

ชุดทดลองสำหรับตรวจสอบพฤติกรรมการทำมาสะอาดคราบอาหาร
บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

EXPERIMENTAL SETUP FOR EVALUATION OF CLEANING BEHAVIOUR OF
THE DEPOSIT OF FOODS ON STAINLESS STEEL SURFACE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-270-049

ชุดทดลองสำหรับตรวจสอบพฤติกรรมการทำมาสะอาดคราบอาหาร
บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

EXPERIMENTAL SETUP FOR EVALUATION OF CLEANING BEHAVIOUR OF
THE DEPOSIT OF FOODS ON STAINLESS STEEL SURFACE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-270-049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL SETUP FOR EVALUATION OF CLEANING BEHAVIOUR OF
THE DEPOSIT OF FOODS ON STAINLESS STEEL SURFACE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

KMITL-2019-EN-M-270-049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ชุดทดลองสำหรับตรวจสอบพฤติกรรมการทำความสะอาด คราบอาหารบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม
นักศึกษา	นางสาวนวพร สุธนรักษ์
รหัสประจำตัว	61601019
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. นวภัทรา หนูนา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	รศ. ดร. ทวีพล ชื้อสัตย์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอชุดทดลองสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบอาหารบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยฟิล์มของเหลว โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$) ร่วมกับ Volume of Fluid (VOF) สำหรับการศึกษาแรงทางกลหรือความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว จากการทดลองทำความสะอาดแผ่นทดสอบที่เคลือบด้วยคราบแข็งสำหรับหลังสุกและคราบนมชั้นหวาน และพิจารณาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดด้วยการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ พบว่า พฤติกรรมหลุดออกของคราบแข็งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการบวม ช่วงการหลุดอย่างรวดเร็ว และช่วงการหลุดอย่างช้า โดยในช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ทำให้คราบเกิดการบวม แนะนำให้ใช้ความเร็วการไหล อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดปานกลางในการทำความสะอาด ช่วงที่ 2 แนะนำให้ใช้ความเร็วการไหลสูง อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดปานกลางในการทำความสะอาด และในช่วงที่ 3 แนะนำให้ใช้ความเร็วการไหลสูงในการทำความสะอาด เนื่องจากในช่วงนี้คราบต้องการแรงเฉือนในการทำความสะอาด ส่วนการทำความสะอาดคราบนมชั้นหวานต้องการปฏิกิริยาเคมีเพื่อทำให้คราบละลายในการทำความสะอาด จึงแนะนำให้ใช้อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดสูงในการทำความสะอาด

Thesis Title	Experimental Setup for Evaluation of Cleaning Behaviour of the Deposit of Foods on Stainless Steel Surface
Student	Miss Nawaporn Suthanarak
Student ID.	61601019
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Navapattra Nunak
Thesis Co – Advisor	Assoc. Prof. Dr.Taweepol Suesut

ABSTRACT

The objective of this study is to propose the experimental setup for investigating of cleaning behavior of food deposited on stainless steel surface by falling liquid film. The Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$) with the Volume of Fluid (VOF) model of computational fluid dynamics is used to simulate the mechanical force or wall shear stress on the surface. Testing plates coated with cooked tapioca starch paste and cooked sweet condensed milk were installed and cleaned on the proposed experimental unit to investigate their cleaning behaviors and to analyze the main factors affecting to the cleaning process using the correlation analysis. From the experiments, it was found that the cleaning behavior of tapioca starch paste can be divided into 3 stages; swelling, rapid and gradual stages. In swelling stage, soil needed the cleaning time for swelling; therefore, there was no specific factor requested in this period. While the maximum flow velocity was recommended in the rapid stage. For the last stage, the high wall shear stress created from the high flow velocity of cleaning fluid was requested to destroy the adhesive strength between soil and surface. In case of cleaning of sweet condensed milk, high temperature and concentration of cleaning fluid were recommended to enhance the solubility during the cleaning process.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. นวภัทรา หนูนาท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.ทวิพล ชื่อสัตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ คำแนะนำ รวมถึงช่วยแก้ปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมอาหารทุกท่านที่ให้ความรู้และสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์พัฒนานวัตกรรมและบริการทางวิศวกรรม (EIDTS) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุน อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ทำวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาในการขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับสร้างชุดทดลอง ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุมที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่รวมถึงอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

ขอขอบคุณนางสาวเมธิณี สงไทย์ ที่ให้คำปรึกษาการใช้โปรแกรม Matlab ในการประมวลผลการทดลอง

ขอขอบคุณนายพนธกร ศิริปริญญาพันธ์ ที่ให้คำปรึกษาการใช้โปรแกรม Ansys Fluent สำหรับทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณนายกิตติศักดิ์ ศรีชัยธำรง และนางสาวณัฐนรี พรหมา ที่ช่วยวัดความหนาของฟิล์มน้ำในการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์ที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ผู้เขียนขอบแต่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน และขอให้อะไร ๆ ท่านจงประสบแต่ความสุขความเจริญตลอดไป

นวพร สุธนรักษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร.....	4
2.1 การแบ่งประเภทของคราบและกลไกในการทำความสะอาด.....	4
2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำความสะอาดของฟิล์มของเหลว.....	6
2.2.1 แรงกระทำทางกล.....	6
2.2.2 ปฏิกริยาเคมี.....	8
2.2.3 อุณหภูมิ.....	8
2.3 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	8
2.3.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-ε.....	8
2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน k-ω.....	9
2.3.3 แบบจำลองหลายสถานะ.....	10
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.4.1 การจำลองการไหลของฟิล์มของเหลว.....	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 การทำความสะอาดคราบ.....	11
บทที่ 3 การออกแบบชุดทดลองและวิธีการทดลอง.....	13
3.1 การออกแบบชุดทดลอง.....	13
3.1.1 ชุดทดลองเพื่อเลือกใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สำหรับการจำลองความเค้นเฉือน.....	13
3.1.1.1 จำลองการไหลของฟิล์มน้ำ.....	15
3.1.2 ชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของคราบอาหาร.....	20
3.2 การเตรียมตัวอย่างคราบอาหาร.....	21
3.2.1 คราบแป้งมันสำปะหลังสุก.....	21
3.2.2 คราบนมข้นหวาน.....	24
3.3 การทดลอง.....	25
3.4 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทำความสะอาด.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	28
4.1 พฤติกรรมการหลุดออกของคราบระหว่างการทำความสะอาด.....	28
4.1.1 คราบแป้งมันสำปะหลังสุก.....	28
4.1.2 คราบนมข้นหวาน.....	37
4.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทำความสะอาด.....	41
4.2.1 คราบแป้งมันสำปะหลังสุก.....	41
4.2.2 คราบนมข้นหวาน.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	44
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก.....	49
ประวัติผู้เขียน.....	85



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลองเพื่อเลือกใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการจำลองความเค้นเฉือน.....	14
3.2 รายละเอียดการสร้างโครงตาข่าย.....	16
3.3 การกำหนดสถานะในการจำลองการไหลของฟิล์มน้ำ.....	17
3.4 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนเฉลี่ยจากการจำลองค่าอ้างอิงที่ระยะ 10 ถึง 50 เซนติเมตร จากจุดเริ่มต้น.....	19
3.5 ส่วนประกอบของชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของคราบอาหาร.....	21
3.6 รายละเอียดของอุปกรณ์การเตรียมคราบแป้งมันสำปะหลังสุกบนแผ่นทดสอบ.....	22
3.7 ส่วนประกอบโดยประมาณของนมข้นหวาน.....	24
3.8 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทำความสะอาด.....	26
4.1 ผลของความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุกในช่วงที่ 1.....	31
4.2 ผลของความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุกในช่วงที่ 2.....	33
4.3 ผลของความเร็วการไหลต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุกในช่วงที่ 3.....	34
4.4 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุกในช่วงที่ 3.....	34
4.5 ผลของความเร็วการไหลต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุก.....	36
4.6 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุก.....	36
4.7 ผลของความเร็วการไหลต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งนมข้นหวาน.....	40
4.8 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบนมข้นหวาน.....	40
4.9 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการทำความสะอาดกับเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุก.....	42

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ค่าสัมพัทธ์ระหว่างปัจจัยการทำความสะอาดกับเวลาในการทำความสะอาด นมชั้นหวาน.....	43



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการหลุดออกของคราบ.....	5
2.2 แผนภาพการทำความสะอาด.....	5
2.3 ลักษณะการไหลของฟิล์ม.....	7
3.1 ชุดทดลองเพื่อเลือกใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการจำลอง ความเค้นเฉือน.....	13
3.2 ตำแหน่งการวัดความหนาของฟิล์มน้ำ.....	14
3.3 โค้งตาข่ายทรงหกเหลี่ยม.....	15
3.4 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	18
3.5 ความเค้นเฉือนจากการจำลองและค่าอ้างอิงจากการทดลองที่มุมเอียง 60 องศา ความเร็วการไหล 1.30 เมตรต่อวินาที (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ).....	19
3.6 ชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของคราบอาหาร.....	20
3.7 ชุดอุปกรณ์การเตรียมคราบแป้งมันสำปะหลังสุก.....	22
3.8 ชุดอุปกรณ์ปาดคราบ.....	23
3.9 คราบแป้งมันสำปะหลังสุก.....	24
3.10 คราบนมข้นหวาน.....	25
3.11 รางรองรับแผ่นทดสอบ.....	25
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคราบแป้งมันสำปะหลังสุกกับเวลาในการทำความสะอาด (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ).....	29
4.2 การแบ่งช่วงลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งมันสำปะหลังสุก.....	30
4.3 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาด คราบแป้งมันสำปะหลังสุกในช่วงที่ 1 (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ).....	32
4.4 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาด คราบแป้งมันสำปะหลังสุกในช่วงที่ 2 (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ).....	33

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุกในช่วงที่ 3 (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ).....	35
4.6 อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุก (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ).....	37
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคราบนมชั้นหวานกับเวลาในการทำความสะอาด (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ).....	38
4.8 อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบนมชั้นหวาน (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ).....	40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมอาหารการทำความสะอาดพื้นผิวอุปกรณ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการกำจัดจุลินทรีย์และสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิวเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนข้าม อาหารที่ผลิตได้มีคุณภาพและปลอดภัยต่อการบริโภค โดยกระบวนการทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพหรือการทำความสะอาดที่ใช้ระยะเวลาสั้น จะช่วยเพิ่มระยะเวลาในการผลิตและลดต้นทุนในการทำความสะอาดลงได้ การทำความสะอาดอุปกรณ์แปรรูปอาหารในระบบปิด เช่น ถังขนาดใหญ่ นิยมทำความสะอาดแบบไม่ถอดชิ้นส่วน (Cleaning in Place หรือ CIP) ด้วยการติดตั้งสเปรย์บอลในการทำความสะอาดพื้นผิวภายในถัง โดยสเปรย์บอลจะฉีดพ่นสารทำความสะอาดไปกระทบพื้นผิวด้านในถัง ทำให้คราบบางส่วนหลุดออกจากพื้นผิวเนื่องจากแรงกระแทก (Impact Force) จากนั้นสารทำความสะอาดจะไหลลงตามแรงโน้มถ่วงโลกก่อให้เกิดฟิล์มของเหลวขุ่น (Falling Liquid Films) และเกิดความเค้นเฉือนในการทำความสะอาดคราบออกจากพื้นผิว [1-4] โดยความเค้นเฉือนเป็นปัจจัยสำคัญในการทำความสะอาดซึ่งขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ได้แก่ อัตราการไหลของสารทำความสะอาด ความหนาแน่นของสารทำความสะอาด มุมเอียงของพื้นผิว และความหนาของฟิล์มของเหลวที่เกิดขึ้น [1, 3, 5-6] โดยตัวแปรที่กล่าวมาความหนาของฟิล์มของเหลวเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลง โดยความเค้นเฉือนสามารถหาได้จากการคำนวณ [5] หรือการประมาณค่าจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งในการคำนวณจำเป็นต้องมีการวัดค่าจากอุปกรณ์จริงหรือชุดทดลอง จึงเป็นวิธีที่ต้องการเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก ส่วนการใช้พลศาสตร์เชิงคำนวณเป็นการจำลองการไหลของของไหลซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ชุดทดสอบหรือการวัดค่าจากอุปกรณ์จริง เป็นวิธีที่ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายอีกทั้งยังได้รับความนิยมและยอมรับอย่างแพร่หลาย [7-12] โดยนอกจากแรงกระทำทางกลหรือความเค้นเฉือนแล้ว ปฏิกริยาเคมี (การละลายและซาฟอนนิฟิเคชัน (Saponification)) ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการทำความสะอาดคราบด้วยเช่นกัน [1-2, 4, 13-17]

หากพิจารณากระบวนการแปรรูปอาหาร การให้ความร้อนในกระบวนการผลิตส่งผลให้อาหารมีความหนืดมากขึ้นและเกาะติดกับพื้นผิวของอุปกรณ์ ซึ่งการทำความสะอาดคราบด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้พื้นผิวอุปกรณ์สะอาดได้ ต้องทำความสะอาดด้วยสารทำความสะอาดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีสภาพเป็นต่าง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงจะสามารถทำความสะอาดคราบออกจากพื้นผิวได้ [1, 14] โดยคราบแต่ละประเภทมีพฤติกรรมการทำความสะอาดหรือลักษณะการหลุดของคราบออกจากพื้นผิวที่แตกต่างกัน (Cleaning Behaviour) การกำหนดปัจจัยในกระบวนการทำความสะอาดคราบแต่ละประเภทจึงแตกต่างกันด้วย ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทำความสะอาด การเข้าใจพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบแต่ละประเภทและการกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดจึงเป็นสิ่งสำคัญ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการออกแบบชุดทดลองสำหรับตรวจสอบพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบอาหารที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยฟิล์มของเหลว โดยค่าความหนาของฟิล์มของเหลวประมาณจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และเลือกใช้คราบแป้งหลังสุกและคราบนมข้นหวานเป็นกรณีศึกษาสำหรับการอธิบายพฤติกรรมการหลุดออกของคราบที่แตกต่างกัน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับการตรวจสอบพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบอาหารบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางปฏิบัติ และการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้แป้งมันสำปะหลังสุกและนมข้นหวานเป็นตัวอย่างคราบ

1.3.2 ใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 มีความหนาผิวเฉลี่ย 0.8 ไมโครเมตร โดยผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการขัดเงาทางกลเป็นพื้นผิวสัมผัสอาหาร

1.3.3 ใช้วิธีการสังเกตและการชั่งน้ำหนักในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคราบในกระบวนการทำความสะอาด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการทำความสะอาดโดยฟิล์มของเหลว ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำความสะอาด และการจำลองการไหลของฟิล์มของเหลว

1.4.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำความสะอาดคราบด้วยฟิล์มของเหลว ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำความสะอาด และการจำลองการไหลของฟิล์มของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3 สร้างแบบจำลองความเค้นเฉือนของฟิล์มของเหลวและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.4.4 ออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับการตรวจสอบพฤติกรรมกรรมการทำความสะอาด

1.4.5 ดำเนินการทดลองทำความสะอาดคราบด้วยชุดทดลองที่ออกแบบ

1.4.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ชุดทดลองสำหรับการตรวจสอบพฤติกรรมกรรมการทำความสะอาด

1.5.2 แนวทางปฏิบัติ และการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการทำความสะอาด

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บท โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การแบ่งประเภทของคราบและกลไกในการทำความสะอาด ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำความสะอาดของฟิล์มของเหลว พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ การออกแบบชุดทดลอง การเตรียมตัวอย่างคราบ การทดลอง และการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการทำความสะอาด

บทที่ 4 กล่าวถึงการพฤติกรรมการหลุดออกของคราบระหว่างการทำความสะอาด และการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการทำความสะอาด

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุป และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

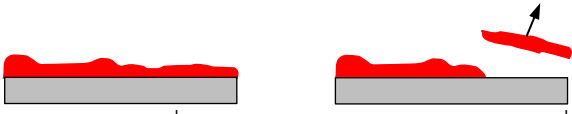
ตรวจเอกสาร

2.1 การแบ่งประเภทของคราบและกลไกในการทำความสะอาด

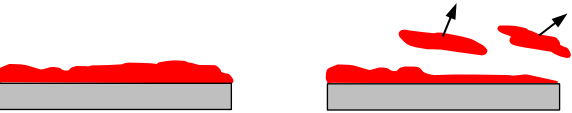
คราบที่พบในอุตสาหกรรมอาหารสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ คราบสารอินทรีย์ เช่น โปรตีนนม ไขมัน และน้ำตาล เป็นต้น ซึ่งสามารถทำความสะอาดได้โดยใช้สารละลายต่าง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และคราบสารอนินทรีย์ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม หรือแร่ธาตุต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งคราบประเภทนี้ไม่สามารถทำความสะอาดด้วยสารละลายต่างได้ จึงจำเป็นต้องใช้สารละลายกรดในการทำความสะอาด เช่น สารละลายกรดไนตริกและสารละลายกรดฟอสฟอริก เป็นต้น [1, 14] ในการทำความสะอาดคราบแต่ละประเภทมีพฤติกรรมการทำความสะอาดที่แตกต่างกัน จึงต้องการกลไกในการทำความสะอาดที่ต่างกันและอาจต้องการกลไกการทำความสะอาดมากกว่า 1 ประเภท โดยพฤติกรรมการหลุดออกของคราบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การหลุดออกเนื่องจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบ (Cohesive Failure) ทำให้คราบแยกตัวออกจากกัน และการหลุดออกเนื่องจากการสูญเสียแรงยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิว (Adhesive Failure) ทำให้คราบแยกตัวออกจากพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 2.1 [14]

กลไกการทำความสะอาดจะส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แรงกระทำทางกล เป็นแรงที่เกิดขึ้นจากการไหลของสารทำความสะอาดหรือการใช้แรงงานคนในการทำความสะอาดคราบออกจากพื้นผิว และปฏิกิริยาเคมี เป็นการใส่สารเคมีไปทำปฏิกิริยากับคราบทำให้คราบสารอินทรีย์อยู่ในรูปที่สามารถทำความสะอาดได้ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การละลาย เป็นกระบวนการที่ของแข็งหรือของเหลวซึ่งเป็นตัวถูกละลายแยกตัวออกจากกันอย่างอิสระและเคลื่อนย้ายเข้าสู่ตัวทำละลาย โดยอัตราการละลายขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย อุณหภูมิของตัวทำละลาย และพื้นที่สัมผัสระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลาย และซาปอนนิฟิเคชัน (Saponification) เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้ไขมันอยู่ในรูปแบบที่สามารถละลายน้ำได้ โดยไขมันจะถูกสลายพันธะด้วยด่างทำให้แตกตัวออกเป็นกลีเซอรอลและเกลือของกรดไขมันซึ่งสามารถละลายน้ำได้ [13]

(ก) คราบแยกตัวออกจากกันเนื่องจากความเสียหายของแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบ



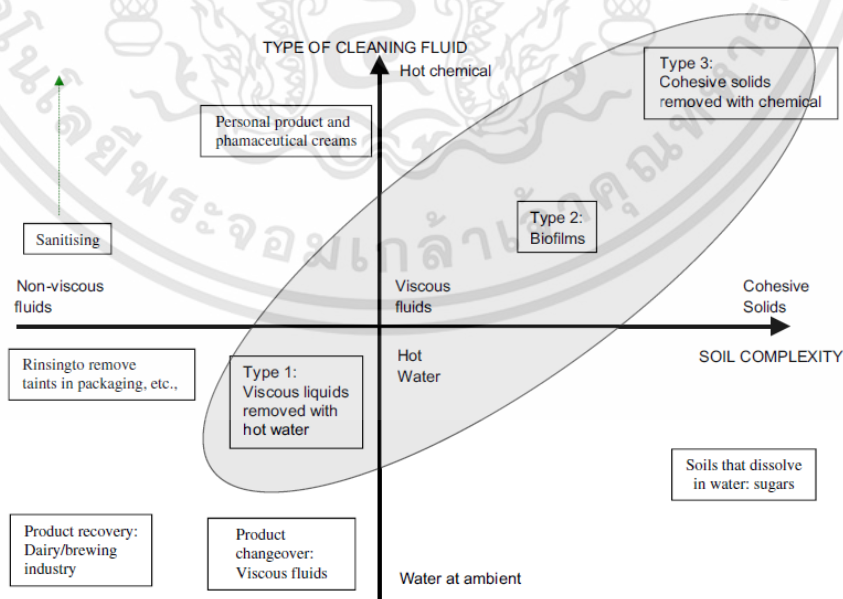
(ข) คราบแยกตัวออกจากพื้นผิวเนื่องจากความเสียหายของแรงยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิว



รูปที่ 2.1 ลักษณะการหลุดออกของคราบ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Khalid et al. [4]

เมื่อพิจารณาแผนภาพการทำความสะอาดดังรูปที่ 2.2 แสดงประเภทของคราบและกลไกในการทำความสะอาด โดยคราบประเภทที่ 1 เป็นคราบทั่วไปซึ่งต้องการแรงกระทำทางกลเพียงอย่างเดียวก็สามารถทำความสะอาดได้ ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการทำความสะอาด เช่น โยเกิร์ต เบียร์ และมันส์ตาร์ด เป็นต้น คราบประเภทที่ 2 เป็นคราบที่โดยปกติอยู่ในรูปที่ไม่สามารถทำความสะอาดได้ จึงต้องการปฏิกิริยาเคมีในการทำความสะอาด เช่น ไขมันและน้ำตาล เป็นต้น และคราบประเภทที่ 3 เป็นคราบที่ต้องการกลไกในการทำความสะอาดมากกว่า 1 ประเภท จึงจะสามารถทำความสะอาดได้ คราบประเภทนี้จึงต้องการทั้งแรงกระทำทางกลและปฏิกิริยาเคมีในการทำความสะอาด เช่น แป้ง นม ชันหวาน และโปรตีนนม เป็นต้น [1]



รูปที่ 2.2 แผนภาพการทำความสะอาด

ที่มา : Fryer and Asteriadou [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำความสะอาดของฟิล์มของเหลว

ในกระบวนการทำความสะอาดเมื่อสเปร์ย์บอลฉีดพ่นสารทำความสะอาดไปกระทบพื้นผิวด้านในถังทำให้เกิดแรงกระแทกขึ้นในการทำความสะอาดคราบออกจากพื้นผิวบริเวณที่โดนสารทำความสะอาดตกกระทบ จากนั้นสารทำความสะอาดจะไหลลงตามแรงโน้มถ่วงโลกก่อให้เกิดฟิล์มของเหลวขึ้น และเมื่อฟิล์มของเหลวสัมผัสกับคราบที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวบริเวณที่ไม่โดนสารทำความสะอาดตกกระทบจะเกิดแรงเฉือนในการทำความสะอาดคราบออกจากพื้นผิว โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำความสะอาดด้วยฟิล์มของเหลวแบ่งออกเป็น 4 ปัจจัยหลัก คือ แรงกระทำทางกล ปฏิกริยาเคมี อุณหภูมิ และเวลาในการทำความสะอาด [1-2, 4, 15] ซึ่งเวลาในการทำความสะอาดได้รับอิทธิพลมาจาก 3 ปัจจัยข้างต้น หากการทำความสะอาดมีแรงกระทำทางกล ปฏิกริยาเคมี และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะสามารถลดระยะเวลาในการทำความสะอาดได้

2.2.1 แรงกระทำทางกล

แรงกระทำทางกล คือ แรงเค้นเฉือน เมื่อฟิล์มของเหลวไหลลงตามแรงโน้มถ่วงของโลกจะเกิดแรงต้านทานการไหลขึ้น นั่นคือ ความเค้นเฉือน (Wall Shear Stress) [3] โดยลักษณะการไหลของฟิล์มสามารถบ่งบอกได้ด้วยตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์ม ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 [5]

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

โดย Re_f คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มของเหลว

Γ คือ อัตราการเปียกเชิงมวล (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)

Γ_v คือ อัตราการเปียกเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อเมตร-วินาที)

η คือ ความหนืดพลวัตของของเหลว (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)

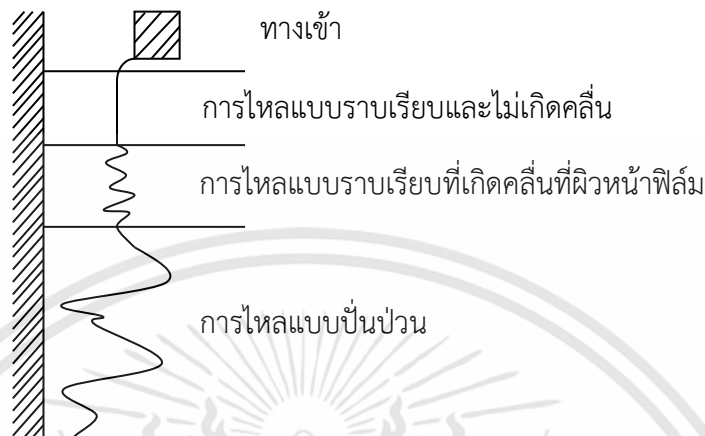
ν คือ ความหนืดจลน์ (ตารางเมตรต่อวินาที)

V คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

B คือ ความกว้างของพื้นที่เปียก (เมตร)

พิจารณาจากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าลักษณะการไหลของฟิล์มของเหลวจะเปลี่ยนไปตามตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งแบ่งรูปแบบการไหลของฟิล์มออกเป็น 3 ช่วง คือ การไหลแบบราบเรียบและไม่มีคลื่นเกิดขึ้น (Smooth Laminar, $Re_f < 4$) การไหลแบบราบเรียบที่มีคลื่นเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของฟิล์ม

(Laminar Wavy, $4 < Re_f < 400$) และการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งจะเกิดคลื่นขึ้นทั้งภายในและผิวหน้าของฟิล์ม (Turbulent หรือ wavy, $Re_f > 400$) [18]



รูปที่ 2.3 ลักษณะการไหลของฟิล์ม

ที่มา : ดัดแปลง Weise et al. [18]

ในการทำความเข้าใจค่าความเค้นเฉือนเป็นปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกถึงแรงที่เกิดขึ้นในการชะคราบออกจากพื้นผิว ซึ่งความเค้นเฉือนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยดังแสดงในสมการที่ 2.2 [5]

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

โดย $\bar{\tau}_w$ คือ ความเค้นเฉือน (ปาสคาล)
 g คือ แรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที²)
 ρ คือ ค่าความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 δ คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม (เมตร)
 α คือ มุมเอียง (องศา)

จะเห็นได้ว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความเค้นเฉือน คือ ความหนาฟิล์มและมุมเอียงของพื้นผิว โดยความหนาฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 (ดัดแปลงจาก Fuchs et al. [5]; To et al. [6])

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดย δ คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม (เมตร)
 Re_f คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มของเหลว
 ν คือ ความหนืดจลน์ (ตารางเมตรต่อวินาที)
 g คือ ความเร่งโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที²)
 α คือ มุมเอียง (องศา)

โดยทั่วไปในการทำความสะอาดการไหลของสารทำความสะอาดจะมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งจะส่งผลให้มีแรงกระทำทางกลในการทำความสะอาดมากกว่าการไหลแบบราบเรียบ ยิ่งอัตราการไหลของสารทำความสะอาดมีค่ามาก การไหลจะมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน และส่งผลให้มีแรงเค้นเฉือนในการทำความสะอาดมากขึ้นตามไปด้วย [5, 19]

