahedral มีความละเอียดระดับ 2 (ค) โครงสร้างตาข่ายชนิด Tetrahedral มีความละเอียดระดับ 3	18
3.5 การวัดความเร็วของฟิล์มน้ำ (ก) ทุ่นลอย ณ ตำแหน่งเริ่มต้น (ข) ทุ่นลอย ณ ตำแหน่ง ที่ 1 (ค) ทุ่นลอย ณ ตำแหน่งที่ 2 (ง) ทุ่นลอย ณ ตำแหน่งสุดท้าย	21
3.6 การติดตั้งไมโครมิเตอร์ (ก) สำหรับการวัดความหนาฟิล์มน้ำ (ข) บริเวณตรงกลางของ พื้นผิวทดสอบ	22
3.7 ตำแหน่งการวัดความหนาของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวทดสอบ	22
3.8 ผลการจำลองของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	23
4.1 ผลการจำลองความเร็วของฟิล์มน้ำ (ก) มุม 30 องศา (ข) มุม 60 องศา	26
4.2 ความหนาของฟิล์มน้ำที่คำนวณจากผลการจำลอง (ก) มุม 30 องศา (ข) มุม 60 องศา	28

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการ เหตุผล และที่มาของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นพื้นผิวสัมผัสอาหาร ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการแปรรูปอาหาร เนื่องจากเมื่อผ่านการใช้งานอาจเป็นแหล่งสะสมของสิ่งสกปรกและจุลินทรีย์ก่อโรค ทำให้เกิดการปนเปื้อนที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และความปลอดภัยของผู้บริโภค กรรมวิธีในการทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งที่จะช่วยลดการสะสมของสิ่งสกปรกและจุลินทรีย์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและความปลอดภัยต่อการบริโภคมากยิ่งขึ้น

วิธีการทำความสะอาดแบบไม่ถอดชิ้นส่วน (Cleaning in place, CIP) เป็นการทำความสะอาดที่ไม่ต้องถอดชิ้นส่วนอุปกรณ์ ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย (Friis, 2002) เหมาะสำหรับการทำความสะอาดท่อและถังขนาดใหญ่ในระบบปิด โดยวิธีการทำความสะอาดและการเลือกใช้สารทำความสะอาดจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของอุปกรณ์และลักษณะการเกาะติดของคราบ ซึ่งการทำความสะอาดโดยใช้น้ำเพียงอย่างเดียวในการชะคราบออก เรียกว่า Washing in place (WIP) ทั่วไปจะใช้ในการทำความสะอาดในช่วงแรกของการล้าง หากเป็นการทำความสะอาดภายในถัง จะนิยมเติมน้ำลงไปภายในถังและปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง หรืออาจเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการใช้ไบกเวนในการทำให้น้ำสัมผัสกับคราบได้ดียิ่งขึ้น แต่หากเป็นการทำความสะอาดในถังขนาดใหญ่ การเติมน้ำภายในถังจะใช้ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงนิยมติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมในการทำความสะอาด โดยอุปกรณ์เพิ่มเติมนี้จะแตกต่างกันไปตามลักษณะการเกาะติดของคราบ เช่น การใช้หัวฉีดนิยมใช้กับคราบที่ต้องการแรงกระแทกในการทำความสะอาด และการใช้สเปรย์บอลนิยมใช้กับคราบที่ต้องการแรงเฉือนและเวลาในการทำความสะอาด เป็นต้น (Goode, 2013)

ในถังพักหรือถังผสมผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนอาจก่อให้เกิดคราบสกปรกที่มีลักษณะเป็นของแข็งหรือของเหลวที่มีความหนืดสูงเกาะติดภายในถัง ซึ่งไม่สามารถทำความสะอาดได้ด้วยการใช้การฉีดพ่นน้ำ เช่น นม เวียโปรตีน เป็นต้น การทำความสะอาดลักษณะนี้ควรใช้สเปรย์บอลในการทำความสะอาด โดยสเปรย์บอลจะทำการฉีดพ่นน้ำไปกระทบบริเวณภายในถัง แล้วก่อให้เกิดฟิล์มของเหลวไหลลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก (falling liquid films) เมื่อฟิล์มของเหลวสัมผัสกับคราบที่ติดอยู่บนพื้นผิว จะเกิดแรงเฉือนขึ้นและแรงที่ววนนี้เป็นปัจจัยสำคัญในการเฉือนคราบออกจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวในกระบวนการทำความสะอาด ซึ่งค่าความเค้นเฉือนขึ้นอยู่กับตัวแปรอันได้แก่ อัตราการไหลของน้ำ ความหนาแน่นของน้ำ มุมเอียงของพื้นผิว และความหนาของฟิล์มของเหลวที่เกิดขึ้น โดยตัวแปรที่กล่าวมานี้ความหนาของฟิล์มของเหลวเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงไป

ความหนาของฟิล์มของเหลวสามารถตรวจสอบได้หลายวิธี เช่น การใช้เลเซอร์ (Laser focus displacement meters) (Takamasa, 2000) การใช้เซนเซอร์ (Confocal chromatic) (Zhou, 2009) การคำนวณ และการประมวลผลภาพจากชุดทดสอบ เป็นต้น โดยวิธีที่กล่าวมาข้างต้นต่างก็มีความถูกต้องแม่นยำ หากแต่การสร้างชุดทดลองใช้เวลาและค่าใช้จ่ายจำนวนมาก จึงได้นำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) มาใช้ในการจำลองฟิล์มของเหลว โดยในการจำลองใช้เวลาไม่นานและมีค่าใช้จ่ายต่ำ ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายมากกว่าการสร้างชุดทดลอง อีกทั้งยังเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย (Salo, 2008) จึงเป็นวิธีที่สนใจในการจำลองความหนาของฟิล์มของเหลวที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายความหนาฟิล์มน้ำบนพื้นผิวสัมผัสอาหาร และคำนวณค่าความเค้นเฉือนผนังที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่วางตัวในมุมต่างกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายความหนาของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวสัมผัสอาหาร

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อทำนายความหนาของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวสัมผัสอาหารที่มุมเอียงและอัตราการไหลแตกต่างกันด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นตัวแทนของพื้นผิวสัมผัสอาหารในการทดสอบ
- 2) ใช้น้ำประปาอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นของเหลวสำหรับการทดสอบแบบจำลอง
- 3) ใช้วิธีการวัดค่าจากชุดทดลองเป็นค่าอ้างอิงในการทวนสอบแบบจำลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแสดงความหนาของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวสัมผัสอาหารที่มุมและอัตราการไหลต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

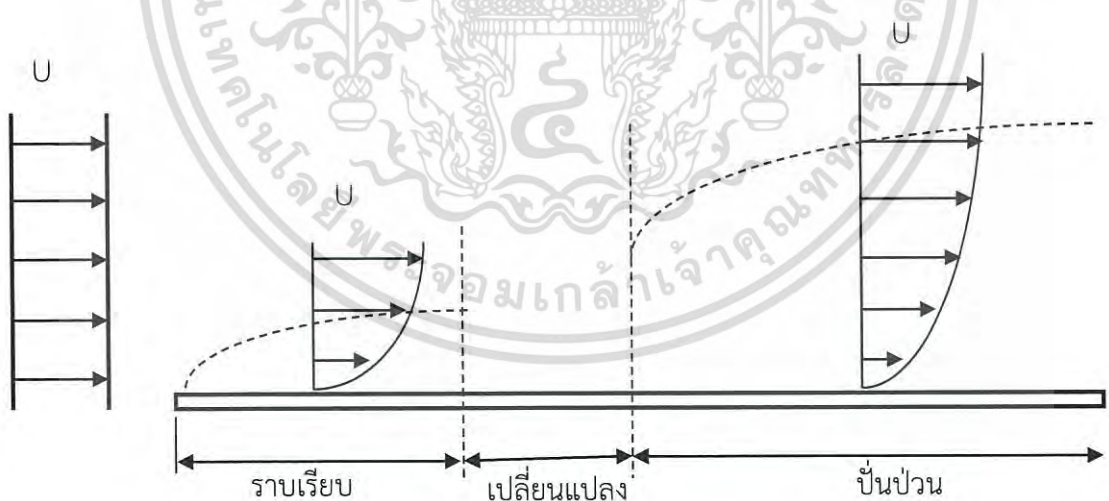
ตรวจเอกสาร

2.1 การไหลของฟิล์มของเหลว

การไหลของฟิล์มของเหลวเป็นการไหลภายนอก เกิดจากการที่ของเหลวตกกระทบบนพื้นผิวอย่างต่อเนื่องแล้วก่อตัวเป็นฟิล์มของเหลวไหลลงมาตามแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการไหลผ่านแผ่นราบ และการก่อตัวของฟิล์ม

2.1.1 การไหลผ่านแผ่นราบ

การไหลภายนอกผ่านแผ่นราบสามารถอธิบายได้ด้วยแนวคิดชั้นขอบเขต ซึ่งเสนอโดย ลุดวิก แพรนด์เทิล (Ludwig Prandtl) ในปี 1904 คือ การแบ่งชั้นการไหลเป็น 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นที่อยู่ติดกับพื้นผิวของวัตถุและชั้นที่อยู่นอกเหนือออกไป ชั้นที่ติดกับพื้นผิวนี้ถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็นชั้นบาง ผลของแรงเสียดทานจากความหนืดในชั้นนี้มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมการไหล ซึ่งชั้นดังกล่าวนี้เรียกว่า ชั้นขอบเขต (boundary layer) ส่วนชั้นที่อยู่นอกเหนือออกไปเป็นชั้นการไหลแบบไม่มีความหนืด



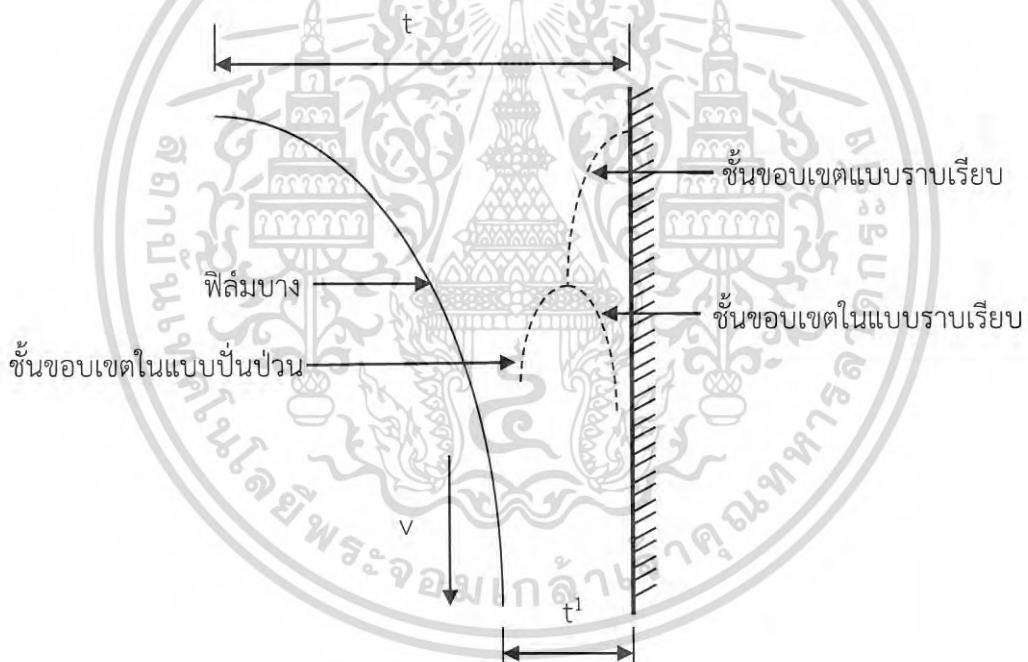
รูปที่ 2.1 การไหลชั้นขอบเขต

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Fox (1994)

จากรูปที่ 2.1 พิจารณาการไหลผ่านแผ่นราบจะเห็นว่าเริ่มต้นการไหลมีความเร็วสม่ำเสมอ (U) และเมื่อของไหลเคลื่อนที่มาสัมผัสกับผิวของแผ่นราบซึ่งมีความเร็วเป็นศูนย์จากเงื่อนไขการไม่ลื่นไถล (no slip) ทำให้อุณหภูมิของของไหลในส่วนที่สัมผัสกับผิวแผ่นราบมีความเร็วที่ลดลงจนเท่ากับแผ่นราบ โดยแรงหนืด (viscous force) และแรงเฉื่อย (inertia force) มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของการไหลในชั้นขอบเขตเป็นอย่างมากทำให้ตัวเลขเรย์โนลด์ (ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยและแรงจากความหนืด) สามารถบ่งบอกสภาพการไหลได้ (Fox, 1994)

2.1.2 การก่อตัวและลักษณะการไหลของฟิล์ม

ฟิล์มของเหลวเมื่อไหลลงตามแรงโน้มถ่วงของโลกด้วยความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) ดังรูปที่ 2.2 จึงเกิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของฟิล์มของเหลวขึ้นนั่นคือความเค้นเฉือน (wall shear stress) ต้านแรงโน้มถ่วงโลก (Tamime, 2008)



รูปที่ 2.2 การก่อตัวของฟิล์ม

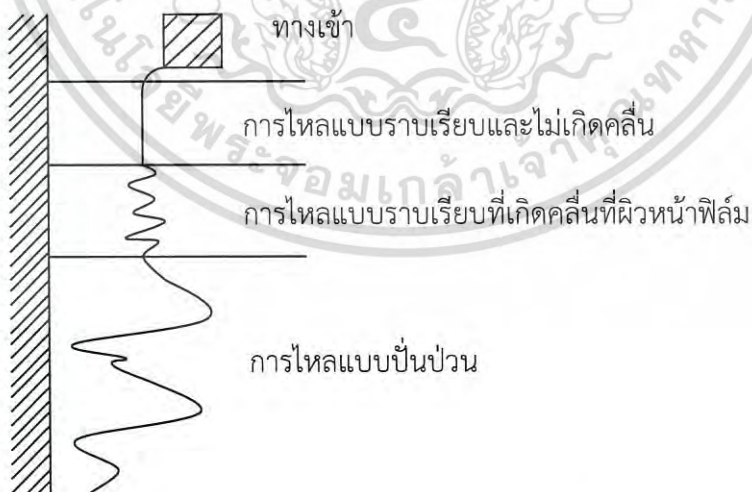
ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Tamime (2008)

ลักษณะการไหลของฟิล์มสามารถบ่งบอกได้ด้วยตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์ม ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 (Weise, 2009 ; Fuchs, 2014)

$$Re_f = \frac{\Gamma}{\eta} = \frac{\Gamma v}{\nu} = \frac{\dot{V}}{B \cdot \nu} \quad (2.1)$$

- โดย Re_f คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มของเหลว
 Γ คือ อัตราการเปียกเชิงมวล (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)
 Γv คือ อัตราการเปียกเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อเมตร-วินาที)
 η คือ ความหนืดพลวัตของของเหลว (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)
 ν คือ ความหนืดจลน์ (ตารางเมตรต่อวินาที)
 \dot{V} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
 B คือ ความกว้างของพื้นที่เปียก (เมตร)

พิจารณาจากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า ลักษณะการไหลของฟิล์มของเหลวจะเปลี่ยนไปตามตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งแบ่งรูปแบบการไหลของฟิล์มออกเป็น 3 ช่วง คือ การไหลแบบราบเรียบและไม่มีคลื่นเกิดขึ้น (smooth laminar, $Re_f < 4$) การไหลแบบราบเรียบที่มีคลื่นเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของฟิล์ม (laminar wavy, $4 < Re_f < 400$) และการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งจะเกิดคลื่นขึ้นทั้งภายในและผิวหน้าของฟิล์ม (turbulent หรือ wavy, $Re_f > 400$) (Weise, 2009)



รูปที่ 2.3 ลักษณะการไหลของฟิล์ม

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Weise (2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ความหนาฟิล์ม

ในการทำความเข้าใจค่าความเค้นเฉือนเป็นสิ่งสำคัญที่บ่งบอกถึงแรงที่เกิดขึ้นในการชะล้างสกปรกออกจากพื้นผิว ค่าความเค้นเฉือนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยพิจารณาจากสมการที่ 2.2 (Fuchs, 2014)

$$\bar{\tau}_w = g\rho\delta \sin \alpha_{PI} \quad (2.2)$$

โดย $\bar{\tau}_w$ คือ ความเค้นเฉือนของผนัง (ปาสคาล)

g คือ แรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที²)

ρ คือ ค่าความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

δ คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม (เมตร)

α_{PI} คือ มุมเอียง (องศา)

จะเห็นได้ว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความเค้นเฉือน คือ ความหนาฟิล์มและมุมเอียงของพื้นผิว โดยความหนาฟิล์มสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.3 (modified To, 2015) ซึ่งมีสมมติฐานว่า ฟิล์มมีการไหลแบบราบเรียบ, ฟิล์มไหลภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก และคุณสมบัติของของไหลมีค่าคงที่

$$\delta = \left(\frac{3\nu^2 Re_f}{g \sin \alpha_{PI}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.3)$$

โดย g คือ ความเร่งโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที²)

ν คือ ความหนืดจลน์ (ตารางเมตรต่อวินาที)

Re_f คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มของเหลว

α_{PI} คือ มุมเอียง (องศา)

2.3 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นการใช้คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ แก้ปัญหา โดยใช้แบบจำลองในการแก้สมการนาเวียร์ – สโตกส์ (Navier-Stoke equations) ซึ่งเป็นเพียงการจำลองการไหลเท่านั้น ไม่สามารถใช้แทนการทดลองจริงได้ จึงเหมาะสำหรับการใช้เป็นเครื่องมือเพื่อตรวจสอบเทียบกับการทดลองจริง ซึ่งความถูกต้องของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้แบบจำลอง โดยในการจำลองการไหลของฟิล์มแบบปั่นป่วน แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนชนิด 2 ตัวแปร ที่มีความซับซ้อนไม่มากนัก ได้แก่ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ และแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ ร่วมกับแบบจำลองหลายสถานะ (Multiphase)

2.3.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ เป็นแบบจำลองที่ใช้ในงานทั่วไปสำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่และไม่พิจารณาผลของความหนืด จึงสามารถทำนายการไหลนอกชั้นขอบเขตได้ดี โดยแบ่งออกเป็น 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ (STD $k-\epsilon$), แบบจำลองความปั่นป่วน Renormalization group (RNG $k-\epsilon$) และแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\epsilon$ (ANSYS, 2011)

1) แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ (STD $k-\epsilon$) เป็นแบบจำลองที่สมมติว่าการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ และไม่พิจารณาผลของความหนืด ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถทำนายการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่ซึ่งอยู่นอกชั้นขอบเขตได้ดี

2) แบบจำลองความปั่นป่วน Renormalization group (RNG $k-\epsilon$) เป็นแบบจำลองที่นำเทคนิคทางสถิติมาประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการนาเวียร์ – สโตกส์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลอง STD $k-\epsilon$ แต่สามารถวิเคราะห์ลักษณะการหมุนวนของการไหลแบบปั่นป่วนได้ จึงมีความแม่นยำมากกว่า

3) แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\epsilon$ เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลอง STD $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ โดยแบบจำลองนี้สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าทั้ง 2 แบบจำลองก่อนหน้านี้และสามารถลู่เข้า (Converge) ได้ง่ายกว่า เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อข้อจำกัดทางคณิตศาสตร์ได้ดีกว่า ดังนั้นแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$

2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$

แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนสามารถทำนายการไหลในชั้นขอบเขตได้ดีกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ ซึ่งแบบจำลองนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบจำลอง คือ แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\omega$ (STD $k-\omega$) และแบบจำลองความปั่นป่วน Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$) โดยแบบจำลอง SST $k-\omega$ นี้เป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดในบรรดาแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งหมด (ANSYS, 2011)

1) แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\omega$ เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาเพื่อให้สามารถทำนายการไหลในช่วงชั้นขอบเขตได้ดี แต่ก็มีจุดด้อย คือสามารถทำนายการไหลนอกชั้นขอบเขตได้ไม่ดีเท่าที่ควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) แบบจำลองความปั่นป่วน Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$) เป็นแบบจำลอง $k-\omega$ ที่ได้รับการพัฒนาให้สามารถทำนายการไหลบริเวณพื้นผิวได้แม่นยำและถูกต้องมากขึ้น ซึ่งแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำและได้รับความนิยมมากที่สุดในบรรดาแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งหมด

2.3.3 แบบจำลองหลายสถานะ

แบบจำลองหลายสถานะ (Multiphase) เป็นแบบจำลองที่ใช้ทำนายระบบที่มีรูปแบบมากกว่า 1 สถานะ เช่น แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง และของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น โดยแบบจำลองหลายสถานะแบ่งออกเป็น 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองปริมาตรของไหล (Volume of fluid) แบบจำลองการผสม (Mixture) และแบบจำลองของออยเลอร์ (Eulerian) (ANSYS, 2011)

1) แบบจำลองปริมาตรของไหล (Volume of fluid หรือ VOF) เป็นแบบจำลองที่ใช้เทคนิคการติดตามพื้นผิว ซึ่งจะพิจารณาผิวหน้าฟิล์ม (interface) ระหว่างของไหล

2) แบบจำลองการผสม (Mixture) เป็นแบบจำลองที่ได้รับการออกแบบสำหรับของไหลหรืออนุภาค 2 สถานะ หรือมากกว่า ที่ปะปนอยู่ร่วมกัน เหมาะสำหรับการจำลองที่ไม่ซับซ้อน

3) แบบจำลองของออยเลอร์ (Eulerian) เป็นแบบจำลองที่มีความคล้ายคลึงกับแบบจำลองการผสม แต่เหมาะสำหรับการจำลองที่มีความซับซ้อนและต้องการความแม่นยำที่มากกว่า

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งออกได้ 3 ส่วน ดังนี้ การทำความสะอาดโดยฟิล์มของเหลว การวัดค่าความหนาของฟิล์มของเหลว และการจำลองฟิล์มของเหลว

2.4.1 การทำความสะอาดโดยฟิล์มของเหลว

Fuchs et al. (2014) ศึกษาผลของพื้นผิวที่ทำมุม 30 - 90 องศา ต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบ (ซิงค์ซัลไฟต์ และแซนแทนแกม) บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม โดยมีตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 1,190 - 3,110 พบว่ามุมเอียงมีผลกระทบอย่างมากต่อความหนาฟิล์ม ความเค้นเฉือน และอัตราการทำความสะอาดเฉลี่ย นอกจากนี้ผลของการทำความสะอาดของผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่เตรียมผิวต่างกัน 3 แบบ คือ ขัดผิวทางกล ขัดผิวด้วยไฟฟ้า และผิวมันวาว พบว่าค่าความขรุขระที่ต่ำไม่ได้นำไปสู่การทำความสะอาดที่ดีกว่า

Fuchs et al. (2013) ได้ตรวจสอบผลการทำความสะอาดด้วยฟิล์มของเหลวที่ได้รับอิทธิพลจากความหนาฟิล์ม โดยการใช้สารเรืองแสงตรวจสอบความหนาฟิล์มบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าพฤติกรรมการทำความสะอาดด้วยฟิล์มของเหลวมีความเชื่อมโยงกับความหนาฟิล์ม ความเค้นเฉือนและความเร็วเฉลี่ยของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

To et al. (2015) ศึกษาการทำความสะอาดแบบไม่ถอดชิ้นส่วนโดยใช้ฟิล์มของเหลวในกรณีที่ย่ำแย่ที่สุด พิจารณาผลของอัตราการไหลและความเร็วของของไหล โดยใช้ชุดทดลองเพื่อประเมินความเร็วของของไหล ความหนาฟิล์ม และตัวเลขเรย์โนลด์ ผลการทดลองบ่งชี้ว่าอัตราการไหลและความเร็วของของไหลแบบไม่ส่งผลต่อจลนศาสตร์การทำความสะอาด โดยเมื่อตัวแปรถูกเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า อัตราการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้นเพียง 8% และ 12% เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าสำหรับมุมเอียงในช่วง 5 - 90 องศา และอัตราการไหลของของเหลวน้อยกว่า 1 แกลลอนต่อนาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานในการทำความสะอาด การไหลจะเป็นแบบราบเรียบและความหนาฟิล์มมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร

2.4.2 การวัดค่าความหนาของฟิล์มของเหลว

Zhou et al. (2009) ได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความหนาของฟิล์มของเหลวโดยใช้เซนเซอร์ (confocal chromatic sensor) ในการทดลองได้ศึกษาผลของลักษณะการไหลในตอนเริ่มต้นของของเหลว ตัวเลขเรย์โนลด์ และมุมเอียงของแผ่นทดสอบ ต่อความหนาของฟิล์มเฉลี่ยที่เวลาใดๆ เปรียบเทียบกับทฤษฎี พบว่าการทดลองและทฤษฎีให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน โดยลักษณะการไหลในตอนเริ่มต้นของของเหลวมีอิทธิพลสำคัญต่อความหนาฟิล์ม และความหนาฟิล์มจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้นและมุมเอียงที่ลดลง

Takamasa et al. (2000) ศึกษาวิธีหารูปแบบคลื่นที่ผิวหน้าฟิล์มและความหนาฟิล์ม สำหรับฟิล์มที่ไหลลงตามแผ่นที่วางตัวในแนวตั้ง ด้วยการใช้เลเซอร์โฟกัส (laser focus displacement meters) 2 ตัว โดยวิธีการนี้สามารถวัดความหนาฟิล์มได้อย่างแม่นยำ ซึ่งผลการทดลอง ได้แก่ความเร็วของคลื่นและความหนาฟิล์มสูงสุด มีความสอดคล้องกับผลการทดลองในอดีต นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวช่วงทางเข้าของฟิล์มในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 250 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามตัวเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่า 702 ฟิล์มจะมีความยาวช่วงทางเข้า 366.5 มิลลิเมตร

2.4.3 การจำลองฟิล์มของเหลว

Lan et al. (2010) เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่บ่งบอกพฤติกรรมของการไหลของฟิล์มของเหลวที่มุม 30 - 90 องศา ด้วยการวัดค่าจากการทดลองและการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าค่าที่ได้จากวิธีการทั้งสองนี้มีความใกล้เคียงกันมาก และผลการจำลองที่ได้จากของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวไม่ส่งผลต่อความหนาของฟิล์มของเหลวที่เกิดขึ้น

Yu (2014) ทำการจำลองพฤติกรรมของฟิล์มของเหลวแบบสามมิติบนแผ่นราบ โดยแบ่งเป็นสองกรณี คือ แบบผิวหน้าของฟิล์มมีการสัมผัสกับอากาศ และแบบผิวหน้าของฟิล์มไม่มีการสัมผัสกับอากาศ นี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ ต่อความหนาฟิล์มและความเร็วของฟิล์มที่มีตัวเลขเรย์โนลด์แตกต่างกัน การศึกษาพบว่าผลจากการจำลองมีความใกล้เคียงกับทฤษฎีอย่างมาก

Xu et al. (2012) ศึกษาการพฤติกรรมการแยกตัวของฟิล์มของเหลวบนแผ่นเอียง 60 องศา ด้วยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในกรณีที่เกิดสไลด์ขนานและสวนทางกับของเหลว โดยการจำลองนี้ได้เลือกใช้แบบจำลอง VOF ในการศึกษาอัตราการไหลของของไหลที่มีผลต่อการแยกตัวของฟิล์ม พบว่าอัตราการไหลเป็นสิ่งสำคัญที่สุดต่อพฤติกรรมการไหลของฟิล์ม อัตราการไหลที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความหนาของฟิล์มมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย และในปริมาณของเหลวที่เท่ากันเมื่อฟิล์มเกิดการแยกตัวจะมีความเร็วในการไหลมากกว่าฟิล์มที่ไม่มีการแยกตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

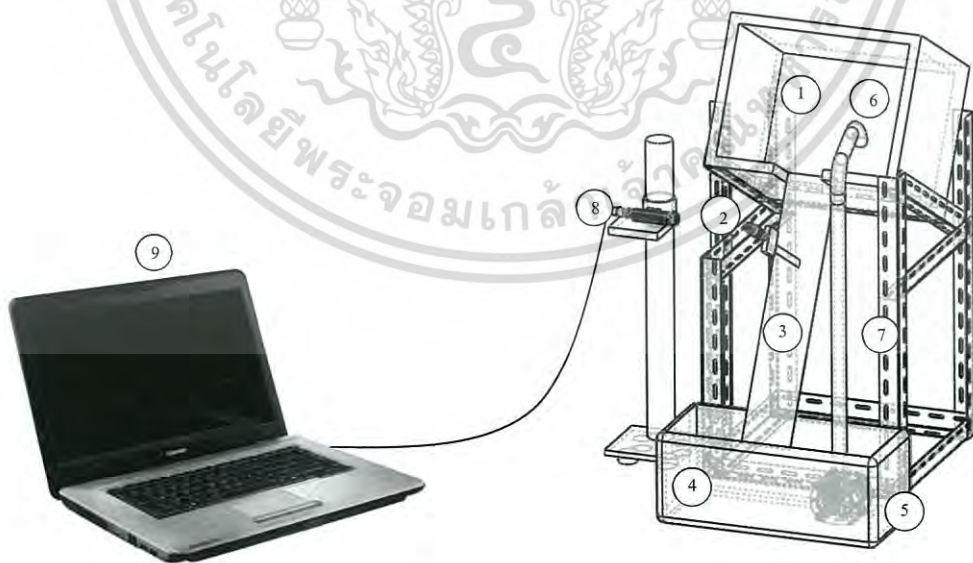
บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และการทดลอง

3.1 ชุดทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์ทดลอง

ชุดอุปกรณ์ทดลอง (รูปที่ 3.1) ประกอบด้วย ถังบรรจุน้ำและพื้นผิวทดสอบซึ่งเป็นแผ่นอลูมิเนียมขนาด 10x50 เซนติเมตรซึ่งทำมุมกับแนวราบ (รูปที่ 1 (ข)) สามารถปรับมุมได้โดยการปรับระดับโครงเหล็กฉากเจาะรูให้มีมุมได้ไม่เกิน 90 องศา เนื่องจากรูปแบบของชุดทดลองอาศัยหลักการน้ำล้น หากปรับมุม 90 องศา จะทำให้การไหลของน้ำที่เกิดขึ้นอาจไม่แนบสนิทกับพื้นผิว ติดตั้งปั้มน้ำแบบหมุนเหวี่ยงภายในถังรองรับน้ำกับท่อยาวที่มีบอลวาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลที่อีกด้านหนึ่งของท่อ ซึ่งบอลวาล์วจะอยู่ภายในบริเวณถังบรรจุน้ำ เมื่อเติมน้ำในถังรองรับน้ำจะเกิดการถ่ายเทน้ำจากถังรองรับน้ำไปยังถังบรรจุน้ำด้วยการใช้ปั้มน้ำ และจากถังบรรจุน้ำไปยังพื้นผิวทดสอบด้วยหลักการน้ำล้น จากนั้นติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับภาพชนิด CCD สำหรับการจับภาพที่ต้องการความละเอียดสูงบริเวณด้านข้างของแผ่นทดสอบเพื่อตรวจสอบการสัมผัสกันของแผ่นอลูมิเนียมบางกับฟิล์มน้ำและแผ่นอลูมิเนียมบางกับพื้นผิวทดสอบ โดยเชื่อมต่อเซนเซอร์ตรวจจับภาพเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกภาพที่ได้จากเซนเซอร์ โดยรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดทดลอง

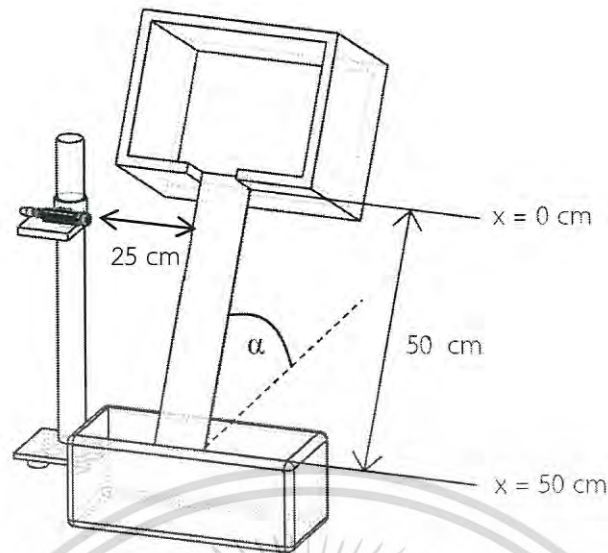
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลอง

หมายเลข	ส่วนประกอบของชุดทดลอง
1	ถังบรรจุน้ำ ขนาด 40x40 เซนติเมตร
2	ไมโครมิเตอร์ ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร
3	พื้นผิวทดสอบซึ่งเป็นแผ่นอลูมิเนียม ขนาด 10x50 เซนติเมตร
4	ถังรองรับน้ำ ขนาด 15x25 เซนติเมตร
5	ปั้มน้ำแบบหมุนเหวี่ยง (Sonic รุ่น AP1600 กำลัง 20 - 23 วัตต์)
6	บอลวาล์วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร
7	ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร
8	เซนเซอร์ตรวจจับภาพ (BASLER acA640 - 120gm)
9	คอมพิวเตอร์สำหรับรับภาพจากเซนเซอร์ตรวจจับภาพ (โปรแกรม Lab View 2016 : NI MAX)

3.1.2 การทดสอบการทำงานของชุดทดลอง

ก่อนทำการทดลองให้ปรับมุมของพื้นผิวทดสอบด้วยการปรับระดับโครงเหล็กฉากเจาะรู เปิดปั้มน้ำแบบหมุนเหวี่ยงให้น้ำเกิดการถ่ายเทจากถังรองรับน้ำไปยังถังบรรจุน้ำและจากถังบรรจุน้ำไหลลงบนพื้นผิวทดสอบด้วยหลักการน้ำล้นเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงปรับอัตราการไหลของน้ำด้วยบอลวาล์ว และวัดอัตราการไหลด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักจากเครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ SF - 400A ความละเอียด 0.1 กรัม โดยรองรับน้ำที่ไหลผ่านพื้นผิวทดสอบเป็นเวลา 2 นาที ไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณอัตราการไหลทำการวัดอัตราการไหลซ้ำ 5 ครั้ง และวัดอุณหภูมิของน้ำด้วยเทอร์โมมิเตอร์แท่งแก้วยี่ห้อ SK จากนั้นจึงติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับภาพที่บริเวณด้านข้างของพื้นผิวทดสอบที่ระยะ 25 เซนติเมตร และติดตั้งไมโครมิเตอร์ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร สำหรับวัดความหนาของฟิล์มน้ำที่บริเวณด้านหน้าของพื้นผิวทดสอบ (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 การวางตัวของพื้นผิวทดสอบทำมุมกับแนวราบ และระยะการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับภาพ

3.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การทำนายการไหลในการทดลองนี้ใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 16.0 ซึ่งเป็นการทำนายการไหลของของไหลแบบ 3 มิติ อาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) โดยการทำนายเลือกจำลองเฉพาะของไหลเท่านั้น ไม่มีการจำลองในส่วนของพื้นผิวทดสอบเนื่องจากความขรุขระของพื้นผิวในการจำลองการไหลมีผลต่อลักษณะการไหลน้อยมาก โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้ คือ Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ ANSYS แนะนำให้ใช้กับการไหลที่มีความซับซ้อนไม่มาก และมีความแม่นยำมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ 2 ตัวแปรชนิดอื่นที่ใช้สมการ Reynolds - averaged Navier - Stokes ในการทำนาย โดยในการจำลองใช้แบบจำลองความปั่นป่วนร่วม SST $k-\omega$ กับแบบจำลอง Multiphase ชนิด Volume of Fluid (VOF) เนื่องจากการไหลของฟิล์มน้ำเป็นการไหลที่มีการสัมผัสกันของน้ำและอากาศ ในการจำลองจึงมีของไหลอยู่ 2 ชนิด คือ น้ำและอากาศ จึงต้องใช้แบบจำลอง Multiphase ชนิด Volume of Fluid ร่วมด้วยเพื่อสามารถตรวจจับพื้นผิวที่เกิดจากการสัมผัสกันของน้ำและอากาศได้ โดยการจำลองการไหลของฟิล์มน้ำอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้ ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid), ความหนืดของของไหลมีค่าคงที่ (Constant viscosity), การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) และไม่พิจารณาผลของแรงเสียดทานด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำนายการไหลในแต่ละแบบนั้น ใช้พารามิเตอร์และโครงสร้างตาข่ายที่มีรายละเอียดแตกต่างกัน โดยการจำลองการไหลของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวทดสอบในงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดการสร้างโครงสร้างตาข่ายแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการสร้างโครงสร้างตาข่าย

หัวข้อ	รายละเอียด
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	100
Sizing	
Use Advance Size Function	On : Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
Inflation	
Use Automatic Inflation	Program Controlled
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.1
Maximum layers	1
Growth Rate	0.1
Inflation Algorithm	Post

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างโครงสร้างตาข่ายสำหรับการจำลองการไหลของฟิล์มน้ำในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ โครงสร้างตาข่ายโดยรวม (Sizing) และโครงสร้างตาข่ายบริเวณพื้นผิว (Inflation) โดยรายละเอียดของการสร้างโครงสร้างตาข่ายทั้ง 2 ส่วนมีดังนี้

1) การกำหนดรายละเอียดสำหรับการสร้างโครงสร้างตาข่ายโดยรวม

- สำหรับพื้นผิวเรียบที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมของพื้นผิว ควรเลือกใช้ Use Advance Size Function แบบ Proximity and Curvature ในการจำลอง โดยในชุดทดลองของการวิจัยนี้มีการเปลี่ยนแปลงมุมของแผ่นที่ 30 และ 60 องศาทำมุมกับแนวราบ

- หากต้องการให้โครงสร้างตาข่ายโดยรวมมีความละเอียดสูงควรเลือก Relevance Center แบบ Fine

- เลือก Transition แบบ Slow เนื่องจากการไหลในชุดทดลองเป็นการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไหลแบบช้า

2) การกำหนดรายละเอียดสำหรับการสร้างโครงสร้างตาข่ายบริเวณพื้นผิว

- หากต้องการให้โครงสร้างตาข่ายบริเวณส่วนโค้งมีความละเอียดสูงควรเลือก Inflation Option แบบ Smooth Transition

โดยแบบจำลองที่ใช้สำหรับการทำนายการไหลของฟิล์มน้ำบนแผ่นราบเรียบในงานวิจัยนี้มีความกว้าง 10 เซนติเมตร และความยาว 50 เซนติเมตร ซึ่งมีโครงสร้างตาข่าย (Mesh) รวมทั้งสิ้นจำนวน 304,453 โครงสร้างตาข่าย โดยโครงสร้างตาข่ายเป็นชนิด Tetrahedral ซึ่งเป็นโครงสร้างตาข่ายที่มีความละเอียดสูง โครงสร้างตาข่ายสำหรับการทำนายการไหลของฟิล์มน้ำแสดงดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างตาข่ายและรูปทรงแบบจำลองการไหลของฟิล์มน้ำ

พารามิเตอร์และตัวแปรขอบเขต (Boundary Conditions) ที่ป้อนในโปรแกรมสำหรับการจำลองการไหลแสดงดังตารางที่ 3.3 และตัวแปรขอบเขตมีทั้งหมด 4 ตัวแปร ดังนี้

