

การตรวจจับฟองอากาศจากรอยรั่วที่ทดสอบโดยการแช่น้ำของออยล์คูลเลอร์  
โดยวิธี Deep Learning

LEAKED DETECTION WITH IMMERSION TECHNIQUE OF OIL COOLER  
USING A DEEP LEARNING METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจจับฟองอากาศจากรอยรั่วที่ทดสอบโดยการแช่น้ำของออยล์คูลเลอร์  
โดยวิธี Deep Learning

LEAKED DETECTION WITH IMMERSION TECHNIQUE OF OIL COOLER  
USING A DEEP LEARNING METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LEAKED DETECTION WITH IMMERSION TECHNIQUE OF OIL COOLER  
USING A DEEP LEARNING METHOD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2564  
สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การตรวจจับฟองอากาศจากรอยรั่วที่ทดสอบโดยการแช่น้ำของออยล์คูลเลอร์  
โดยวิธี Deep Learning  
LEAKED DETECTION WITH IMMERSION TECHNIQUE OF OIL COOLER USING  
A DEEP LEARNING METHOD

ผู้จัดทำ

- |                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| 1. นาย เตชิต ศรีตระกูล     | รหัสประจำตัว 61010390 |
| 2. นาย ธนภูมิ อุทัยจันทนา  | รหัสประจำตัว 61010448 |
| 3. นาย ธนภัทร์ เพิ่มทรัพย์ | รหัสประจำตัว 61010883 |



อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภิววัฒน์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจจับฟองอากาศจากรอยรั่วที่ทดสอบโดยการแช่น้ำของออยล์คูลเลอร์  
โดยวิธี Deep Learning

นายเตชิต ศรีตระกูล	61010390
นายธนภูมิ อุทัยจันทนา	61010448
นายรณภัทร์ เพิ่มทรัพย์	61010883
ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภิววัฒน์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2564	

### บทคัดย่อ

การทดสอบการรั่วไหลของ Oil Cooler ของรถไฟในโรงงานมักกะสันนั้น จะทดสอบด้วยเทคนิคการแช่น้ำ (Immersion Technique) โดยการอัดความดันอากาศเข้าไปใน Oil Cooler แล้วจุ่มลงในอ่างทดสอบ สังเกตฟองอากาศที่รั่วออกมาจาก Oil Cooler หากมีฟองอากาศออกมาแสดงว่า Oil Cooler มีรอยรั่ว ซึ่งต้องใช้พนักงานที่มีประสบการณ์ในการสังเกต บางครั้งใช้เวลานานในการทดสอบเนื่องจากอัตราการรั่วไหลที่ต่ำ ทางคณะจึงเล็งเห็นถึงการสร้างนวัตกรรมมาเพื่อใช้ในการตรวจจับฟองอากาศที่รั่วไหลด้วยวิธี Deep learning ซึ่งได้เลือกใช้ Library PyTorch ที่เป็น Library สำหรับการสร้างแบบจำลอง โดยใช้อัลกอริทึม YOLOv5 ในการค้นหาและเรียนรู้รูปภาพ ซึ่งจะได้ชุดข้อมูลรูปภาพทั้งหมด 2,252 รูปภาพโดยแบ่งชุดข้อมูลรูปภาพออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ชุดข้อมูลฝึกสอน (Training) 2,000 รูปภาพ ชุดข้อมูลทดสอบ (Validation) 187 รูปภาพ และชุดข้อมูลตรวจสอบ (Testing) 94 รูปภาพ จากการทดลองพบว่าแบบจำลองที่ผ่านการเรียนรู้มีค่าความเที่ยงตรง (Precision) เท่ากับ 0.889 ค่าความไว (Recall) เท่ากับ 0.804 ค่าคะแนน F1 (F1-score) เท่ากับ 0.844 และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ย (Average Precision) เท่ากับ 0.855