2.2.2 ปฏิกริยาเคมี

ปฏิกริยาเคมีเป็นปัจจัยที่ได้รับอิทธิพลมาจากความเข้มข้นของสารเคมีในการทำความสะอาด โดยปกตินิยมใช้ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 หากใช้ความเข้มข้นสูงกว่านี้สารเคมีอาจทำปฏิกริยากับคราบทำให้คราบเกาะติดกับพื้นผิวอุปกรณ์มากขึ้นและทำความสะอาดได้ยากขึ้น [16]

2.2.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เป็นปัจจัยในการทำความสะอาดเป็นการกล่าวถึงอุณหภูมิของสารทำความสะอาด โดยยิ่งสารทำความสะอาดมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดดีขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดปฏิกริยาเคมีได้มากขึ้น [1-2, 4, 17]

2.3 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นการใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ แก้ปัญหา โดยใช้แบบจำลองในการแก้สมการนาเวียร์ – สโตก ซึ่งเป็นการจำลองการไหลเท่านั้นไม่สามารถใช้แทนการทดลองจริงได้ จึงเหมาะสำหรับการใช้เป็นเครื่องมือเพื่อตรวจสอบเทียบกับการทดลองจริง โดยความถูกต้องของการจำลองขึ้นอยู่กับการใช้แบบจำลอง ในการจำลองการไหลของฟิล์มแบบปั่นป่วน แบบจำลองที่ใช้ ได้แก่ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ แบบจำลองความปั่นป่วน k- ω และแบบจำลองหลายสถานะ

2.3.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ เป็นแบบจำลองที่ใช้ในงานทั่วไปสำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่และไม่พิจารณาผลของความหนืด จึงสามารถ

ทำนายการไหลนอกชั้นขอบเขตได้ดี โดยแบ่งออกเป็น 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองความปั่นป่วน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน $k-\epsilon$ (STD $k-\epsilon$), แบบจำลองความปั่นป่วน Renormalization Group (RNG $k-\epsilon$) และแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\epsilon$ [20]

2.3.1.1 แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ (STD $k-\epsilon$) เป็นแบบจำลองที่มีสมมติฐานว่าการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ และไม่พิจารณาผลของความหนืด ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถทำนายการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่ซึ่งอยู่นอกชั้นขอบเขตได้ดี

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

2.3.1.3 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 $k-\omega$ เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วน สามารถทำนายการไหลในชั้นขอบเขตได้ดีกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ ซึ่งแบบจำลองนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบจำลอง คือ แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\omega$ (STD $k-\omega$) และแบบจำลองความปั่นป่วน Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$) โดยแบบจำลอง SST $k-\omega$ นี้เป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุดในบรรดาแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งหมด [20]

2.3.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\omega$ เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาเพื่อให้สามารถทำนายการไหลในช่วงชั้นขอบเขตได้ดี แต่ก็มีจุดด้อย คือสามารถทำนายการไหลนอกชั้นขอบเขตได้ไม่ดีเท่าที่ควร

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

2.3.3 แบบจำลองหลายสถานะ

แบบจำลองหลายสถานะเป็นแบบจำลองที่ใช้ทำนายระบบที่มีรูปแบบมากกว่า 1 สถานะ เช่น แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง และของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น โดยแบบจำลองหลายสถานะแบ่งออกเป็น 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองปริมาตรของไหล (Volume of Fluid) แบบจำลองการผสม (Mixture) และแบบจำลองของออยเลอร์ (Eulerian) [20]

2.3.3.1 แบบจำลองปริมาตรของไหล (Volume of Fluid หรือ VOF) เป็นแบบจำลองที่ใช้เทคนิคการติดตามพื้นผิว ซึ่งจะพิจารณามิวน้ำฟิล์ม (Interface) ระหว่างของไหล

2.3.3.2 แบบจำลองการผสม (Mixture) เป็นแบบจำลองที่ได้รับการออกแบบสำหรับของไหลหรืออนุภาค 2 สถานะ หรือมากกว่า ที่ปะปนอยู่ร่วมกัน เหมาะสำหรับการจำลองที่ไม่ซับซ้อน

2.3.3.2 แบบจำลองของออยเลอร์ (Eulerian) เป็นแบบจำลองที่มีความคล้ายคลึงกับแบบจำลองการผสม แต่เหมาะสำหรับการจำลองที่มีความซับซ้อนและต้องการความแม่นยำที่มากกว่า

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งออกได้ 2 ส่วน ได้แก่ การจำลองการไหลของฟิล์มของเหลว และการทำความสะอาด

2.4.1 การจำลองการไหลของฟิล์มของเหลว

Zhou et al. [21] ได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความหนาของฟิล์มของเหลวโดยการใช้เซนเซอร์ (confocal chromatic sensor) ในการทดลองได้ศึกษาผลของลักษณะการไหลในตอนเริ่มต้นของของเหลว ตัวเลขเรย์โนลด์ และมุมเอียงของแผ่นทดสอบ ต่อความหนาของฟิล์มเฉลี่ยที่เวลาใดๆ เปรียบเทียบกับทฤษฎี พบว่าการทดลองและทฤษฎีให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน โดยลักษณะการไหลในตอนเริ่มต้นของของเหลวมีอิทธิพลสำคัญต่อความหนาฟิล์ม และความหนาฟิล์มจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้นและมุมเอียงที่ลดลง

Takamasa and Hazuka [22] ศึกษาวิธีหารูปแบบคลื่นที่ผิวหน้าฟิล์มและความหนาฟิล์มสำหรับฟิล์มที่ไหลลงตามแผ่นที่วางตัวในแนวตั้ง ด้วยการใช้เลเซอร์โฟกัส (laser focus displacement meters) 2 ตัว โดยวิธีการนี้สามารถวัดความหนาฟิล์มได้อย่างแม่นยำ ซึ่งผลการทดลอง ได้แก่ ความเร็วของคลื่นและความหนาฟิล์มสูงสุด มีความสอดคล้องกับผลการทดลองในอดีต นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวช่วงทางเข้าของฟิล์มในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 250 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามตัวเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่า 702 ฟิล์มจะมีความยาวช่วงทางเข้า 366.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lan et al. [10] เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่บ่งบอกพฤติกรรมการไหลของฟิล์มของเหลวที่มุม 30 ถึง 90 องศา ด้วยการวัดค่าจากการทดลองและการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าค่าที่ได้จากวิธีการทั้งสองนี้มีความใกล้เคียงกันมาก และผลการจำลองที่ได้จากของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวไม่ส่งผลต่อความหนาของฟิล์มของเหลวที่มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าแรงตึงผิวไม่ส่งผลต่อความหนาของฟิล์มของเหลวที่เกิดขึ้น

Yu Yiqi [12] ทำการจำลองพฤติกรรมของฟิล์มของเหลวแบบสามมิติบนแผ่นราบ โดยแบ่งเป็นสองกรณี คือ แบบผิวหน้าของฟิล์มมีการสัมผัสกับอากาศ และแบบผิวหน้าของฟิล์มไม่มีการสัมผัสกับอากาศ ต่อความหนาฟิล์มและความเร็วของฟิล์มที่มีตัวเลขเรย์โนลด์แตกต่างกัน การศึกษาพบว่าผลจากการจำลองมีความใกล้เคียงกับทฤษฎีอย่างมาก

Xu et al. [11] ศึกษาการพฤติกรรมการแยกตัวของฟิล์มของเหลวบนแผ่นเอียง 60 องศา ด้วยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในกรณีที่แก๊สไหลขนานและสวนทางกับของเหลว โดยการทำจำลองนี้ได้เลือกใช้แบบจำลอง VOF ในการศึกษาอัตราการไหลของของไหลที่มีผลต่อการแยกตัวของฟิล์ม พบว่าอัตราการไหลเป็นสิ่งสำคัญที่สุดต่อพฤติกรรมการไหลของฟิล์ม อัตราการไหลที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความหนาของฟิล์มมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย และในปริมาณของเหลวที่เท่ากันเมื่อฟิล์มเกิดการแยกตัวจะมีความเร็วในการไหลมากกว่าฟิล์มที่ไม่มีการแยกตัว

2.4.2 การทำความสะอาดคราบ

Fuchs et al. [5] ศึกษาผลของพื้นผิวที่ทำมุม 30 ถึง 90 องศา ต่อพฤติกรรมทำความสะอาด (ซิงค์ซัลไฟด์ และแซนแทนกัม) บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม โดยมีตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 1190 ถึง 3110 พบว่ามุมเอียงมีผลกระทบอย่างมากต่อความหนาฟิล์ม ความเค้นเฉือน และอัตราการทำความสะอาดเฉลี่ย นอกจากนี้ผลของการทำความสะอาดของผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่เตรียมผิวต่างกัน 3 แบบ คือ ขัดผิวทางกล ขัดผิวด้วยไฟฟ้า และผิวมันวาว พบว่าค่าความหยาบผิวที่ต่ำไม่ได้นำไปสู่การทำความสะอาดที่ดีกว่า

Gillham et al. [2] ศึกษาการทำความสะอาดคราบโปรตีนนมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 80 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 500 ถึง 5000 โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงมวลของคราบและการเปลี่ยนแปลงความต้านทานความร้อนของคราบ พบว่าลักษณะการหลุดออกของเวย์โปรตีนประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การบวมตัว การหลุดออกอย่างรวดเร็ว และการหลุดออกอย่างช้า โดยอุณหภูมิและอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการทำความสะอาด

Khalid et al. [4] ศึกษาจลนศาสตร์การกำจัดคราบน้ำฝรั่งเข้มข้น (Pink guava puree) บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมในกระบวนการทำความสะอาดแบบไม่ถอดชิ้นส่วนภายในท่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิ ความเข้มข้น และความเร็วการไหลของสารละลายในการทำความสะอาด โดยตรวจวัดพื้นที่ที่คราบด้วยกล้องวีดิโอทุก 1 นาที เพื่อสร้างรูปแบบการทำความสะอาด (Cleaning Profile) และกราฟความสัมพันธ์ของจลนศาสตร์การทำความสะอาด พบว่ากระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก และความเร็วการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.2 เมตรต่อวินาที โดยใช้เวลาในการทำความสะอาด 2 นาที

To and Annapragada [6] ศึกษาการทำความสะอาดแบบไม่ถอดชิ้นส่วนโดยใช้ฟิล์มของเหลวในกรณีที่ยืดที่สุด พิจารณาผลของอัตราการไหลและความเร็วของของไหล โดยใช้ชุดทดลองเพื่อประเมินความเร็วของของไหล ความหนาฟิล์ม และตัวเลขเรย์โนลด์ ผลการทดลองบ่งชี้ว่าอัตราการไหลและความเร็วของของไหลแทบไม่ส่งผลต่อจลนศาสตร์การทำความสะอาด โดยเมื่อตัวแปรถูกเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า อัตราการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 8 และร้อยละ 12 เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าสำหรับมุมเอียงในช่วง 5 ถึง 90 องศา และอัตราการไหลของของเหลวน้อยกว่า 1 แกลลอนต่อนาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานในการทำความสะอาด การไหลจะเป็นแบบราบเรียบและความหนาฟิล์มมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร

บทที่ 3

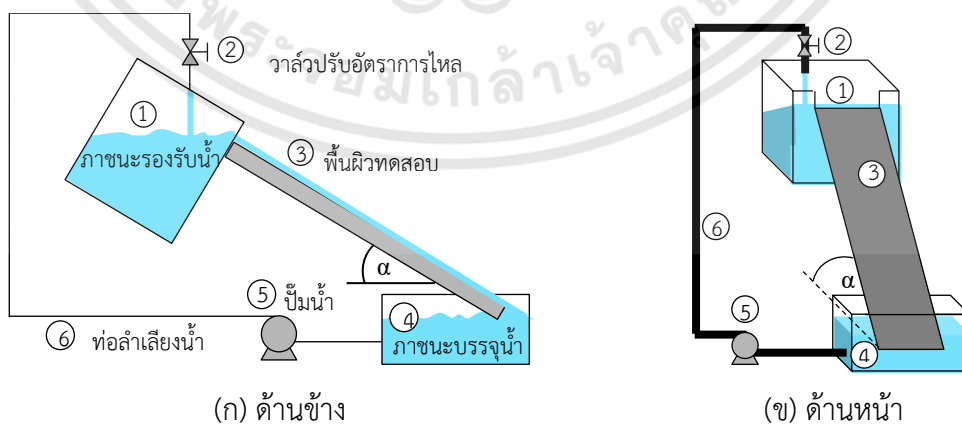
การออกแบบชุดทดลองและวิธีการทดลอง

3.1 การออกแบบชุดทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบชุดทดลองและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด สะอาดคราบ ซึ่งปัจจัยที่พิจารณาได้แก่ ความเร็วการไหล, อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาด โดยนำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการออกแบบชุดทดลอง ชุดทดลองในงานวิจัยนี้จึงแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดทดลองเพื่อเลือกใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการจำลองความเค้นเฉือน และชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของคราบอาหาร

3.1.1 ชุดทดลองเพื่อเลือกใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการจำลองความเค้นเฉือน

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการเลือกใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการจำลองความเค้นเฉือนของฟิล์มน้ำและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย บั๊มน้ำ ท่อลำเลียงน้ำ ภาชนะบรรจุน้ำ วาล์วปรับอัตราการไหล และแผ่นทดสอบซึ่งใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นตัวแทนของพื้นผิวสัมผัสอาหาร โดยสามารถปรับมุมของแผ่นทดสอบให้มีขนาด 0 ถึง 90 องศา และใช้น้ำประปาอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นของเหลวสำหรับทดสอบแบบจำลอง โดยรายละเอียดของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.1



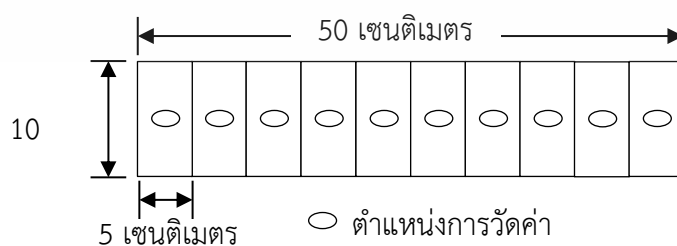
รูปที่ 3.1 ชุดทดลองเพื่อเลือกใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการจำลองความเค้นเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลองเพื่อเลือกใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
สำหรับการจำลองความเค้นเฉือน

หมายเลข	ส่วนประกอบของชุดทดสอบ
1	ภาชนะรองรับน้ำ ขนาด 4 ลิตร
2	วาล์วปรับอัตราการไหล รุ่น Sanwa
3	พื้นผิวทดสอบซึ่งเป็นอลูมิเนียมขนาด กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร
4	ภาชนะบรรจุน้ำ ขนาด 10 ลิตร
5	ปั้มน้ำ รุ่น Sonic AP3500 กำลัง 60 วัตต์
6	ท่อลำเลียงสารทำความสะอาด

ปรับมุมของแผ่นทดสอบเป็น 30, 60 และ 90 องศา กับแนวราบและเปิดปั้มน้ำให้เกิดการถ่ายเท
น้ำจากภาชนะบรรจุน้ำลงบนพื้นผิวทดสอบด้วยหลักการนำล้นเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบเวลาที่
กำหนดจึงวัดอัตราการไหลของน้ำด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก โดยรองรับน้ำที่ไหลผ่านแผ่นทดสอบเป็นเวลา
2 นาที ไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณอัตราการไหล และปรับอัตราการไหลของน้ำด้วยวาล์วปรับอัตราการ
ไหลให้มีค่า 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อพิจารณาเป็นความเร็วมีค่า 0.63, 1.00 และ 1.30
เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มมีค่า 311, 622 และ 932 ตามลำดับ ติดตั้ง
ไมโครมิเตอร์ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ที่ด้านข้างของแผ่นทดสอบสำหรับวัดความหนาของฟิล์ม
น้ำ โดยวัดค่าความหนาของฟิล์มน้ำทุกระยะ 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.2 ทำการวัดค่า 3 ครั้ง และทำ
การทดลอง 3 ซ้ำ แล้วนำความหนาของฟิล์มน้ำจากการวัดไปคำนวณค่าความเค้นเฉือนดังสมการที่
2.2 เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
โดยเปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากการจำลองกับค่าอ้างอิงและคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน
ดังสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งการวัดความหนาของฟิล์มน้ำ

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

โดย % error คือ ร้อยละความคลาดเคลื่อน

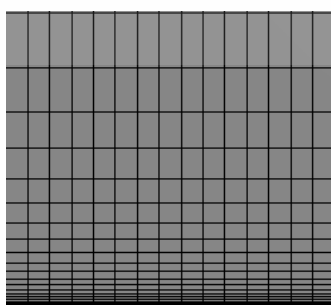
x_{CFD} คือ ความเค้นเฉือนจากการจำลอง (ปาสคาล)

x_t คือ ความเค้นเฉือนอ้างอิง (ปาสคาล)

3.1.1.1 จำลองการไหลของฟิล์มน้ำ

จำลองการไหลของฟิล์มน้ำในรูปแบบสามมิติด้วยโปรแกรม Ansys Fluent 16.0 โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST k- ω ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ Ansys แนะนำให้ใช้กับการไหลที่มีความซับซ้อนไม่มาก และมีความแม่นยำมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ 2 ตัวแปรชนิดอื่น ได้แก่ STD k- ϵ , RNG k- ϵ , Realizable k- ϵ และ STD k- ω (ผลการจำลองแสดงในภาคผนวก ก)

นอกจากนี้ในการจำลองยังใช้แบบจำลองหลายสถานะชนิด VOF ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน SST k- ω และใช้โครงสร้างตาข่ายทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal Mesh) (รูปที่ 3.3) ซึ่งเป็นโครงตาข่ายที่ได้รับการแนะนำให้ใช้ร่วมกับแบบจำลองหลายสถานะ เนื่องจากการไหลของฟิล์มน้ำเป็นการไหลที่มีการสัมผัสกันของน้ำและอากาศ ในการจำลองจึงมีของไหลอยู่ 2 ชนิด คือ น้ำและอากาศ จึงต้องใช้แบบจำลองหลายสถานะชนิด VOF ร่วมด้วยเพื่อสามารถตรวจจับพื้นผิวที่เกิดจากการสัมผัสกันของน้ำและอากาศได้ โดยรายละเอียดการสร้างโครงตาข่ายแสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งแบบจำลองมีจำนวนโครงสร้างตาข่าย (Elements) 380700 หน่วย และจุดต่อ (Node) 397290 จุด และกำหนดเงื่อนไขการจำลองดังตารางที่ 3.3 โดยมีสมมติฐานในการจำลองดังนี้ ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) ความหนืดของของไหลมีค่าคงที่ (Constant Viscosity) ความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady Flow) และไม่พิจารณาผลของแรงเสียดทานด้านข้าง (No Friction) [23]



รูปที่ 3.3 โครงสร้างตาข่ายทรงหกเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการสร้างโครงตาข่าย

	Parameters	Detail
Mesh	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
Method	Span Angle Center	Fine
	Inflation	
	Use Automatic Inflation	None
	Inflation Option	Smooth Transition
Sizing	Method	Multizone
	Mapped Mesh Type	Hexa
Sizing	Type	Number of Divisions
	Bias Type	-----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

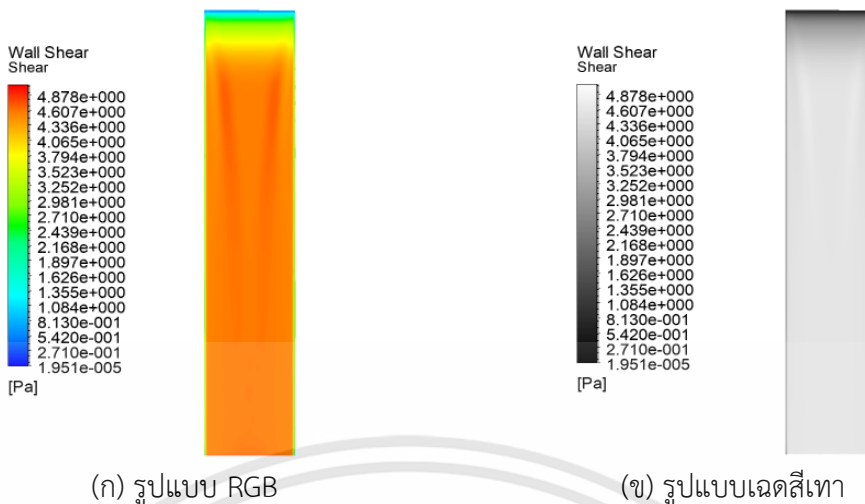
ตารางที่ 3.3 การกำหนดสภาวะในการจำลองการไหลของฟิล์มน้ำ

Parameters	Detail	
Operating Conditions	Gravity (m/s ²)	9.81
	Pressure (kPa)	101.325
	Surface Tension (N/m)	0.072
Model	Viscous Model	SST k- ω
	Multiphase Model	VOF
Phase	Primary Phase	Air (25°C)
	- Density (kg/m ³)	1.184 ^ก
	- Viscosity (kg/m·s)	1.849x10 ⁻⁵ ^ก
	Secondary Phase	Water (25°C)
	- Density (kg/m ³)	997 ^ข
- Viscosity (kg/m·s)	0.000891 ^ข	
Boundary Conditions	Inlet water velocity (m/s)	0.63, 1.00 and 1.30

^ก สมบัติทางกายภาพของอากาศ [24]

^ข สมบัติทางกายภาพของน้ำ [24]

นำผลการจำลองไปวิเคราะห์ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไหลของฟิล์มของเหลว โดยผลที่ได้จากการจำลองจะแสดงอยู่ในรูปของความเค้นเฉือนตามระดับสีดังรูปที่ 3.4 (ก) ในการวิเคราะห์ผลการจำลองจะพิจารณาค่าความเค้นเฉือนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการไหลของฟิล์มน้ำด้วยการวิเคราะห์ผลภาพ โดยปรับระดับสีของผลการจำลองให้อยู่ในรูปแบบเฉดสีเทาดังรูป 3.4 (ข) และนำค่าความเค้นเฉือนกับค่าสีที่ได้จากผลการจำลองไปพล็อตกราฟเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและความเค้นเฉือน จากนั้นจึงนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้สำหรับหาค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในทุก ๆ ตำแหน่งของรูปภาพผลการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab โดยการวิเคราะห์ผลแสดงในภาคผนวก ข

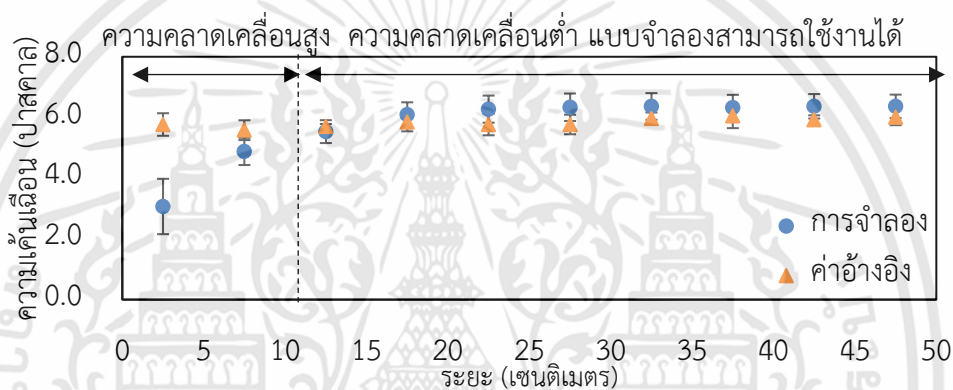


รูปที่ 3.4 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

จากการทดลองพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำที่วัดได้จากชุดทดลองมีความสอดคล้องกับผลของ Fuchs et al. [5] โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการของ Nusselt พบว่าความหนาของฟิล์มน้ำจากการคำนวณและจากการวัดมีค่าที่ใกล้เคียงกันที่ความเร็วการไหล 0.63 เมตรต่อวินาที ซึ่งฟิล์มน้ำมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ แต่ที่ความเร็วการไหล 1.00 และ 1.30 เมตรต่อวินาที ซึ่งฟิล์มน้ำมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน ความหนาของฟิล์มน้ำที่วัดได้จากชุดทดลองมีค่าสูงกว่าการคำนวณ เนื่องจากสมการของ Nusselt มีสมมติฐานว่าฟิล์มน้ำมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ ความหนาของฟิล์มน้ำจากการคำนวณจึงมีค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงเมื่อฟิล์มน้ำมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้น ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจึงเลือกใช้ค่าความหนาของฟิล์มน้ำที่ได้จากการวัดโดยตรงจากชุดทดลองมาใช้สำหรับการคำนวณความเค้นเฉือน

เมื่อเปรียบเทียบความเค้นเฉือนที่ได้จากการจำลองและการทดลองที่ทุกระยะ 5 เซนติเมตร (ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.5) พบว่าความเค้นเฉือนที่ได้จากการจำลองมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าอ้างอิงอย่างมากที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตร แรกจากจุดเริ่มต้น เนื่องจากอิทธิพลของทางเข้าของน้ำที่แตกต่างกันของชุดทดลองกับแบบจำลอง [22] โดยค่าความเค้นเฉือนเฉลี่ยที่ระยะ 10 ถึง 50 เซนติเมตร จากจุดเริ่มแสดงดังตารางที่ 3.4 พบว่าค่าความเค้นเฉือนจากการจำลองมีค่าที่สอดคล้องกับผลของ Fuchs et al. [5] โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วการไหลและมุมเอียงที่สูงขึ้น เนื่องจากมุมเอียงที่สูงขึ้นส่งผลให้ฟิล์มน้ำได้รับผลของแรงโน้มถ่วงมากกว่าที่มุมเอียงต่ำกว่า และเมื่อพิจารณาผลของความเร็วการไหล พบว่าความเค้นเฉือนที่ความเร็วการไหล 0.63 เมตรต่อวินาที ซึ่งฟิล์มน้ำมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ มีค่าที่ต่ำกว่าที่ความเร็วการไหล 1.00 และ 1.30 เมตรต่อวินาที ซึ่งฟิล์มน้ำมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน เนื่องจากความเร็วการไหลที่มากกว่าทำให้ฟิล์มน้ำมีลักษณะ

การไหลแบบปั่นป่วนค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจึงสูงกว่าการไหลของฟิล์มน้ำที่ความเร็วการไหลที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของความเร็วการไหลและมุมเอียงที่มีผลต่อค่าความเค้นเฉือน พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลส่งผลให้ความเค้นเฉือนมีค่าเปลี่ยนไปอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของพื้นผิว จึงอาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่นำเสนอสามารถจำลองการไหลของฟิล์มน้ำได้ดีที่ระยะ 10 เซนติเมตร เป็นต้นไปจากจุดเริ่มต้น และมีค่าความคลาดต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 3 ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากสมมติฐานที่แตกต่างกันของแบบจำลองกับสมการการคำนวณความเค้นเฉือน (สมการที่ 2.2)



รูปที่ 3.5 ความเค้นเฉือนจากการจำลองและค่าอ้างอิงจากการทดลองที่มุมเอียง 60 องศา ความเร็วการไหล 1.30 เมตรต่อวินาที (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนเฉลี่ยจากการจำลองค่าอ้างอิงที่ระยะ 10 ถึง 50 เซนติเมตร จากจุดเริ่มต้น