- Inlet water velocity เป็นค่าความเร็วที่ได้จากการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรด้วยวิธีชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์
- Outlet pressure เป็นค่าความดันที่ครอบคลุมชุดทดลองคือความดันบรรยากาศ
- Density of pure water เป็นค่าความหนาแน่นของน้ำ โดยค่าความหนาแน่นที่ป้อนในโปรแกรมมีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิในการทดลองแต่ละการทดลอง
- Viscosity of pure water เป็นค่าความหนืดของน้ำ ซึ่งค่าความหนืดจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของน้ำในการทดลองแต่ละเงื่อนไขเช่นเดียวกับความหนาแน่น

พารามิเตอร์ในส่วน Solution Methods เป็นการตั้งค่าที่ได้ศึกษาจากงานวิจัย (Xu, 2012) แนะนำว่าสำหรับการไหลบนพื้นผิวจะทำการกำหนด Solution Methods โดยตั้งค่า Pressure แบบ PRESTO เพื่อให้เกิดการลู่ออกได้ยากขึ้น Momentum เลือกแบบ Second Order เพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างตาข่ายแบบ Tetrahedral ที่สร้างขึ้นมา ในส่วนของ Turbulent Kinetic Energy กับ Turbulent Dissipation Rate เลือกแบบ First Order Upwind เพื่อให้เกิดการลู่ออกอย่างรวดเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาในการคำนวณลดลง

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ป้อนในโปรแกรม ANSYS FLUENT

ตัวแปร	รายละเอียด
Boundary Conditions	
Inlet water velocity	100, 200, 300 ลิตรต่อชั่วโมง
Outlet pressure	101.325 กิโลปาสกาล
Solution Methods	
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	PRESTO!
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
Calculation	
Number of Iterations	2,000

โดยสามารถคำนวณหาความหนาของฟิล์มน้ำได้จากการนำค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองไปคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์โดยใช้สมการ 2.1 และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความหนาของฟิล์มน้ำเฉลี่ยโดยใช้สมการที่ 2.3

3.2.1 การหาความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายที่เหมาะสม

การหาความละเอียดที่เหมาะสมของโครงสร้างตาข่ายใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST k- ω ในการทำนาย และมีตัวแปรขอบเขตเดียวกับการทดลองหาค่าความเร็วอ้างอิงจากการซั่งน้ำหนักแบบสถิตย์ นั่นคือ ความเร็วการไหล 0.0083 เมตรต่อวินาที ความดันที่ทางออก 101.325 กิโลปาสกาล (ความดันบรรยากาศ) และใช้น้ำอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งแบ่งและทดสอบโครงสร้างตาข่ายเป็น 3 ระดับ ดังนี้

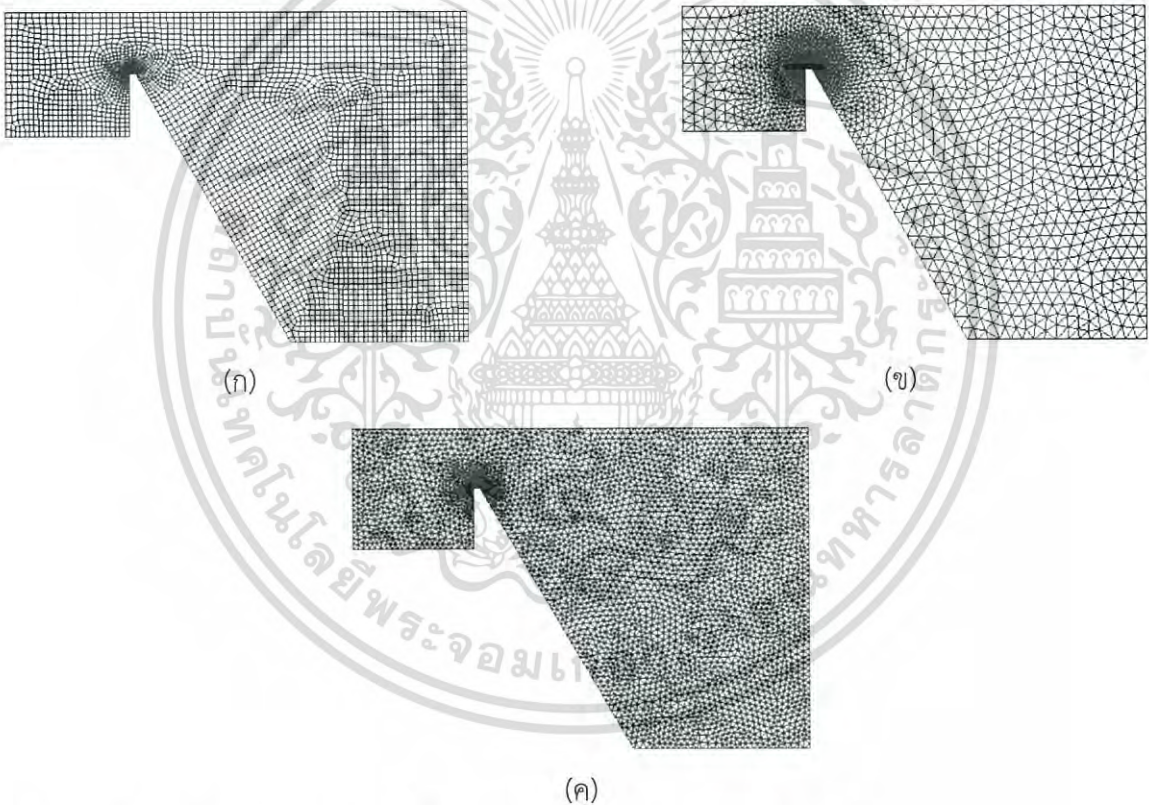
ระดับที่ 1 เป็นโครงสร้างแบบไร้ระเบียบ (Unstructured Mesh) โดยมีค่า Relevance เท่ากับ 100 และไม่มีโครงสร้างตาข่ายบริเวณขอบแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับที่ 2 เป็นโครงสร้างตาข่ายชนิด Tetrahedral และกำหนดให้โครงสร้างตาข่ายมีความละเอียดสูงขึ้นบริเวณที่เป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง

ระดับที่ 3 เป็นโครงสร้างตาข่ายที่มีการควบคุมความละเอียดโดยใช้ Program Controlled

โครงสร้างตาข่ายที่ความละเอียดในแต่ละระดับแสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจากการสร้างโครงสร้างตาข่ายพบว่า โครงสร้างตาข่ายความละเอียดระดับที่ 1 (รูปที่ 3.4 (ก)) มีความละเอียดต่ำที่สุด เป็นโครงสร้างแบบไร้ระเบียบและไม่มีโครงสร้างตาข่ายบริเวณขอบแผ่น โครงสร้างตาข่ายความละเอียดระดับที่ 2 (รูปที่ 3.4 (ข)) เป็นโครงสร้างตาข่ายชนิด Tetrahedral เป็นการเพิ่มความละเอียดของโครงตาข่ายเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนาย และโครงสร้างตาข่ายความละเอียดระดับที่ 3 (รูปที่ 3.4 (ค)) เป็นโครงสร้างตาข่ายชนิดเดียวกับระดับที่ 2 ที่มีการควบคุมความละเอียดโดยใช้ Program Controlled



รูปที่ 3.4 โครงสร้างตาข่าย (ก) โครงสร้างตาข่ายไร้ระเบียบมีความละเอียดระดับ 1

(ข) โครงสร้างตาข่ายชนิด Tetrahedral มีความละเอียดระดับ 2

(ค) โครงสร้างตาข่ายชนิด Tetrahedral มีความละเอียดระดับ 3

การเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มน้ำจากการทำนายของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ระดับความละเอียดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.4 โดยความหนาของฟิล์มน้ำอ้างอิงเป็นความหนาเฉลี่ยจากการซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักแบบสถิตย์และคำนวณปริมาตรของน้ำที่อยู่บนพื้นผิว ซึ่งความหนาของฟิล์มน้ำจากการทำนายโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นความหนาเฉลี่ยพื้นผิวของแผ่นเช่นเดียวกันความหนาอ้างอิง

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบระดับความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายในการทำนายความหนาของฟิล์มน้ำด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ระดับของความละเอียด	จำนวนโครงสร้างตาข่าย	ความหนาของฟิล์มน้ำเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	
		การทำนาย ¹	อ้างอิง ²
1	72,181	0.62	0.83
2	158,957	0.62	0.83
3	304,453	0.75	0.83

หมายเหตุ ¹ ความหนาของฟิล์มน้ำจากการทำนายโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

² ความหนาของฟิล์มน้ำจากการชั่งน้ำหนักแบบสถิตย์

3.2.2 การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้มี 5 แบบจำลอง คือ แบบจำลองความปั่นป่วน STD k- ϵ , RNG k- ϵ , Realizable k- ϵ , STD k- ω และ SST k- ω ซึ่งแบบจำลองทั้งหมดใช้ร่วมกับแบบจำลอง Multiphase ชนิด Volume of Fluid โดยการจำลองจะใช้ตัวแปรขอบเขตเดียวกัน คือ ความเร็วที่ทางเข้า 0.083 เมตรต่อวินาที ความดันที่ทางออก 101.325 กิโลปาสกาล (ความดันบรรยากาศ) และใช้น้ำอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นตัวกลาง ซึ่งความละเอียดของโครงสร้างตาข่ายระดับที่ 3 (304,453 โครงสร้างตาข่าย) ดังการทดสอบในหัวข้อ 3.2.1 โดยการทำนายการไหลใช้คอมพิวเตอร์ Lenovo Y520 (Intel Core i7-7700HQ CPU 2.80GHz, DDRIV 2400MHz 12.0GB) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนในการทำนายความหนาของฟิล์มน้ำด้วย
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

แบบจำลองความ ปั่นป่วน	ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)		ความแตกต่าง (เปอร์เซ็นต์)
	การทำนาย ¹	อ้างอิง ²	
STD k- ϵ	0.73	0.83	11.90
RNG k- ϵ	0.73	0.83	12.01
Realizable k- ϵ	0.73	0.83	11.65
STD k- ω	0.73	0.83	11.87
SST k- ω	0.75	0.83	9.19

หมายเหตุ ¹ ความหนาของฟิล์มน้ำจากการทำนายโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

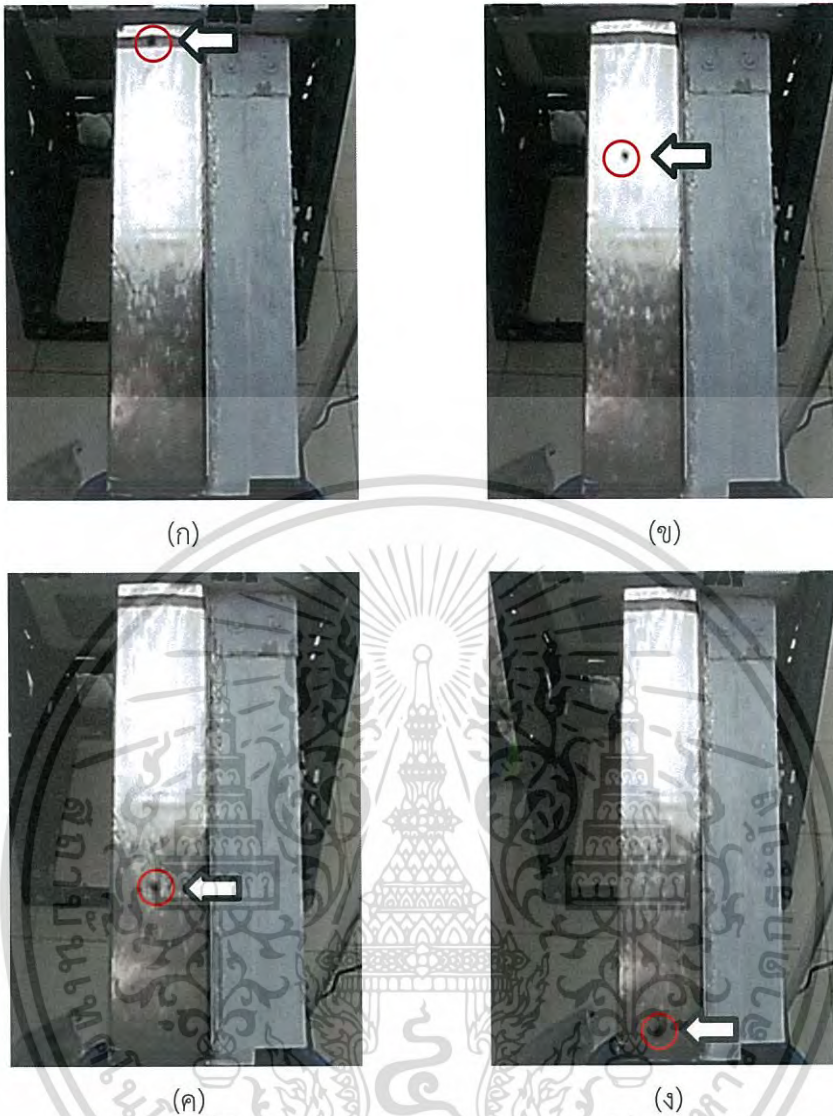
² ความหนาของฟิล์มน้ำจากการซิงก์น้ำหนักแบบสถิตย์

3.3 การทดลอง

3.3.1 การวัดความเร็วของฟิล์มน้ำโดยใช้ฟุนลอยน้ำ

ทำการทดลองโดยลักษณะการไหลของน้ำจะใช้หลักการน้ำล้นออกจากภาชนะ และไหลลงบนพื้นผิวทดสอบที่มุม 30 และ 60 องศา กับแนวราบ โดยน้ำจะต้อไหลเต็มพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียม โดยใช้ปั้มน้ำในการถ่ายเทน้ำจากภาชนะที่ใช้บรรจุน้ำไปยังถังน้ำล้น ควบคุมอัตราการไหลของน้ำโดยใช้วาล์วเปิด-ปิดน้ำซึ่งจะใช้อัตราการไหลเท่ากับ 100 ± 10 , 200 ± 10 และ 300 ± 10 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งการวัดอัตราการไหลของน้ำจะใช้วิธีซิงก์น้ำหนักและเมื่อควบคุมอัตราการไหลได้ตามแผนการทดลองจะเริ่มทำการทดลองโดยใช้พลาสติกขนาด 1×1 เซนติเมตร ซึ่งสามารถลอยตามผิวกระแสได้เป็นฟุนลอย เมื่อปล่อยฟุนลอยจากจุดเริ่มต้นจะทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวของฟุนลอยจนกระทั่งฟุนลอยลอยถึงจุดสุดท้ายเป็นอันสิ้นสุดการบันทึก จากนั้นจะนำวิดีโอที่ได้จากการบันทึกไปหาความเร็วของฟุนลอยจากระยะทางที่ฟุนลอยเคลื่อนที่และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ โดยสามารถหาความเร็วในแต่ละระยะได้มากที่สุดคือ 3 ช่วงตามความยาวของแผ่นอลูมิเนียมแสดงดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การวัดความเร็วของฟิล์มน้ำ (ก) ทุ่นลอย ณ ตำแหน่งเริ่มต้น (ข) ทุ่นลอย ณ ตำแหน่งที่ 1
(ค) ทุ่นลอย ณ ตำแหน่งที่ 2 (ง) ทุ่นลอย ณ ตำแหน่งสุดท้าย

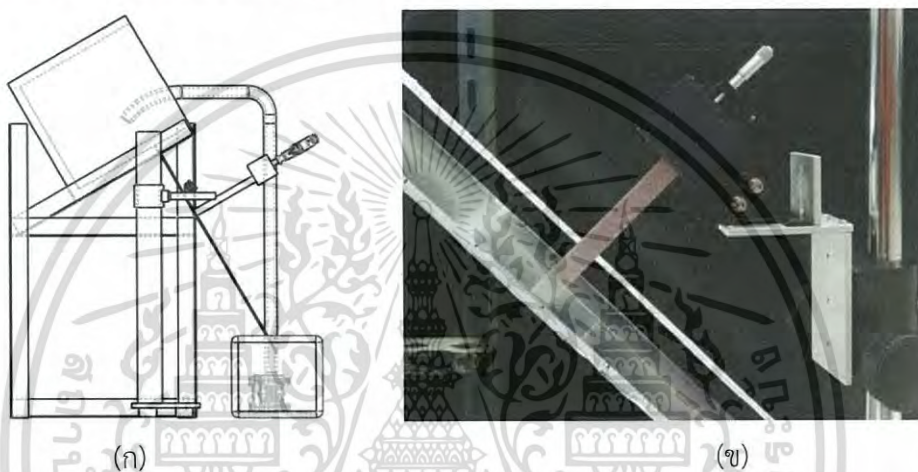
3.3.2 การวัดความหนาของฟิล์มน้ำจากชุดทดลอง

ทำการทดลองโดยลักษณะการไหลของน้ำ มุมของแผ่น และอัตราการไหลอยู่ในสถานการณ์เดียวกับข้อ 3.3.1 เริ่มทำการทดลองโดยใช้ไมโครมิเตอร์ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร สำหรับการวัดค่าความหนาของฟิล์มน้ำ โดยทำการติดแผ่นอลูมิเนียมบางไว้ที่ปากเคลื่อนที่ของไมโครมิเตอร์ดังรูปที่ 3.6

จากนั้นทำการวัดความหนาของฟิล์มน้ำโดยแบ่งช่วงการวัดออกเป็น 10 ช่วง ช่วงละ 5 เซนติเมตร ตามความยาวพื้นผิวทดสอบ (รูปที่ 3.7) โดยปรับไมโครมิเตอร์จนแผ่นอลูมิเนียมบางสัมผัสกับฟิล์มน้ำและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ่านค่าไมโครมิเตอร์ จากนั้นทำการปรับไมโครมิเตอร์ด้วยการหมุนแกนของไมโครมิเตอร์ จนกระทั่งแผ่นอลูมิเนียมบางสัมผัสกับพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งจะสามารถหาค่าความหนาได้จาก ค่าที่อ่านได้จากไมโครมิเตอร์เมื่อสัมผัสกับพื้นผิวทดสอบ - ค่าที่อ่านได้จากไมโครมิเตอร์เมื่อสัมผัสกับฟิล์มน้ำ = ความหนาของฟิล์มน้ำ ทำการวัดค่าความหนาฟิล์มซ้ำช่วงละ 3 ครั้ง และทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยระหว่างการทดลองจะใช้เซนเซอร์ตรวจจับภาพในการตรวจสอบการสัมผัสกันของแผ่นอลูมิเนียมบางกับฟิล์มน้ำ และแผ่นอลูมิเนียมบางกับพื้นผิวทดสอบ โดยสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นอลูมิเนียมที่ติดอยู่กับปากเคลื่อนที่ของไมโครมิเตอร์ได้สะดวกและได้ผลที่มีความละเอียดและแม่นยำ