**คำหลัก:** Oil Cooler, การเรียนรู้เชิงลึก, การรู้จำวัตถุ, อัลกอริทึม YOLOv5

LEAKED DETECTION WITH IMMERSION TECHNIQUE OF OIL COOLER USING  
A DEEP LEARNING METHOD

Techit Sritrakul 61010390  
Tanapoom Uthajuntawana 61010448  
Ronnapat Permsub 61010883  
Assis.Prof.Dr. Akapot Tantrapiwat Advisor  
Year 2021

**ABSTRACT**

The leak test of the train's oil cooler in Makkasan Workshop. It is tested by immersion technique which compress air pressure into the oil cooler and immerse it in the test bathtub. Inspection the air bubbles leaking from the oil cooler. If bubbles come out, the oil cooler has a leak which requires experienced observer. If the leak rate is beneath, the testing time will be longer. Consequently, the team envisioned an innovation to detect bubbles for the leaks in the oil cooler using deep learning method. We have chosen the PyTorch library as a modeling library based on the YOLOv5 algorithm for training the model which uses 2,252 bubble images and divided into 3 groups that are dataset for training 2,000 images, dataset for validation 187 images and dataset for testing 94 images. The experimental result represents precision of training model is 0.889, recall of training model is 0.804, F-1 score of training model is 0.844 and average precision (AP) is 0.855

**Keywords:** Oil cooler, Deep learning, Object recognition, YOLOv5 algorithm

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เพราะพระคุณของบิดามารดาของผู้ศึกษาที่ให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ และสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างมาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของ ครอบครัวศรีตระกูล ครอบครัวอุทัยจันทนา และครอบครัวเพิ่มทรัพย์ มา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ในความ กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา คอยใส่ใจ ตรวจสอบความถูกต้องทั้งเนื้อหาและรูปแบบเล่มปริญญา นิพนธ์ของผู้ศึกษามาโดยตลอด ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาเครื่องกลที่ได้ประสิทธิ์ ประสาทความรู้และอบรมสั่งสอน ทั้งให้ความช่วยเหลือผู้ศึกษาในส่วนต่างๆ และขอขอบพระคุณ ดร.ธานินทร์ ศิวาลัย นายช่างที่โรงงานมักกะสัน การรถไฟแห่งประเทศไทยที่ช่วยให้ข้อมูลและจัดหา อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย

ท้ายที่สุด ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกคน สำหรับความร่วมมือ ร่วมแรงร่วมใจ ความเสียสละ อดทนที่มีให้กันและกันอย่างสม่ำเสมอโดยตลอด และความรักที่เพื่อนมีให้ “กันและกัน” ไม่เคย เปลี่ยนแปลง