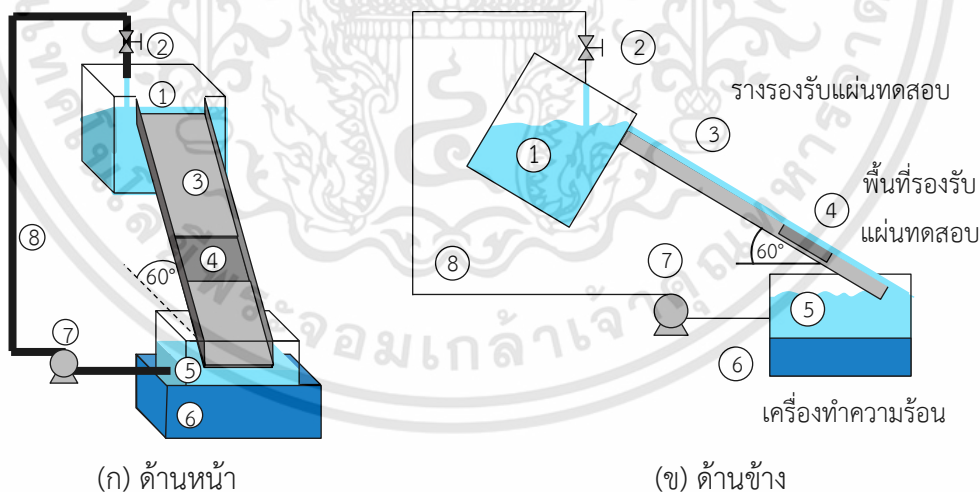
ความเร็วการไหล (m/s)	ความเค้นเฉือน (ปาสคาล) และค่าความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)								
	30°			60°			90°		
	ค่าอ้างอิง	CFD	Error	ค่าอ้างอิง	CFD	Error	ค่าอ้างอิง	CFD	Error
0.63	2.689	2.624	2.437	3.879	3.767	2.895	4.323	4.198	2.900
1.00	3.472	3.464	0.247	5.082	5.061	0.407	5.634	5.592	0.747
1.30	3.986	3.941	1.112	5.844	5.761	1.432	6.367	6.385	0.283

ดังนั้น ในการออกแบบชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของคราบอาหารจากการทำความสะอาดด้วยฟิล์มของเหลว จึงใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ SST k- ω ร่วมกับแบบจำลอง VOF สำหรับการพิจารณาแรงทางกลหรือความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว ซึ่งจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพบว่า ความเค้นเฉือนได้รับอิทธิพลจากความเร็วการไหลของฟิล์มน้ำมากกว่ามุมเอียงของพื้นผิว การกำหนดปัจจัยการทำความสะอาดในด้านของแรงกระทำทางกลจึงพิจารณาความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดเพียงอย่างเดียว โดยการกำหนดความเร็วการไหลในการทำความสะอาดคราบจะพิจารณาให้ฟิล์มมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนและมีความหนาฟิล์มมากพอที่จะครอบคลุมคราบที่ต้องการทำความสะอาด นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนืดของวัสดุจาก 0 ถึง 0.1 มิลลิเมตร จะไม่ส่งผลต่อค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น โดยความเค้นเฉือนและความหนาฟิล์มจากการไหลของสารทำความสะอาดมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ระยะ 30 เซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Takamasa and Hazuka [22] ที่พบว่าฟิล์มน้ำจะเริ่มมีความหนาที่คงที่ที่ระยะ 33 เซนติเมตร ในการทำความสะอาดจึงกำหนดให้แผ่นทดสอบในการทำความสะอาดคราบวางอยู่ที่ระยะ 35 เซนติเมตร จากจุดเริ่มต้น

3.1.2 ชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของคราบอาหาร

ชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของคราบอาหารได้รับการออกแบบดังอธิบายในหัวข้อที่ 3.1.1 ซึ่งชุดทดลองนี้ดัดแปลงมาจากชุดทดลองในรูปที่ 3.1 โดยมีการปรับแต่งพื้นผิวทดสอบเป็นรางรองรับแผ่นทดสอบและติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพิ่มเติมดังแสดงในรูปที่ 3.6 และรายละเอียดของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.6 ชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของคราบอาหาร

ตารางที่ 3.5 ส่วนประกอบของชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของคราบอาหาร

หมายเลข	ส่วนประกอบของชุดทดสอบ
1	ภาชนะรองรับสารทำความสะอาด ขนาด 4 ลิตร
2	วาล์วปรับอัตราการไหล รุ่น Sanwa
3	รางรองรับแผ่นทดสอบทำจากอลูมิเนียมขนาด กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร มีขอบด้านข้างสูง 2.7 เซนติเมตร ตลอดความยาวราง
4	พื้นที่รองรับแผ่นทดสอบขนาด กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร
5	ภาชนะบรรจุสารทำความสะอาด ขนาด 10 ลิตร
6	เครื่องทำความร้อนแบบอ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น BWS-10 สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ 5 ถึง 99 ± 2 องศาเซลเซียส
7	ปั๊มน้ำ รุ่น Sonic AP3500 กำลัง 60 วัตต์
8	ท่อลำเลียงสารทำความสะอาด

3.2 การเตรียมตัวอย่างคราบอาหาร

ในการทดสอบการทำงานของชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของคราบอาหารนั้น ได้พิจารณาแป้งมันสำปะหลังสุกและนมข้นหวานเป็นตัวแทนของคราบ โดยแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวแทนของคราบคาร์โบไฮเดรตประเภทแป้ง และคราบนมข้นหวานเป็นตัวแทนของคราบคาร์โบไฮเดรตประเภทน้ำตาลซึ่งมีองค์ประกอบอื่นผสมอยู่ เช่น นมและน้ำมัน เป็นต้น โดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ขนาดกว้าง 4 เซนติเมตร และยาว 10 เซนติเมตร ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการขัดเงาทางกลให้มีความหยาบผิวเฉลี่ย 0.8 ไมโครเมตร เป็นแผ่นทดสอบ

3.2.1 คราบแป้งมันสำปะหลังสุก

ชุดอุปกรณ์การเตรียมคราบแป้งมันสำปะหลังสุกแสดงดังรูปที่ 3.7 ประกอบด้วย ปีกเกอร์, อ่างควบคุมอุณหภูมิ, เครื่องกวน, เทอร์โมคัปเปิล และเครื่องชั่งน้ำหนัก โดยรายละเอียดของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์การเตรียมคราบแป้งมันสำปะหลังสุก

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดของอุปกรณ์การเตรียมคราบแป้งมันสำปะหลังสุกบนแผ่นทดสอบ

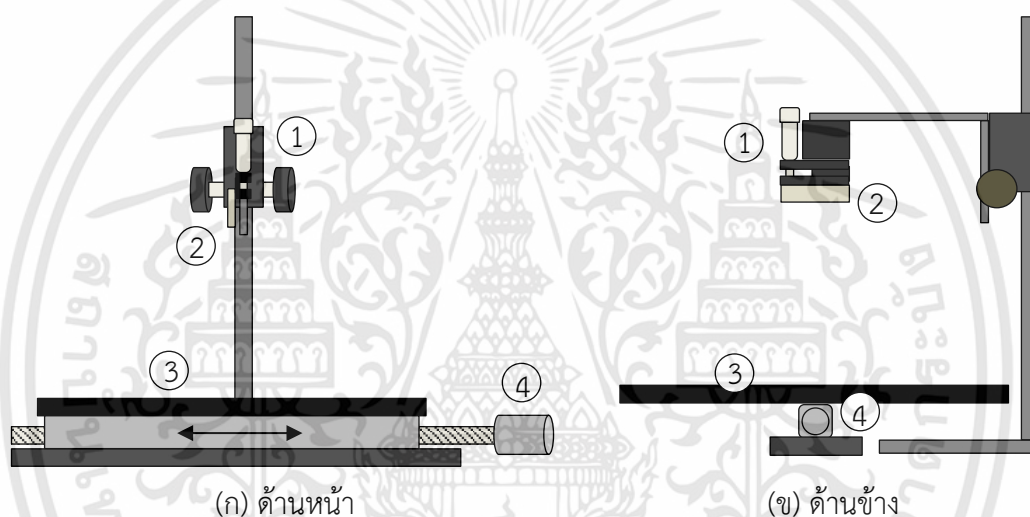
หมายเลข	รายละเอียดของอุปกรณ์
1	บีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร
2	อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น BWS-10 สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ 5 ถึง 99 ± 2 องศาเซลเซียส
3	เครื่องกวนซึ่งเป็นมอเตอร์กระแสตรง 12 โวลต์ ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที รุ่น ZYTD520 ต่อกับใบกวนขนาดเล็ก
4	เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K รุ่น Fluke 54IIB Thermometer S2
5	เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.001 กรัม รุ่น Vibra AB323 Shinko Denshi
6	เตาอบไฟฟ้า Zanussi ZOT103KX กำลังไฟ 1500 วัตต์

เตรียมน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 7 โดยมวลต่อปริมาตร โดยชั่งน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง 7 กรัม ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก และตวงน้ำ 100 มิลลิลิตร ผสมแป้งกับน้ำในบีกเกอร์ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) นำบีกเกอร์วางในอ่างควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และกวนน้ำแป้งในบีกเกอร์ด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เพิ่มอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิขึ้นจนน้ำแป้งมีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จึงปรับลดความเร็วรอบใบกวนลงเป็น 50 รอบต่อนาที และคงสถานะนี้ไว้เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงหยุดการกวนแป้งโดยนำใบกวนออกจากบีกเกอร์และลดอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิลงจนน้ำแป้งมีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คงสถานะนี้ไว้จนกว่าจะนำไปปาดบนแผ่นทดสอบเพื่อป้องกันการคืนตัวของแป้งสุก

เตรียมแผ่นทดสอบสำหรับปาดคราบแป้งสุกซึ่งกำหนดพื้นที่การปาดคราบเป็นขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร และยาว 9 เซนติเมตร โดยติดเทปใสจากขอบของแผ่นทดสอบเข้ามาด้านในเป็นระยะ 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนติเมตร นำแผ่นทดสอบที่ติดเทปใสเรียบร้อยแล้ววางบนฐานชุดอุปกรณ์ปาดคราบ (รูปที่ 3.8) ปรับแผ่นปาดคราบให้อยู่ระดับเดียวกันกับพื้นผิวด้านบนของแผ่นทดสอบ แล้วปรับไมโครมิเตอร์ให้แผ่นปาดคราบขึ้นไปเหนือแผ่นทดสอบเป็นระยะ 0.8 มิลลิเมตร เมื่อได้ระยะปาดคราบแล้วจึงเทน้ำแป้งสูกลงบนพื้นผิวทดสอบและปาดน้ำแป้งสูกบนพื้นผิวทดสอบให้เรียบเสมอกันตลอดทั้งแผ่น จะได้คราบแป้งสูกหนา 0.8 มิลลิเมตร บนแผ่นทดสอบ นำเทปใสออกและนำแผ่นทดสอบไปให้ความร้อนด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงนำแผ่นทดสอบออกจากเตาอบและเก็บแผ่นทดสอบไว้ในกล่องควบคุมความชื้นที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทำการทดลอง โดยคราบแป้งบนแผ่นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.9



หมายเลข	รายละเอียดของอุปกรณ์
1	ไมโครมิเตอร์ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร
2	แผ่นปาดคราบซึ่งเป็นแผ่นเหล็กกล้าหนา 0.1 มิลลิเมตร
3	ฐานอุปกรณ์ปาดคราบซึ่งสามารถเคลื่อนที่ในแนวราบด้วยความเร็ว 2.48 ± 0.05 เซนติเมตรต่อวินาที
4	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 ถึง 24 โวลต์ ความเร็วรอบ 60 ถึง 150 รอบต่อ นาที

รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์ปาดคราบ



(ก) ก่อนได้รับความร้อน



(ข) หลังได้รับความร้อน

รูปที่ 3.9 คราบแข็งมันสำปะหลังสุก

3.2.2 คราบนมข้นหวาน

กระบวนการเตรียมคราบนมข้นหวานมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับการเตรียมคราบแข็งสุก หากแต่นมข้นหวานในการทดลองเป็นนมข้นหวานสำเร็จจึงไม่ต้องผ่านกระบวนการก่อนนำมาปาดลงบนแผ่นทดสอบเหมือนคราบแข็งสุก โดยนมข้นหวานที่ใช้ในการทดลอง คือ นมข้นหวานตรามะลิซึ่งมีส่วนประกอบโดยประมาณแสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ส่วนประกอบโดยประมาณของนมข้นหวาน

ส่วนประกอบ	ปริมาณโดยประมาณ (%)
น้ำตาล	47.0
นมผงพร้อมมันเนย	10.0
น้ำมันปาล์ม	8.0
เวย์ผง	4.8

เตรียมแผ่นทดสอบสำหรับปาดคราบเช่นเดียวกับการเตรียมคราบแข็งมันสำปะหลังสุก แต่ปรับระยะปาดคราบเป็น 0.5 มิลลิเมตร และนำแผ่นทดสอบไปให้ความร้อนด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงนำแผ่นทดสอบออกจากเตาอบและนำมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องให้อุณหภูมิของแผ่นทดสอบลดลงจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงเก็บแผ่นทดสอบไว้ในกล่องควบคุมความชื้นที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทำการทดลอง โดยคราบนมข้นหวานบนแผ่นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.10



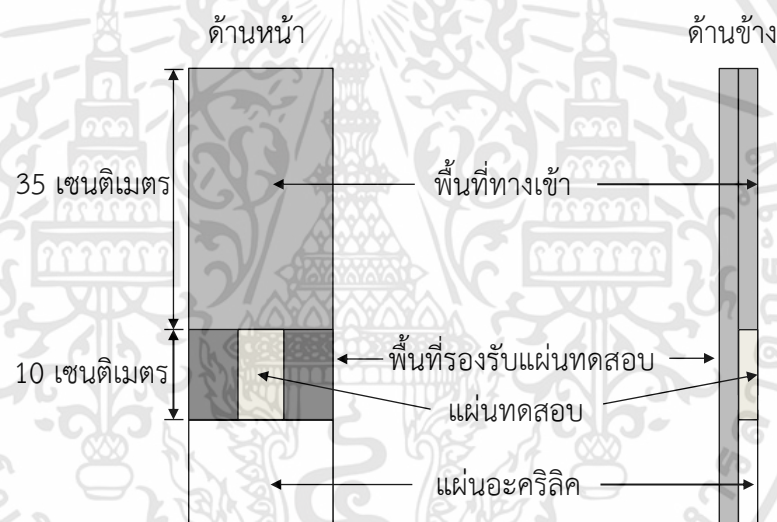
(ก) ก่อนได้รับความร้อน

(ข) หลังได้รับความร้อน

รูปที่ 3.10 คราบน้ำมันขุ่นขาว

3.3 การทดลอง

วางแผ่นทดสอบซึ่งมีตัวอย่างคราบตามการเตรียมดังหัวข้อ 3.2 ลงบนพื้นที่รองรับแผ่นทดสอบ และนำแผ่นทดสอบซึ่งไม่มีคราบวางประกบด้านข้างทั้ง 2 ด้าน ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 รางรองรับแผ่นทดสอบ

จากการเตรียมคราบในหัวข้อที่ 3.2 พบว่าตัวอย่างคราบมีความหนาสูงสุดประมาณ 0.5 มิลลิเมตร จึงนำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการจำลองการไหลของฟิล์มของเหลวเพื่อหาความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดที่มีความหนาของฟิล์มของเหลวมากพอที่จะครอบคลุมคราบในการทำสะอาด ซึ่งที่ความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดมีค่าเท่ากันเมื่อขนาดความกว้างของรางรองรับแผ่นทดสอบมีค่าแตกต่างกันจะส่งผลให้ความหนาของฟิล์มของเหลวและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไหลของสารทำความสะอาดมีค่าที่แตกต่างกันตามไปด้วย ดังคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ถึง 2.3 ในงานวิจัยนี้รางรองรับแผ่นทดสอบมีความกว้าง 10 เซนติเมตร จากการจำลองพบว่าที่ความเร็วการไหล 1.46 เมตรต่อวินาที ความหนาของฟิล์มของเหลวมีค่า 0.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิเมตร ซึ่งมีความหนาพอที่จะครอบคลุมครบในกระบวนการทำความสะอาด โดยมีตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มเป็น 1101.85 ซึ่งฟิล์มมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน ในการทดลองจึงต้องกำหนดความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดขั้นต่ำเป็น 1.46 เมตรต่อวินาที

ดังนั้นในการทดลองซึ่งต้องการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบ ได้แก่ ความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาด จึงกำหนดระดับของปัจจัยในการทำความสะอาดแต่ละปัจจัยเป็น 3 ระดับ ดังตารางที่ 3.8 โดยความเร็วการไหล 1.46, 2.32 และ 3.03 เมตรต่อวินาที เป็นการไหลในช่วงปั่นป่วนซึ่งพิจารณาตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์มดังสมการที่ 2.1 มีค่า 1101.85, 2206.79 และ 3302.47 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.8 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทำความสะอาด

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย
ความเร็วการไหล	1.46, 2.32 และ 3.03 เมตรต่อวินาที
- ตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์ม	1101.85, 2206.79 และ 3302.47
- ความเค้นเฉือน	6.702, 8.776 และ 10.026 ปาสคาล
อุณหภูมิ	25, 35 และ 60 องศาเซลเซียส
ความเข้มข้นของสารทำความสะอาด	
- การทำความสะอาดคราบแป้งสุก	ร้อยละ 0.5, 1.0 และ 2.0 โดยมวล
- การทำความสะอาดคราบนมข้นหวาน	ร้อยละ 0, 0.5 และ 1.0 โดยมวล

ระหว่างการทำความสะอาดจะนำแผ่นทดสอบออกจากชุดทดสอบทุก 30 วินาที และวางตั้งที่มุมเอียง 45 องศากับแนวราบ เป็นเวลา 1 นาที ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคราบ ทำเช่นนี้ตลอดระยะเวลาการทำความสะอาด และหยุดการทำความสะอาดเมื่อน้ำหนักของแผ่นทดสอบมีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้นก่อนนำไปใช้ในการเตรียมคราบ โดยทำการทดลองทั้งหมดซ้ำ 3 ครั้ง

3.4 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด

วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบด้วยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistic ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำ

ความสะอาดอันได้แก่ ความเค้นเหื่อน อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาด กับระยะเวลาในการทำความสะอาดคราบ โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง $+1$ หาก r มีค่า -1 แสดงว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันอย่างมากในเชิงตรงกันข้าม หาก r มีค่า $+1$ แสดงว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันอย่างมากในทิศทางเดียวกัน และหาก r มีค่า 0 แสดงว่าตัวแปรที่พิจารณาไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 พฤติกรรมการหลุดออกของคราบระหว่างการทำความสะอาด

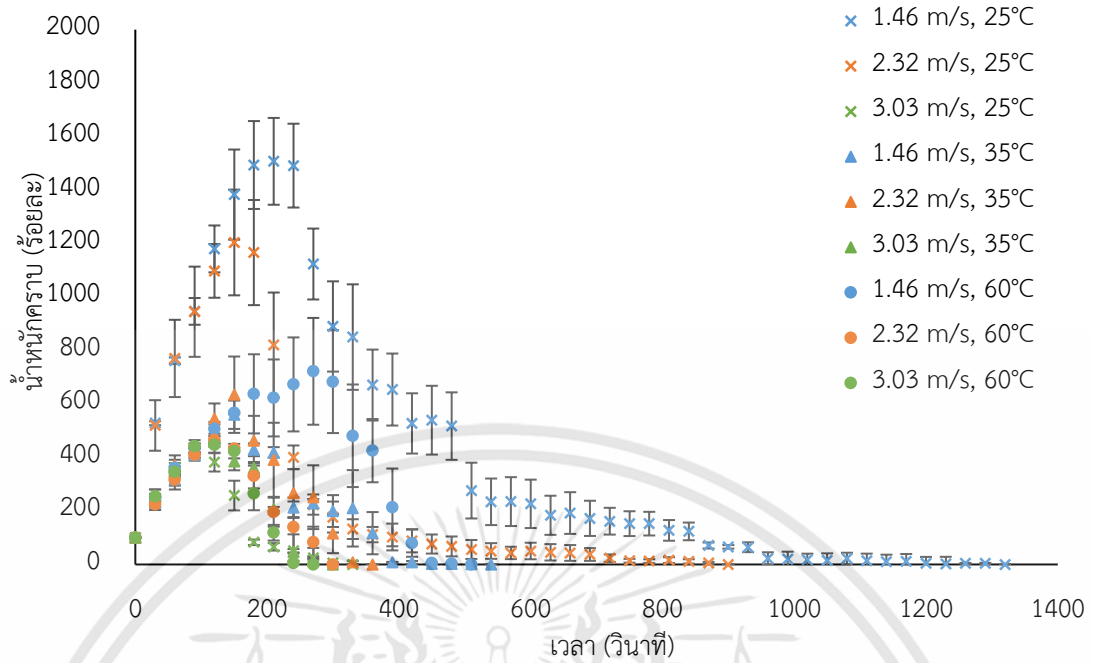
4.1.1 คราบแป้งมันสำปะหลังสุก

พิจารณารูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคราบแป้งมันสำปะหลังสุกกับเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด พบว่า พฤติกรรมการหลุดออกของคราบมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการหลุดออกของน้ำฝรั่งเข้มข้นและโปรตีนนม [2, 4] โดยค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากคราบมีระยะเวลาการทำความสะอาดในแต่ละช่วงที่ไม่เท่ากัน ซึ่งลักษณะการหลุดออกของคราบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง (รูปที่ 4.2) ดังนี้

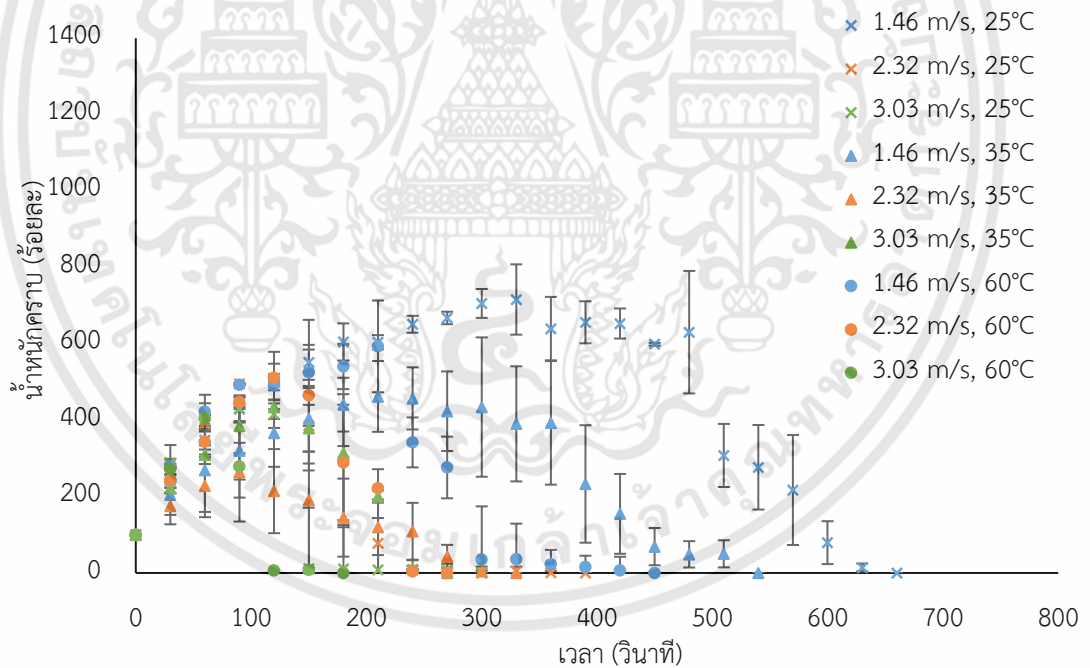
ช่วงที่ 1 ช่วงการบวม เป็นช่วงที่น้ำหนักคราบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสัมผัสกันของสารทำความสะอาดกับคราบทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารของสารทำความสะอาดเข้าสู่คราบ คราบจึงเกิดการบวมตัวขึ้นส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในคราบและแรงยึดติดระหว่างคราบกับแผ่นทดสอบลดลงโดยที่คราบยังไม่หลุดออกจากพื้นผิว [1-2, 4]

ช่วงที่ 2 ช่วงการหลุดอย่างรวดเร็ว เป็นช่วงที่น้ำหนักคราบลดลงอย่างรวดเร็ว (น้ำหนักคราบมีการเปลี่ยนแปลงทุกนาที) เนื่องจากแรงเฉือนของสารทำความสะอาดก่อให้เกิดความเสียหายของแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบและแรงยึดติดระหว่างคราบกับแผ่นทดสอบ ทำให้คราบที่บวมแล้วหลุดออกจากกันและหลุดออกจากแผ่นทดสอบ [1-2, 4]

ช่วงที่ 3 ช่วงการหลุดอย่างช้า เป็นช่วงที่น้ำหนักของคราบลดลงอย่างช้า (น้ำหนักของคราบไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องทุกนาที) เป็นผลมาจากคราบบางส่วนไม่เกิดการบวมหรือบวมไม่เต็มที่ในช่วงที่ 1 และ 2 จึงต้องการทั้งเวลาในการสัมผัสกับสารทำความสะอาดและแรงเฉือนจากการไหลของสารทำความสะอาดในการทำลายแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบและแรงยึดติดระหว่างคราบกับแผ่นทดสอบคราบจึงจะหลุดออกจากพื้นผิวได้ [2, 4-5]



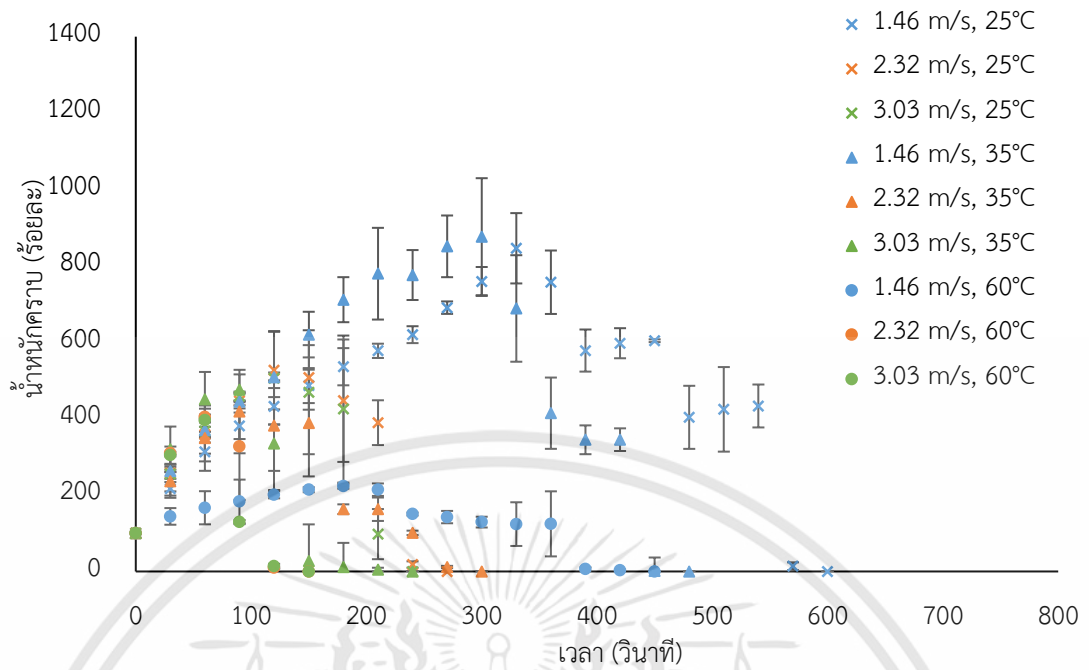
(ก) ความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 0.5 โดยมวล