รูปที่ 3.6 การติดตั้งไมโครมิเตอร์ (ก) สำหรับการวัดความหนาฟิล์มน้ำ

(ข) บริเวณตรงกลางของพื้นผิวทดสอบ

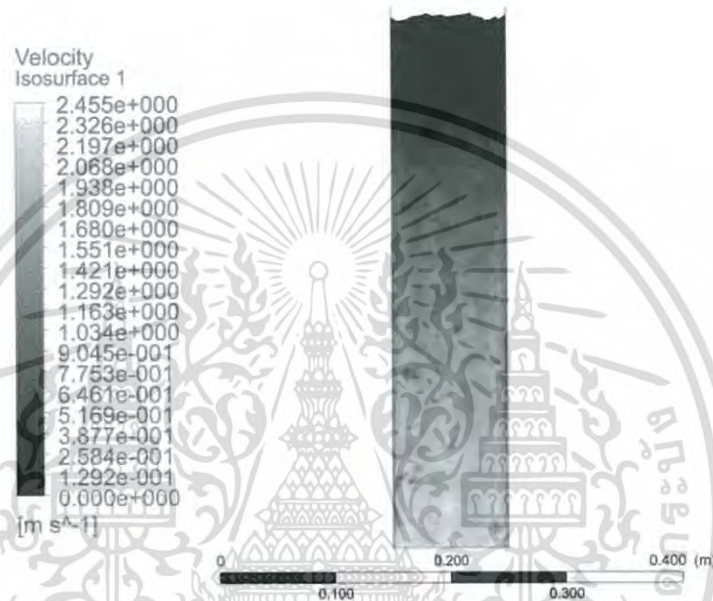


รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการวัดความหนาของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเร็วและความหนาของฟิล์มน้ำจากผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ทำการบันทึกรูปผลการจำลองที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยกำหนดพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.3 โดยมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลให้มีค่า 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง ที่มุม 30 และ 60 องศา ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองจะแสดงอยู่ในรูปของความเร็วไล่ตามระดับสีดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

นำค่าความเร็วเทียบกับค่าสีที่ได้จากผลการจำลองไปใช้ในการพล็อตกราฟเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและความเร็ว จากนั้นจะนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้สำหรับการหาค่าความเร็วในทุกตำแหน่งของรูปภาพโดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งจะได้ความเร็วในทุก ๆ ตำแหน่งของรูปภาพ และนำผลความเร็วที่ได้ไปคำนวณเป็นค่าความหนาของฟิล์มน้ำจากสมการ 2.3 โดยผลที่ได้จากการจำลองและการคำนวณจะแสดงผลอยู่ในรูปของความเร็วและความหนาฟิล์มน้ำในทุก ๆ ตำแหน่งของรูปภาพ

3.4 การเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

เปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความเร็วของฟิล์มน้ำจากการจำลองกับการวัดค่าจากชุดทดลองด้วยวิธีการใช้หุ่นลอยน้ำ และเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มน้ำจากการวิเคราะห์ค่าจากการจำลองและการวัดค่าจากชุดทดลองด้วยไมโครมิเตอร์ คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนดังสมการที่ 3.1

$$\% \text{ error} = \left| \frac{X_{CFD} - X_t}{X_t} \right| \times 100 \quad (3.1)$$

โดย $\% \text{ error}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)

X_{CFD} คือ ค่าจากการวิเคราะห์ผลการจำลอง

X_t คือ ค่าที่วัดได้จากชุดทดลอง



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงความถูกต้องของแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการนำมาใช้สำหรับจำลองการไหลของฟิล์มน้ำ วิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับค่าที่วัดได้จากชุดทดลอง

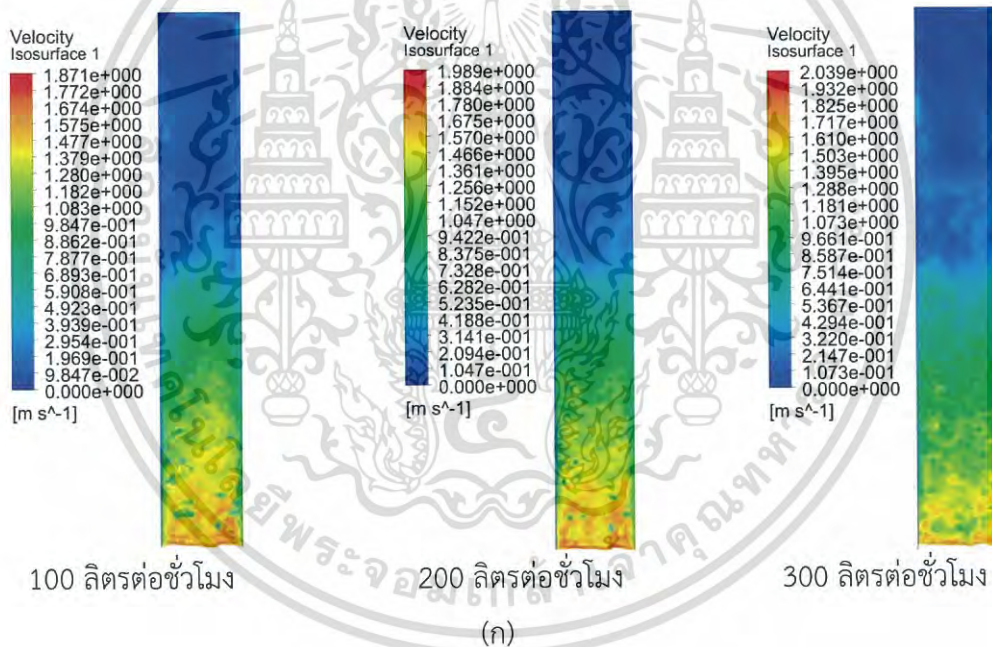
4.1 ความถูกต้องของแบบจำลองจากการเปรียบเทียบความเร็ว

การทดลองที่อัตราการไหล 100 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง ที่มุม 30 และ 60 องศา โดยที่อัตราการไหลที่ใช้สามารถคำนวณได้จากตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มของเหลว (สมการ 2.1) ซึ่งแผ่นทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความกว้างเท่ากับ 10 เซนติเมตร ดังนั้นผลจากการคำนวณโดยอ้างอิงจากเลขเรย์โนลด์สามารถสรุปได้ว่า ที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง เป็นตัวแทนของลักษณะการไหลของฟิล์มแบบราบเรียบ ที่อัตราการไหล 200 ลิตรต่อชั่วโมง เป็นตัวแทนของลักษณะการไหลแบบราบเรียบที่มีคลื่นเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของฟิล์ม และที่อัตราการไหล 300 ลิตรต่อชั่วโมง เป็นตัวแทนของลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน

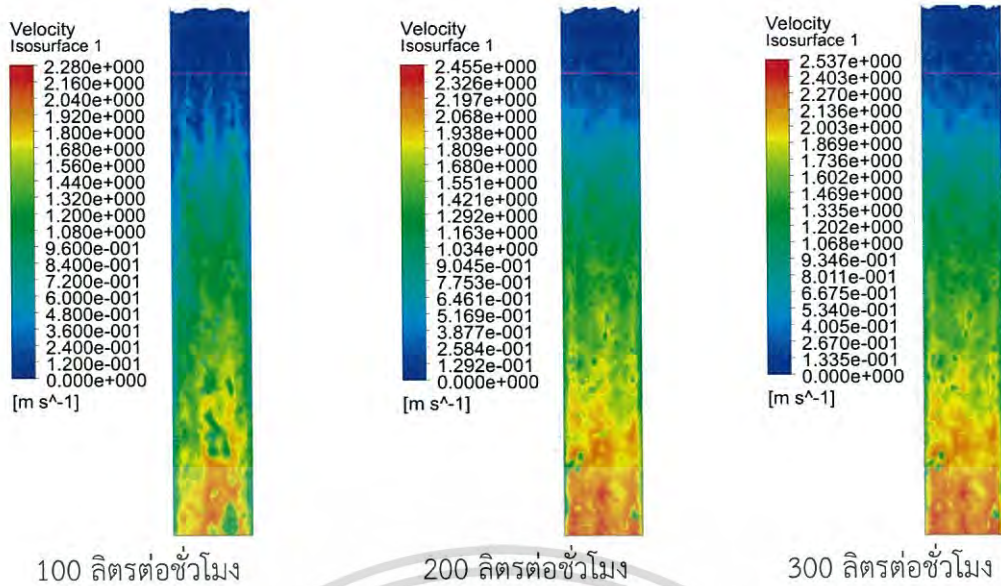
ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.1 เคนสีที่ต่างกันแสดงค่าความเร็วของฟิล์มน้ำที่แตกต่างกัน โดยบริเวณที่มีความเร็วต่ำจะแสดงด้วยสีน้ำเงิน และจะเปลี่ยนสีจากโทนเย็นไปเป็นโทนร้อนตามค่าความเร็วที่สูงขึ้น ซึ่งบริเวณที่แสดงสีแดงคือบริเวณที่มีค่าความเร็วสูงที่สุด โดยความเร็วของฟิล์มน้ำที่ระยะ 0 ถึง 25 เซนติเมตร แสดงด้วยสีน้ำเงิน และ ฟ้า ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วต่ำ และที่ระยะ 25 ถึง 50 เซนติเมตร มีสีทั้งโทนร้อนและโทนเย็นปะปนกันไป โดยบริเวณที่แสดงสีโทนร้อนคือบริเวณที่เกิดคลื่นขึ้นที่ผิวหน้าของฟิล์มน้ำ ยิ่งคลื่นมีความสูงชันมากยิ่งมีความเร็วมากและแสดงเป็นสีโทนร้อนที่มีความเข้มขึ้นตามไปด้วย จากรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) จะเห็นได้ว่าที่ระยะ 25 ถึง 50 เซนติเมตร ผลการจำลองแสดงสีโทนร้อนมากขึ้นตามอัตราการไหลและมุมเอียงที่มากขึ้น นั่นคือเมื่ออัตราการไหลและมุมเอียงเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร็วของฟิล์มน้ำมีค่าสูงขึ้น เมื่อวิเคราะห์ผลการจำลองพบว่าการจำลองซึ่งใช้หลักการนำล้นนั้นความเร็วของฟิล์มน้ำที่ระยะ 0 ถึง 25 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ย 0.34 ± 0.24 , 0.48 ± 0.30 และ 0.62 ± 0.34 เมตรต่อวินาที ที่มุม 30 องศา อัตราการไหล 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง และมีค่าเฉลี่ย 0.63 ± 0.27 , 0.78 ± 0.36 และ 0.83 ± 0.37 เมตรต่อวินาที ที่มุมเอียง 60 องศา อัตราการไหล 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งไม่สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากชุดทดลองโดยมีค่าเฉลี่ย 0.68 ± 0.09 , 1.03 ± 0.06 และ 1.25 ± 0.09 เมตรต่อวินาที ที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหล 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง และมีค่าเฉลี่ย 0.83 ± 0.17 , 1.14 ± 0.10 และ 1.32 ± 0.11 เมตรต่อวินาที ที่มุม 60 องศา อัตราการไหล 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงถึง 52.68 % และ 36.71 % ที่มุม 30 และ 60 องศาตามลำดับ และผลของ Xu et al. (2012) ที่ความเร็วของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตลอดระยะทางของการไหล ทำให้ผลการจำลองในระยะ 0 ถึง 25 เซนติเมตรมีความคลาดเคลื่อนไปอย่างมาก เนื่องจากที่ระยะ 0 ถึง 25 เซนติเมตร เป็นย่านทางเข้า (Entrance length) ของฟิล์มน้ำจากหลักการจำลองแบบน้ำล้น ซึ่งฟิล์มมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ, มีความเร็วต่ำ และยังไม่เข้าสู่ช่วงสภาวะคงตัว (Steady state) (Takamasa, 2000) แต่ในการจำลองใช้แบบจำลองความปั่นป่วนซึ่งมีสภาวะคงตัว ผลการจำลองในช่วงเริ่มต้นของการไหลระยะ 0 ถึง 25 เซนติเมตร จึงมีความคลาดเคลื่อนไป อาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองสามารถจำลองการไหลได้อย่างถูกต้องที่ระยะ 25 ถึง 50 เซนติเมตร ดังนั้นผลการทดลองที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะเป็นการทดลองที่ระยะ 25 ถึง 50 เซนติเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.1 ผลการจำลองความเร็วของฟิล์มน้ำ (ก) มุม 30 องศา (ข) มุม 60 องศา

ความเร็วเฉลี่ยของฟิล์มน้ำจากการจำลองและการวัดจากชุดทดลองที่ระยะ 25 ถึง 50 เซนติเมตรดังตารางที่ 4.1 ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ Xu et al. (2012) พบว่าค่าความเร็วเฉลี่ยจากการจำลองและชุดทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถจำลองการไหลของฟิล์มน้ำในช่วงสภาวะคงตัว (ระยะ 25 ถึง 50 เซนติเมตร) ได้ดีที่มุม 30 และ 60 องศา อัตราการไหล 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง

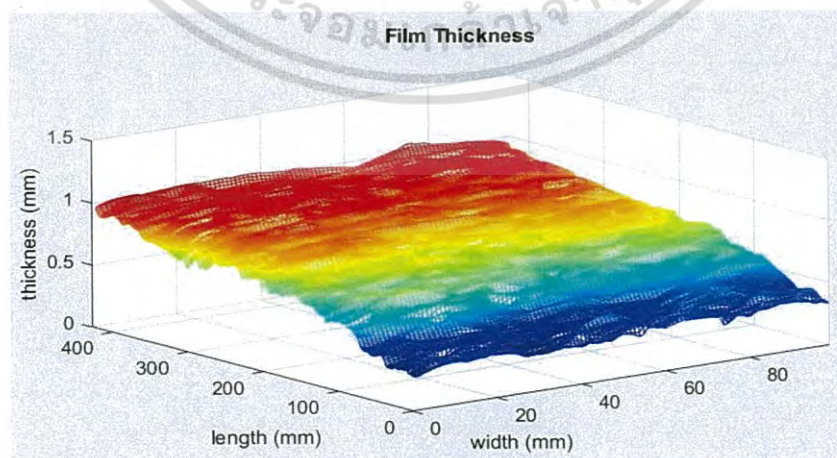
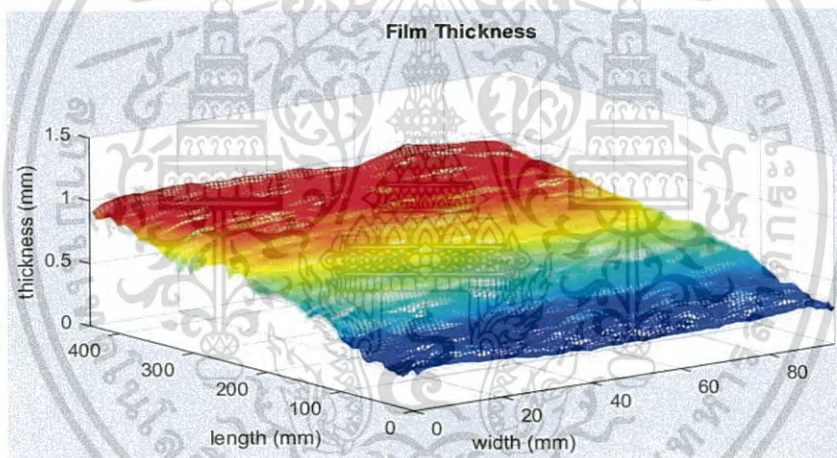
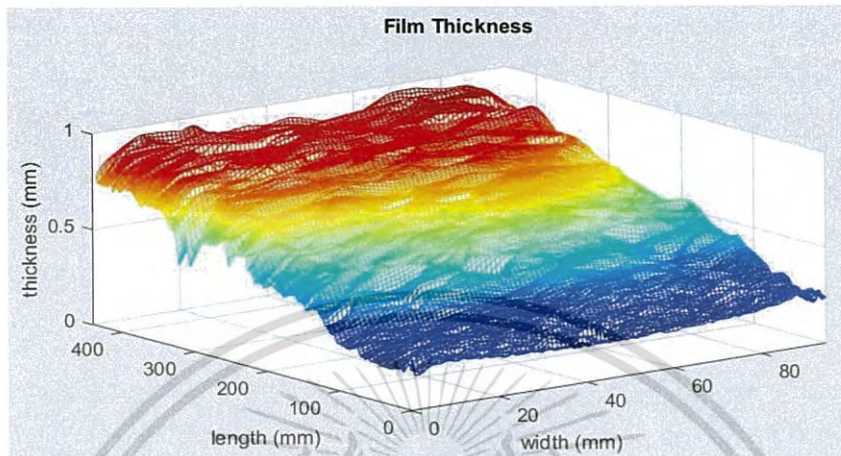
ตารางที่ 4.1 ความเร็วเฉลี่ยของฟิล์มน้ำจากการจำลองและชุดทดลอง

อัตราการไหล (L/h)	ความเร็วเฉลี่ยของฟิล์มน้ำ (เมตรต่อวินาที) ที่ระยะ 25 ถึง 50 เซนติเมตร และค่าความคลาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)			
	30°		60°	
	การทดลอง	CFD	การทดลอง	CFD
100	0.80±0.06	0.79±0.19	0.94±0.22	0.97±0.17
200	1.11±0.07	1.09±0.19	1.26±0.18	1.22±0.23
300	1.35±0.11	1.28±0.17	1.43±0.16	1.40±0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

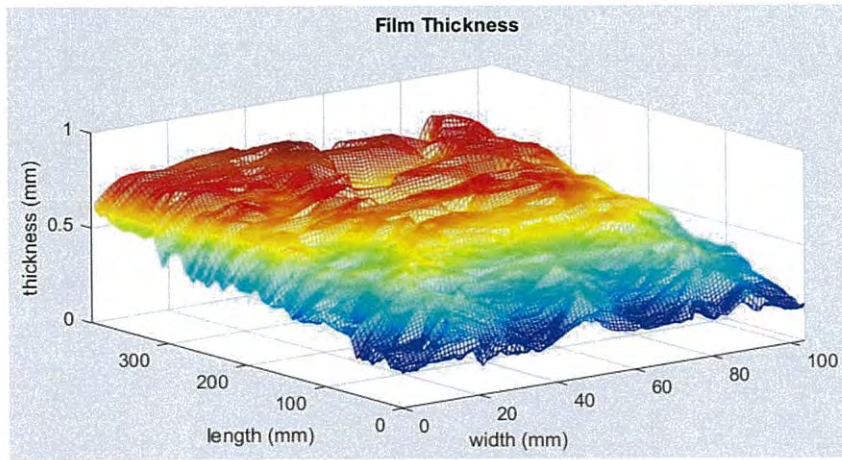
4.2 ความหนาฟิล์มที่คำนวณจากผลการจำลอง

ผลการวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มน้ำจากผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.2 ความหนาของฟิล์มน้ำแสดงในรูปกราฟสามมิติและเฉดสี บริเวณที่มีความหนาของฟิล์มน้ำมากกว่าจะแสดงด้วยสีโทนร้อน และบริเวณที่มีความหนาของน้ำต่ำกว่าจะแสดงด้วยสีโทนเย็น

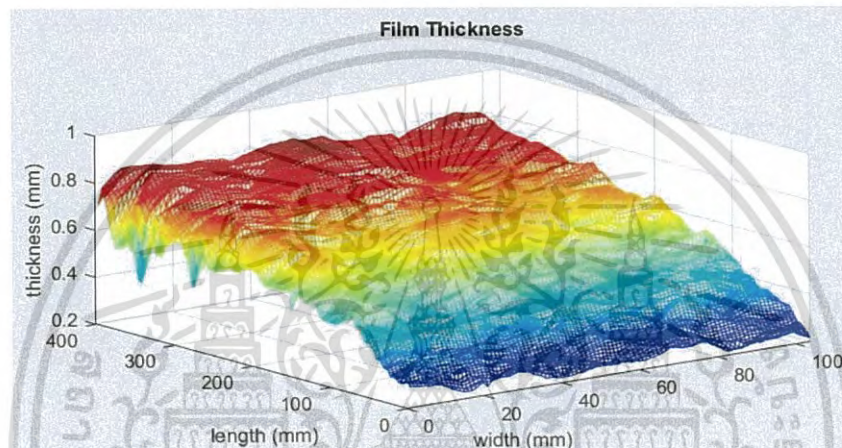


(ก)