นายเดชิต ศรีตระกูล  
ธนภูมิ อุทัยจันทนา  
รณภัทร์ เพิ่มทรัพย์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ .....	VII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย .....	1
1.4 สมมุติฐานการวิจัย .....	1
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	2
2.1 ข้อมูลพื้นฐานของ Oil Cooler.....	2
2.2 สาเหตุการเกิดความเสียหายของ Oil Cooler.....	3
2.2.1 การกัดกร่อนของท่อ (Tube Corrosion).....	3
2.2.2 การกัดเซาะของท่อ (Tube Erosion) .....	4
2.2.3 การกัดเซาะรูปตัว U (U-bend Erosion) .....	4
2.2.4 การกัดเซาะปลายท่อเข้า (Inlet Tube-End Erosion) .....	5
2.2.5 ค้อนน้ำหรือค้อนไอน้ำ (Steam or Water Hammer) .....	6
2.2.6 ความล้าจากความร้อน (Thermal Fatigue) .....	7
2.2.7 การสั่นสะเทือน/การสั่นพ้อง (Vibration/Resonance).....	8
2.2.8 การเกิดหลุมของท่อ.....	9
2.3 การทดสอบการรั่วไหลของ Oil Cooler.....	10
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการรั่วไหลด้วยฟองอากาศ.....	10
2.4.1 หลักการของการทดสอบการรั่วไหลด้วยฟองอากาศ .....	10
2.4.2 ชนิดของเทคนิคการทดสอบฟองอากาศโดยแบ่งตามของเหลวทดสอบ .....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 จุดเด่นของการทดสอบการรั่วไหลด้วยฟองอากาศ .....	11
2.4.4 ข้อจำกัดของการทดสอบการรั่วไหลด้วยฟองอากาศ .....	12
2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความไวของการทดสอบฟองอากาศ .....	13
2.4.6 สิ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของวิธีการสังเกตการรั่วไหล .....	13
2.4.7 ปัจจัยที่สามารถพัฒนาการทดสอบเพื่อความสะดวกต่อการสังเกตของผู้ทำการทดสอบ ..	14
2.4.8 หลักการของการทดสอบการรั่วไหลของฟองอากาศด้วยวิธีการแช่น้ำ.....	14
2.4.9 สมการทางคณิตศาสตร์เนื่องจากการก่อตัวของฟองอากาศ.....	15
2.4.10 หลักการในการเกิดฟองอากาศสำหรับการทดสอบด้วยการแช่น้ำ .....	16
2.4.11 ความดันวิกฤติที่จำเป็นสำหรับการก่อตัวของฟองอากาศขนาดใหญ่ที่เสถียร .....	18
2.4.12 ผลกระทบของแรงตึงผิวเนื่องจากการทดสอบด้วยการแช่น้ำด้วยแก๊สฮีเลียมที่ความดัน 200 kPa .....	19
2.4.13 ผลกระทบของความดันอากาศหรือความดันฮีเลียมบนการปล่อยฟองอากาศใน ของเหลวทดสอบที่แตกต่างกัน .....	20
2.5 การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning).....	21
2.5.1 การทำ Max Pooling .....	21
2.5.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network - CNN) .....	22
2.6 การตรวจจับวัตถุ (Object Detection).....	23
2.7 ระบบการรู้จำวัตถุ (Object Recognition) .....	24
2.8 กระบวนการสอนระบบการรู้จำวัตถุ.....	25
2.8.1 การถ่ายรูปรูปวัตถุเพื่อนำไปประกอบการสอนระบบ .....	25
2.8.2 การกำหนดป้ายกำกับให้วัตถุบนภาพถ่าย (Image Annotations).....	26
2.8.3 การสร้างชุดข้อมูลบนโครงข่ายประสาทเทียมดาร์คเน็ต .....	27
2.9 ตัวแบบ YOLOv5 .....	27
2.10 Roboflow .....	28
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน .....	29
3.1 บทนำ .....	29
3.2 การเตรียมข้อมูล .....	29

3.3 การสร้างและฝึกแบบจำลอง .....	30
3.4 การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง .....	30
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน .....	32
4.1 บทนำ .....	32
4.2 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนและทดสอบแบบจำลอง .....	32
4.2.1 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนแบบจำลอง .....	32
4.2.2 ผลลัพธ์ของการทดสอบแบบจำลอง .....	33
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเที่ยงตรง ค่าความไว และ ค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ย เทียบกับจำนวนอีพอคซ์ในการฝึกสอน .....	34
4.4 การคำนวณเพื่อหาอัตราการรั่วไหลของ Oil Cooler .....	35
4.4.1 การคำนวณหาขนาดกลุ่มฟองอากาศจากรูปภาพ .....	35
4.4.2 การคำนวณอัตราการรั่วไหลเพื่อหาระยะเวลาในการสังเกตฟองอากาศ .....	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	39
5.1 บทนำ .....	39
5.2 สรุปผลการทดลอง .....	39
5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้น .....	39
5.4 ข้อเสนอแนะ .....	40
เอกสารอ้างอิง .....	41
ภาคผนวก ผลลัพธ์ของการทดสอบแบบจำลอง .....	43

# สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	หลักการทำงานของ Oil Cooler.....	2
รูปที่ 2.2	Oil Cooler ของรถไฟ.....	3
รูปที่ 2.3	Oil Cooler ยี่ห้อ Cummins.....	3
รูปที่ 2.4	การกักความร้อนของท่อ.....	4
รูปที่ 2.5	การกักเชื้อในท่อรูปตัว U.....	5
รูปที่ 2.6	การกักเชื้อปลายท่อเข้า.....	5
รูปที่ 2.7	ท่อทองแดงแตกเนื่องจากค้อนไอน้ำ.....	6
รูปที่ 2.8	การฉีกขาดในท่อทองแดงเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่มาก.....	7
รูปที่ 2.9	ท่อที่ได้รับความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงของไฮโดรเจน.....	7
รูปที่ 2.10	แผ่นกั้นและท่อชำรุดจากกักเชื้อจากความถี่สูง.....	8
รูปที่ 2.11	การเกิดหลุมขนาดใหญ่บนท่อทองแดง.....	9
รูปที่ 2.12	แสดงถึงรัศมีของฟองอากาศน้อยกว่ารัศมีรอยร้าว.....	17
รูปที่ 2.13	แสดงถึงรูปร่างของฟองอากาศเป็นครึ่งทรงกลม.....	17
รูปที่ 2.14	แสดงถึงฟองอากาศที่เป็นทรงกลม.....	17
รูปที่ 2.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเวลาในการเดินฟองอากาศเทียบกับแรงตึงผิวที่อุณหภูมิของของเหลวที่มีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง.....	19
รูปที่ 2.16	ผลของความดันและแก๊สทดสอบที่ใช้น้ำอุณหภูมิ 25 °C.....	20
รูปที่ 2.17	ผลของความดันและแก๊สทดสอบที่ใช้น้ำเต็มสารลดแรงตึงผิว 1-2 % อุณหภูมิ 25 °C..	20
รูปที่ 2.18	โครงสร้างของ Deep Learning.....	21
รูปที่ 2.19	แสดงโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน.....	22
รูปที่ 2.20	การตรวจจับรูปภาพโดยการวาดกล่องวัตถุ.....	23
รูปที่ 2.21	การตรวจจับรูปภาพโดยใช้วิธีถึงมสีให้ทุก Pixel ของวัตถุนั้น.....	24
รูปที่ 2.22	แสดงการกำหนดป้ายกำกับให้วัตถุแต่ละหมวดหมู่บนรูปภาพด้วย LabelImg.....	26
รูปที่ 2.23	สถาปัตยกรรมของ YOLOv5.....	27
รูปที่ 2.24	หน้าต่างโปรแกรม Roboflow.....	28
รูปที่ 4.1	แสดงผลลัพธ์ของการฝึกสอนแบบจำลองบนกุ๊กิลโคแล็บ.....	32
รูปที่ 4.2	ตัวอย่างรูปจากการตรวจสอบของแบบจำลอง.....	33
รูปที่ 4.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเที่ยงตรง ค่าความไว และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ย เทียบกับจำนวนอีพอคซีในการฝึกสอน.....	34
รูปที่ 4.4	แบบจำลองการทดลองเพื่อหาขนาดของฟองอากาศ (หน่วยเซนติเมตร).....	36

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทดสอบการรั่วไหลของ Oil Cooler ของรถไฟในโรงงานมักกะสันนั้น จะทดสอบด้วยเทคนิคการจุ่มน้ำ (Immersion Technique) โดยการอัดความดันอากาศเข้าไปใน Oil Cooler แล้วจุ่มลงในอ่างทดสอบ สังเกตฟองอากาศที่รั่วออกมาจาก Oil Cooler หากมีฟองอากาศออกมาแสดงว่า Oil Cooler มีรอยรั่ว ซึ่งต้องใช้พนักงานที่มีประสบการณ์ในการสังเกต บางครั้งใช้เวลานานในการทดสอบเนื่องจากอัตราการรั่วไหลที่ต่ำ ทางคณะจึงเล็งเห็นถึงการสร้างนวัตกรรมมาเพื่อใช้ในการตรวจจับฟองอากาศที่รั่วไหลด้วยวิธี Deep learning

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเป็นตัวช่วยในการทดสอบการรั่วไหล Oil Cooler ที่มีอัตราการรั่วไหลต่ำซึ่งใช้เวลาในการทดสอบนานทำให้สามารถประหยัดเวลาของผู้ทำการทดสอบได้