(ข) ความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 1.0 โดยมวล

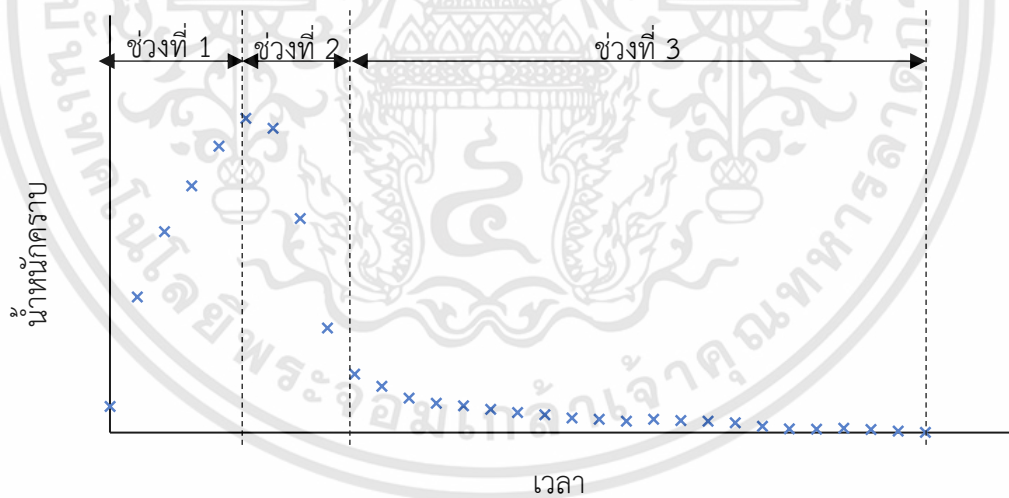
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคราบเป้น้ำมันสำปะหลังสุกกับเวลาในการทำความสะอาด (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ครั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 2.0 โดยมวล

รูปที่ 4.1 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคราบเปื้อนหลังจากปัดหลังสุดกับเวลาในการทำความสะอาด (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ครั้ง)



รูปที่ 4.2 การแบ่งช่วงลักษณะการหลุดออกของคราบเปื้อนหลังจากปัด

เมื่อพิจารณาลักษณะการหลุดออกของคราบที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วง และผลของความเร็วกวโรไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดที่มีต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบเปื้อนสกปรก พบว่า การทำความสะอาดคราบในแต่ละช่วงมีปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดที่แตกต่างกัน ดังนี้

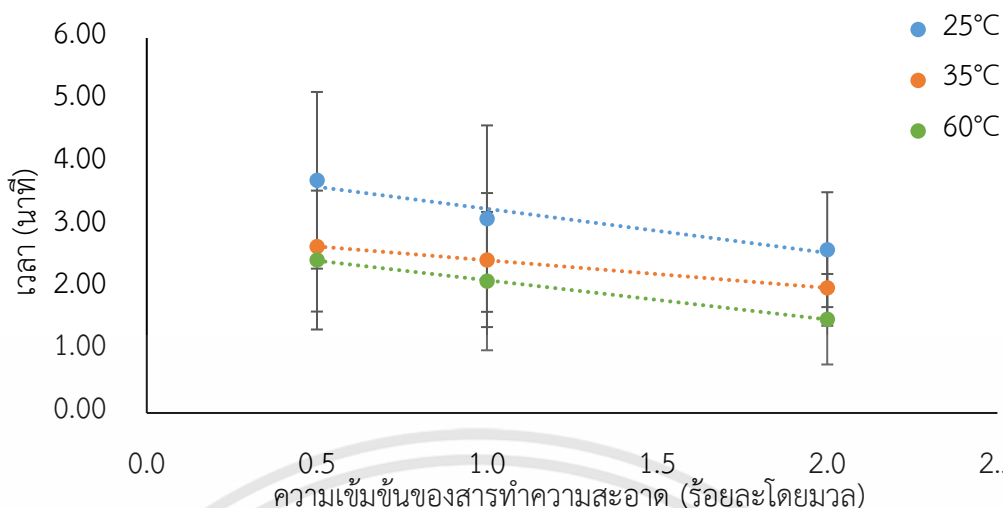
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่คราบเกิดการบวมก่อนจะหลุดออกจากพื้นผิว ในการทำความสะอาดเมื่อคราบสัมผัสกับสารทำความสะอาดและได้รับความร้อนจะเกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบ ทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในคราบจับตัวกับน้ำ คราบจึงเกิดการบวม เมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดเพิ่มขึ้นส่งผลให้คราบจับตัวกับน้ำได้มากขึ้นจึงเกิดการบวมมากขึ้น แรงยึดเหนี่ยวภายในคราบและแรงยึดติดระหว่างคราบกับแผ่นทดสอบจึงลดลง นอกจากนี้ความเร็วการไหลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้เกิดแรงเฉือนในการชะคราบออกจากพื้นผิวมากขึ้น คราบจึงต้องการเวลาในช่วงการบวมน้อยลงก่อนจะหลุดออกจากพื้นผิว จากผลการทดลอง พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจะส่งผลต่อพฤติกรรมทำความสะอาดคราบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลจาก 2.32 เป็น 3.03 เมตรต่อวินาที และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 35 เป็น 60 องศาเซลเซียส จะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมทำความสะอาด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมทำความสะอาดที่เกิดขึ้นในช่วงที่ 1 ไม่ได้รับอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ระหว่างปัจจัยในการทำความสะอาดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังพิจารณาจากรูปที่ 4.3 แสดงผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาด จะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยมีลักษณะที่ค่อนข้างขนานกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาด ในครั้งนี้จึงแนะนำให้ใช้ความเร็วการไหล 2.32 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 1.0 โดยมวล ในการทำความสะอาดคราบแป้งสกปรกพื้นที่ขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.1 ผลของความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสกปรกในช่วงที่ 1

เวลาในการทำความสะอาด (นาที)			
ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)	1.46	2.32	3.03
	3.70 ± 0.94^a	2.11 ± 0.53^b	1.72 ± 0.51^b
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25	35	60
	3.15 ± 1.22^a	2.37 ± 0.86^b	2.02 ± 0.96^b
ความเข้มข้น (ร้อยละโดยมวล)	0.5	1.0	2.0
	2.94 ± 1.20^a	2.56 ± 1.16^b	2.04 ± 0.82^c

^{a, b, c} : อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



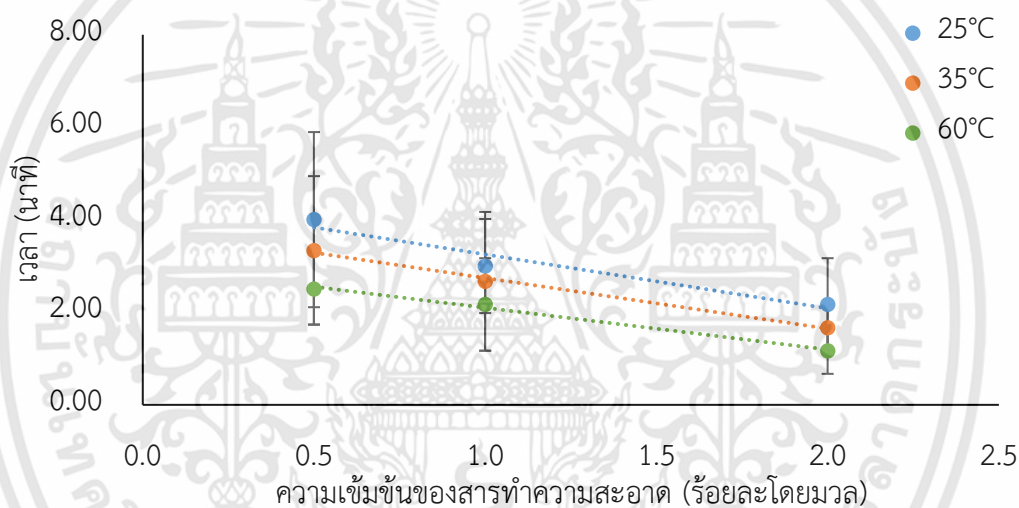
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุกในช่วงที่ 1 (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงการหลุดอย่างรวดเร็วโดยเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้คราบที่ยังไม่บวมในช่วงที่ 1 เกิดการบวม และคราบที่บวมแล้วแต่ยังไม่หลุดออกจากพื้นผิวเกิดการบวมได้มากขึ้น เมื่อคราบที่บวมสัมผัสกับแรงเฉือนที่เกิดจากการไหลของสารทำความสะอาดก็จะหลุดออกจากพื้นผิว โดยความเร็วการไหลที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดแรงเฉือนในการชะคราบออกจากพื้นผิวมากขึ้น จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจะส่งผลต่อพฤติกรรมทำความสะอาดคราบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจากร้อยละ 1.0 เป็นร้อยละ 2.0 โดยมวล จะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมทำความสะอาด ดังแสดงในตารางที่ 4.2 นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมทำความสะอาดที่เกิดขึ้นในช่วงที่ 2 ไม่ได้รับอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในการทำความสะอาดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เช่นเดียวกับช่วงที่ 1 ดังพิจารณาจากรูปที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาด จะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยมีลักษณะที่ค่อนข้างขนานกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาด ในช่วงนี้จึงแนะนำให้ความเร็วการไหล 3.03 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 1.0 โดยมวล ในการทำความสะอาดคราบแป้งสุกบนพื้นที่ขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.2 ผลของความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุกในช่วงที่ 2

เวลาในการทำความสะอาด (นาที)			
ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)	1.46	2.32	3.03
	3.67±1.41 ^a	2.31±0.60 ^b	1.57±0.67 ^c
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25	35	60
	3.06±1.43 ^a	2.56±1.34 ^b	1.94±0.91 ^c
ความเข้มข้น (ร้อยละโดยมวล)	0.5	1.0	2.0
	3.28±1.45 ^a	2.61±1.10 ^b	1.67±0.75 ^b

a, b, c : อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุกในช่วงที่ 2 (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ครั้ง)

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงการหลุดอย่างช้าโดยอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คราบที่ยังไม่บวมเกิดการบวมขึ้นและคราบที่บวมไม่เต็มที่เกิดบวมมากขึ้นทำให้หลุดออกจากพื้นผิวได้เร็วขึ้น นอกจากนี้เมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นยังส่งผลให้แรงเฉือนมากขึ้นทำให้คราบหลุดออกจากพื้นผิวได้เร็วขึ้นเช่นกัน จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจะส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลจะส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด (ตารางที่ 4.3) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 35 เป็น 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจากร้อยละ 1.0 เป็น ร้อยละ 2.0 โดยมวล จะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด นอกจากนี้อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดยังส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบในช่วงที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังพิจารณาจากตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจะส่งผลให้พฤติกรรมการทำความสะอาดคราบมีการเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่อุณหภูมิ 35 และ 60 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด ในช่วงนี้จึงแนะนำให้ใช้ความเร็วการไหล 3.03 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 1.0 โดยมวล ในการทำความสะอาดคราบแป้งสูกบนพื้นที่ขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.3 ผลของความเร็วการไหลต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งสูกหลังสุกในช่วงที่ 3

เวลาในการทำความสะอาด (นาที)			
ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)	1.46	2.32	3.03
	3.04 ± 3.25^a	2.02 ± 2.54^b	1.16 ± 0.31^c

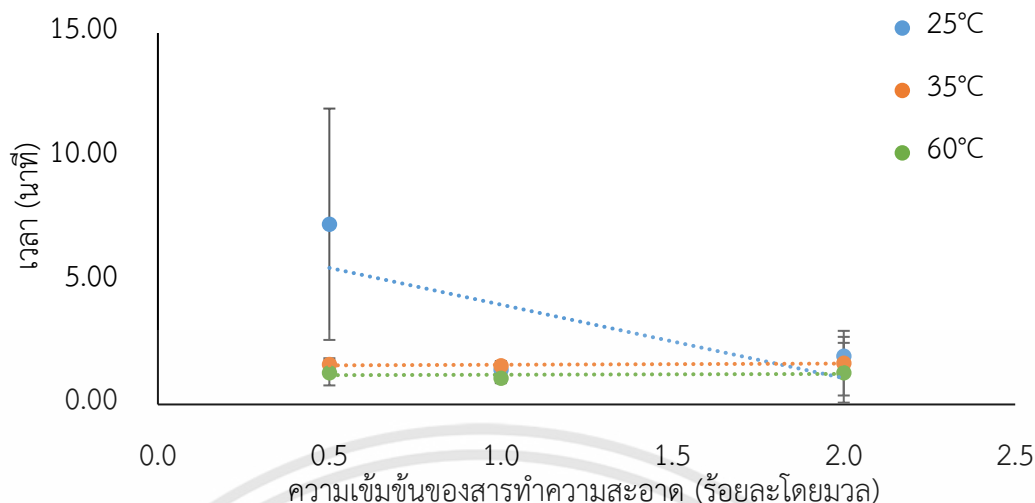
ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งสูกหลังสุกในช่วงที่ 3

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการทำความสะอาด (นาที)		
	ความเข้มข้นของสารทำความสะอาด (ร้อยละโดยมวล)		
	0.5	1.0	2.0
25	7.28 ± 4.67^{Aa}	1.39 ± 0.26^{Ab}	1.94 ± 0.79^{Ab}
35	1.61 ± 0.26^{Ba}	1.56 ± 0.20^{Aa}	1.67 ± 1.30^{Aa}
60	1.28 ± 0.51^{Ba}	1.06 ± 0.20^{Aa}	1.28 ± 1.21^{Aa}

^{A, B, C} : อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

^{a, b, c} : อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุกในช่วงที่ 3 (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เมื่อพิจารณาเวลาทั้งหมดในการทำความสะอาด พบว่า คราบแป้งสุกเป็นคราบที่ต้องการการบวมและแรงเฉือนในการทำความสะอาด โดยความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจะส่งผลให้พฤติกรรมการทำความสะอาดคราบเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากเมื่อคราบสัมผัสกับสารทำความสะอาดและได้รับความร้อนจะเกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบ ทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในคราบจับตัวกับน้ำ คราบจึงเกิดการบวมขึ้น โดยอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้คราบจับตัวกับน้ำได้มากขึ้น แรงยึดเหนี่ยวภายในคราบและแรงยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิวจึงลดลง เมื่อคราบดังกล่าวสัมผัสกับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไหลของสารทำความสะอาดส่งผลให้คราบสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบและแรงยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิว คราบจึงหลุดออกจากกันและหลุดออกจากพื้นผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Fuchs et al. [5] ที่ศึกษาผลของความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดที่มีต่อการทำความสะอาดคราบ พบว่าความเร็วการไหลส่งผลต่อการทำความสะอาดคราบโดยเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นความเร็วการทำทำความสะอาดคราบจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และสอดคล้องกับผลของ Khalid et al. [4] ที่ศึกษาการทำทำความสะอาดคราบน้ำฝรั่งเข้มข้นแล้วพบว่าอุณหภูมิ ความเข้มข้น และความเร็วของสารทำความสะอาดจะส่งผลต่อเวลาในการทำความสะอาด จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจะส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลจะส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด (ตารางที่ 4.5) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 35 เป็น 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียส และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจากร้อยละ 1.0 เป็น ร้อยละ 2.0 โดยมวล จะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมทำความสะอาด นอกจากนี้อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดยังส่งผลต่อพฤติกรรมทำความสะอาดคราบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังพิจารณาจากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 60 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจะส่งผลให้พฤติกรรมทำความสะอาดคราบมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิ 35 และ 60 องศาเซลเซียส กราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันโดยมีลักษณะที่ขนานกัน ในขณะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แนวโน้มของกราฟมีลักษณะที่ต่างออกไปและไม่ขนานกับกราฟเส้นอื่น แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 25 เป็น 35 องศาเซลเซียส พฤติกรรมทำความสะอาดที่เกิดขึ้นจะได้รับอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาด โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจาก 35 เป็น 60 องศาเซลเซียส จะไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาด จึงแนะนำให้ใช้ความเร็วการไหล 3.03 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 1.0 โดยมวล ในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุกบนพื้นที่ขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.5 ผลของความเร็วการไหลต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุก

เวลาในการทำความสะอาด (นาที)			
ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)	1.46	2.32	3.03
	10.28±4.54 ^a	6.09±3.23 ^b	4.43±1.10 ^c

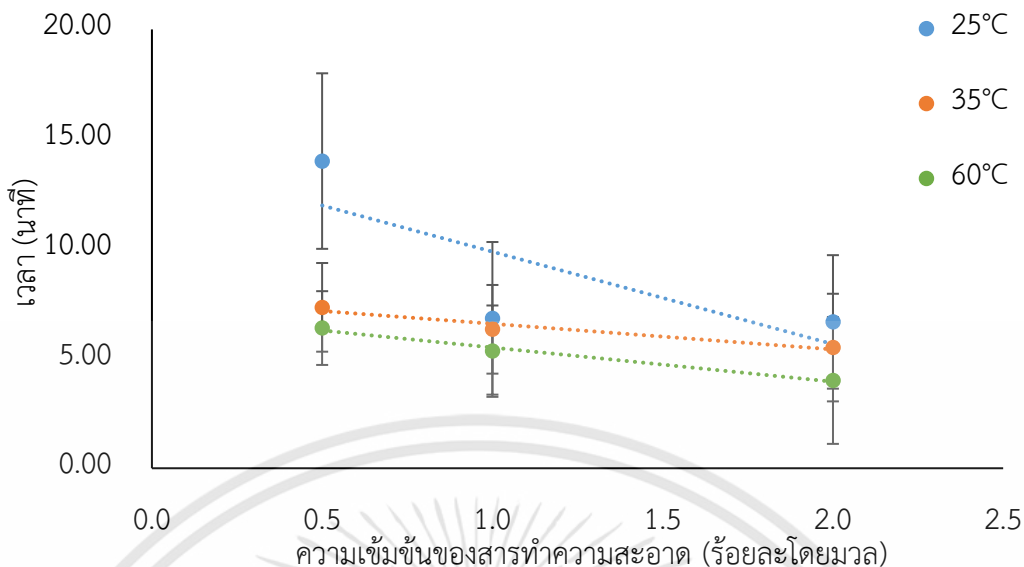
ตารางที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุก

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการทำความสะอาด (นาที)		
	ความเข้มข้นของสารทำความสะอาด (ร้อยละโดยมวล)		
	0.5	1.0	2.0
25	14.00±4.00 ^{Aa}	6.83±3.48 ^{Ab}	6.67±3.04 ^{Ab}
35	7.33±2.02 ^{Ba}	6.33±2.02 ^{Aa}	5.50±2.45 ^{Aa}
60	6.39±1.68 ^{Ba}	5.34±2.08 ^{Aa}	4.00±2.89 ^{Aa}

^{A, B, C} : อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

^{a, b, c} : อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

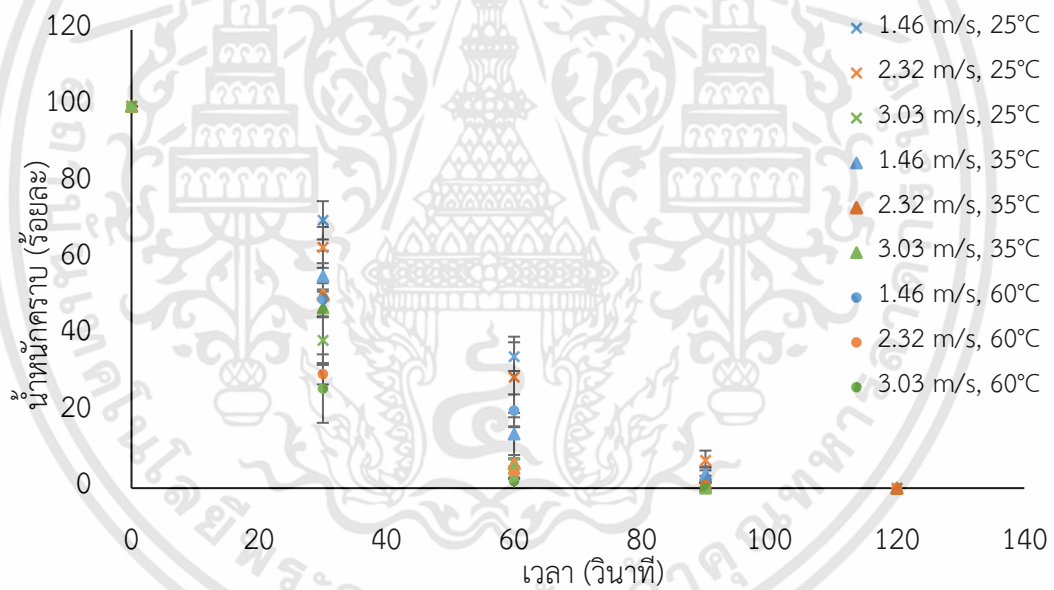
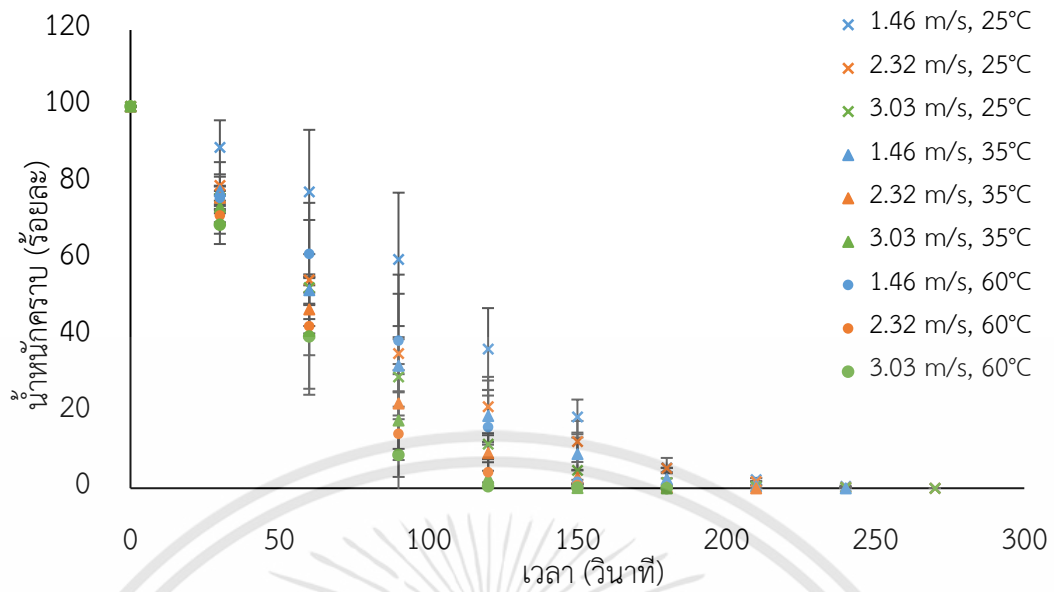
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



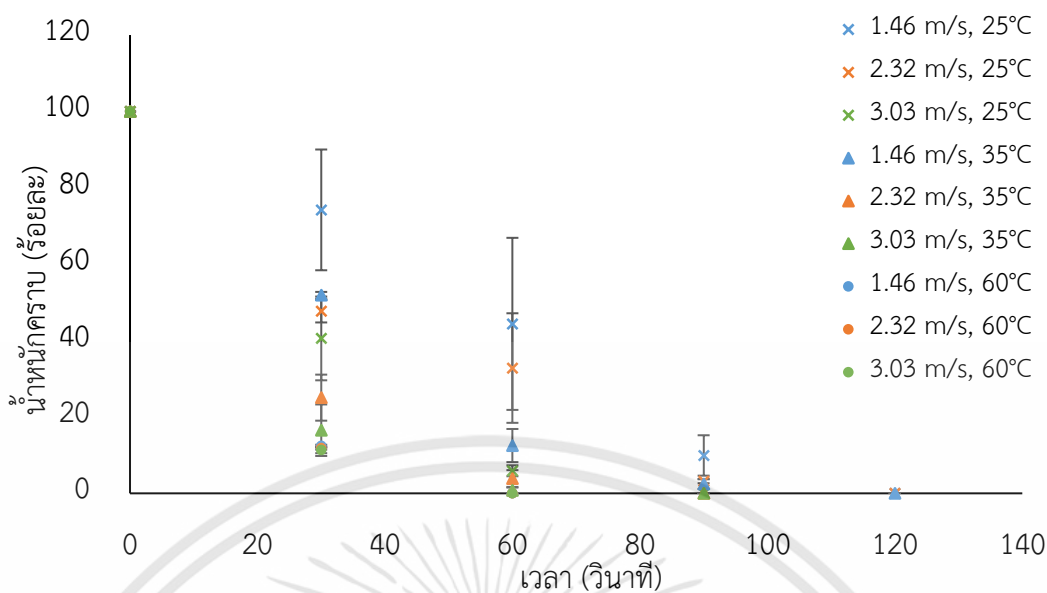
รูปที่ 4.6 อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุก (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

4.1.2 คราบนมชั้นหวาน

ผลการทดลองพิจารณาจากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคราบนมชั้นหวานกับเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด พบว่า คราบนมชั้นหวานมีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำตาล (ประมาณร้อยละ 47) จึงต้องการการละลายในการทำความสะอาด เมื่อสารทำความสะอาดสัมผัสกับคราบจะเกิดการถ่ายโอนมวลสารซึ่งกันและกัน โดยคราบจะแยกตัวออกจากกันอย่างอิสระและเคลื่อนย้ายเข้าสู่สารทำความสะอาด เมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้มากขึ้นระยะเวลาในการทำความสะอาดคราบจึงลดลง สอดคล้องกับผลของ Khalid et al. [4] ซึ่งศึกษาการทำความสะอาดคราบน้ำฝรั่งเข้มข้นที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบพบว่า อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้น้ำตาลเกิดการละลายและหลุดออกจากพื้นผิว นอกจากคราบนมชั้นหวานจะมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลักแล้วยังมีองค์ประกอบรองเป็นโปรตีน (ประมาณร้อยละ 15) ซึ่งต้องการแรงกระทำทางกลและปฏิกิริยาเคมีในการทำความสะอาด โดยลักษณะการทำความสะอาดโปรตีนจะมีความคล้ายคลึงกับการทำความสะอาดคราบแป้งสุกที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.1.1 ด้วยเหตุนี้ความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดจึงส่งผลต่อการทำความสะอาดคราบนมชั้นหวานด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักราบบนชิ้นหวานกับเวลาในการทำความสะอาด (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)



(ค) ความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 2.0 โดยมวล

รูปที่ 4.7 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักราบนมชั้นหวานกับเวลาในการทำความสะอาด (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เมื่อพิจารณาลักษณะการหลุดออกของคราบ และผลของความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดที่มีต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบนมชั้นหวาน พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจะส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลจะส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด (ตารางที่ 4.7) และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจากร้อยละ 0 โดยมวล เป็นร้อยละ 0.5 โดยมวล จะส่งผลให้พฤติกรรมการทำความสะอาดที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันเช่นกัน เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารทำความสะอาดเป็นร้อยละ 0 โดยมวล เป็นการใช้น้ำในการทำความสะอาด กลไกการทำความสะอาดที่เกิดขึ้นจึงมีเพียงแรงกระทำทางกลเท่านั้น ส่วนที่ความเข้มข้นของสารทำความสะอาดมีค่าร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยมวล พฤติกรรมการทำความสะอาดที่เกิดขึ้นได้รับผลมาจากปฏิกิริยาเคมีร่วมด้วย นอกจากนี้ อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดยังส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังพิจารณาจากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 0 และ 1.0 โดยมวล การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบ ในขณะที่ความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 0.5 โดยมวล การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด จึง