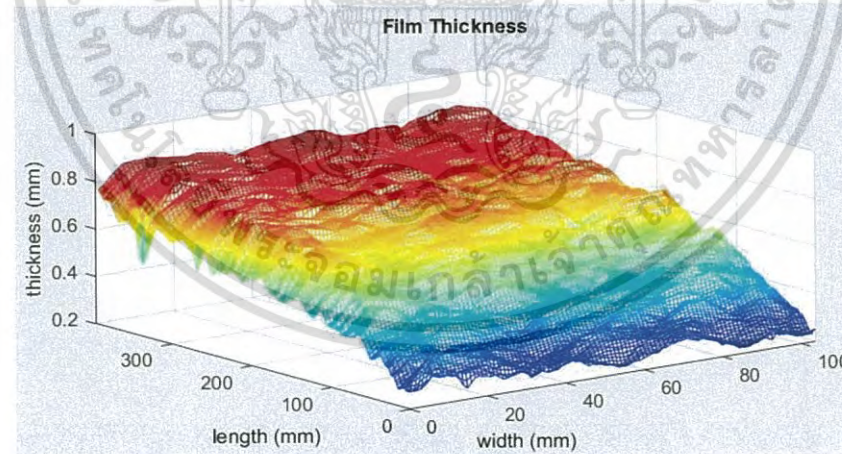
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



100 ลิตรต่อชั่วโมง



200 ลิตรต่อชั่วโมง



300 ลิตรต่อชั่วโมง

(ข)

รูปที่ 4.2 ความหนาของฟิล์มน้ำที่คำนวณจากผลการจำลอง (ก) มุม 30 องศา (ข) มุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

ความหนาฟิล์มน้ำเฉลี่ยที่คำนวณจากผลการจำลองและวัดจากชุดทดลองที่ระยะ 25 เซนติเมตร เป็นต้นไป แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าที่มุม 30 และ 60 องศา อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง ค่าความหนาฟิล์มน้ำเฉลี่ยที่คำนวณจากผลจำลองและวัดจากชุดทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่อัตราการไหล 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง ความหนาฟิล์มน้ำที่คำนวณจากการจำลองมีค่าต่ำกว่าการทดลอง เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณความหนาของฟิล์มน้ำเป็นสมการที่มีสมมติฐานว่าการไหลของฟิล์มน้ำมีลักษณะแบบราบเรียบ โดยที่อัตราการไหล 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมงมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้ค่าที่คำนวณได้จากการจำลองเกิดความคลาดเคลื่อนมากกว่าที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมงที่มีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Fuchs et al. (2014), Yu (2014)

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบความหนาเฉลี่ยของฟิล์มน้ำจากการจำลองและชุดทดลอง

อัตราการไหล (L/h)	ความหนาเฉลี่ยของฟิล์มน้ำ (มิลลิเมตร) ที่ระยะ 25 ถึง 50 เซนติเมตร และค่าความคลาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)					
	30°			60°		
	การทดลอง	CFD	Error	การทดลอง	CFD	error
100	0.56	0.56	0.12	0.53	0.54	0.79
200	0.70	0.68	3.21	0.66	0.64	3.85
300	0.74	0.72	2.84	0.71	0.68	4.40

เมื่อเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มน้ำที่มุม 30 และ 60 องศา โดยมีอัตราการไหล 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าแบบจำลองสามารถนำมาคำนวณความหนาฟิล์มน้ำได้ดีในช่วงที่มีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ ที่มุม 30 และ 60 องศา โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 0.79% ส่วนในช่วงที่มีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดของสมการที่ใช้ในการคำนวณ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 4.40%

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายความหนาของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวสัมผัสอาหารที่วางตัวในมุม 30 และ 60 องศา กับแนวราบ ที่อัตราการไหล 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง โดยทำการจำลองความหนาของฟิล์มน้ำด้วยแบบจำลอง SST k- ω ร่วมกับแบบจำลอง VOF นำผลการจำลองไปวิเคราะห์ความเร็วของฟิล์มน้ำที่เกิดขึ้นทุกตำแหน่งด้วยโปรแกรม MATLAB และนำผลการวิเคราะห์ความเร็วไปคำนวณความหนาของฟิล์มน้ำ ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบความเร็วและความหนาของฟิล์มน้ำจากการวิเคราะห์ผลการจำลองกับการวัดจากชุดทดลอง โดยในการทดลองใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นตัวแทนของพื้นผิว วัดความเร็วของฟิล์มน้ำที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการใช้หุ่นลอยจากการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของแผ่นพลาสติกขนาด 1x1 เซนติเมตรที่ใช้เป็นหุ่นลอยนำมาคำนวณความเร็วของฟิล์มน้ำ และวัดความหนาของฟิล์มน้ำทุกระยะ 5 เซนติเมตรด้วยไมโครมิเตอร์ พบว่าแบบจำลองสามารถจำลองความเร็วเฉลี่ยของฟิล์มน้ำที่ระยะ 25 ถึง 50 เซนติเมตรได้ดี และเมื่อนำผลการจำลองไปคำนวณความหนาของฟิล์มน้ำเฉลี่ยพบว่า ในช่วงการไหลแบบราบเรียบความหนาของฟิล์มน้ำเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงมากกว่าช่วงการไหลแบบปั่นป่วน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.79%

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยขั้นนี้ได้ทำการจำลองการไหลของฟิล์มน้ำและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับชุดทดลองโดยมีพื้นผิวทดสอบเป็นแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งในอุตสาหกรรมอาหารอลูมิเนียมไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นพื้นผิวสัมผัสอาหาร ดังนั้นหากนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการทำนายความหนาของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวสัมผัสอาหารหรือพื้นผิวอื่น เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม แบบจำลองนี้จะยังคงสามารถใช้ได้เนื่องจากอลูมิเนียมและพื้นผิวสัมผัสอาหารมีค่าแรงตึงผิวไม่แตกต่างกันมากนัก ค่าความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นจึงไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้หากฟิล์มที่ต้องการทำการจำลองเป็นน้ำที่มีการผสมสารทำความสะอาดหรือสารลดแรงตึงผิว แบบจำลองนี้ก็ยังคงสามารถใช้ได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวต่างกันมีความหนาของฟิล์มแทบไม่แตกต่างกัน

บรรณานุกรม

กีรติ ลีวัจนกุล. 2543. “อุทกวิทยา”. มหาวิทยาลัยรังสิต.

ANSYS. 2011. “ANSYS FLUENT Theory guide”. ANSYS Inc.

Cengel Y. A. and Ghajar A. J. 2011. “Heat and mass transfer: Fundamentals & applications”. New York : McGraw-Hill.

Fox W. R. and McDonald T. A. 1994. “Introduction to Fluid Mechanics”. John Wiley & Sons, Inc.

Friis A. and Jensen B. B. B. 2002. “Prediction fo hygiene in food processing equipment using flow modelling”. **Institution of Chemical Engineers**. 80(C) : 281-285.

Fuchs E., Boye A., Murcek R. and Majschak J.-P. 2014. “An experimental comparison of film flow parameters and cleaning behavior of falling liquid films for different tilt angles”. **Food and Bioproducts Processing**.

Fuchs E., Boye A., Stoye H., Mauermann M. and Majschak J.-P. 2013. “Influence of the film flow characteristic on the cleaning behavior”. **International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning**. 411-420.

Goode K. R., Asteriadou K., Robbins P. T. and Fryer P. J. 2013. “Fouling and cleaning studies in the food and beverage industry classified by cleaning type”. **Institute of Food Technologists**. 12 : 121-143.

Jensen B. B. B., Friis A., Benezech Th., Legentilhomme P. and Lelievre C. 2005. “Local wall shear stress variations predicted by computational fluid dynamics for hygienic design”. **Food and Bioproducts Processing**. 83(C1) : 53-60.

Lan H., Wegener J. L., Armaly B. F., and Drallmeier J. A. 2010. “Developing laminar gravity-driven thin liquid film flow down an inclined plane”. **Journal of Fluids Engineering**.

Norton T. and Sun D.-W. 2006. “Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review”. **Trends in Food Science & Technology**. 17 : 600-620.

Salo S., Friis A. and Wirtanen G. 2008. “Cleaning validation of fermentation tanks”. **Food and Bioproducts Processing**. 86 : 204-210.

Takamasa T. and Hazuku T. 2000. “Measuring interfacial waves on film flowing down a vertical plate wall in the entry region using laser focus displacement meters”. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 43(15) : 2807-2819.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Tamime A.Y. 2008. "Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage Operations Third Edition". **Blackwell Publishing**.
- To A. and Annapragada S.R. 2015. "Experimental parameters for small-scale cleaning characterization. part II: Effect of fluid velocity on the kinetics of cleaning". **Institute of Validation Technology**.
- Weise F. and Scholl S. 2009. "Evaporation of pure liquids with increased viscosity in a falling film evaporator". **Heat Mass Transfer**. 45 : 1037-1046.
- Xu Y., Yuan J., Repke J. U. and Wozny G. 2012. "CFD study on liquid flow behavior on inclined flat plate focusing on effect of flow rate". **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**. 6(2) : 186-194
- Yu Yiqi. 2014. "A computational fluid study of falling film behavior on flat plate". **ASME US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting**.
- Zhou D.W., Gambaryan-Roisman T. and Stephan P. 2009. "Measurement of water falling film thickness to flat plate using confocal chromatic sensing technique". **Experimental Thermal and Fluid Science**. 33 : 273-283.



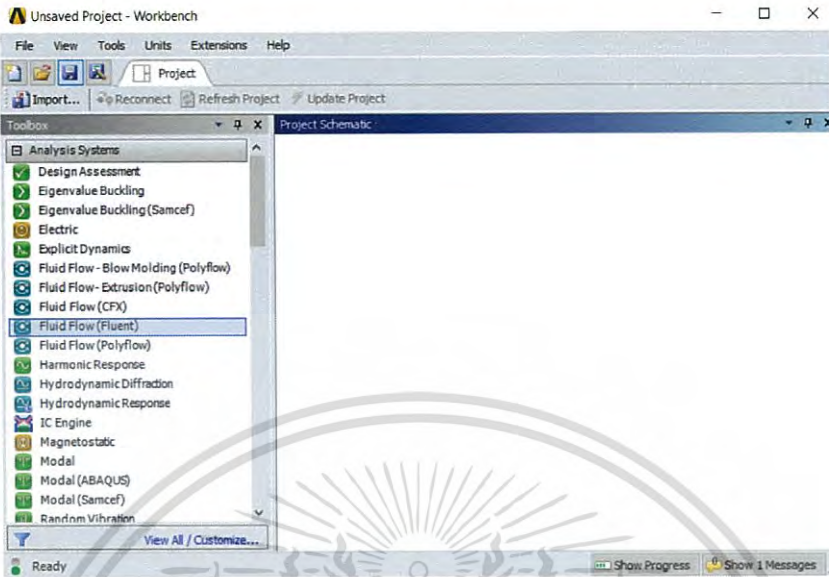
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

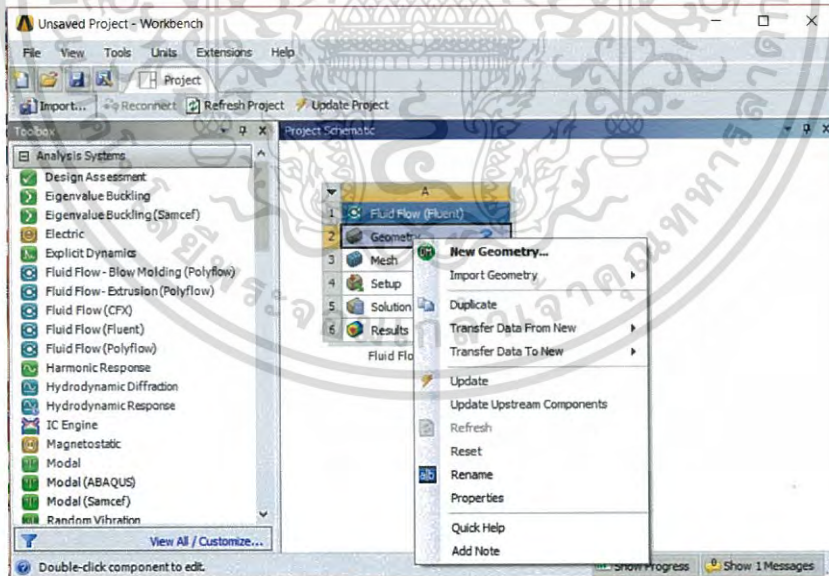
1. การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0

1.1 ดับเบิลคลิกที่ Fluid Flow (Fluent) เพื่อสร้างไฟล์งาน



รูปที่ 1 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (1)

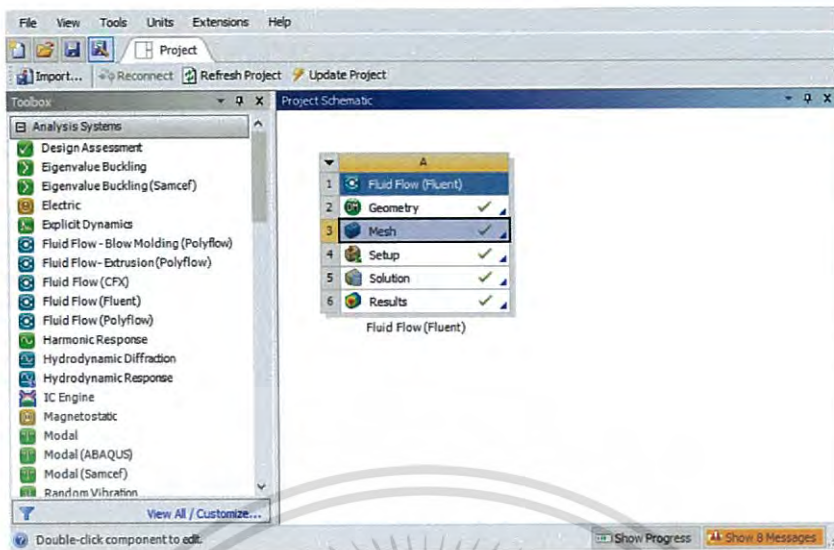
1.2 คลิกขวาที่ Geometry >>> Import Geometry เพื่อนำชิ้นงานเข้ามา



รูปที่ 2 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (2)

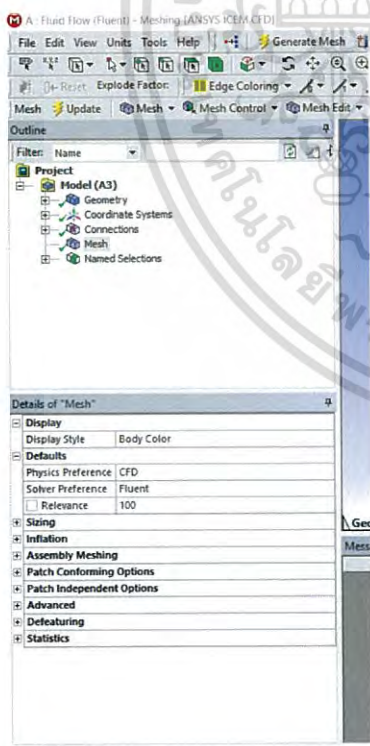
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ดับเบิลคลิกที่ Mesh



รูปที่ 3 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (3)

1.4 คลิกที่ Mesh และปรับค่าดังตาราง

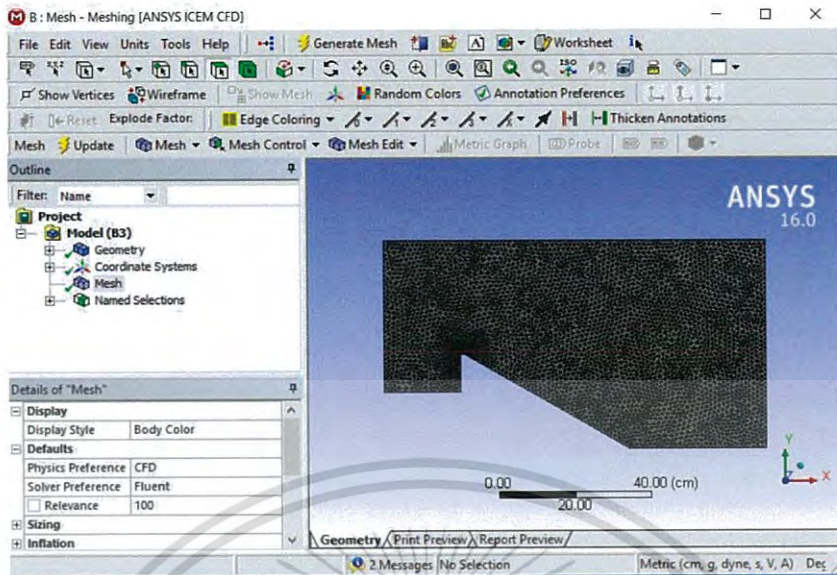


คำสั่ง	ค่า
Relevance	100
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Inflation	
Use Automatic Inflation	Program Controlled
Inflation option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.01
Maximum Layer	1
Growth Rate	0.1
Inflation Algorithm	Post

รูปที่ 4 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (4)

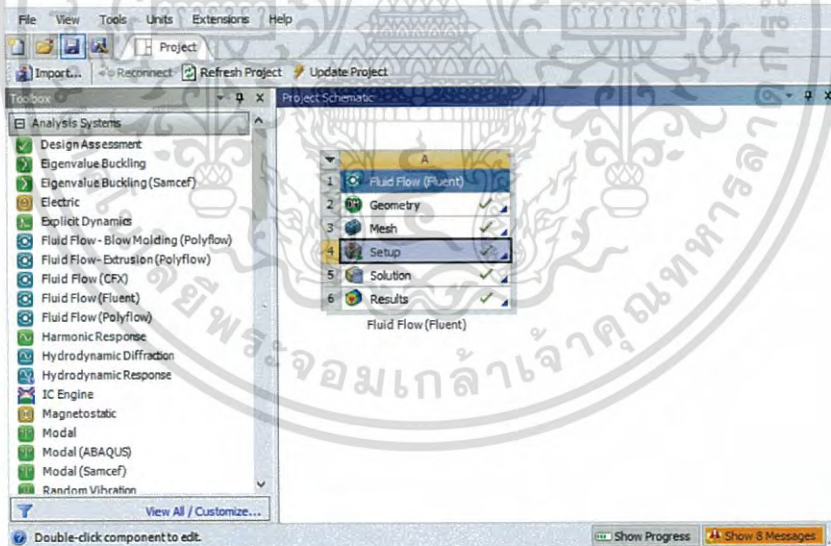
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 คลิก Generate Mesh



รูปที่ 5 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (5)

1.7 ดับเบิลคลิก Set Up



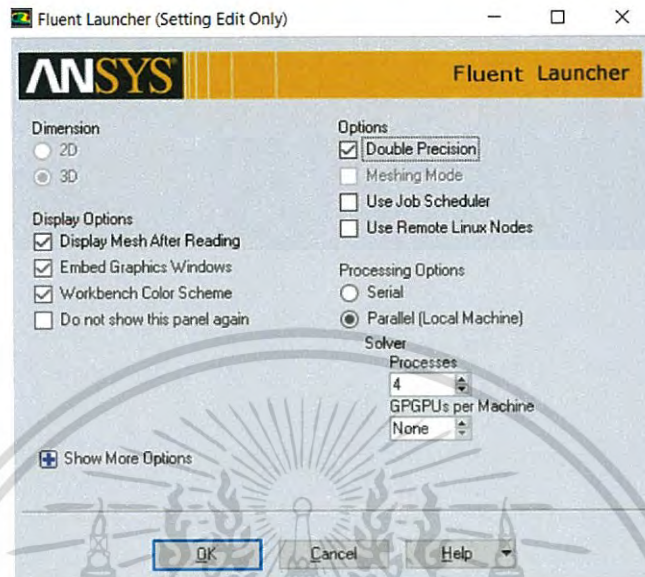
รูปที่ 6 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 ตั้งค่า Options >>> Double Precision