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

วิธีการตรวจจับฟองอากาศที่เกิดจากการรั่วไหลของ Oil Cooler ใช้วิธีการ Object Detection ด้วยอัลกอริทึม YOLOv5

### 1.4 สมมุติฐานการวิจัย

การทดสอบการรั่วไหลของ Oil Cooler ทดสอบด้วยเทคนิคการจุ่มน้ำเหมือนกับการทดสอบการรั่วไหลของ Air Condition Coil และ Automotive Coil

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย

1.5.1 เพื่อเป็นตัวช่วยในการทดสอบการรั่วไหล Oil Cooler ที่มีอัตราการรั่วไหลต่ำซึ่งใช้เวลาในการทดสอบนานทำให้สามารถประหยัดเวลาของผู้ทำการทดสอบได้

1.5.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการทดสอบการรั่วไหลด้วยฟองอากาศ ในส่วนของการทดสอบ โดยการแช่น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

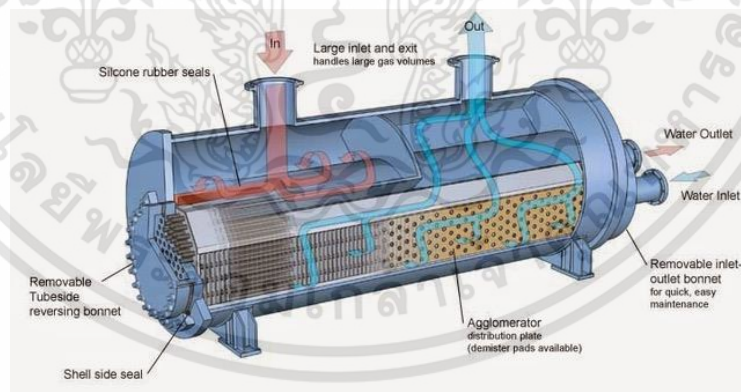
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในส่วนนี้ประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานของ Oil Cooler สาเหตุการเกิดความเสียหายของ Oil Cooler การทดสอบการรั่วไหลของ Oil Cooler ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการรั่วไหลด้วย ฟองอากาศ การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) การตรวจจับวัตถุ (Object Detection) ระบบการรู้จำวัตถุ (Object Recognition) กระบวนการสอนระบบการรู้จำวัตถุ ตัวแบบ YOLOv5 และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ข้อมูลพื้นฐานของ Oil Cooler

Oil Cooler [1] เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนในระบบไฮดรอลิกที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในระบบ ทำหน้าที่ในการระบายความร้อนออกจากเครื่องจักร ขนาดของ Oil Cooler มีหลากหลายขนาด โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่เราต้องการจะปล่อยออกไป ซึ่งหลักการทำงานของ Oil Cooler จะใช้น้ำเย็นเข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อน โดยจะดึงความร้อนออกจากระบบน้ำมันไฮดรอลิก ผ่านพื้นผิวสัมผัสของท่อที่อยู่ภายใน Oil Cooler



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของ Oil Cooler [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 Oil Cooler ของรถไฟ



รูปที่ 2.3 Oil Cooler ยี่ห้อ Cummins [2]

## 2.2 สาเหตุการเกิดความเสียหายของ Oil Cooler [3]

### 2.2.1 การกัดกร่อนของท่อ (Tube Corrosion)

ปัญหาที่ใหญ่ที่สุดต่อ Oil Cooler ที่ใช้ท่อเหล็กคาร์บอน คือการ Oxidation ในพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของท่อปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจน ( $O_2$ ) กับเหล็ก ( $Fe_2$ ,  $Fe_3$ ) เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่พบได้บ่อยที่สุดในปฏิกิริยานี้ ทำให้เกิดชั้นของเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) บนท่อเหล็กคาร์บอนซึ่งส่งผลให้การซึมผ่านของความร้อนลดลงและทำให้ท่อเสื่อมสภาพในที่สุด ปัญหานี้แก้ไขได้ยากและมักตรวจพบเมื่อท่อสึกกร่อนจนระดับประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง การไหลของของเหลวลดลงอย่างมาก หรือท่อมีรูพรุนและรั่ว