แนะนำให้ใช้ความเร็วการไหล 1.46 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 1.0 โดยมวล ในการทำความสะอาดคราบหมันชั้นหวนบนพื้นที่ขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.7 ผลของความเร็วการไหลต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบหมันชั้นหวน

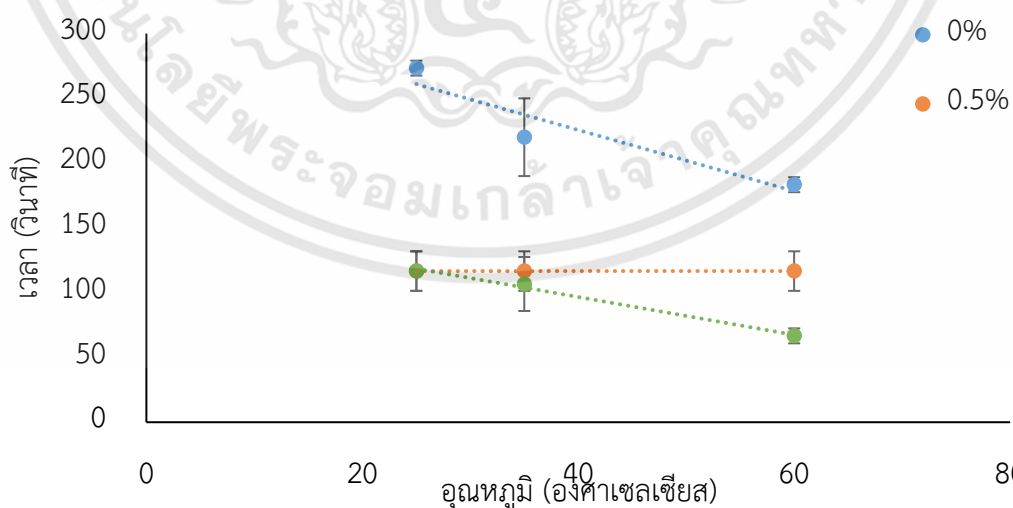
เวลาในการทำความสะอาด (วินาที)			
ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)	1.46	2.32	3.03
	160±67 ^a	147±64 ^b	132±67 ^c

ตารางที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบหมันชั้นหวน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการทำความสะอาด (วินาที)		
	ความเข้มข้นของสารทำความสะอาด (ร้อยละโดยมวล)		
	0	0.5	1.0
25	273±5 ^{Aa}	116±15 ^{Ab}	116±15 ^{Ab}
35	220±30 ^{Ba}	116±15 ^{Ab}	106±20 ^{Ab}
60	183±5 ^{Ca}	116±15 ^{Ab}	66±5 ^{Bc}

A, B, C : อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

a, b, c : อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.8 อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดต่อเวลาในการทำความสะอาดคราบหมันชั้นหวน (ค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด

4.2.1 ทรายแป้งมันสำปะหลังสุก

ผลการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่า การทำความสะอาดในช่วงที่ 1 และ 2 ความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดมีความสัมพันธ์ในทางตรงข้ามกับเวลาการทำความสะอาดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยมีค่าสหสัมพันธ์เป็น -0.699 , -0.366 และ -0.319 ตามลำดับ และ -0.662 , -0.346 และ -0.510 ตามลำดับ ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.1.1 ว่าทรายแป้งมันสำปะหลังสุกต้องการการบวมและแรงเฉือนในการทำความสะอาด โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดส่งผลให้คราบเกิดการบวมได้มากขึ้น และการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดส่งผลให้เกิดแรงเฉือนมากขึ้นคราบจึงหลุดออกจากพื้นผิวได้เร็วขึ้น เมื่อพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์พบว่าค่าสหสัมพันธ์ของความเร็วการไหลมีค่ามากที่สุด (ในช่วงที่ 1 มีค่า -0.699 และในช่วงที่ 2 มีค่า -0.366) และค่าสหสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดมีค่ารองลงมา (ในช่วงที่ 1 มีค่า -0.366 และ -0.319 ตามลำดับ และในช่วงที่ 2 มีค่า -0.346 และ -0.510 ตามลำดับ) จึงอาจกล่าวได้ว่าความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้พฤติกรรมการทำความสะอาดทรายในช่วงที่ 1 และ 2 มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการทำความสะอาดลดลง เมื่อพิจารณาการทำความสะอาดในช่วงที่ 3 พบว่าความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดมีความสัมพันธ์ในทางตรงข้ามกับเวลาการทำความสะอาดในช่วงที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยมีค่าสหสัมพันธ์เป็น -0.306 เนื่องจากการทำความสะอาดทรายในช่วงที่ 3 ต้องการแรงเฉือนในการทำความสะอาดดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.1 ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Khalid et al. [4] ที่พบว่าในช่วงที่ 1 และ 2 ความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด ส่วนช่วงที่ 3 ความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดโดยที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดไม่ส่งผล

และเมื่อพิจารณาผลของปัจจัยการทำความสะอาดที่มีต่อเวลาทั้งหมดในการทำความสะอาด พบว่าความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดมีความสัมพันธ์ในทางตรงข้ามกับเวลาทั้งหมดในการทำความสะอาดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยมีค่าสหสัมพันธ์เป็น -0.597 , -0.366 และ -0.360 ตามลำดับ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่าทรายแป้งมันสำปะหลังสุกต้องการการบวมและแรงเฉือนในการทำความสะอาด โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความเข้มข้น

ของสารทำความสะอาดส่งผลให้คราบเกิดการบวมได้มากขึ้น และการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดส่งผลให้เกิดแรงเฉือนมากขึ้นคราบจึงหลุดออกจากพื้นผิวได้เร็วขึ้น เมื่อพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์พบว่าค่าสหสัมพันธ์ของความเร็วการไหลมีค่ามากที่สุด (-0.597) และค่าสหสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดมีค่ารองลงมาตามลำดับ (-0.366 และ -0.360 ตามลำดับ) จึงอาจกล่าวได้ว่าความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้พฤติกรรมการทำความสะอาดคราบมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดมีค่าเพิ่มขึ้นระยะเวลาในการทำความสะอาดจะลดลง

ตารางที่ 4.9 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการทำความสะอาดกับเวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุก

เวลาในการทำความสะอาด	ค่าสหสัมพันธ์		
	ความเร็วการไหล	อุณหภูมิ	ความเข้มข้น
โดยรวม	-0.597*	-0.366*	-0.360*
ช่วงที่ 1	-0.699*	-0.366*	-0.319*
ช่วงที่ 2	-0.662*	-0.346*	-0.510*
ช่วงที่ 3	-0.306*	-0.250	-0.175

* : มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$)

4.2.2 คราบนมข้นหวาน

ผลการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดมีความสัมพันธ์ในทางตรงข้ามกับเวลาการทำความสะอาดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยมีค่าสหสัมพันธ์เป็น -0.290 และ -0.815 ตามลำดับ ทั้งนี้ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น (หัวข้อที่ 4.1.2) ว่าคราบนมข้นหวานมีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำตาลซึ่งต้องการการละลายในการทำความสะอาด การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดจึงส่งผลพฤติกรรมการทำความสะอาดทำให้ระยะเวลาในการทำความสะอาดลดลง [4] เมื่อพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์พบว่าค่าสหสัมพันธ์ของความเข้มข้นมีค่าเข้าใกล้ -1 และค่าสหสัมพันธ์ของอุณหภูมิมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับเวลาในการทำความสะอาดค่อนข้างน้อย ส่วนความเข้มข้นของสารทำความสะอาดมีความสัมพันธ์กับเวลาในการทำความสะอาดอย่างมาก จึงอาจกล่าวได้ว่าในการทำความสะอาดคราบนมข้นหวานความเข้มข้นของสารทำความสะอาดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมการทำความสะอาดมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อความเข้มข้นของสารทำความสะอาดมีค่ามากขึ้นระยะเวลาในการทำความสะอาดคราบจะลดลง

ตารางที่ 4.10 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการทำความสะอาดกับเวลาในการทำความสะอาดคราบนมชั้นหวาน

เวลาในการทำความสะอาด	ค่าสหสัมพันธ์		
	ความเร็วการไหล	อุณหภูมิ	ความเข้มข้น
	-0.176	-0.290*	-0.815*

* : มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบชุดทดลองสำหรับการตรวจสอบพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบอาหารบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทำความสะอาดออกเป็น 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วการไหล 1.46, 2.32 และ 3.03 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 25, 35 และ 60 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสารทำความสะอาด ร้อยละ 0.5, 1.0 และ 2.0 โดยมวล สำหรับการทำความสะอาดคราบแข็งน้ำมันสำหรับล้างจาน และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดร้อยละ 0, 0.5 และ 1.0 โดยมวล สำหรับการทำความสะอาดคราบนมชั้นหวาน โดยนำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการจำลองการไหลของฟิล์มน้ำเพื่อออกแบบชุดทดลอง จากนั้นทำการตรวจสอบพฤติกรรมหลุดออกของคราบโดยใช้แป้งมันสำปะหลังสุกและนมชั้นหวานเป็นตัวแทนของคราบคาร์โบไฮเดรตประเภทแป้งและน้ำตาล ตามลำดับ โดยในระหว่างการทำความสะอาดใช้วิธีการชั่งน้ำหนักเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคราบ

จากการทดลองและวิเคราะห์สหสัมพันธ์ พบว่า การทำความสะอาดคราบแป้งสุกมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับการทำความสะอาดน้ำฝรั่งเข้มข้นและโปรตีนนมซึ่งอาศัยการบวมในการทำความสะอาด โดยสามารถแบ่งช่วงการทำความสะอาดออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ช่วงการบวม, ช่วงที่ 2 ช่วงการหลุดอย่างรวดเร็ว และช่วงที่ 3 ช่วงการหลุดอย่างช้า โดย ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ทำให้คราบเกิดการบวมแนะนำให้ใช้ความเร็วการไหล อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดปานกลางในการทำความสะอาด, ช่วงที่ 2 แนะนำให้ใช้ความเร็วการไหลที่สูง อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดปานกลางในการทำความสะอาด เนื่องจากคราบต้องการปฏิกิริยาเคมีในการบวมและแรงเฉือนในการชะคราบออกจากพื้นผิว ซึ่งในช่วงที่ 1 และ 2 ความเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดส่งผลต่อพฤติกรรมทำความสะอาดคราบ โดยความเร็วการไหลเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้พฤติกรรมทำความสะอาดคราบเปลี่ยนแปลงไป และในช่วงที่ 3 แนะนำให้ใช้ความเร็วการไหลสูงในการทำความสะอาด เนื่องจากในช่วงนี้คราบต้องการแรงเฉือนในการทำความสะอาด จึงอาจกล่าวได้ว่า ความเร็วการไหลเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้พฤติกรรมทำความสะอาดคราบแป้งมันสำปะหลังสุกเปลี่ยนแปลงไป ส่วนการทำความสะอาดคราบนมชั้นหวานต้องการปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้คราบละลายในการทำความสะอาด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์พบว่าอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความเข้มข้นของสารทำความสะอาดส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบ โดยความเข้มข้นของสารทำความสะอาดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เวลาในการทำความสะอาดเปลี่ยนแปลงไป จึงแนะนำให้ใช้อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารทำความสะอาดที่สูงในการทำความสะอาด โดยความเข้มข้นของสารทำความสะอาดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้สร้างชุดทดสอบจากวัสดุซึ่งเป็นอนุภาคนิยมโดยวางรองรับแผ่นทดสอบมีขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร หากวางรองรับแผ่นทดสอบมีขนาดเปลี่ยนแปลงไป เมื่อความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดมีค่าเท่ากัน ความหนาของฟิล์มของเหลวและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไหลของสารทำความสะอาดจะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยในการทดลองทำความสะอาดสารทำความสะอาดที่ใช้คือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งกัดกร่อนอนุภาคนิยม ดังนั้นหากต้องการชุดทดสอบที่คงทนแข็งแรงและใช้งานได้ในระยะยาวควรเลือกวัสดุในการสร้างชุดทดสอบให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนของสารทำความสะอาดที่ใช้ได้ และการทดลองทำความสะอาดคราบยังพิจารณาคราบแข็งมันสำหรับหลังสุกและนมข้นหวานเป็นตัวแทนของคราบคาร์โบไฮเดรตประเภทแป้งและน้ำตาล ตามลำดับ ซึ่งในอุตสาหกรรมอาหารยังมีคราบประเภทอื่น เช่น โปรตีนและไขมัน เป็นต้น โดยคราบแต่ละประเภทต้องการกลไกในการทำความสะอาดที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการวิจัยต่อไปจึงควรศึกษากลไกการทำความสะอาดและวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการทำความสะอาดคราบประเภทอื่นเพิ่มเติม นอกจากนี้หากคราบได้รับความร้อนสูงจนเกิดการไหม้ส่งผลให้คราบกลายเป็นคาร์บอนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ เมื่อคราบกลายเป็นสารอินทรีย์การทำความสะอาดที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะไม่สามารถทำความสะอาดคราบออกจากพื้นผิวได้ และชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของคราบอาหารที่นำเสนอจะไม่สามารถนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการทำความสะอาดคราบประเภทนี้ได้ เนื่องจากในการทำความสะอาดคราบสารอินทรีย์จำเป็นต้องใช้สารละลายกรดในการทำความสะอาดร่วมกับการใช้แรงกระทำทางกล โดยแรงกระทำทางกลที่เกิดขึ้นจากการไหลของสารทำความสะอาดไม่มากพอที่จะทำลายแรงยึดเหนี่ยวและแรงยึดติดของคราบจึงจำเป็นต้องใช้แรงงานคนในการทำความสะอาดคราบออกจากพื้นผิว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Goode K.R., Asteriadou K., Robbins P.T. and Fryer P.J. “Fouling and Cleaning Studies in The Food and Beverage Industry Classified by Cleaning Type” **Institute of Food Technologists**, vol. 12, 2013. pp. 121-143.
- [2] Gillham C.R., Fryer P.J., Hasting A.P.M. and Wilson D.I. “Cleaning-in-place of Whey Protein Fouling Deposits: Mechanisms Controlling Cleaning” **Institution of Chemical Engineers**, vol. 77, 1999. pp. 127-136.
- [3] Tamime Adnan. **Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage Operations**. 3rd ED. Blackwell Publishing. 2008.
- [4] Khalid N.I., Nordin N., Chia Z.Y., Ab Aziz N., Nuraini A.A., Taip F.S. and Ahmedow A. “A Removal Kinetics Approach for Evaluation of Economic Cleaning Protocols of Pink Guava Puree Fouling Deposit” **Journal of Cleaner Production**, vol. 135, 2016. pp. 1317-1326.
- [5] Fuchs E., Boye A., Murcek R. and Majschak J.P. “An Experimental Comparison of Film Flow Parameters and Cleaning Behavior of Falling Liquid Films for Different Tilt Angles” **Food and Bioproducts Processing**, vol. 93, 2014. pp. 318-326.
- [6] To A., Annapragada S.R. “Experimental Parameters for Small-scale Cleaning Characterization. Part II: Effect of Fluid Velocity on The Kinetics of Cleaning” **Institute of Validation Technology**, 2015.
- [7] Jensen B.B.B., Friis A., Benezech T., Legentilhomme P. and Lelievre C. “Local Wall Shear Stress Variations Predicted by Computational Fluid Dynamics for Hygienic Design” **Food and Bioproducts Processing**, vol. 83, 2005. pp. 53-60.
- [8] Norton T., Sun D.W. “Computational Fluid Dynamics (CFD) – An Effective and Efficient Design and Analysis Tool for The Food Industry: A Review” **Trends in Food Science & Technology**, vol. 17, 2006. pp. 600-620.
- [9] Salo S., Friis A. and Wirtanen G. “Cleaning Validation of Fermentation Tanks” **Food and Bioproducts Processing**, vol. 86, 2008. pp. 204-210.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] Lan H., Wegener J.L., Armaly B.F., and Drallmeier J.A. “Developing Laminar Gravity-driven Thin Liquid Film Flow Down An Inclined Plane” **Journal of Fluids Engineering**, 2010.
- [11] Xu Y., Yuan J., Repke J.U. and Wozny G. “CFD Study on Liquid Flow Behavior on Inclined Flat Plate Focusing on Effect of Flow Rate” **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, vol. 6, no. 2, 2012. pp. 186-194.
- [12] Yu Yiqi. 2014. “A Computational Fluid Study of Falling Film Behavior on Flat Plate” **ASME US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting**, 2014.
- [13] Prabu S.L., Prakash T.N.K.S. and Thirumurugan R. “Chapter 5 – Cleaning Validation and Its Regulatory Aspects in the Pharaceutical Industry” **Developments in Surface Contamination and Cleaning**, 2015. pp. 129-186.
- [14] Fryer P.J., Asteriadou K. “A Prototype Cleaning Map: A Classification of Industrial Cleaning Processes” **Food Science & Technology**, vol. 20, 2009. pp. 255-262.
- [15] Lelievre C., Antonini G., Faille C. and Benezech T. “Cleaning-in-place Modelling of Cleaning Kinetics of Pipes Soiled by Bacillus Spores Assuming A Process Combining Removal and Deposit” **Institution of Chemical Engineers**, vol. 80, 2002. pp. 305-311.
- [16] Bird M.R., Bartlett M. “Effect of NaOH Concentration on Cleaning Time of Whole Milk Deposit at 50°C” **Institution of Chemical Engineers.**, vol. 73, 1995. pp. 63-70.
- [17] Fan M., Phinney D.M. and Heldman D.R. “The Impact of Cleaning-in-place Parameters on Rinse Water Effectiveness and Efficiency” **Journal of Food Engineering**, vol. 222, 2018. pp. 276-283.
- [18] Weise F., Scholl S. “Evaporation of Pure Liquids with Increased Viscosity in A Falling Film Evaporator” **Heat Mass Transfer**, vol. 45, 2009. pp. 1037-1046.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [19] Lerch K, Hinrichs J., Dittmer P. and Rauschnabel J. “Cleanability of Surfaces from Active Pharma-ceutical Ingredient Surrogate Riboflavin by Falling Film” **Chemie Ingenieur Technik**, vol. 85, no. 3, 2012. pp. 323-332.
- [20] ANSYS. **ANSYS FLUENT Theory Guide**. ANSYS Inc. 2011.
- [21] Zhou D.W., Gambaryan R. T. and Stephan P. “Measurement of Water Falling Film Thickness to Flat Plate Using Confocal Chromatic Sensing Technique” **Experimental Thermal and Fluid Science**, vol. 33, 2009. pp. 273-283.
- [22] Takamasa T., Hazuka T., “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**, vol. 43, no. 15, 2000, pp. 2807-2819.
- [23] Fox W.R., McDonald T.A. **Introduction to Fluid Mechanics**. John Wiley & Sons, Inc. 1994.
- [24] Çengel Y. A., Ghajar A. J. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications**. New York: McGraw-Hill. 2011.



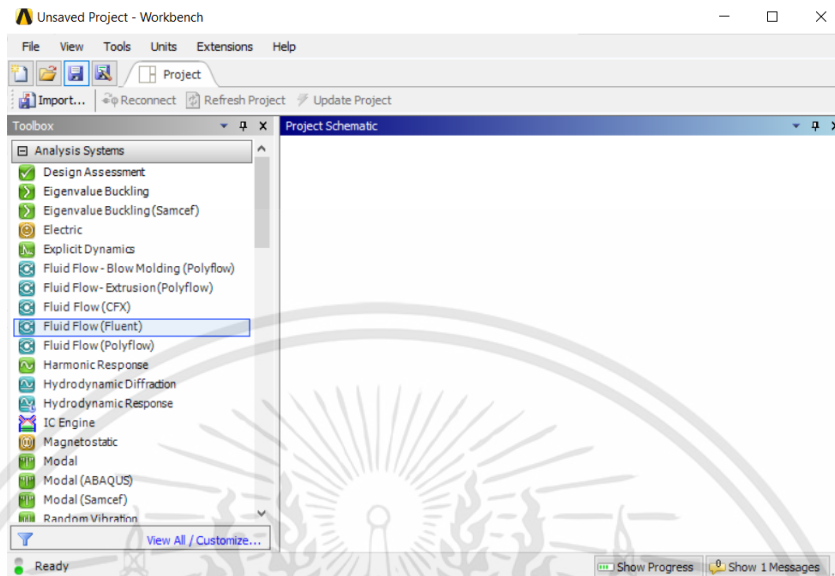
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

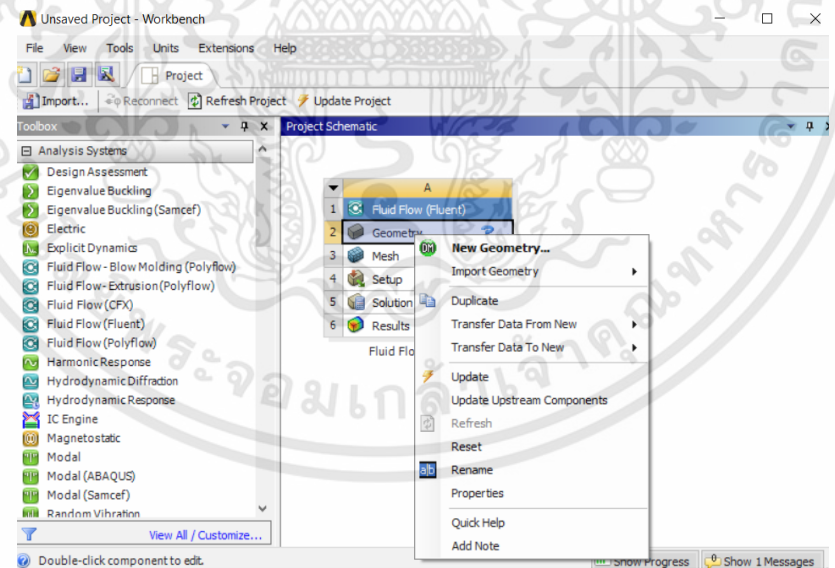
1. การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0

1.1 ดับเบิลคลิกที่ Fluid Flow (Fluent) เพื่อสร้างไฟล์งาน



รูปที่ 1 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (1)

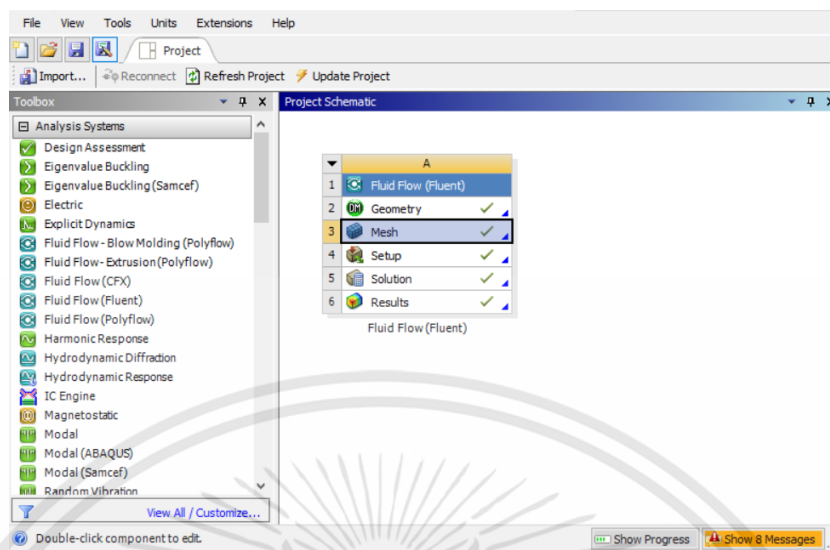
1.2 คลิกขวาที่ Geometry >>> Import Geometry เพื่อนำชิ้นงานเข้ามา



รูปที่ 2 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (2)

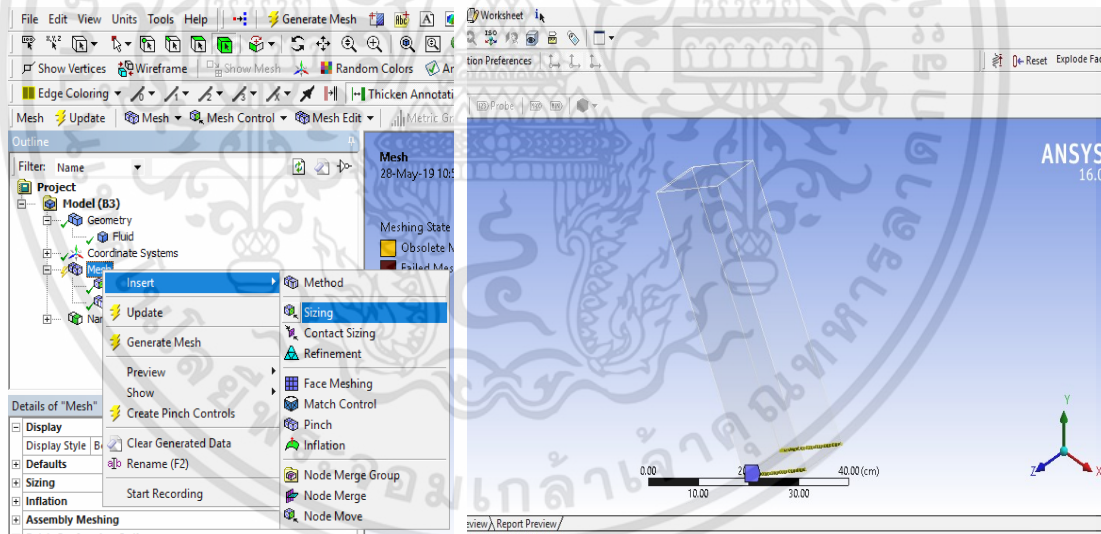
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ดับเบิลคลิกที่ Mesh



รูปที่ 3 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (3)

1.4 คลิกขวาที่ Mesh >>> Insert >>> Sizing >>> เลือกขอบของชิ้นงาน



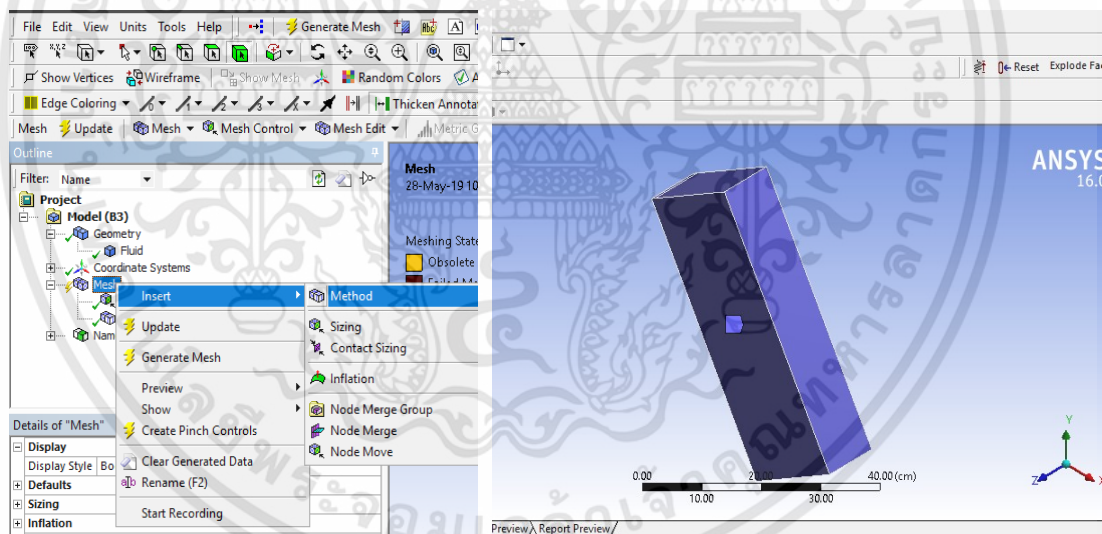
รูปที่ 4 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ปรับค่าดังตาราง