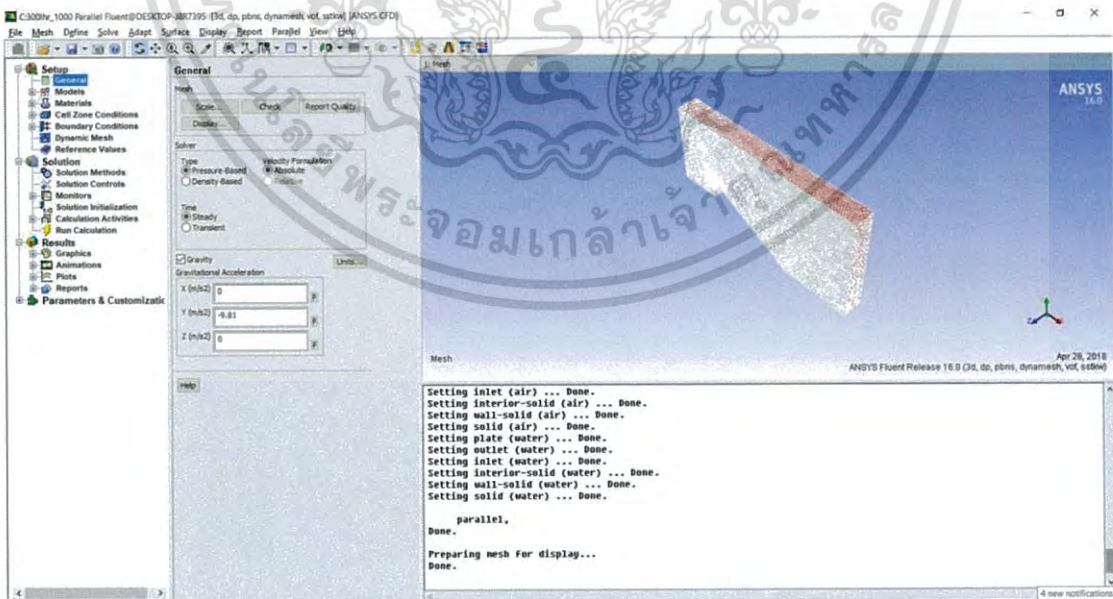
Processing Options >>> Parallel (Local Machine) >>> Processes 4

หมายเหตุ Processes ควรกำหนดตามสเปกของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล



รูปที่ 7 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (7)

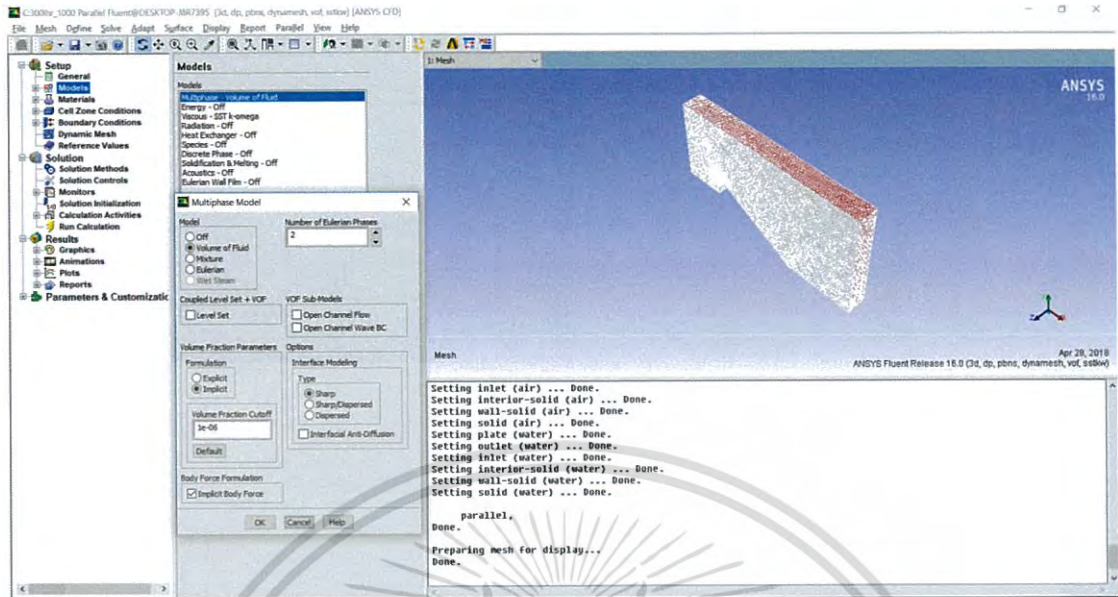
1.9 คลิก General >>> Gravity >>> -9.81 ที่แกน Y



รูปที่ 8 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (8)

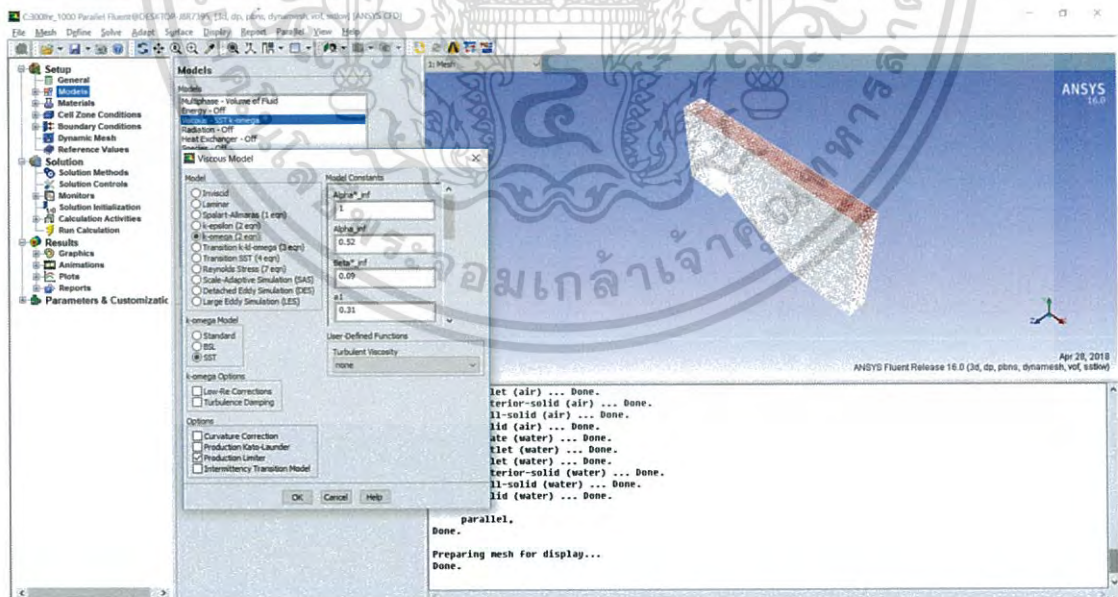
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.10 คลิก Models >>> Multiphase >>> Volume of Fluid >>> ตั้งค่าดังรูปภาพ



รูปที่ 9 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (9)

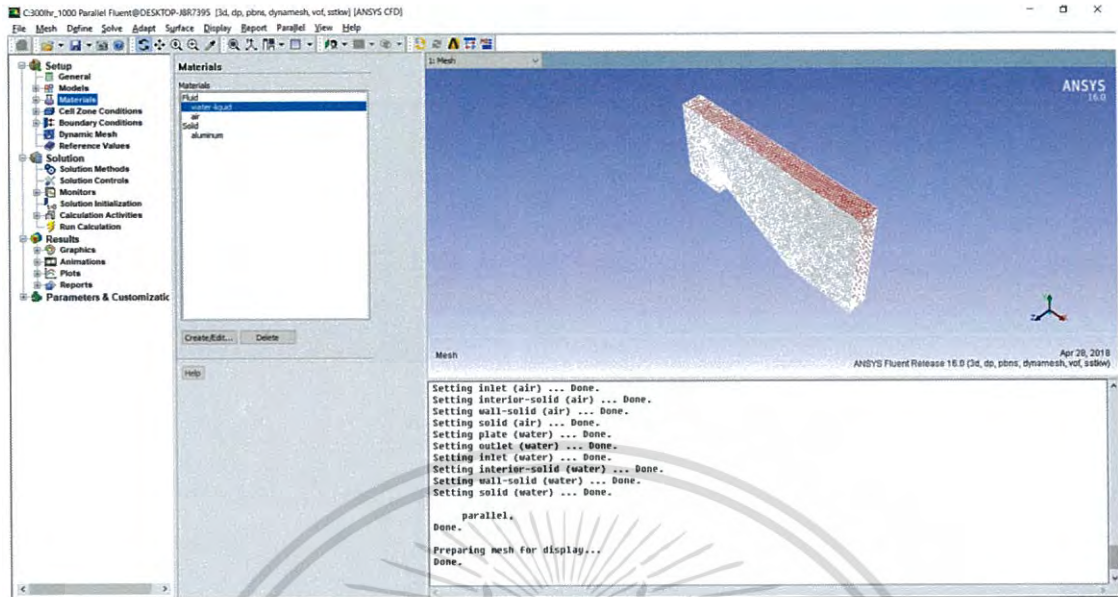
1.11 คลิก Models >>> Viscous >>> SST k - ω >>> ตั้งค่าดังรูปภาพ



รูปที่ 10 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (10)

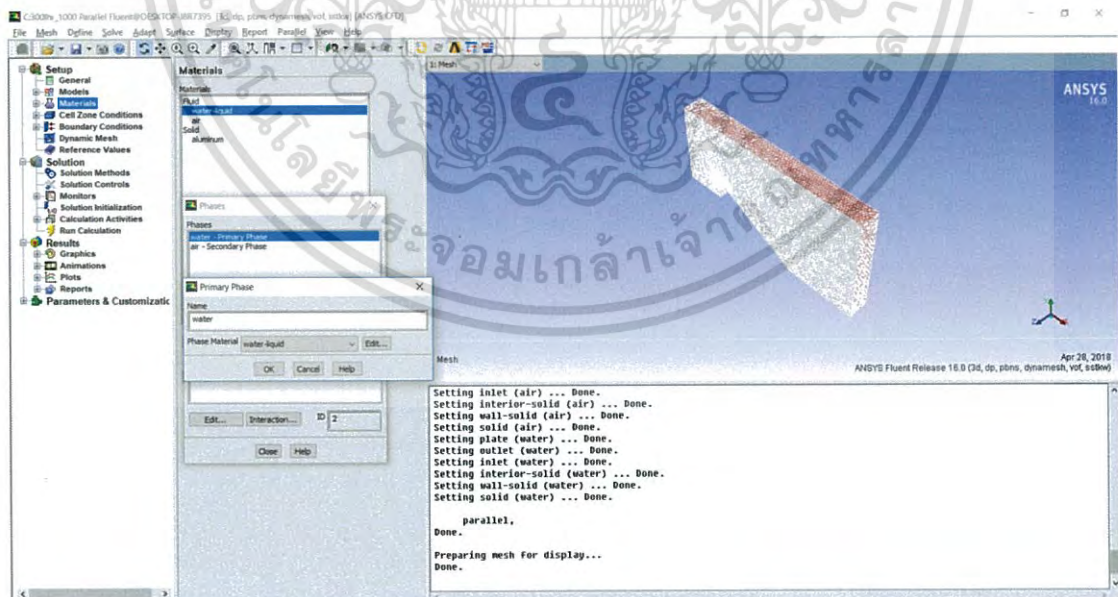
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.12 Materials >>> Fluid >>> water-liquid



รูปที่ 11 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (11)

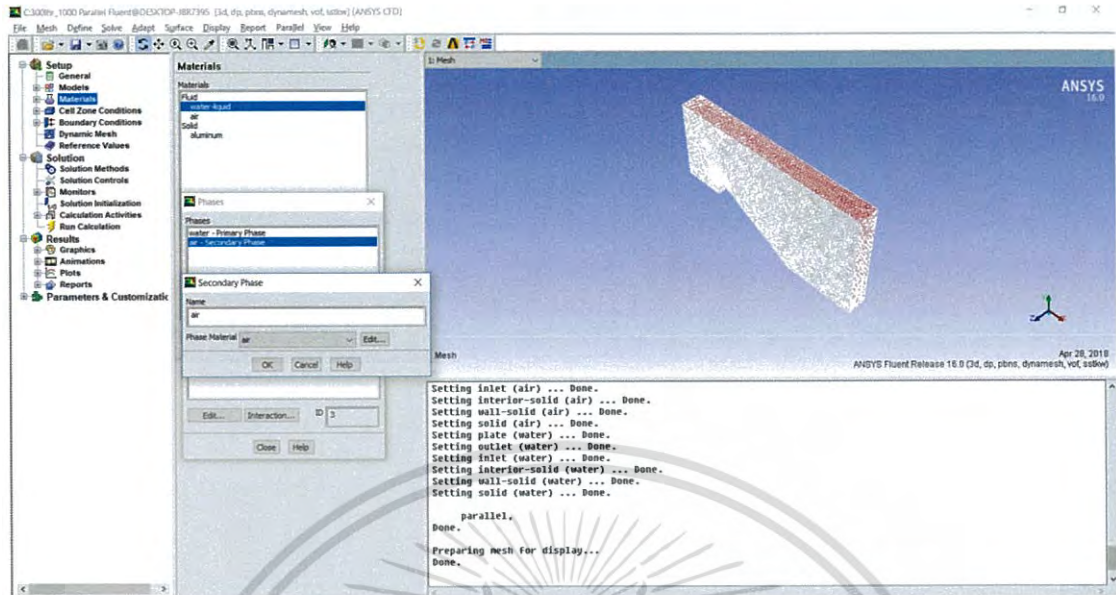
1.13 Define >>> Phases >>> Primary Phase >>> Edit... >>> ตั้งค่าตั้งรูปภาพ



รูปที่ 12 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (12)

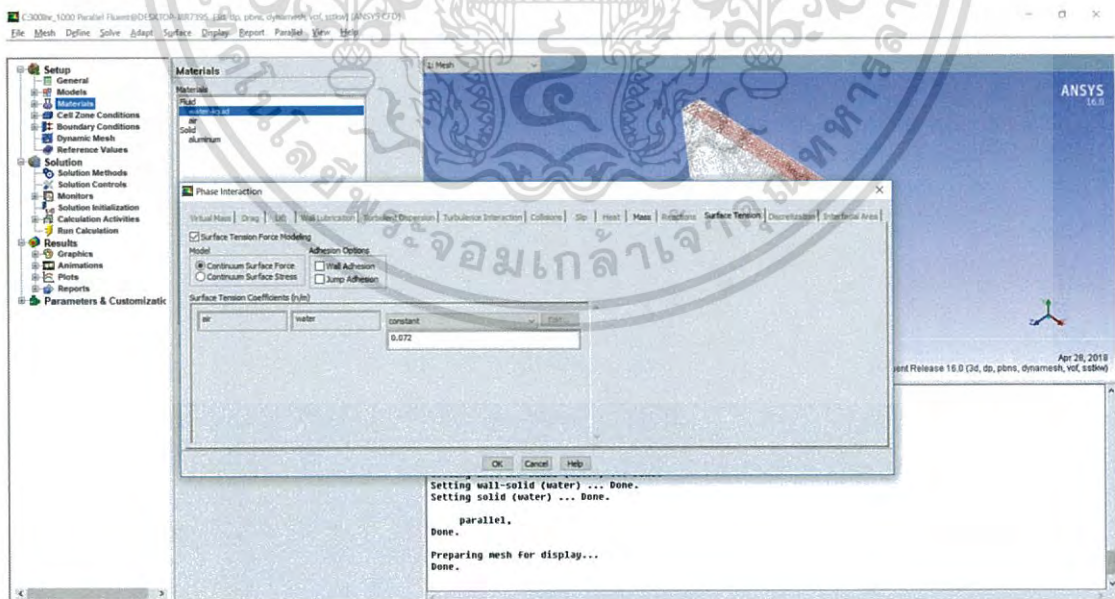
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.14 Define >>> Phases >>> Secondary Phase >>> Edit... >>> ตั้งค่าตั้งรูปภาพ



รูปที่ 13 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (13)

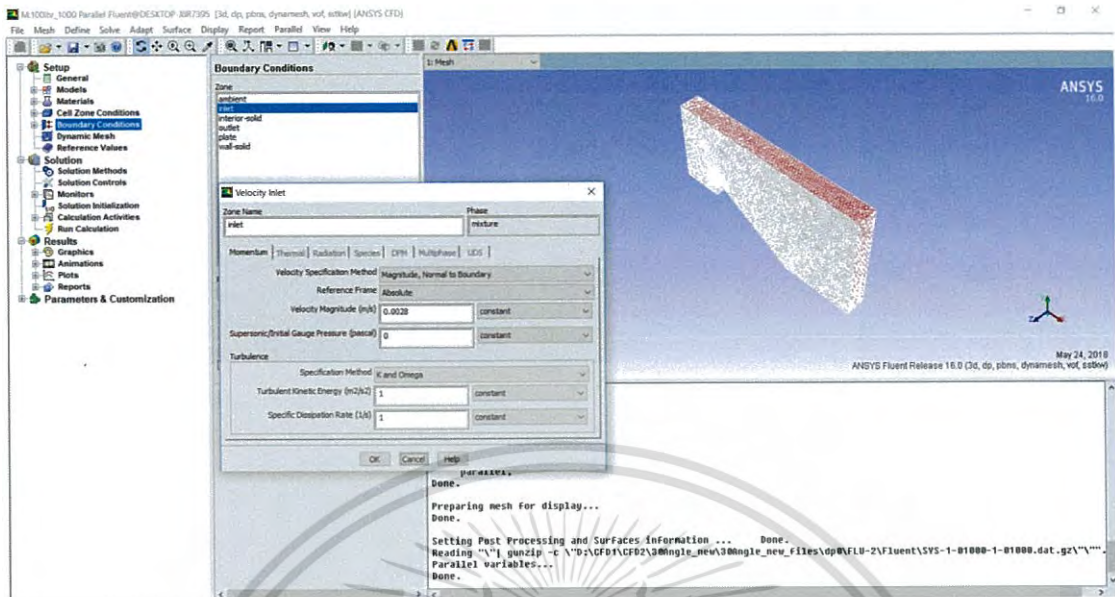
1.15 Define >>> Phases >>> Interaction >>> Surface Tension >>> ตั้งค่าตั้งรูปภาพ



รูปที่ 14 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (14)

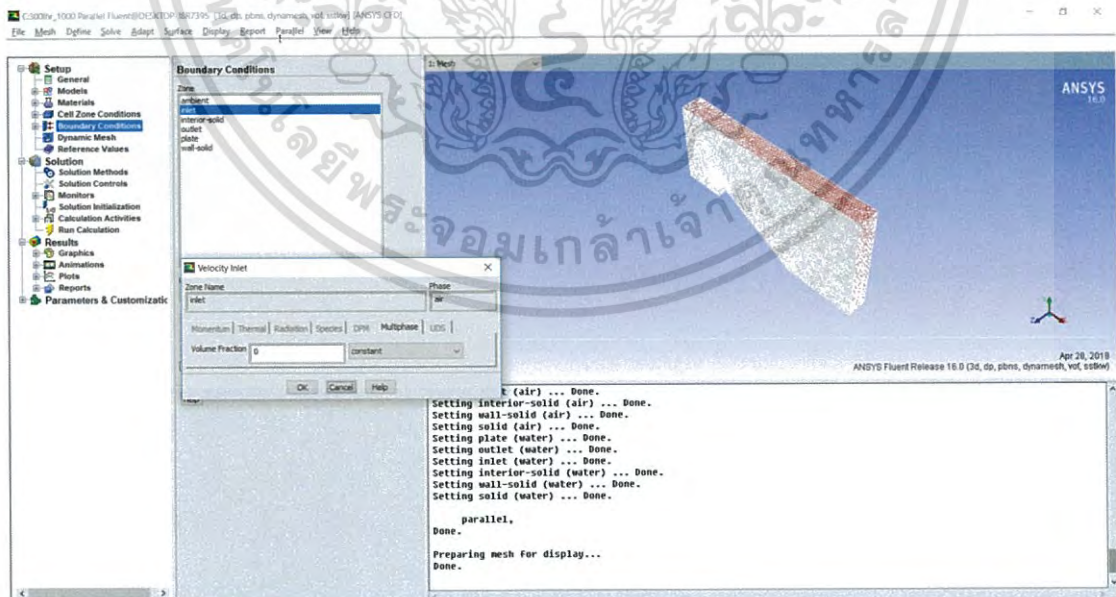
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.16 Boundary Conditions >>> inlet >>> phase >>> mixture >>> ใส่ค่าความเร็ว