คำสั่ง	ค่า
Suppressed	No
Type	Number of Divisions
Number of Divisions	80
Behavior	Hard
Bias Type	— — — —
Bias Option	Bias Factor
Bias Factor	80
Reverse Bias	No Selection

1.6 คลิกขวาที่ Mesh >>> Insert >>> Method >>> เลือกชิ้นงาน



รูปที่ 5 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ปรับค่าดังตาราง

คำสั่ง	ค่า
Suppressed	No
Method	Multizone
Mapped Mesh Type	Hexa
Surface Mesh Method	Program Controlled

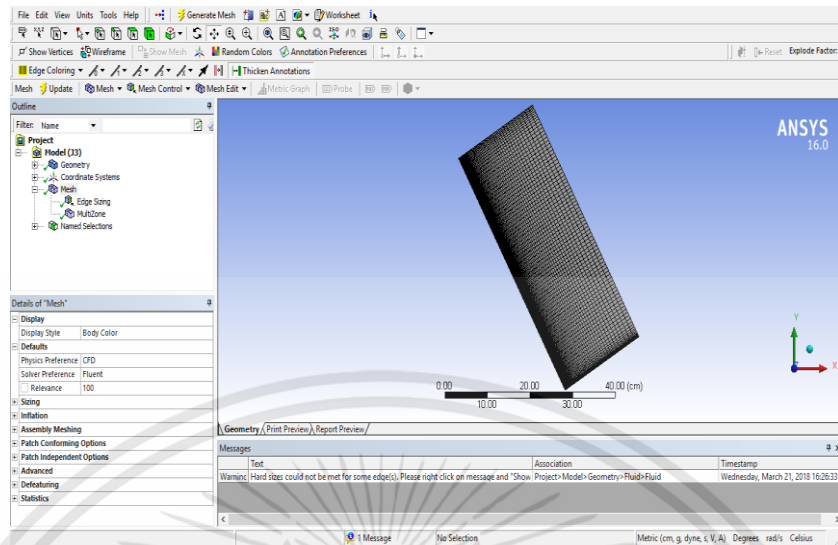
1.8 คลิกที่ Mesh และปรับค่าดังตาราง

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	None
Inflation option	Smooth Transition

รูปที่ 6 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (6)

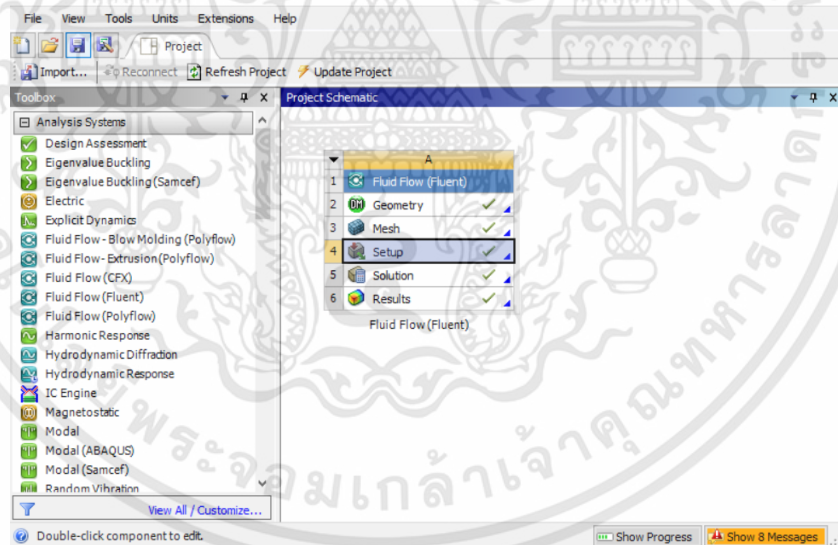
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.9 คลิก Generate Mesh



รูปที่ 7 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (7)

1.10 ดับเบิลคลิก Set Up

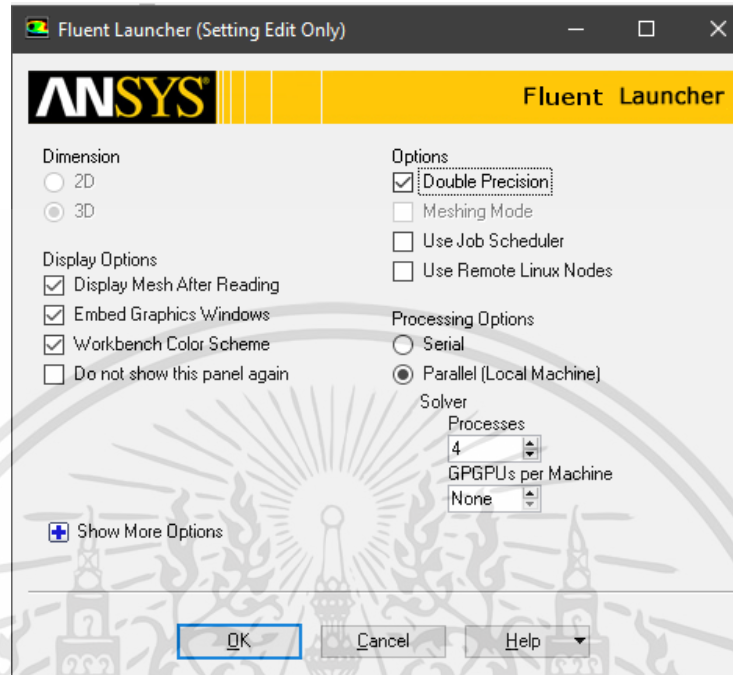


รูปที่ 8 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

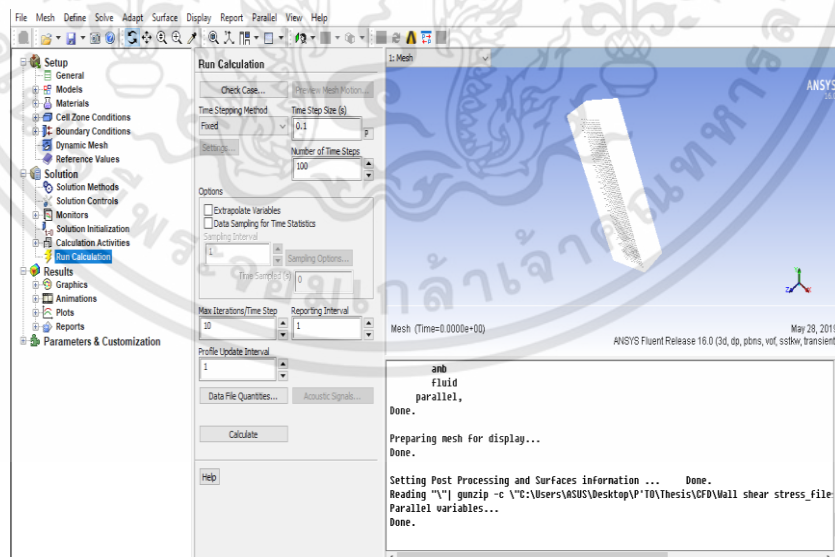
1.11 ตั้งค่าตั้งรูปภาพ

หมายเหตุ Processes ควรกำหนดตามสเปกของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล



รูปที่ 9 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (9)

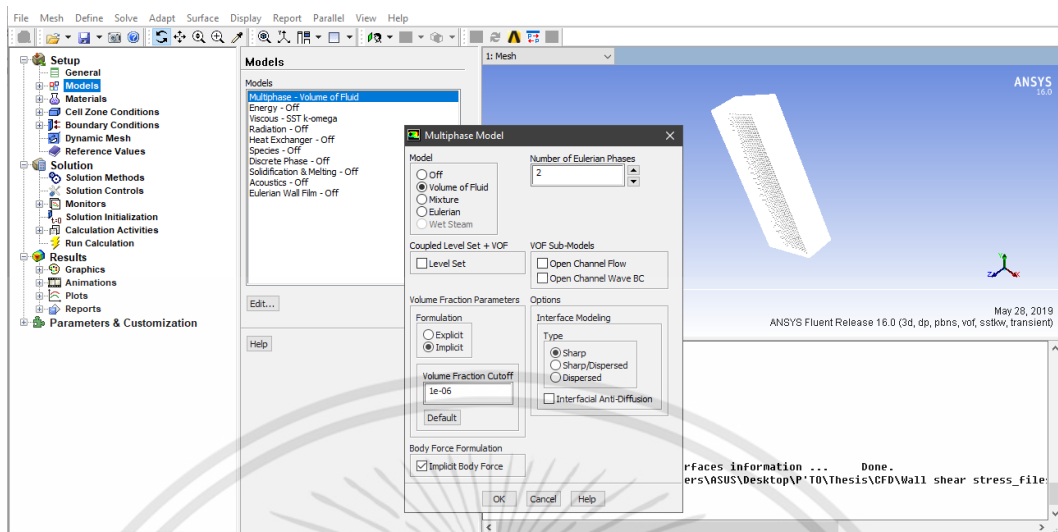
1.12 คลิก General >>> Gravity>>> -9.81 ที่แกน Y



รูปที่ 10 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (10)

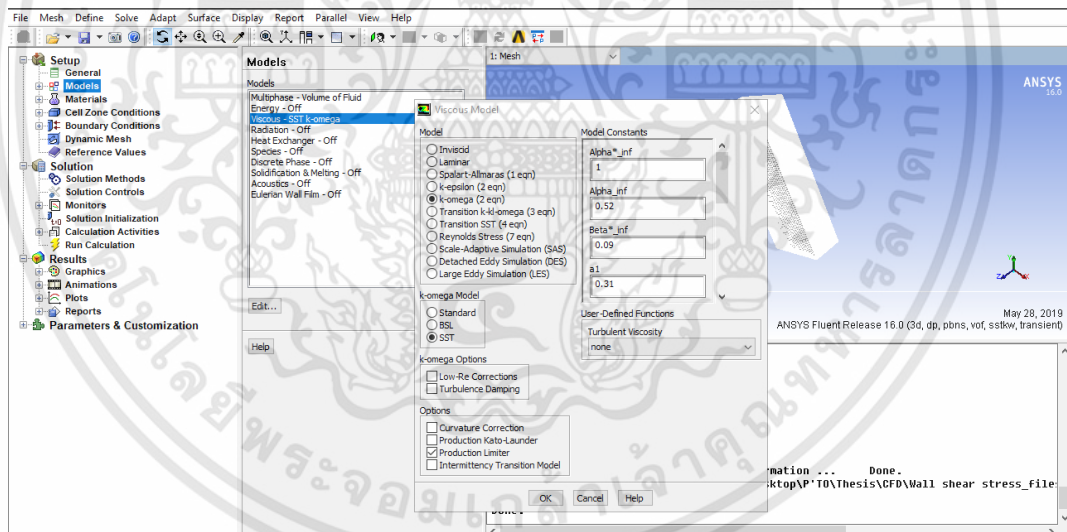
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 11 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (11)

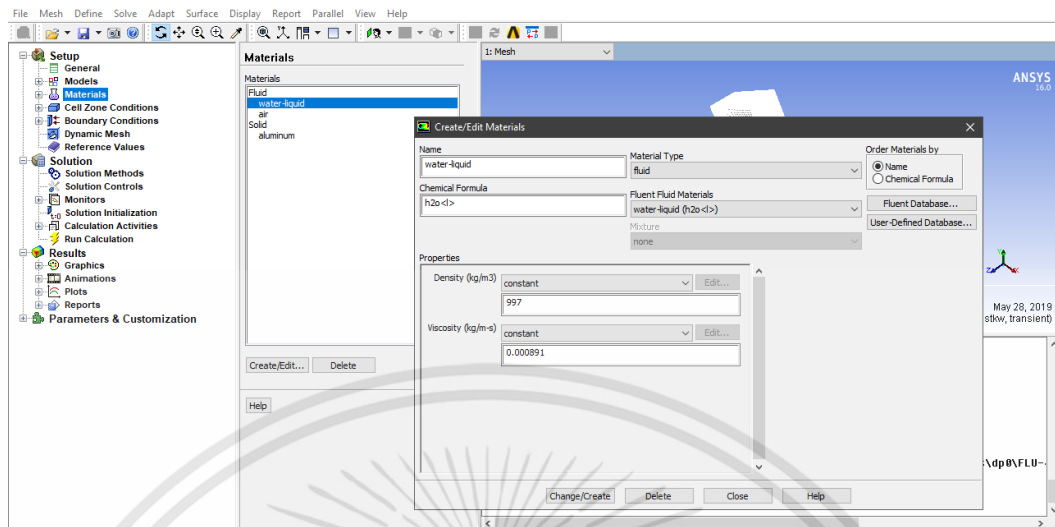
1.14 คลิก Models >>> Viscous >>> SST k - ω >>> ตั้งค่าดังรูปภาพ



รูปที่ 12 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (12)

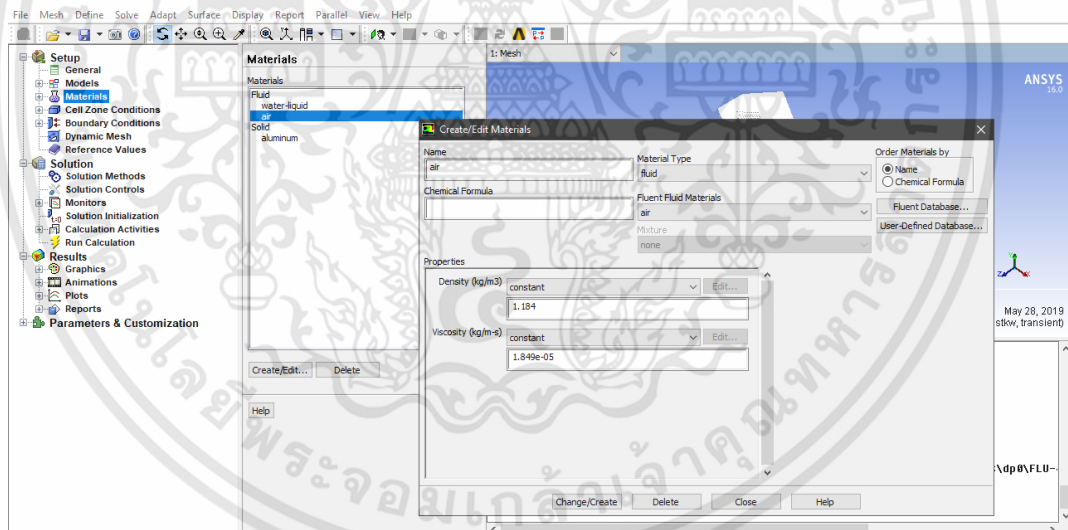
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.15 คลิก Materials >>> Fluid >>> Create/Edit... >>> water-Liquid ตั้งค่าตามรูปภาพ



รูปที่ 13 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (13)

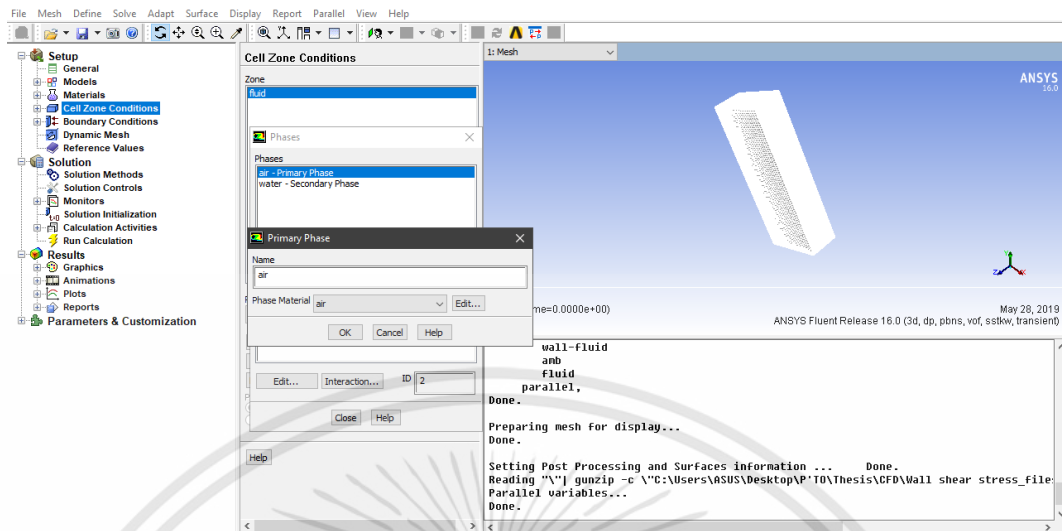
1.16 คลิก Materials >>> Fluid >>> Create/Edit... >>> air ตั้งค่าตามรูปภาพ



รูปที่ 14 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (14)

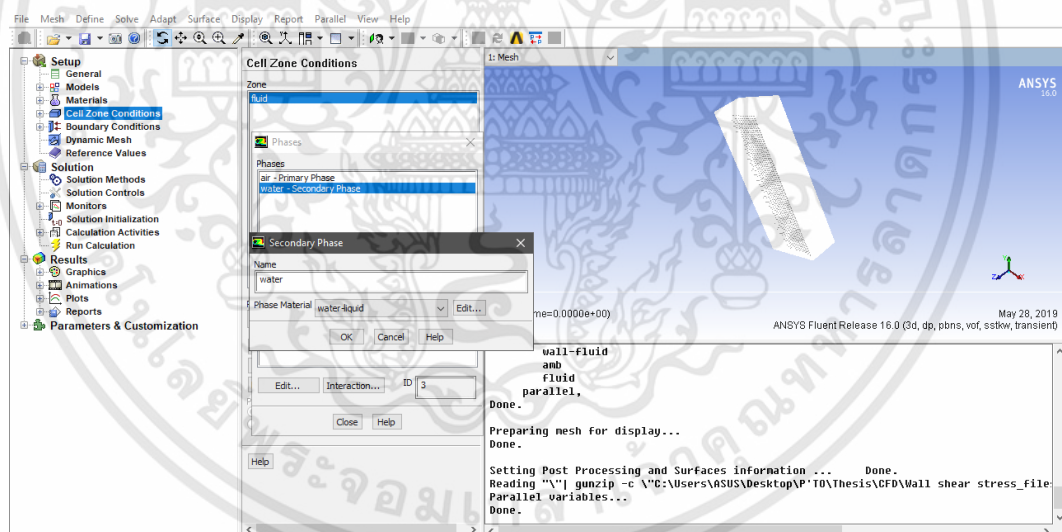
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.17 คลิก Define >>> Phases >>> Primary Phase >>> Edit... >>> ตั้งค่าตั้งรูปภาพ



รูปที่ 15 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (15)

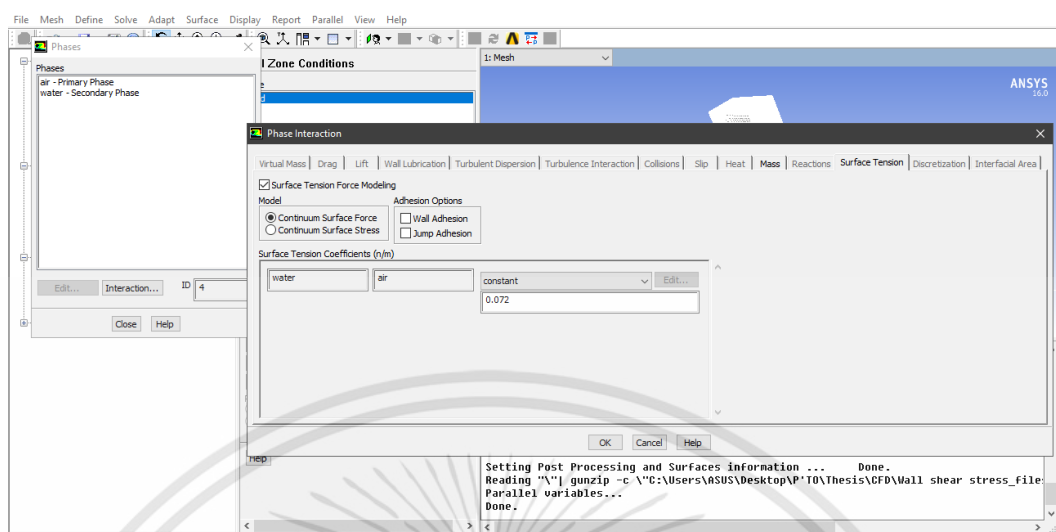
1.18 คลิก Define >>> Phases >>> Secondary Phase >>> Edit... >>> ตั้งค่าตั้งรูปภาพ



รูปที่ 16 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (16)

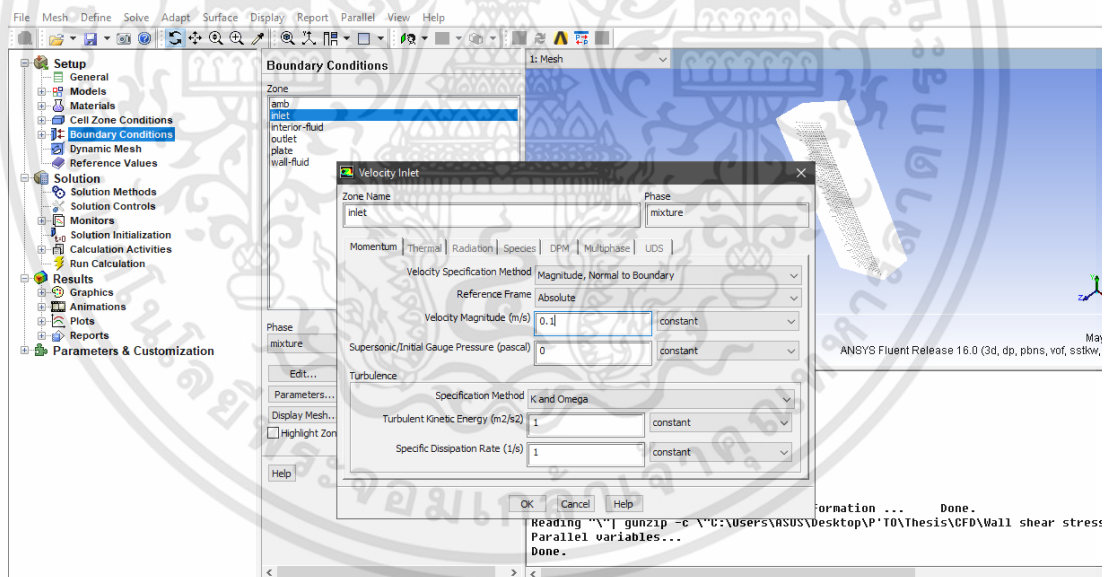
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.19 คลิก Define >>> Phases >>> Interaction >>> Surface Tension >>> ตั้งค่าตั้งรูปภาพ



รูปที่ 17 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (17)

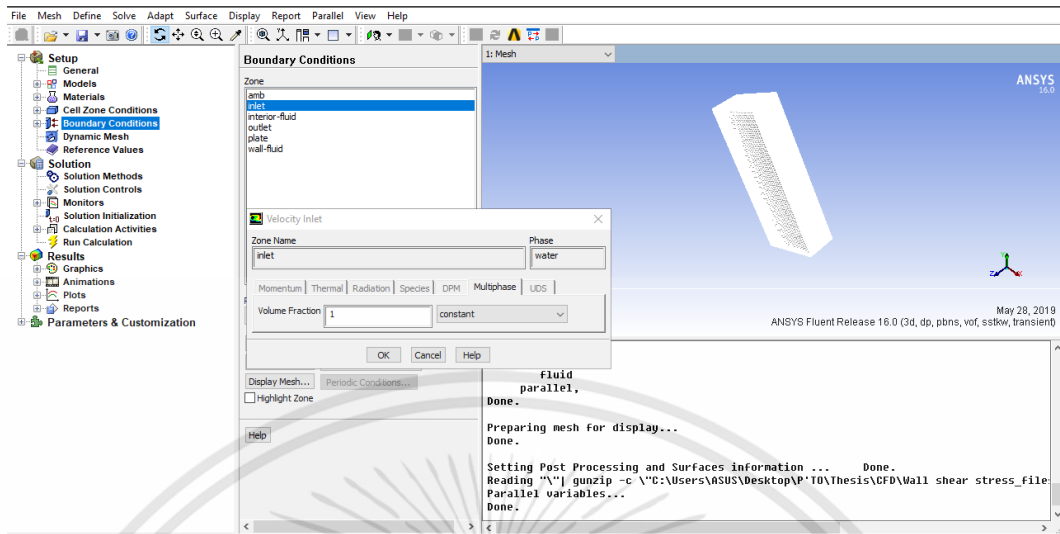
1.20 คลิก Boundary Condition >>> inlet >>> phase >>> mixture >>> ใส่ค่าความเร็ว



รูปที่ 18 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (18)

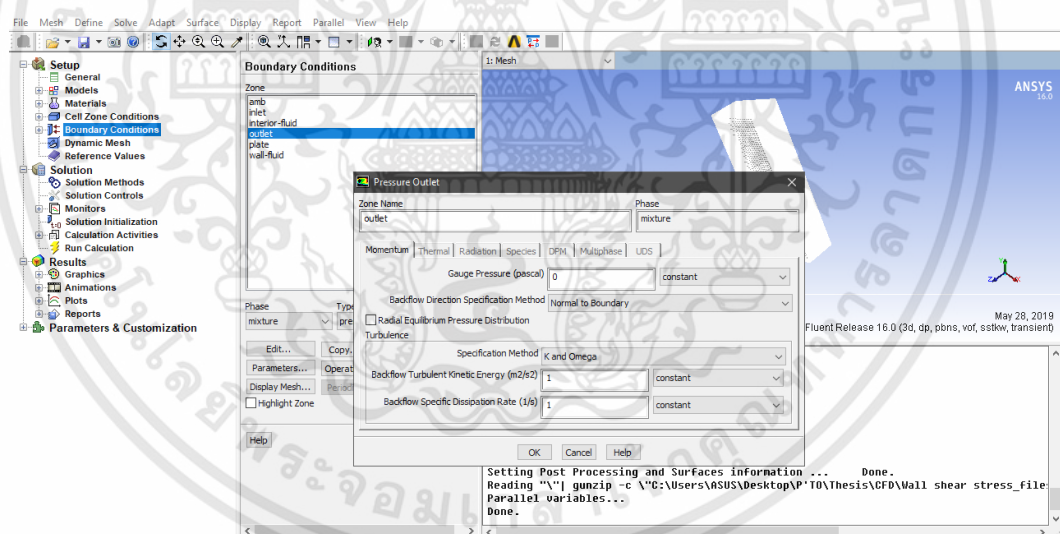
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.21 คลิก Boundary Condition >>> inlet >>> phase >>> water >>> volume Fraction = 1



รูปที่ 19 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (19)