รูปที่ 15 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (15)

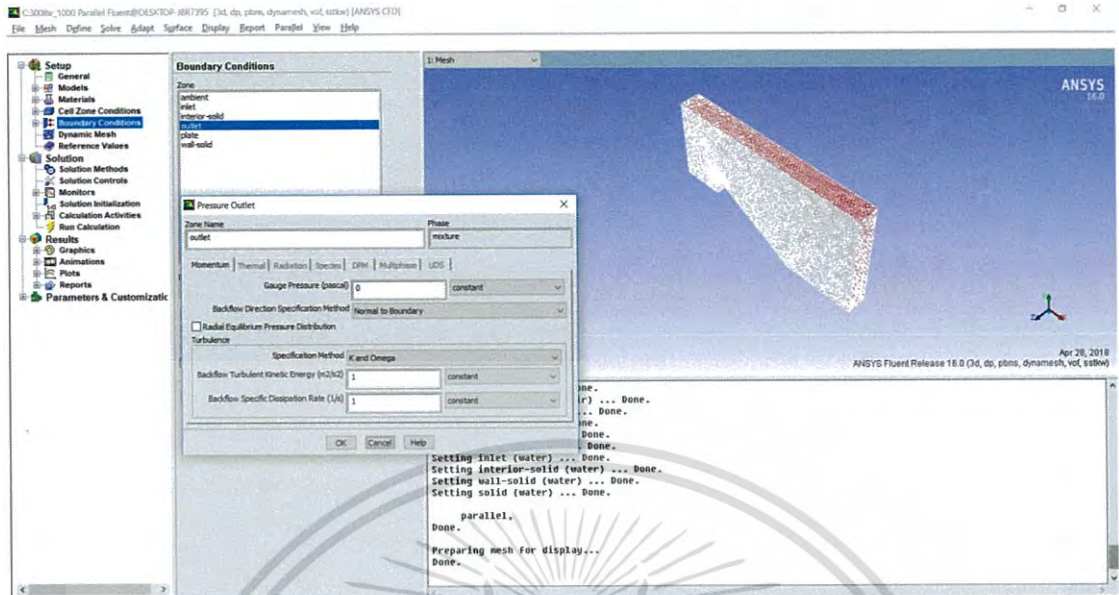
1.17 Boundary Conditions >>> inlet >>> phase >>> air >>> Volume Fraction = 0



รูปที่ 16 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (16)

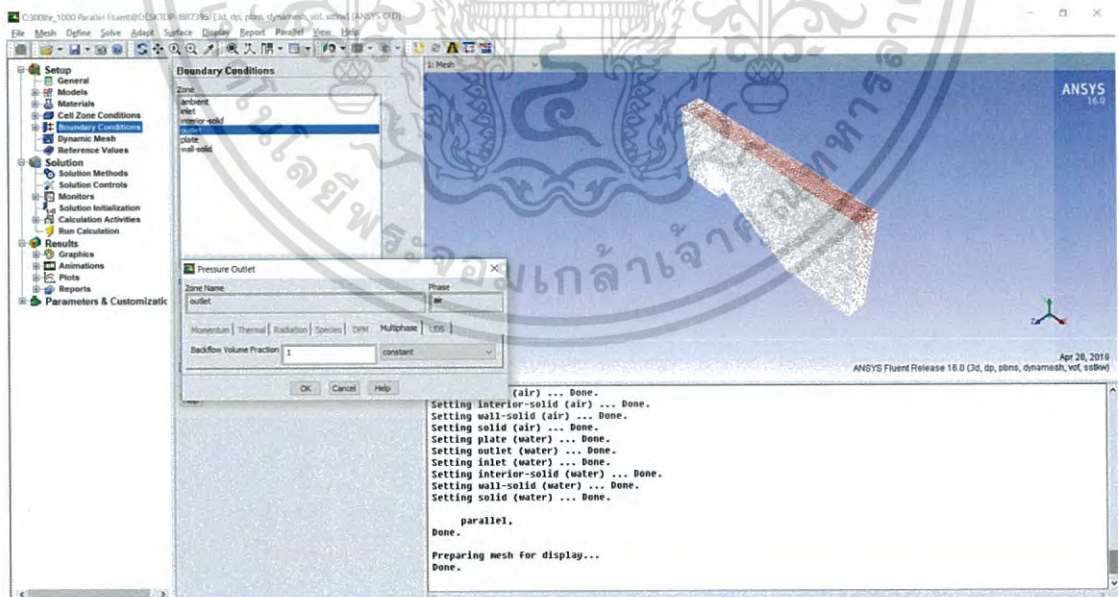
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.18 Boundary Conditions >>> outlet >>> phase >>> mixture >>> ตั้งค่าดังรูปภาพ



รูปที่ 17 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (17)

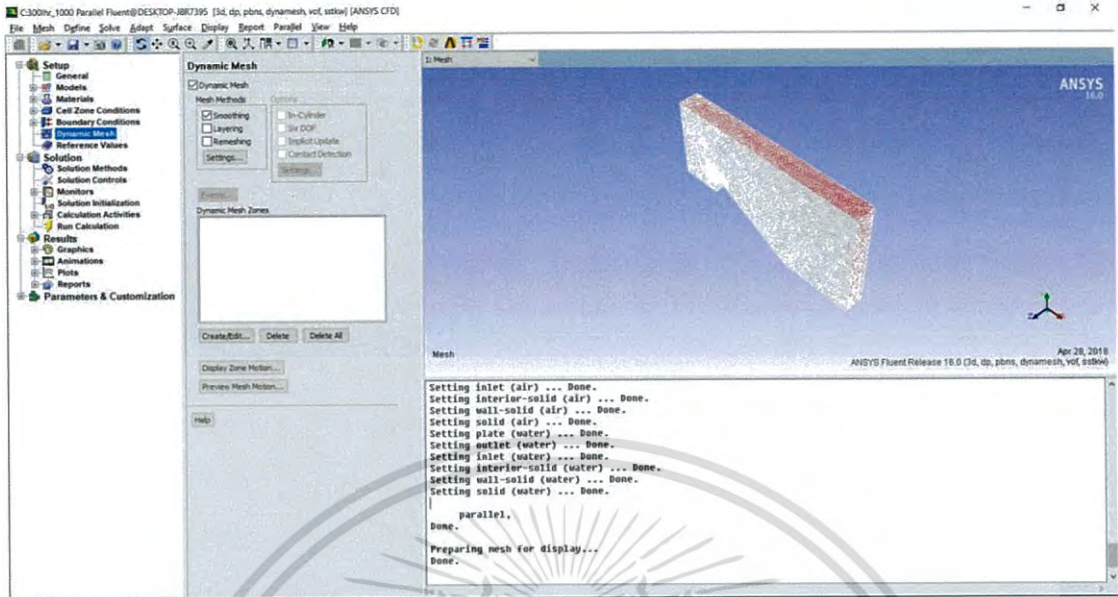
1.19 Boundary Conditions >>> outlet >>> phase >>> air >>> Backflow Volume Fraction = 1



รูปที่ 18 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (18)

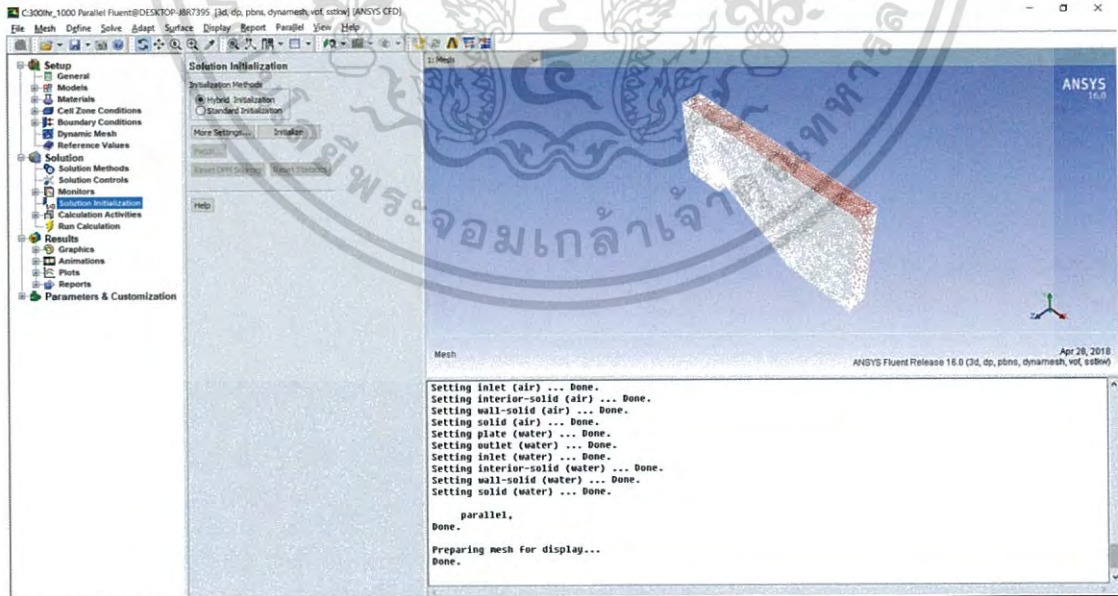
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.22 Dynamic Mesh



รูปที่ 22 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (22)

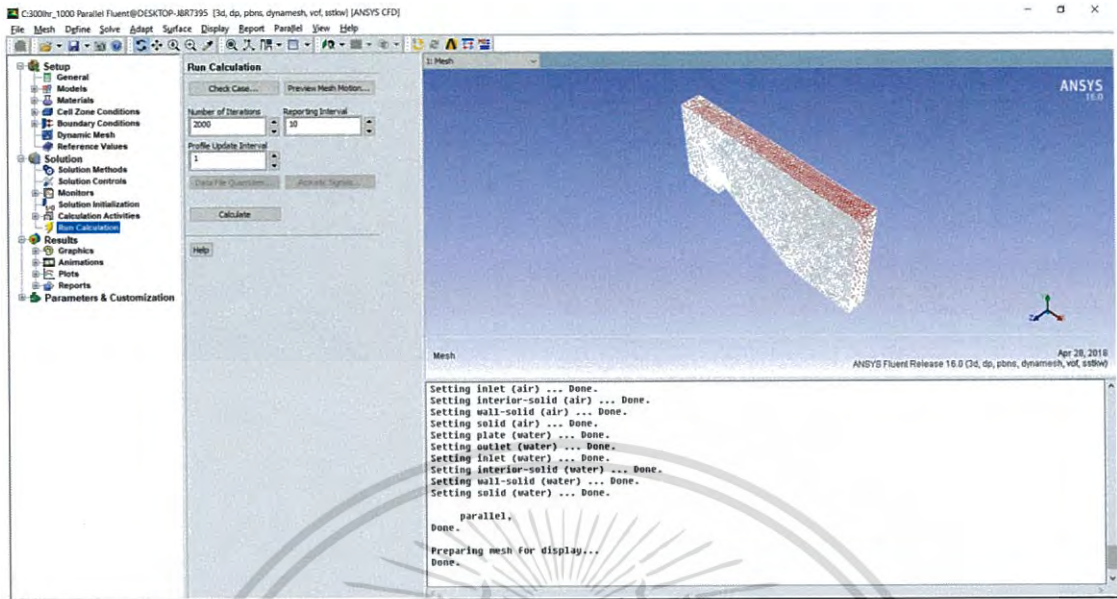
1.23 Solution Initialization >>> Hybrid Initialization >>> Initialize



รูปที่ 23 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (23)

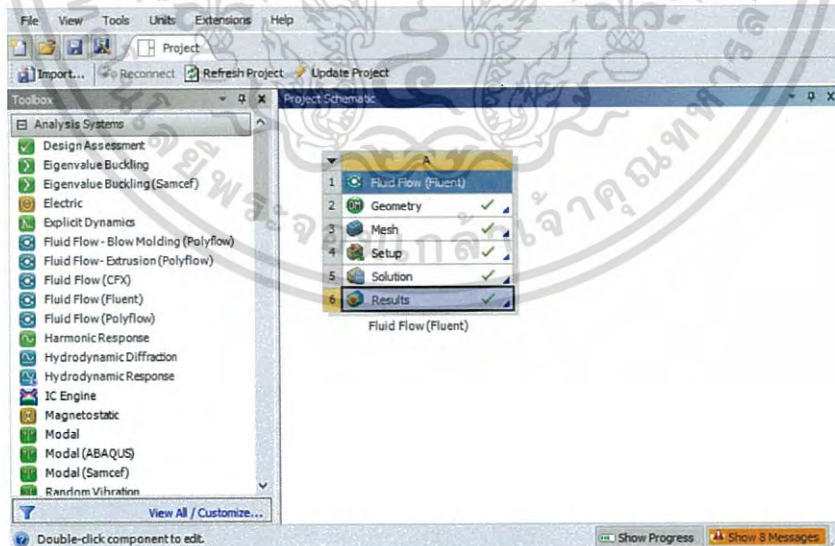
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.24 Run Calculation >>> Number of Iterations >>> 2,000



รูปที่ 24 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (24)

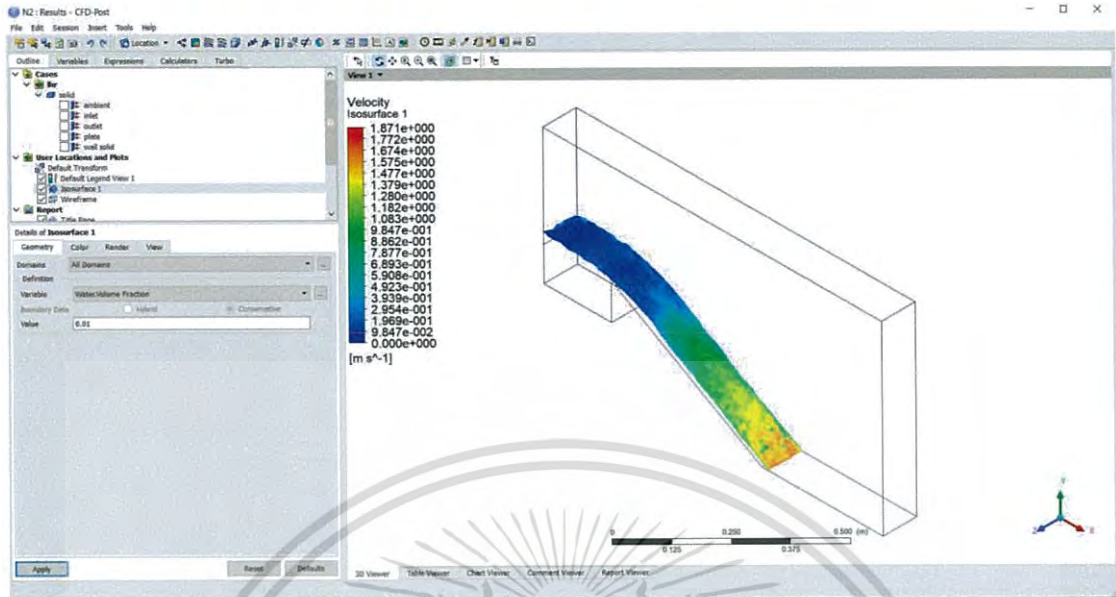
1.25 หลังจากคำนวณเสร็จสิ้น ดับเบิลคลิก Result



รูปที่ 25 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (25)

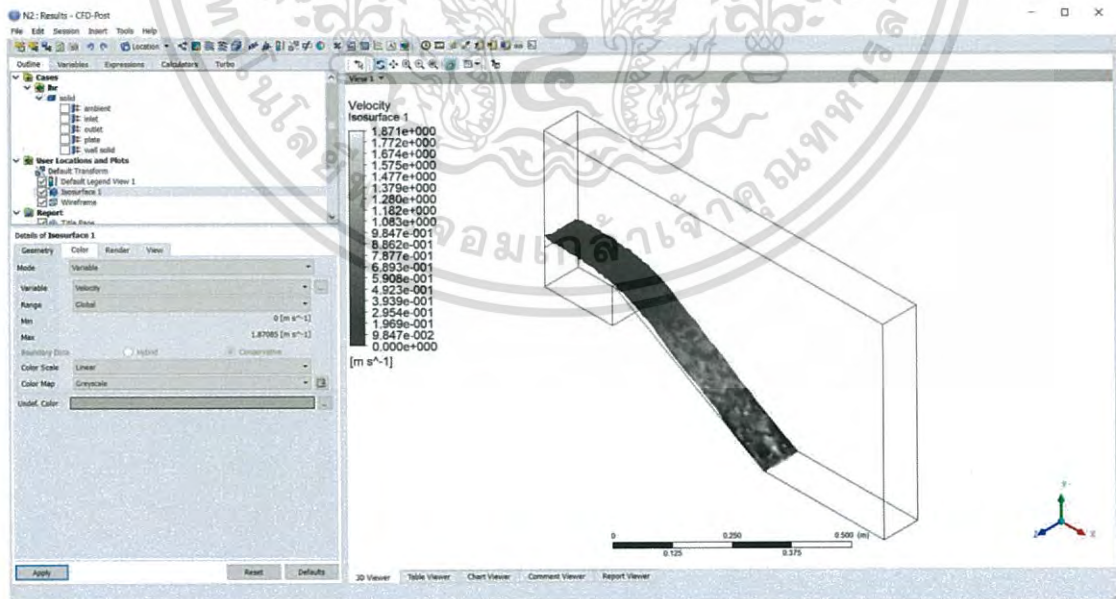
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.26 คลิก Location >>> Isosurface >>> Water. Volume Fraction 0.01



รูปที่ 26 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (26)

1.27 ปรับให้เป็น Greyscale >>> Isosurface >>> Color >>> Color Map >>> Greyscale



รูปที่ 27 การใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 16.0 (27)

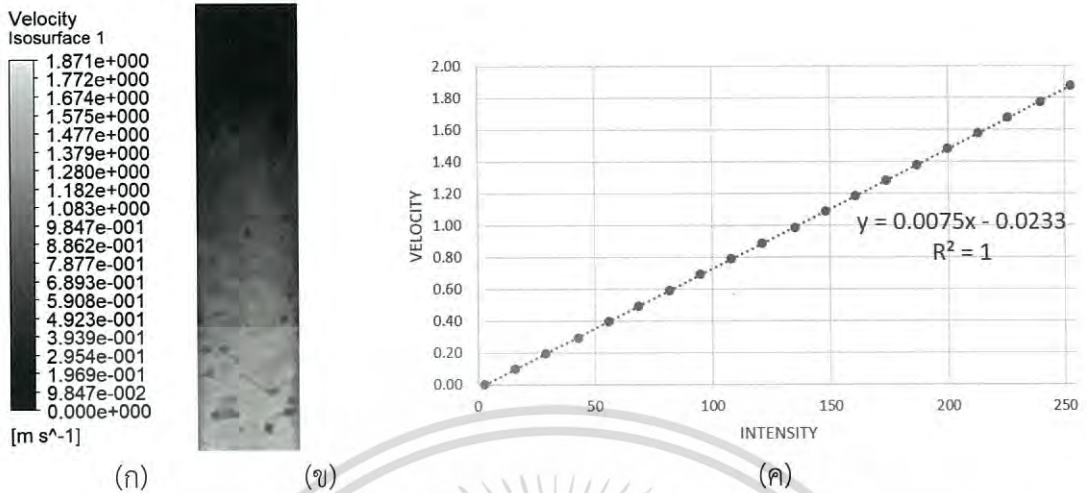
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 นำแถบสีความเร็วของผลการจำลองไปหาสมการการแปลงค่าสีเป็นความเร็วด้วยโปรแกรม