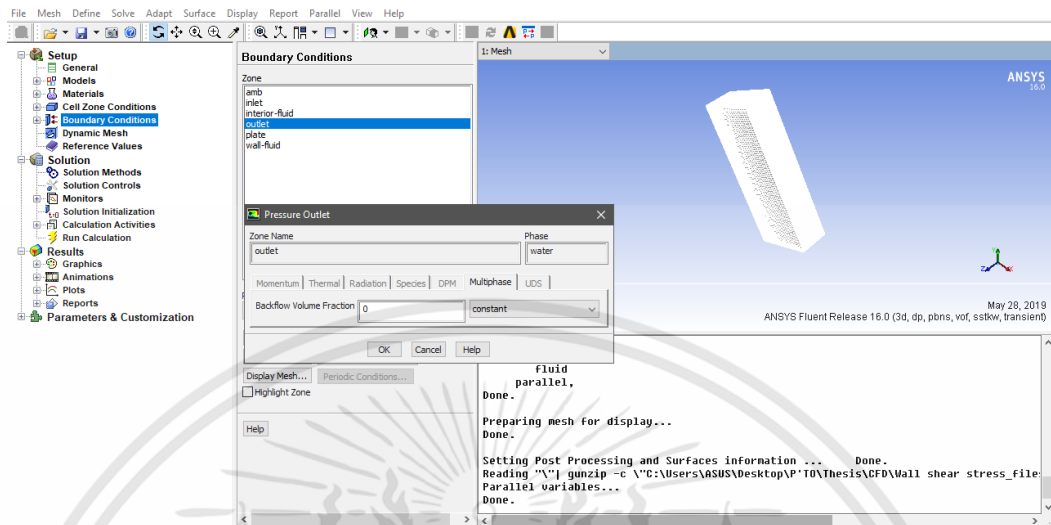
1.22 คลิก Boundary Condition >>> outlet >>> phase >>> mixture >>> ตั้งค่าตั้งรูปภาพ



รูปที่ 20 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (20)

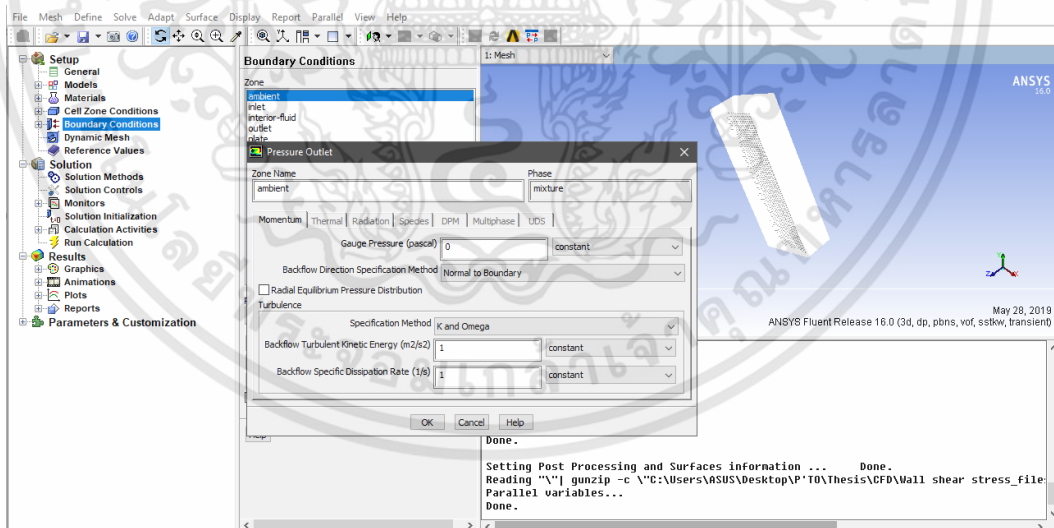
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.23 คลิก Boundary Condition >>> outlet >>> phase >>> water >>> Backflow
volume Fraction = 0



รูปที่ 21 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (21)

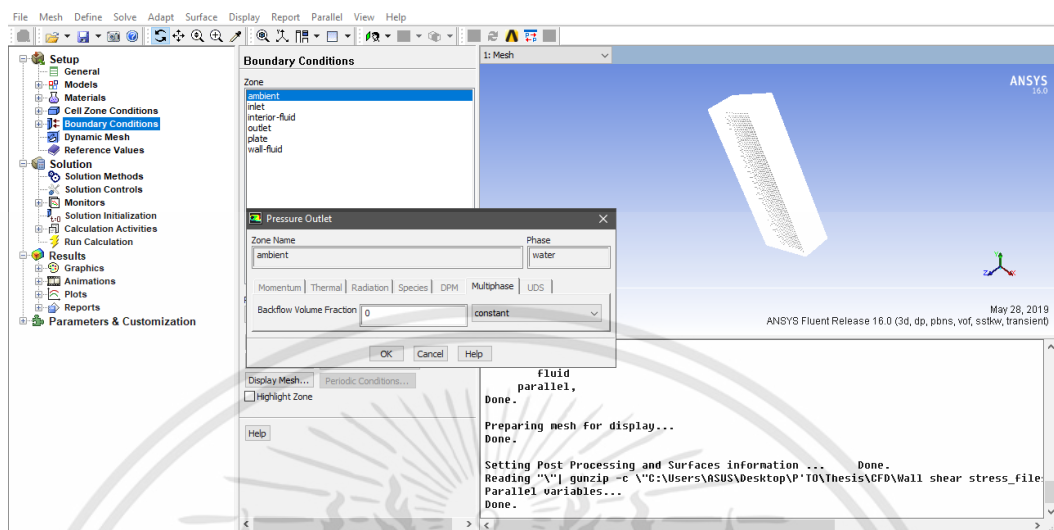
1.24 คลิก Boundary Conditions >>> ambient >>> phase >>> mixture >>> type >>>
pressure-outlet >>> ตั้งค่าดังรูปภาพ



รูปที่ 22 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (22)

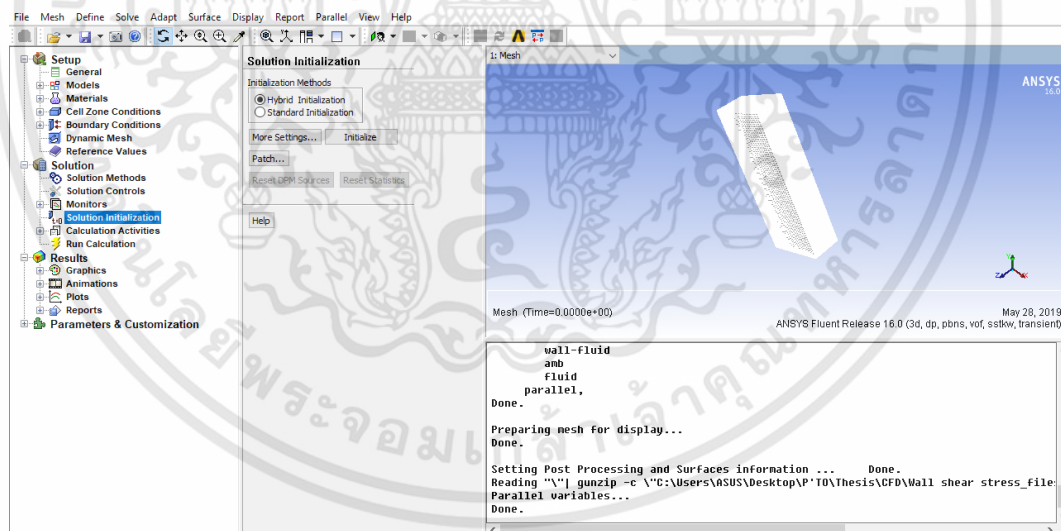
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.25 คลิก Boundary Conditions >>> ambient >>> phase >>> water >>> Backflow
Volume Fraction = 0



รูปที่ 23 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (23)

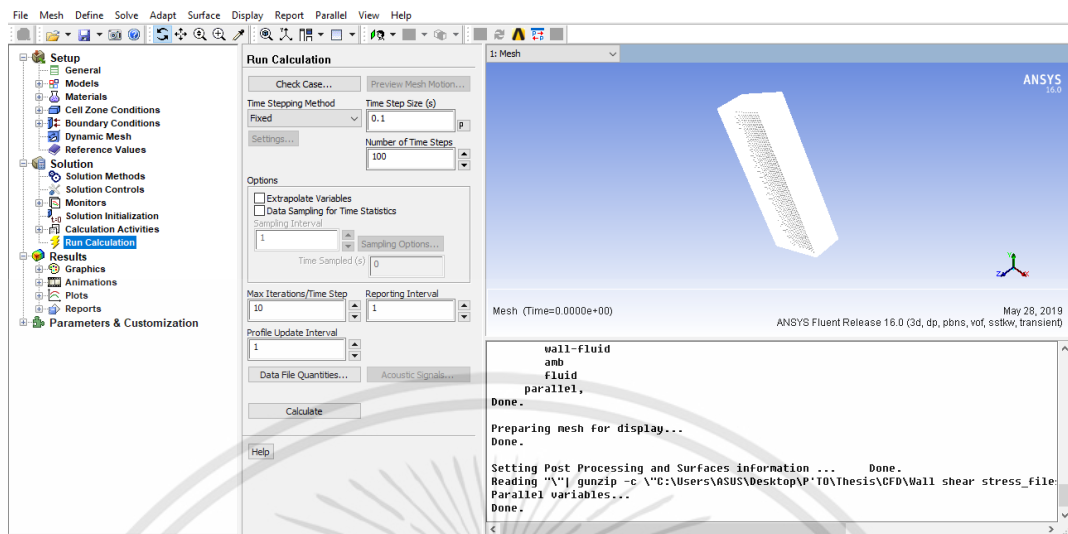
1.26 คลิก Solution Initialization >>> Hybrid Initialization >>> Initialize



รูปที่ 24 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (24)

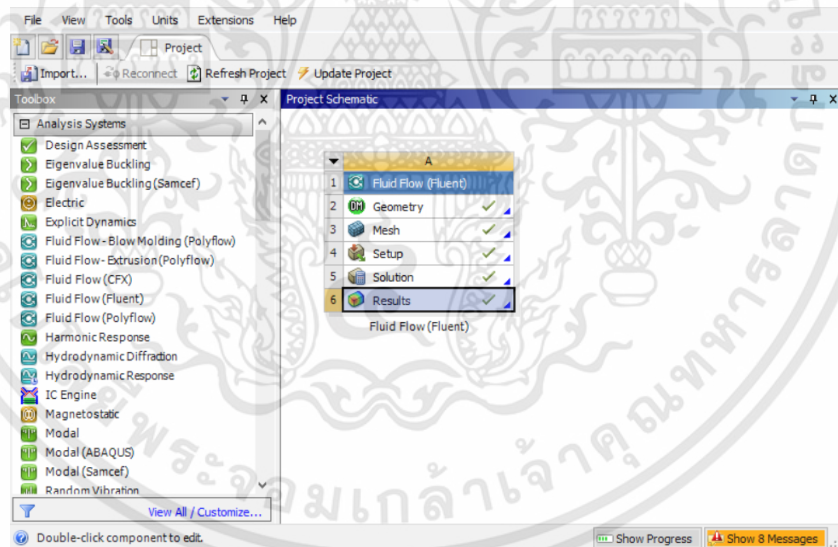
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.27 คลิก Run Calculation >>> ตั้งค่าดังรูปภาพ



รูปที่ 25 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (25)

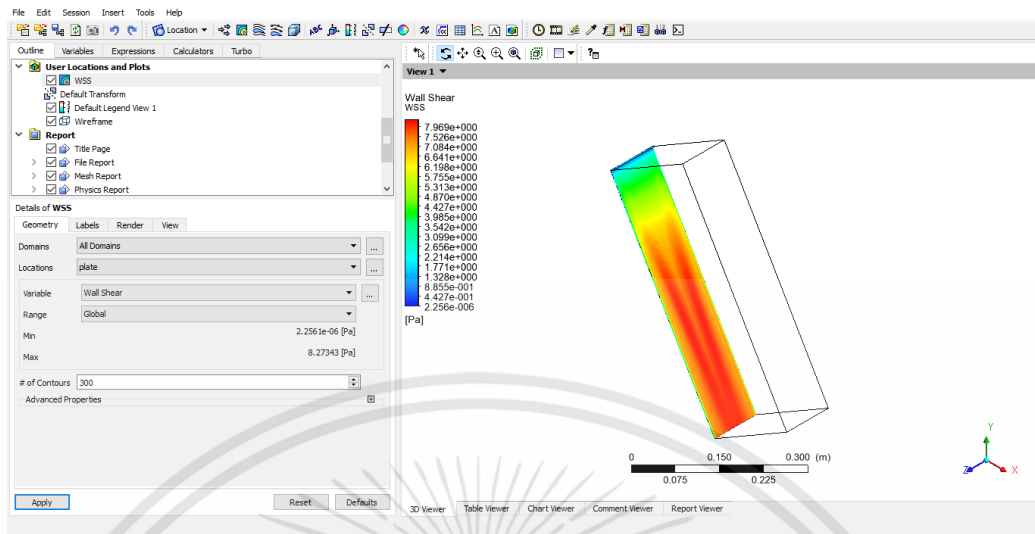
1.28 หลังการคำนวณเสร็จสิ้น ดับเบิลคลิก Results



รูปที่ 26 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (26)

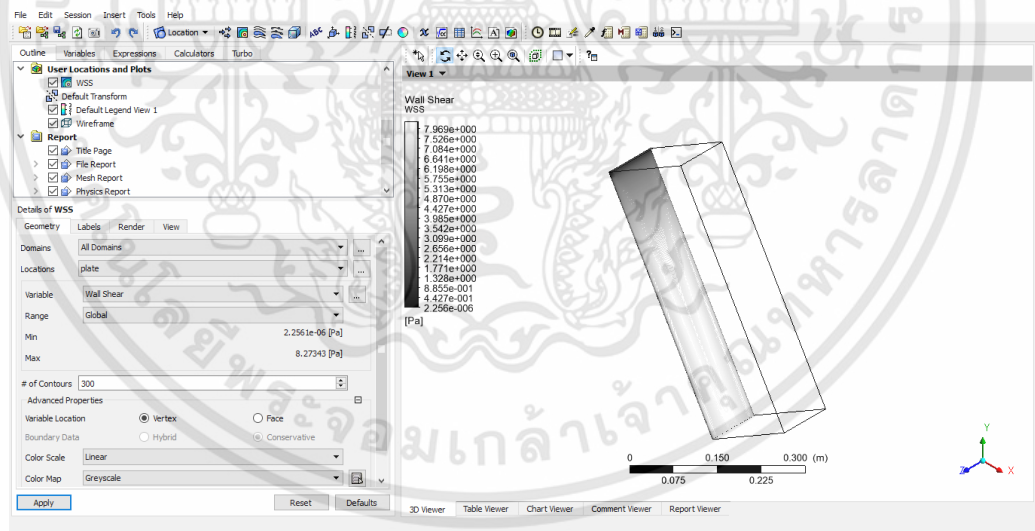
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.29 คลิก Contour >>> Locations >>> plate >>> Variable >>> Wall Shear



รูปที่ 27 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (27)

1.30 ปรับให้เป็นเฉดสีเทา >>> Contour >>> Advanced Properties >>> Color Map >>> Grayscale



รูปที่ 28 การใช้โปรแกรม Ansys Fluent 16.0 (28)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเลือกแบบจำลองที่เหมาะสม

2.1 จำลองความเค้นเฉือนของฟิล์มน้ำด้วยโปรแกรม Ansys Fluent 16.0 ที่มุมเอียง 60 องศา ความเร็วการไหล 1.00 เมตรต่อวินาที ด้วยแบบจำลองดังนี้ แบบจำลอง STD k- ϵ , แบบจำลอง RNG k- ϵ , แบบจำลอง Realizable k- ϵ , แบบจำลอง STD k- ω และแบบจำลอง SST k- ω

2.2 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับค่าอ้างอิงซึ่งคำนวณจากสมการที่ 2.2

ผลการจำลองแสดงดังตารางที่ ก.1 พบว่าแบบจำลอง SST k- ω สามารถจำลองความเค้นเฉือนได้อย่างแม่นยำที่สุด เนื่องผลการจำลองความเค้นเฉือนจากแบบจำลอง SST k- ω มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง (ค่าอ้างอิง 5.082) โดยมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.407

ตาราง ก.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองความเค้นเฉือนด้วยแบบจำลองต่าง ๆ ที่มุมเอียง 60 องศา ความเร็วการไหล 1.00 เมตรต่อวินาที (ค่าอ้างอิง 5.082)

แบบจำลอง	ความเค้นเฉือน (ปาสคาล)	
	การจำลอง	ความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)
STD k- ϵ	5.770	13.534
RNG k- ϵ	5.441	7.062
Realizable k- ϵ	5.420	6.649
STD k- ω	5.222	2.759
SST k- ω	5.061	0.407



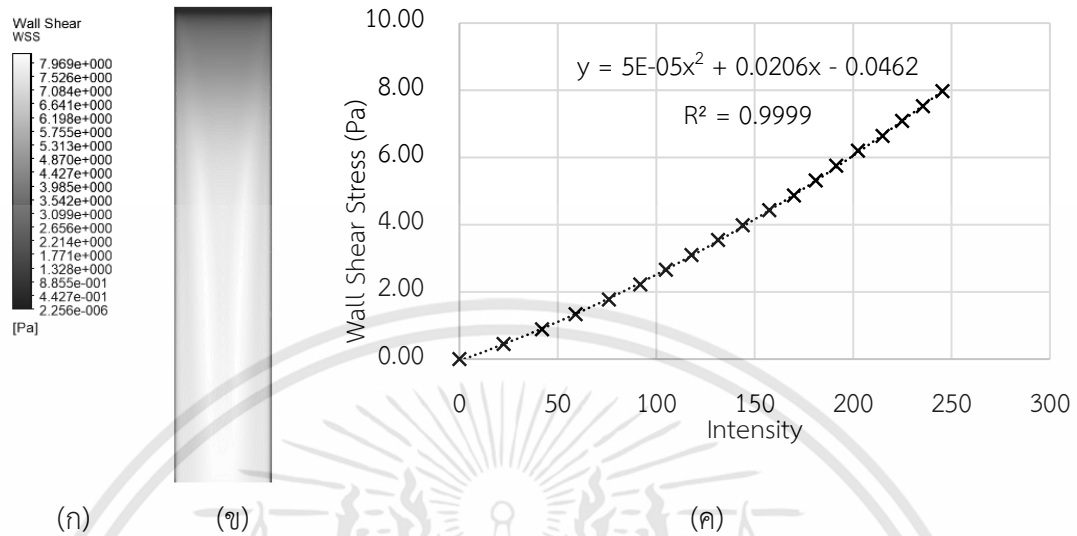
ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ผลจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดย Matlab

ตัวอย่างสำหรับความเร็วการไหล 1.46 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. นำแถบสีของผลการจำลองความเค้นเฉือนไปสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีกับความเค้นเฉือนด้วยโปรแกรม Microsoft Excel



รูปที่ 29 (ก) แถบสีความเร็วจากผลการจำลอง, (ข) ผลการจำลองความเค้นเฉือน และ (ค) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีกับความเค้นเฉือนที่ความเร็วการไหล 1.46 เมตรต่อวินาที

2. นำผลการจำลอง (รูปที่ 29 (ข)) และสมการความสัมพันธ์ไปวิเคราะห์ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นทุกตำแหน่งด้วยโปรแกรม Matlab โดยกำหนดโค้ดสำหรับการวิเคราะห์ดังนี้

```

Line1 >> clc
Line2 >> clear all
Line3 >> close all
Line4 >> im = imread('ชื่อไฟล์รูปภาพ');
Line5 >> imgr = im(:,:,1);
Line6 >> imdb = double(imgr);
Line7 >> [M,N] = size(imdb);
Line8 >> imdbh = zeros (M,N);
Line9 >> for i=1:M
Line10 >>   for j=1:N
Line11 >>     imdbh(i,j) = (0.00005*((imdb(i,j))^2))+(0.0206*(imdb(i,j))-0.0462;
Line12 >>   end
Line13 >> end

```

หมายเหตุ ^a สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีกับความเค้นเฉือน

ตาราง ข.1 ความเค้นเฉือนเฉลี่ยของฟิล์มน้ำที่วิเคราะห์ได้จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab

ระยะ (เซนติเมตร)	ความเค้นเฉือน (ปาสคาล)								
	มุม (องศา)								
	30			60			90		
	ความเร็วการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)								
	100	200	300	100	200	300	100	200	300
0 - 5	1.807	2.048	2.250	2.547	2.862	3.068	3.125	3.416	3.649
5 - 10	2.649	3.040	3.226	3.911	4.634	4.882	4.410	5.285	5.625
10 - 15	2.618	3.470	3.737	3.801	4.882	5.234	4.104	5.347	5.740
15 - 20	2.624	3.476	3.820	3.804	5.071	5.791	4.103	5.502	6.225
20 - 25	2.616	3.420	3.910	3.798	5.117	5.774	4.102	5.524	6.377
25 - 30	2.623	3.429	3.982	3.802	5.134	5.836	4.104	5.527	6.424
30 - 35	2.622	3.434	4.014	3.801	5.129	5.863	4.104	5.529	6.444
35 - 40	2.623	3.437	4.023	3.800	5.127	5.825	4.107	5.528	6.457
40 - 45	2.624	3.499	4.024	3.800	5.129	5.868	4.108	5.527	6.455
45 - 50	2.630	3.443	4.028	3.806	5.128	5.866	4.109	5.532	6.455

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

ความหนาของฟิล์มน้ำและความเค็มเหนือนที่ได้จากชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.1 ความหนาของฟิล์มน้ำที่ได้จากชุดทดลอง

ระยะ (เซนติเมตร)	ความหนาของฟิล์มน้ำ (มิลลิเมตร)								
	มุม (องศา)								
	30			60			90		
	ความเร็วการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)								
	100	200	300	100	200	300	100	200	300
0 - 5	0.566	0.735	0.774	0.471	0.607	0.681	0.457	0.563	0.645
5 - 10	0.556	0.784	0.782	0.457	0.603	0.659	0.425	0.562	0.641
10 - 15	0.539	0.754	0.842	0.486	0.606	0.673	0.434	0.574	0.663
15 - 20	0.552	0.707	0.797	0.459	0.613	0.691	0.443	0.562	0.647
20 - 25	0.562	0.741	0.789	0.446	0.606	0.681	0.447	0.570	0.635
25 - 30	0.542	0.702	0.776	0.447	0.613	0.681	0.436	0.584	0.659
30 - 35	0.531	0.681	0.783	0.447	0.610	0.705	0.430	0.566	0.663
35 - 40	0.527	0.689	0.871	0.444	0.606	0.714	0.438	0.594	0.647
40 - 45	0.566	0.652	0.850	0.465	0.610	0.700	0.432	0.590	0.657
45 - 50	0.564	0.667	0.883	0.461	0.618	0.710	0.443	0.595	0.657

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ความเค้นเฉือนของฟิล์มน้ำที่ได้จากชุดทดลอง

ระยะ (เซนติเมตร)	ความเค้นเฉือน (ปาสคาล)								
	มุม (องศา)								
	30			60			90		
	ความเร็วการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)								
	100	200	300	100	200	300	100	200	300
0 - 5	2.770	3.594	3.785	3.989	5.139	5.768	4.470	5.506	6.308
5 - 10	2.721	3.834	3.824	3.871	5.107	5.582	4.157	5.497	6.269
10 - 15	2.637	3.687	4.118	4.116	5.133	5.700	4.245	5.614	6.485
15 - 20	2.699	3.457	3.898	3.888	5.192	5.853	4.333	5.497	6.328
20 - 25	2.750	3.624	3.858	3.778	5.133	5.768	4.372	5.575	6.211
25 - 30	2.649	3.433	3.795	3.786	5.192	5.768	4.264	5.712	6.445
30 - 35	2.595	3.330	3.829	3.786	5.166	5.971	4.206	5.536	6.485
35 - 40	2.577	3.369	4.259	3.761	5.133	6.048	4.277	5.810	6.328
40 - 45	2.768	3.188	4.157	3.939	5.167	5.929	4.225	5.771	6.426
45 - 50	2.760	3.262	4.318	3.905	5.234	6.014	4.333	5.819	6.426

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.1 เวลาในการทำความสะอาดคราบแป้งสูง

ความ เข้มข้น (ร้อยละ โดยมวล)	ระยะเวลาในการทำความสะอาด (นาที)											
	เวลาทั้งหมด			ช่วงที่ 1			ช่วงที่ 2			ช่วงที่ 3		
	ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)											
	1.46	2.32	3.03	1.46	2.32	3.03	1.46	2.32	3.03	1.46	2.32	3.03
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส												
0.5	22.00±1.00	14.0±1.00	6.00±0.50	5.33±0.58	3.17±0.58	2.67±0.76	6.17±1.04	3.17±0.29	2.67±0.29	11.67±0.58	8.83±0.58	1.33±0.29
1.0	10.83±0.76	5.17±0.29	4.50±0.50	4.83±0.76	2.33±0.76	2.17±0.29	4.17±0.29	2.50±0.29	2.33±0.29	1.67±0.29	1.33±0.29	1.17±0.29
2.0	10.17±0.76	5.17±0.76	4.67±0.76	3.67±0.76	2.17±0.29	2.00±0.00	3.17±0.29	2.17±0.29	1.17±0.29	2.83±0.58	1.67±0.58	1.33±0.29
อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส												
0.5	9.50±0.50	7.00±0.50	5.50±0.50	3.83±0.29	2.33±0.76	1.83±0.76	5.17±0.29	2.67±0.29	2.17±0.29	1.83±0.29	1.67±0.50	1.33±0.50
1.0	8.50±0.87	6.00±0.50	4.50±0.50	3.67±0.76	2.00±0.00	1.67±0.58	4.17±0.29	2.67±0.29	1.17±0.29	1.67±0.29	1.67±0.29	1.33±0.58
2.0	8.33±0.76	4.17±1.04	4.00±0.50	2.67±0.76	1.83±0.76	1.50±0.00	2.17±0.29	1.67±0.29	1.17±0.29	3.17±0.29	1.00±0.50	0.83±0.29
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส												
0.5	8.17±0.76	6.17±1.26	4.83±0.76	3.67±0.29	2.17±0.29	1.50±0.29	3.17±0.29	2.67±0.29	1.67±0.29	1.83±0.29	1.17±0.58	0.83±0.29
1.0	7.67±0.29	4.67±0.76	3.67±0.76	3.33±0.58	1.83±0.29	1.17±0.29	3.17±0.29	2.17±0.29	1.17±0.29	1.17±0.29	1.17±0.58	0.83±0.29
2.0	7.33±1.26	2.50±0.50	2.17±0.29	2.33±0.29	1.17±0.29	1.00±0.00	1.67±0.29	1.17±0.29	0.67±0.29	2.67±0.58	0.67±0.29	0.50±0.29

ตาราง ง.2 เวลาในการทำความสะอาดคราบนมชั้นหวาน

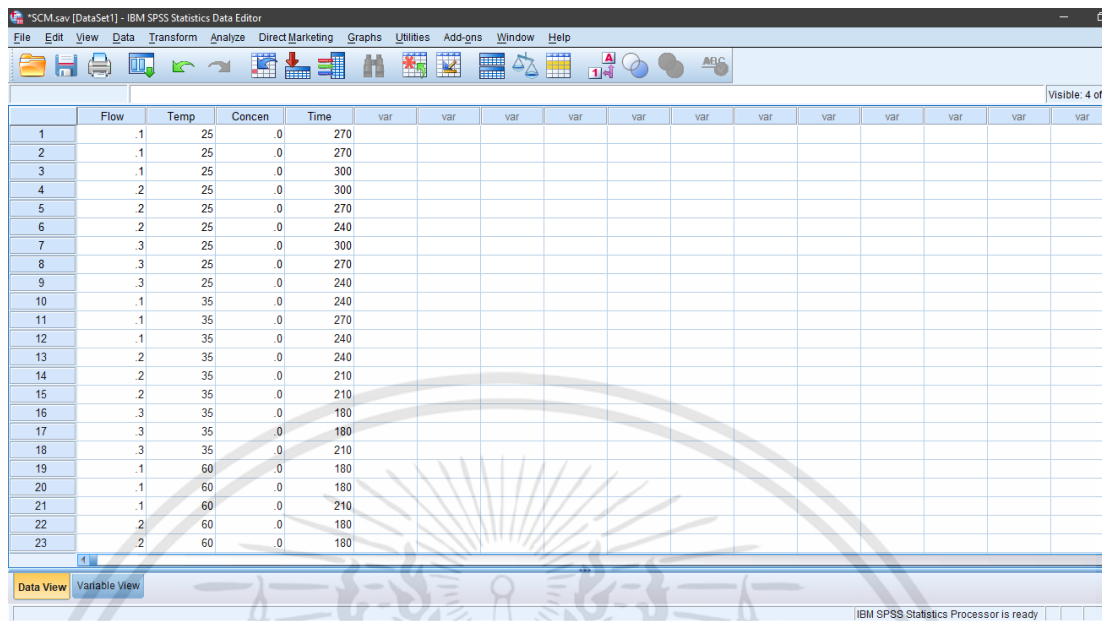
ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)	เวลาในการทำความสะอาด (วินาที)		
	ความเข้มข้นของสารทำความสะอาด		
	0	0.5	1.0
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส			
1.46	280±17	130±17	130±17
2.32	270±30	120±0	120±0
3.03	270±30	100±17	100±17
อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส			
1.46	250±17	130±17	130±17
2.32	220±17	120±0	100±17
3.03	190±17	100±17	90±0
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส			
1.46	190±17	130±17	70±17
2.32	180±0	120±0	70±17
3.03	180±0	100±17	60±0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

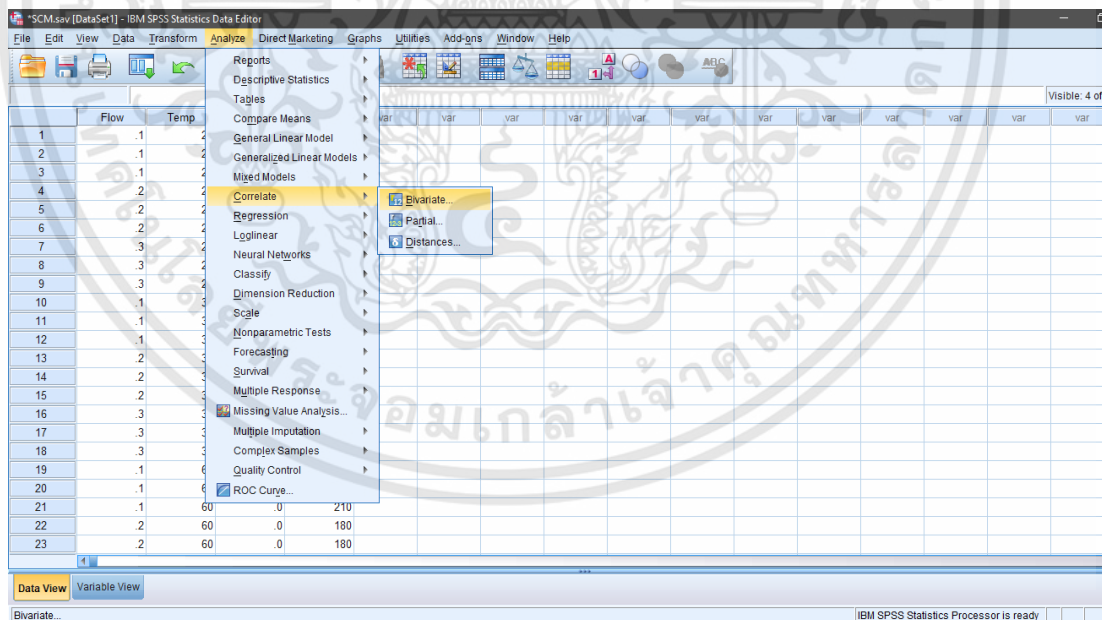
1. ป้อนความเร็วการไหล อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารทำความสะอาด และเวลาในการทำความสะอาด



	Flow	Temp	Concen	Time	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var
1	.1	25	.0	270												
2	.1	25	.0	270												
3	.1	25	.0	300												
4	.2	25	.0	300												
5	.2	25	.0	270												
6	.2	25	.0	240												
7	.3	25	.0	300												
8	.3	25	.0	270												
9	.3	25	.0	240												
10	.1	35	.0	240												
11	.1	35	.0	270												
12	.1	35	.0	240												
13	.2	35	.0	240												
14	.2	35	.0	210												
15	.2	35	.0	210												
16	.3	35	.0	180												
17	.3	35	.0	180												
18	.3	35	.0	210												
19	.1	60	.0	180												
20	.1	60	.0	180												
21	.1	60	.0	210												
22	.2	60	.0	180												
23	.2	60	.0	180												

รูปที่ 30 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (1)

2. เลือก Analyze >>> Correlate >>> Bivariate

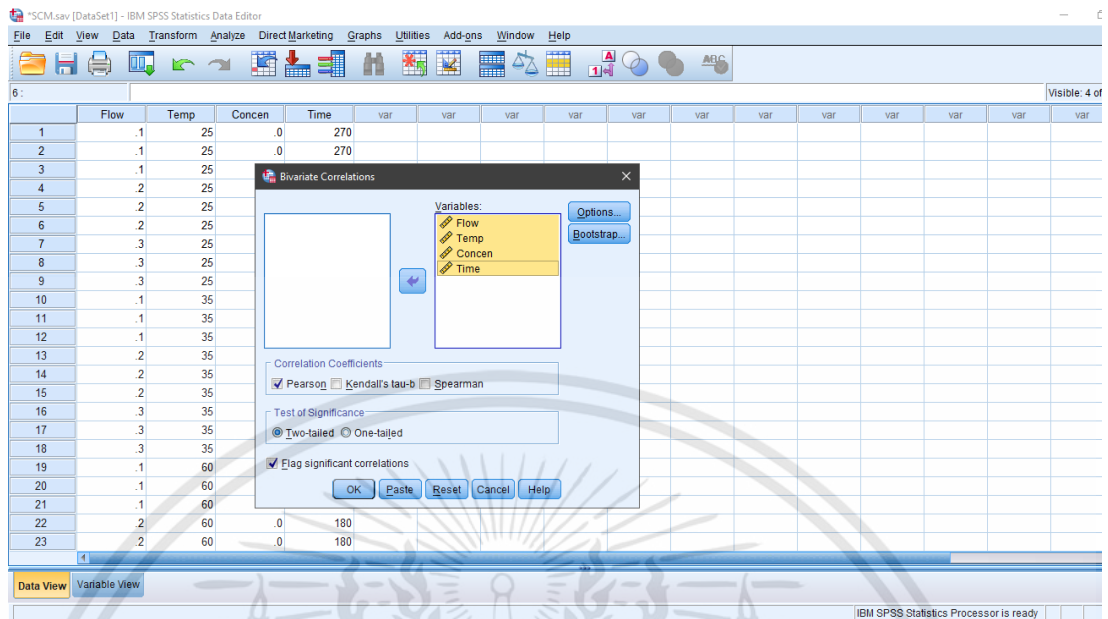


The screenshot shows the IBM SPSS Statistics Data Editor interface. The 'Analyze' menu is open, and the 'Correlate' option is selected. The 'Bivariate...' option is highlighted in the submenu. The data table from the previous screenshot is visible in the background.

รูปที่ 31 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (2)

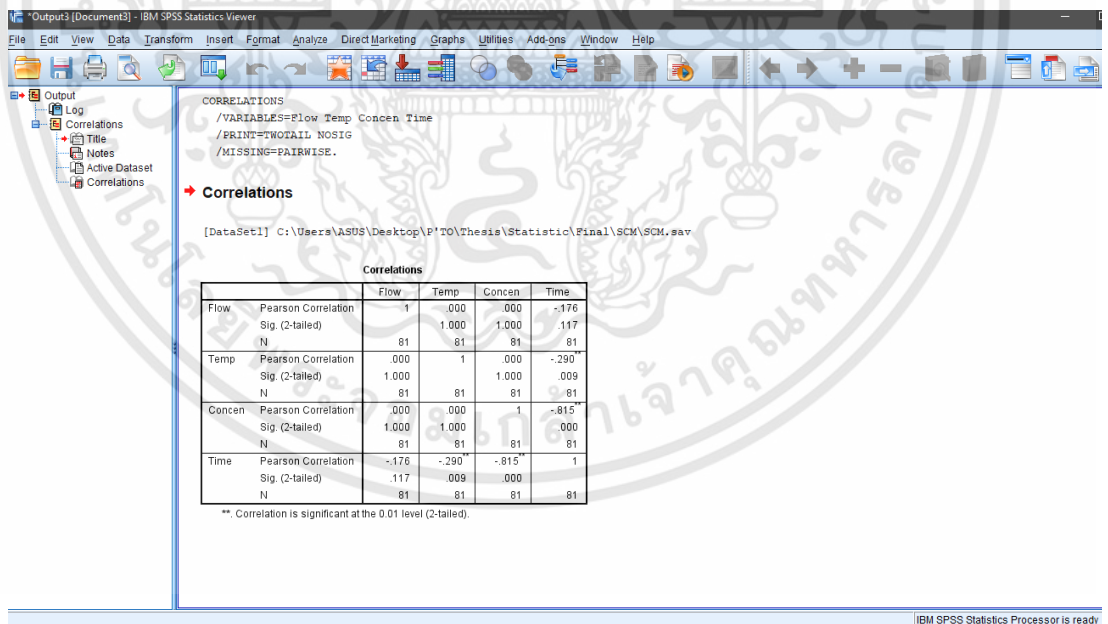
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือกตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์ความสัมพันธ์



รูปที่ 32 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (3)

4. ดูค่าความสัมพันธ์ของตัวแปร



รูปที่ 33 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



iceast 2018

The 4th International Conference on Engineering,
Applied Sciences and Technology



"Exploring Innovative Solutions
for Smart Society"

Swissôtel Resort Phuket Patong Beach
Phuket, Thailand

July 4-7, 2018

iceast2018@kmitl.ac.th

www.iceast.org



ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A CFD study on wall shear stress of falling water film on food contact surface

Nawaporn Suthanarak¹, and Navaphattra Nunak^{1,*}

¹Food Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Abstract. This paper proposes a CFD model to simulate the wall shear stress of the falling water film on the hydrophilic surface (aluminum) of the inclined flat plate in the range of 30°, 60° and 90° at a flow rate of 100, 200 and 300 L/h. Wall shear stress simulated from the CFD using SST k- ω with the VOF model was compared with the real data obtained from the experiment. It was found that both inclined angle and water flow rate had an effect to the wall shear stress and the CFD with the proposed model had the potential to predict it with the maximum averaged error of 2.9%.

1 Introduction

In food industry, the removal of soil and microorganism from food processing equipment and machines in wet-cleaning with water is the most important process indicating the level of food safety. If inadequate or improper cleaning occurs, soil residues may remain on the equipment surface causing to product contamination and deterioration and foodborne disease in the consumers.

Generally, cleaning of a large tank with the principle of falling film using a spray ball is preferable. A series of jets of water spraying injected through spray balls spread out on the interior surface of a tank and flowed down by gravity force creating the wall shear stress for removing soil from the surface. From a theory of fluid mechanics, the wall shear stress is an important factor to indicate the cleaning performance. It depends on many parameters such as liquid properties, flow characteristics and inclination of the surface [1-4]. Fuchs et al. [3] and Lerch et al. [5] have studied the cleaning process with falling water film and found that the turbulent flow of water can enhance the cleaning performance. This finding also is in the agreement with Tamime [2]. Therefore, an understanding on flow characteristics of cleaning fluid effecting to cleaning performance in term of wall shear stress is importance.

To obtain the wall shear stress, it can be achieved by directly calculating from the measured thickness of liquid film. However, it spends a lot of time and costs a lot. Therefore, Computational Fluid Dynamics (CFD) is introduced to simulate the wall shear stress [6-9]. Moreover, it is also widely used to simulate the flow velocity of fluid and other applications about a decade [10-11]. In this study, the CFD model was proposed to estimate the wall shear stress of falling water film created on the inclined surface at various flow rates.

2. Theory of falling liquid film

Falling liquid film is a film flow downward under gravity, the characteristics of film flow can be indicated by film Reynolds number (Re_f) as illustrated in equation (1) [3, 12]:

$$Re_f = \Gamma/\eta = \Gamma_V/v = \dot{V}/B v \quad (1)$$

where Γ is the mass flow rate per wetted width (kg/h·m), η is the dynamic viscosity of the liquid (kg/m·s), Γ_V is the volumetric wetting rate (m³/h·m), v is the kinematic viscosity of the liquid (m²/s), \dot{V} is the volume flow rate (m³/h) and B is the wetted width (m).

According to equation (1), the film flow characteristic can be classified into three types as follow: $Re_f < 4$ is laminar flow or smooth laminar film, $4 < Re_f < 400$ is transient flow which is a laminar film with a small wave on the interface and $Re_f > 400$ is a turbulent flow or wavy film having a large wave on the interface (fig. 1) [12].

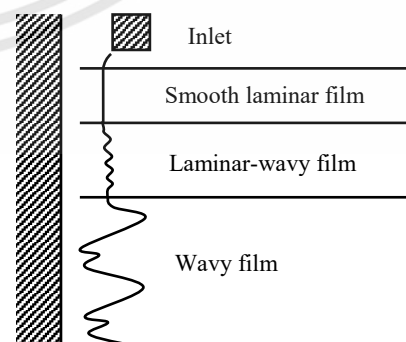


Fig. 1. Falling film characteristic [12]

The thickness of liquid film can be evaluated from the theory of Nusselt film which assumes that the film flow characteristic is laminar under the action of gravity,

*Corresponding author: Navaphattra@gmail.com

the shear stress at interface is neglected, and fluid properties are constant [3, 4, 13]. The film thickness (δ) can be calculated by equation (2)

$$\delta = (3\nu^2 Re_f / g \sin \theta)^{1/3} \quad (2)$$

where g is the gravitational acceleration (m/s^2) and θ is the angle of inclination of the surface with respect to a horizontal.

During the film flows down, there is a force acting upwards created between the surface and the liquid film that is called the wall shear stress, influenced by the liquid film thickness. It is an important parameter indicating the performance of soil removal from the surface. It can be calculated by equation (3) with the several assumptions, i.e. the fluid flow is uniform and incompressible, the net pressure force is zero, and the momentum flux through the control volume is zero [14].

$$\tau_w = \rho g \delta \sin \theta \quad (3)$$

where τ_w is the wall shear stress (Pa), ρ is density (kg/m^3).

3 Materials and methods

3.1 The experimental setup

The experimental unit (see fig. 2) consisted of a centrifugal pump, a tube, a ball valve, a water container, and a testing surface. For the testing surface, an 10x50 cm aluminum plate used as representative of food contact surface, can be adjusted for any angle. Water was circulated by the centrifugal pump (Sonic AP1600 20-23 watt), installed in a water container with a tube and a ball valve connecting, from a water container to overflow on a testing surface.

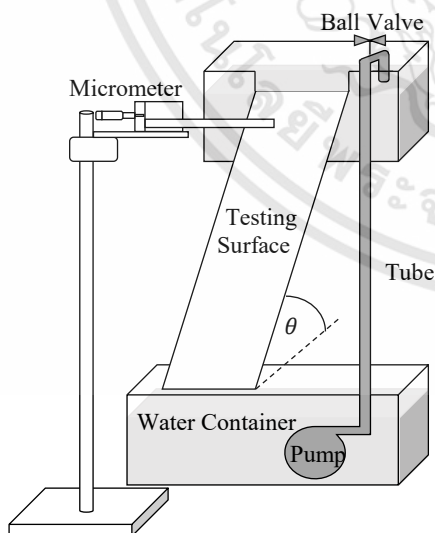


Fig. 2. Experimental Unit

3.2 Experimental method

The experiments were carried out under gravity driven falling water film on a vertical and inclined testing

surface at various angles (30° , 60° and 90°). Water was circulated at least 5 minutes before the data were recorded. The flow rate of water was measured using weighing method (SF-400A resolution 0.1g) and the temperature of water was measured by thermocouple type K (Fluke 54IIB Thermometer S2). Experiments were performed at the flow rate of 100, 200 and 300 L/h with Reynolds number of 311, 622 and 932, respectively. The micrometer with resolution of 0.01 mm was installed on the tripod to measure the thickness of water film at every 5 cm long from the origin point (0 cm) (fig. 3), then compared with the theoretical results calculated from the equation (2) to consider the real data of water film thickness for calculating wall shear stress created on the surface by equation (3) [3, 4, 13]. They were referred as the real data for validating the results simulated from CFD.

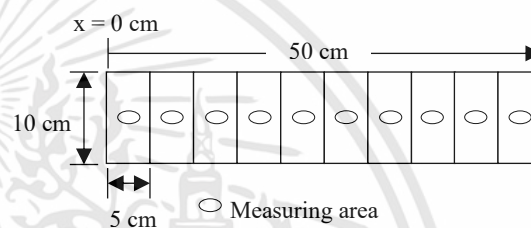


Fig. 3. Film thickness measuring position

3.3 CFD Modeling

In this study, the falling film flow was investigated by the three-dimensional CFD simulation (ANSYS FLUENT 16.0) with Navier-Stokes equation, which assumes that fluid is incompressible flow and constant viscosity. The shear stress transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$), a turbulent model, was used to simulate film flow with the sensitivity inside and outside shear layer [15]. From the preliminary experiments, it was found that the SST $k-\omega$ model gave the minimum error comparing with the wall shear stress simulated from other turbulent models, i.e. STD $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$ and Realizable $k-\epsilon$ models (results not shown).

In addition, the multiphase model, Volume of Fluid (VOF) was also applied with SST $k-\omega$ model and hexagonal mesh for capturing the interface between two phases since the film flow in this study was two-phase flow (gas and liquid) [8, 15].

The wall shear stress of falling water film was simulated with the CFD model by separating the water film into many small elements, then it was considered under the conditions as shown in Table 1.

To validate the CFD model, the simulated wall shear stress was compared with the real data or theoretical data obtained from section 3.2 in term of a relative error as presented in equation (4)

$$\%error = |(x_{sim} - x_t) / x_t| \times 100 \quad (4)$$

where $\%error$ is a relative error, x_{sim} is a simulation data and x_t is a real data.

Table 1. Simulation conditions fixed in the CFD

Parameter	Detail
Operating Conditions	
Gravity (m/s ²)	9.81
Pressure (kPa)	101.325
Surface Tension (N/m)	0.072
Model	
Viscous Model	SST k- ω
Multiphase Model	VOF
Phase	
Primary Phase	Air (25°C)
- Density (kg/m ³)	1.184 ^a
- Viscosity (kg/m-s)	1.849x10 ⁻⁵ ^a
Secondary Phase	Water (25°C)
- Density (kg/m ³)	997 ^b
- Viscosity (kg/m-s)	0.000891 ^b
Boundary Conditions	
Inlet water flow rate (L/h)	100, 200 and 300

^a Physical properties of air [16]

^b Physical properties of water [16]

4 Results and discussion

4.1 Wall shear stress validation

Fig. 4 shows the thickness of water film calculated from the Nusselt's film theory and measured by a micrometer. The thickness measured from the experimental unit are in a good agreement with the findings of Fuchs et al. [3]. The thickness values obtained from both methods were very close for flow characteristic in the laminar or transient (100 L/h), whereas the values obtained from the measurement were higher than that from the theory at higher flow rate (200 and 300 L/h) or in the turbulent flow. Since the Nusselt's film theory is scoped only for the laminar film flow, the calculated results are lower than the actual film thickness. Besides, cleaning the internal surface of a large tank should be processed with the turbulent falling film flow. Therefore, in this study, the wall shear stress considered to be the real data was calculated from the measured film thickness and used to validate the CFD model.

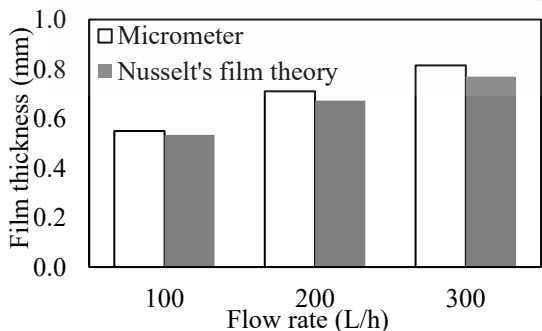


Fig. 4. Water film thickness on the inclined surface at 30° calculated from Nusselt's film theory and measured by micrometer

Fig. 5 shows an example of comparing the wall shear stress obtained from the CFD simulation and the experiment at every 5 cm long from the origin point (0 cm). It was found that the CFD simulation had much relative error at the first one fifth of the whole distance due to the influence of the water inlet of the experimental unit. For this reason, the proposed CFD model could be used to simulate the film flow at the distance of 10-50 cm from the origin point. The contour of wall shear stress created on the inclined surface as shown in fig. 6. Therefore, the wall shear stress hereafter was the CFD averaged from the distance of 10 to 50 cm as presented in Table 2.

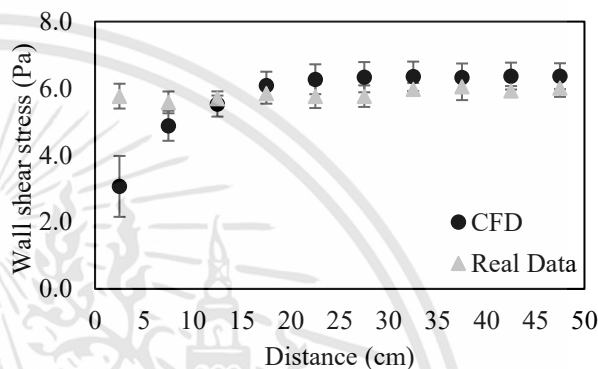


Fig. 5. Wall shear stress simulated from CFD and the real data obtained from the experiment on the inclined surface at 60° with a flow rate of 300 L/h

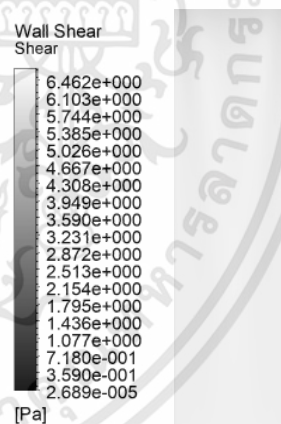


Fig. 6. Wall shear stress contour of water film flow on the inclined surface at 90° with a flow rate of 200 L/h

Considering Table 2, It was found that the thickness of water film simulated from CFD had a good agreement with Fuchs et al. [3] and represented the low relative error. The maximum relative error under all experimental conditions was less than 3%. This probably due to different assumptions of the CFD model and the equation (3). Since aluminum plate is a hydrophilic surface having the surface tension close to other types of food contact materials such as stainless steel, this model could also be applied to simulate the wall shear stress created on the food contact surface. The higher surface tension is, the higher wall shear stress is [6]. However, for more accuracy the further work on the correction factor for any types of materials would be needed.

Table 2. Comparison of experimental calculation and CFD simulation with relative error

Flow rate (L/h)	Wall shear stress (Pa) with different inclined angles and relative error (%)								
	30°			60°			90°		
	Experiment	CFD	Error	Experiment	CFD	Error	Experiment	CFD	Error
100	2.689	2.624	2.437	3.879	3.767	2.895	4.323	4.198	2.900
200	3.472	3.464	0.247	5.082	5.061	0.407	5.634	5.592	0.747
300	3.986	3.941	1.112	5.844	5.761	1.432	6.367	6.385	0.283

4.2 Effect of inclined angle and flow rate

From Table 2, wall shear stress of water film on the surface increased with the increasing of surface inclination and water flow rate as water film was influenced by gravity at a more inclined angle. When considering the water flow rate, the wall shear stress occurred from water film flow at 100 liters per hour, non-turbulent flow, was lower than that of at 200 and 300 liters per hour, turbulent flow. The higher water flow rate caused the film flow more turbulent, and more wall shear stress. However, the film wall shear stress is influenced by the water flow rate more than an inclined angle.

5 Conclusions

Wall shear stress is an important factor for cleaning by falling liquid film. It was influenced by water flow rate and inclined angle. The increasing of inclination angle and water flow rate caused the greater wall shear stress. When comparing wall shear stress simulated from the CFD using SST k- ω with VOF model and obtained from the experiments, it was found that the CFD was a potential tool to predict the wall shear stress at different conditions with the maximum error of 2.9%. Nevertheless, further research would be needed in case of changing the material type. Finally, this study would be more benefits if this concept was applied to the cleaning behavior of any types of soils using falling water film in the future work.

The authors would like to thanks Mr. Kittisak Srichaitamrong and Ms.Natnaree Phomma for performing film thickness measurement.

Reference

1. K. R. Goode, K. Asteriadou, P. T. Robbins, P. J. Fryer, "Fouling and cleaning studies in the food and beverage industry classified by cleaning type," *IFT*, **12**, 121-143, (2013)
2. Y. Tamime, *Cleaning-in-place: Dairy, Food and beverage operations Third Edition*, Blackwell Publishing, Oxford, (2008)
3. E. Fuchs, A. Boye, R. Murcek, J.-P. Majschak, "An experimental comparison of film flow parameters and cleaning behavior of falling liquid

film for different tilt angles," *Food Bioprod. Process.*, **93**, 318-326, (2014)

4. A. To, S. R. Annapragada, "Experimental parameters for small-scale cleaning characterization. Part II: effect of fluid velocity on the kinetics of cleaning," *Insitute of validation technology*, (2015)
5. K. Lerch, J. Hinrichs, P. Dittmer, J. Rauschnabel, "Cleanability of surfaces from active pharmaceutical ingredient surrogate riboflavin by falling film," *Chemie Ingenieur Technik*, **85**, 323-332, (2013)
6. H. Lan, J. L. Wegener, B. F. Armaly, J. A. Drallmeier, "Developing laminar gravity-driven thin liquid film flow down an inclined plane," *J. Fluids Eng.*, **132**, (2010)
7. B. B. B. Jensen, A. Friis, Th. Benezech, P. Legentilhomme, C. Lelievre, "Local wall shear stress variations predicted by computational fluid dynamics for hygienic design," *Food Bioprod. Process.*, **83(C1)**, 53-60, (2005)
8. Y. Xu, J. Yuan, J. U. Repke, G. Wozny, "CFD study on liquid flow behavior on inclined flat plate focusing on effect of flow rate," *Eng. Appl. Comp. Fluid*, **6**, 186-194, (2012)
9. Y. Yu, "A computational fluid study of falling film behavior on flat plate," *FEDSM2014*, (2014)
10. T. Norton, D.-W. Sun, "Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review," *Trends Food Sci. Technol.*, **17**, 600-620, (2006)
11. S. Salo, A. Friis, G. Wirtanen, "Cleaning validation of fermentation tanks," *Food Bioprod. Process.*, **86**, 204-210, (2008)
12. F. Weise, S. Scholl, "Evaporation of pure liquids with increased viscosity in falling film evaporator," *Heat Mass Transfer*, **45**, 1037-1046, (2009)
13. S. Portalski, "Studies of falling liquid film flow: Film thickness on a smooth vertical plate," *Chem Eng. Sci.*, **18**, 787-804, (1963)
14. W. R. Fox, T. A. McDonald, *Introduction to fluid mechanics*, John Wiley & Sons, New York, (1994)
15. ANSYS FLUENT, *ANSYS FLUENT Theory guide*, ANSYS Inc., (2011)
16. Y. A. Cengel, J. M. Cimbala, *Fluid mechanics: fundamentals and applications*, McGraw-Hill, New York, (2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวนวพร สุธนรักษ์
 ที่อยู่ 118/39 ซอยรามคำแหง118 ถนนกาญจนาภิเษก แขวงสะพานสูง เขตสะพานสูง
 จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10250

ประวัติการศึกษา

2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและความเชี่ยวชาญ

- งานวิจัยเรื่อง แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายความหนาของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวสัมผัสอาหาร
- งานวิจัยเรื่อง แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการศึกษาความเค้นเฉือนของฟิล์มน้ำบนพื้นผิวสัมผัสอาหาร