Microsoft Excel



รูปที่ 28 (ก) แถบสีความเร็วจากผลการจำลอง (ข) ผลการจำลองความเร็วของฟิล์มน้ำ

(ค) การหาสมการของความเร็วจากค่าสีที่มี 30 องศา อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง

2.2 นำผลการจำลองความเร็วของฟิล์มน้ำ (รูปที่ 28 (ข)) ไปวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม MATLAB โดย

ใส่โค้ดสำหรับวิเคราะห์ดังนี้

```

Line1 >> clc,
Line2 >> clear all,
Line3 >> close all,
Line4 >> im = imread('ชื่อไฟล์รูปภาพ');
Line5 >> imm = imrotate(im,0);
Line6 >> imgr = imm(:,:,1);
Line7 >> imdb = double(imgr);
Line8 >> [M,N] = size(imdb);
Line9 >> imdbh = zeros (M,N);
Line10 >> for i=1:M
Line11 >> for j=1:N
Line12 >> imdbh(i,j) = (((imdb(i,j))*0.0075)-0.0233);
Line13 >> end
Line14 >> end
Line15 >> S = 0.5;
Line16 >> V = 0.9025*10^-6;
Line17 >> G = 9.81;
Line18 >> imft = ((3*V*(imdbh)/(G*S)).^0.5)*1000;
Line19 >> subplot1 = subplot(2,2,1);
Line20 >> mesh(imdb);
Line21 >> colormap('jet');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Line22 >> xlim(subplot1,[0 N]);
Line23 >> ylim(subplot1,[0 M]);
Line24 >> zlim(subplot1,[0 255]);
Line25 >> grid(subplot1,'on');
Line26 >> hold(subplot1,'all');
Line27 >> xlabel('width (mm)','HorizontalAlignment','center');
Line28 >> ylabel('length (mm)','HorizontalAlignment','center');
Line29 >> zlabel('Intensity');
Line30 >> title({'Intensity Gray value','});
Line31 >> caxis([0,120])
Line32 >> subplot2 = subplot(2,2,2);
Line33 >> mesh(imdbh);
Line34 >> colormap('jet');
Line35 >> xlim(subplot2,[0 N]);
Line36 >> ylim(subplot2,[0 M]);
Line37 >> grid(subplot2,'on');
Line38 >> hold(subplot2,'all');
Line39 >> xlabel('width (mm)','HorizontalAlignment','center');
Line40 >> ylabel('length (mm)','HorizontalAlignment','center');
Line41 >> zlabel('Velocity (m/s)');
Line42 >> title({'Velocity','});
Line43 >> caxis([0,0.6])
Line44 >> subplot3 = subplot(2,2,3);
Line45 >> imsho = imrotate(imm,180);
Line46 >> imshoo = imshow(imsho);
Line47 >> subplot4 = subplot(2,2,4);
Line48 >> mesh(imft);
Line49 >> colormap('jet');
Line50 >> xlim(subplot4,[0 N]);
Line51 >> ylim(subplot4,[0 M]);
Line52 >> grid(subplot4,'on');
Line53 >> hold(subplot4,'all');
Line54 >> xlabel('width (mm)','HorizontalAlignment','center');
Line55 >> ylabel('length (mm)','HorizontalAlignment','center');
Line56 >> zlabel('thickness (mm)');
Line57 >> title({'Film Thickness','});
Line58 >> meantc = mean2(imft);
Line59 >> fprintf('Mean Film Thickness = %.4f',meantc);

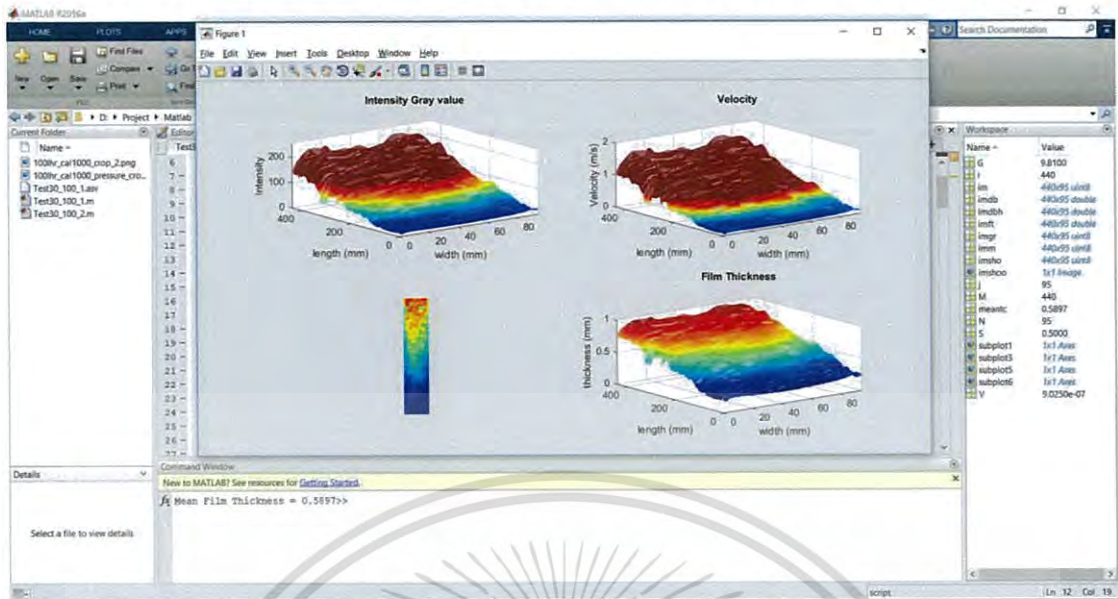
```

หมายเหตุ^a สมการของความเร็วเทียบกับค่าสี่

^b สมการคำนวณความหนาฟิล์มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 นำความเร็วและความหนาแต่ละตำแหน่งไปวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากชุดทดลอง



รูปที่ 31 การใช้โปรแกรม MATLAB (2)

ตารางที่ ข.1 ความเร็วของฟิล์มน้ำที่วิเคราะห์ได้จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ที่มุม 30 องศา อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง

ระยะ (เซนติเมตร)	ความเร็วของฟิล์มน้ำ (เมตรต่อวินาที)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.095	0.096	0.084	0.082	0.072	0.072	0.082	0.095	0.127	0.125
2	0.112	0.105	0.081	0.087	0.084	0.078	0.076	0.093	0.134	0.109
3	0.100	0.099	0.087	0.081	0.082	0.094	0.082	0.086	0.128	0.098
4	0.081	0.088	0.101	0.092	0.092	0.098	0.094	0.106	0.131	0.107
5	0.088	0.086	0.091	0.128	0.108	0.124	0.121	0.109	0.127	0.122
6	0.084	0.103	0.104	0.127	0.132	0.160	0.143	0.125	0.139	0.154
7	0.088	0.113	0.105	0.109	0.158	0.196	0.177	0.170	0.163	0.141
8	0.091	0.107	0.113	0.122	0.166	0.208	0.203	0.177	0.137	0.116
9	0.103	0.108	0.134	0.143	0.153	0.229	0.219	0.182	0.141	0.151
10	0.113	0.113	0.147	0.165	0.176	0.243	0.241	0.213	0.172	0.188
11	0.129	0.144	0.183	0.198	0.220	0.272	0.269	0.241	0.184	0.220
12	0.128	0.200	0.266	0.256	0.276	0.342	0.320	0.251	0.162	0.233
13	0.181	0.242	0.337	0.357	0.349	0.405	0.397	0.227	0.202	0.270
14	0.242	0.307	0.426	0.342	0.440	0.423	0.437	0.273	0.259	0.321
15	0.283	0.332	0.456	0.518	0.519	0.510	0.450	0.306	0.315	0.332

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16	0.303	0.457	0.508	0.588	0.502	0.489	0.445	0.356	0.387	0.344
17	0.361	0.503	0.562	0.594	0.579	0.538	0.511	0.461	0.442	0.367
18	0.400	0.499	0.519	0.570	0.592	0.617	0.632	0.522	0.465	0.410
19	0.388	0.460	0.520	0.612	0.679	0.672	0.684	0.617	0.520	0.458
20	0.400	0.451	0.551	0.661	0.699	0.713	0.705	0.583	0.513	0.494
21	0.421	0.515	0.595	0.700	0.733	0.784	0.715	0.576	0.548	0.531
22	0.477	0.524	0.655	0.709	0.740	0.841	0.798	0.656	0.601	0.548
23	0.484	0.595	0.705	0.750	0.793	0.872	0.847	0.776	0.614	0.510
24	0.488	0.610	0.681	0.744	0.804	0.808	0.868	0.799	0.586	0.497
25	0.511	0.598	0.679	0.739	0.778	0.887	0.881	0.827	0.717	0.511
26	0.621	0.680	0.767	0.819	0.811	0.901	0.920	0.861	0.740	0.561
27	0.756	0.807	0.785	0.810	0.933	0.945	0.997	0.903	0.773	0.595
28	0.721	0.797	0.914	0.909	0.929	0.956	1.011	0.963	0.818	0.606
29	0.718	0.821	0.993	0.929	0.942	1.038	0.978	0.958	0.880	0.522
30	0.774	0.894	0.963	0.913	0.947	1.001	1.011	0.954	0.852	0.591
31	0.779	0.817	0.961	1.040	1.050	1.137	1.115	1.016	0.821	0.586
32	0.815	0.879	0.934	1.006	1.098	1.091	1.170	1.081	0.816	0.689
33	0.832	1.042	1.074	1.050	1.129	1.151	1.183	1.155	0.951	0.756
34	0.815	1.044	1.050	1.103	1.156	1.202	1.199	1.150	1.023	0.740
35	0.775	1.036	1.081	1.054	1.150	1.215	1.197	1.101	0.948	0.690
36	0.806	1.077	1.113	1.110	1.178	1.185	1.168	1.206	1.147	0.803
37	0.796	1.033	1.144	1.207	1.231	1.223	1.268	1.274	1.147	0.798
38	0.787	1.053	0.958	1.213	1.274	1.277	1.265	1.247	1.146	0.923
39	0.980	1.150	1.167	1.166	1.255	1.263	1.302	1.211	1.118	0.861
40	1.095	1.189	1.176	1.240	1.270	1.248	1.205	1.173	1.239	0.920
41	0.980	1.085	1.242	1.310	1.261	1.267	1.227	1.282	1.322	0.903
42	1.081	1.283	1.297	1.348	1.337	1.280	1.269	1.279	1.200	0.838
43	1.098	1.297	1.313	1.309	1.353	1.316	1.186	1.175	1.266	0.897
44	1.171	1.346	1.181	1.179	1.336	1.337	1.390	1.426	1.103	0.791
45	1.203	1.140	1.068	1.129	1.410	1.348	1.429	1.396	0.890	0.901
46	1.201	1.186	1.217	1.272	1.405	1.363	1.335	1.390	1.310	1.067
47	1.260	1.417	1.341	1.355	1.320	1.332	0.997	1.429	1.453	1.115
48	1.262	1.414	1.387	1.414	1.392	1.376	1.443	1.501	1.472	1.172
49	1.281	1.507	1.496	1.409	1.403	1.368	1.487	1.514	1.492	1.208
50	1.387	1.627	1.552	1.470	1.480	1.348	1.546	1.641	1.541	1.292

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ความหนาของฟิล์มน้ำที่วิเคราะห์ได้จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ที่มุม 30 องศา อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง

ระยะ (เซนติเมตร)	ความหนาของฟิล์มน้ำ (มิลลิเมตร)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.228	0.230	0.215	0.212	0.199	0.200	0.212	0.229	0.265	0.262
2	0.248	0.240	0.211	0.218	0.214	0.208	0.205	0.226	0.272	0.244
3	0.234	0.234	0.218	0.211	0.213	0.228	0.212	0.218	0.266	0.231
4	0.211	0.220	0.236	0.225	0.226	0.232	0.228	0.241	0.269	0.243
5	0.219	0.217	0.224	0.264	0.243	0.261	0.257	0.245	0.264	0.259
6	0.215	0.238	0.239	0.264	0.269	0.297	0.280	0.261	0.276	0.290
7	0.220	0.249	0.241	0.245	0.294	0.329	0.312	0.306	0.299	0.277
8	0.224	0.243	0.250	0.259	0.302	0.339	0.335	0.312	0.275	0.253
9	0.238	0.244	0.272	0.281	0.290	0.355	0.347	0.316	0.278	0.288
10	0.250	0.249	0.285	0.302	0.311	0.366	0.364	0.342	0.307	0.322
11	0.266	0.282	0.317	0.331	0.348	0.388	0.385	0.364	0.319	0.348
12	0.265	0.331	0.382	0.375	0.390	0.434	0.419	0.371	0.299	0.358
13	0.314	0.365	0.431	0.443	0.439	0.473	0.468	0.352	0.333	0.386
14	0.363	0.411	0.485	0.431	0.492	0.483	0.490	0.387	0.378	0.421
15	0.395	0.428	0.501	0.534	0.535	0.530	0.498	0.410	0.416	0.428
16	0.409	0.501	0.529	0.570	0.526	0.520	0.495	0.443	0.462	0.436
17	0.444	0.526	0.557	0.573	0.565	0.544	0.530	0.503	0.493	0.450
18	0.468	0.525	0.535	0.560	0.571	0.584	0.590	0.536	0.506	0.475
19	0.463	0.504	0.535	0.581	0.612	0.609	0.614	0.583	0.535	0.502
20	0.469	0.499	0.551	0.604	0.621	0.627	0.624	0.567	0.532	0.522
21	0.481	0.533	0.573	0.621	0.636	0.658	0.628	0.564	0.550	0.541
22	0.512	0.537	0.601	0.625	0.639	0.681	0.663	0.601	0.576	0.550
23	0.515	0.573	0.624	0.643	0.661	0.693	0.684	0.654	0.582	0.530
24	0.517	0.580	0.613	0.641	0.666	0.667	0.692	0.664	0.568	0.523
25	0.529	0.574	0.612	0.638	0.654	0.700	0.697	0.675	0.629	0.530
26	0.584	0.612	0.651	0.672	0.667	0.705	0.713	0.689	0.638	0.556
27	0.645	0.667	0.658	0.667	0.718	0.722	0.742	0.706	0.653	0.572
28	0.629	0.663	0.710	0.708	0.716	0.726	0.747	0.729	0.672	0.578
29	0.628	0.673	0.740	0.716	0.721	0.757	0.735	0.727	0.697	0.531
30	0.653	0.703	0.729	0.710	0.723	0.743	0.747	0.726	0.686	0.568
31	0.654	0.671	0.728	0.758	0.761	0.792	0.784	0.749	0.672	0.565
32	0.669	0.696	0.718	0.745	0.778	0.776	0.804	0.772	0.669	0.616

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

33	0.675	0.758	0.770	0.761	0.789	0.797	0.808	0.798	0.722	0.645
34	0.666	0.758	0.760	0.780	0.799	0.814	0.813	0.797	0.751	0.638
35	0.647	0.755	0.772	0.763	0.796	0.819	0.813	0.778	0.721	0.613
36	0.664	0.771	0.784	0.783	0.806	0.809	0.803	0.816	0.795	0.661
37	0.657	0.755	0.794	0.816	0.824	0.821	0.837	0.839	0.795	0.657
38	0.656	0.761	0.724	0.818	0.839	0.840	0.835	0.830	0.795	0.713
39	0.733	0.796	0.802	0.802	0.832	0.835	0.848	0.817	0.785	0.688
40	0.776	0.809	0.806	0.827	0.837	0.830	0.816	0.805	0.827	0.710
41	0.733	0.771	0.828	0.850	0.834	0.836	0.823	0.841	0.854	0.703
42	0.771	0.841	0.846	0.863	0.859	0.840	0.837	0.840	0.813	0.679
43	0.777	0.846	0.851	0.850	0.864	0.852	0.806	0.803	0.835	0.702
44	0.803	0.862	0.807	0.805	0.859	0.859	0.876	0.887	0.775	0.659
45	0.814	0.787	0.767	0.785	0.882	0.863	0.888	0.877	0.695	0.704
46	0.813	0.805	0.817	0.834	0.880	0.867	0.856	0.875	0.847	0.766
47	0.833	0.884	0.860	0.864	0.853	0.858	0.733	0.887	0.895	0.783
48	0.833	0.883	0.875	0.883	0.877	0.872	0.892	0.910	0.901	0.803
49	0.839	0.912	0.908	0.882	0.880	0.869	0.906	0.914	0.908	0.816
50	0.874	0.948	0.925	0.901	0.904	0.863	0.923	0.952	0.922	0.844

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ความเร็วของฟิล์มน้ำที่มุ่มและอัตราการไหลต่าง ๆ

มุ่ม (องศา)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ความเร็วของฟิล์มน้ำ (เมตรต่อวินาที)								
		ช่วงที่ 1*			ช่วงที่ 2**			ช่วงที่ 3***		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
30	100	0.611	0.604	0.597	0.827	0.728	0.735	0.834	0.812	0.880
	200	1.018	1.010	0.951	1.041	1.018	1.128	1.191	1.159	1.127
	300	1.182	1.183	1.193	1.406	1.250	1.260	1.513	1.406	1.269
60	100	0.609	0.768	0.733	0.874	0.861	1.125	0.883	0.627	1.254
	200	1.137	1.146	1.114	1.023	1.334	1.104	1.494	1.254	1.382
	300	1.277	1.428	1.190	1.413	1.413	1.222	1.429	1.719	1.362

* ระยะ 0-16 เซนติเมตร

** ระยะ 16-32 เซนติเมตร

*** ระยะ 32-50 เซนติเมตร

ตารางที่ ค.2 ความหนาของฟิล์มน้ำที่มุ่มและอัตราการไหลต่าง ๆ

มุ่ม (องศา)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ครั้งที่	ความหนาของฟิล์มน้ำ (มิลลิเมตร) ที่ระยะต่าง ๆ (เซนติเมตร)									
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
30	100	1	0.467	0.620	0.511	0.725	0.579	0.498	0.506	0.513	0.540	0.487
		2	0.493	0.571	0.551	0.631	0.523	0.567	0.550	0.543	0.575	0.591
		3	0.469	0.628	0.556	0.630	0.575	0.633	0.636	0.555	0.613	0.595
	200	1	0.802	0.770	0.813	0.742	0.750	0.706	0.720	0.680	0.748	0.790
		2	0.788	0.725	0.735	0.703	0.635	0.748	0.603	0.682	0.665	0.661
		3	0.751	0.874	0.839	0.697	0.740	0.676	0.734	0.702	0.718	0.647
	300	1	0.625	0.682	0.677	0.695	0.729	0.759	0.746	0.702	0.765	0.738
		2	0.679	0.717	0.714	0.731	0.768	0.782	0.752	0.731	0.709	0.716
		3	0.679	0.717	0.714	0.731	0.770	0.782	0.772	0.701	0.759	0.746
60	100	1	0.569	0.496	0.454	0.499	0.587	0.547	0.516	0.490	0.580	0.442
		2	0.504	0.510	0.529	0.554	0.474	0.488	0.533	0.536	0.575	0.557
		3	0.581	0.595	0.531	0.451	0.578	0.559	0.528	0.487	0.572	0.560
	200	1	0.554	0.636	0.694	0.649	0.678	0.577	0.670	0.653	0.65	0.745
		2	0.619	0.522	0.595	0.674	0.721	0.506	0.646	0.759	0.602	0.626
		3	0.699	0.698	0.732	0.720	0.566	0.616	0.715	0.768	0.746	0.768
	300	1	0.639	0.785	0.824	0.778	0.614	0.603	0.731	0.712	0.740	0.768
		2	0.742	0.705	0.761	0.783	0.787	0.681	0.718	0.692	0.712	0.657
		3	0.758	0.607	0.740	0.741	0.808	0.793	0.738	0.723	0.725	0.662

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้