รูปที่ 2.4 การกัดกร่อนของท่อ [3]

### 2.2.2 การกัดเซาะของท่อ (Tube Erosion)

การกัดเซาะของท่อ คือการเสียหายของโลหะโดยของเหลวที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดสูง เช่น ซิลิกา ตะกอน หรือน้ำทะเลที่มีเกลือ ทราย และสิ่งมีชีวิตในทะเล เป็นตัวเร่งการพังทลายของท่อทั้งภายในและที่ขอบชั้นนอกของท่อทางเข้า แม้ว่าท่อทั้งหมดจะถูกกัดเซาะเมื่อเวลาผ่านไป แต่จุดอ่อนที่สุดของท่อโดยทั่วไปคือส่วนโค้งตัว U และขอบด้านบนของท่อทางเข้า

### 2.2.3 การกัดเซาะรูปตัว U (U-bend Erosion)

ความเร็วของเหลวภายในท่อที่มากกว่าคำแนะนำของผู้ผลิตอาจนำไปสู่ความเสียหายจากการกัดเซาะตามหน้าด้านในของการโค้งกลับด้านนอกของ U-bend การเปลี่ยนแปลงทิศทางของการไหล ณ จุดนี้ทำให้เกิดความต้านทานต่อการไหลของของไหลทำให้เกิดแรงของของไหล และฝุ่นละอองในนั้น เพื่อมุ่งไปที่ผนังด้านในของท่อกัดเซาะท่ออย่างต่อเนื่อง ณ จุดนี้



รูปที่ 2.5 การกัดเซาะในท่อรูปตัว U [3]

#### 2.2.4 การกัดเซาะปลายท่อเข้า (Inlet Tube-End Erosion)

การกัดเซาะของท่อที่สำคัญยังสามารถพบได้ที่ปลายของท่อทางเข้า ซึ่งท่อเชื่อมต่อผ่านแผ่นท่อและต้องเผชิญกับความดันของของเหลวที่เข้ามา ณ จุดนี้ การแบ่งการไหลของของไหลจากสายหลักออกเป็นหลายสายเล็กๆ จำนวนมากส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนและความเร็วแต่ละตำแหน่งสูงมาก



รูปที่ 2.6 การกัดเซาะปลายท่อเข้า [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 ค้อนน้ำหรือค้อนไอน้ำ (Steam or Water Hammer)

ค้อนน้ำหรือค้อนไอน้ำเป็นแรงที่มีพลังและสามารถทำให้ตัวเรือน (Housing) หรือท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแตกหรือยุบได้ ค้อนไอน้ำมักเกิดขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ซึ่งมักเกิดจากการหยุดชะงักของการไหลของน้ำหล่อเย็นอย่างกะทันหัน การกลายเป็นไออย่างรวดเร็วของน้ำหรือปั๊มทำงานผิดปกติ สามารถสังเกตปรากฏการณ์นี้ได้ในห้องอุ่นน้ำให้ร้อน (Feed Water Heater) ซึ่งความดันไอน้ำสูงจะเพิ่มโอกาสการเกิดค้อนน้ำ



รูปที่ 2.7 ท่อทองแดงแตกเนื่องจากค้อนไอน้ำ [3]

โอกาสน้อยที่ค้อนไอน้ำจะทำให้ตัวเรือนเสียหาย เพราะท่อจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าตัวเรือนและมักจะเกิดความเสียหายมากกว่าตัวเรือน อย่างไรก็ตาม ความเสียหายของท่อจะถูกตรวจพบเฉพาะในการตรวจสอบภายในหรือเมื่อปรากฏการรั่วไหลเท่านั้น

## 2.2.6 ความล้าจากความร้อน (Thermal Fatigue)

ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีความเสี่ยงที่จะฉีกขาดและเกิดรอยแตก เนื่องจากความเครียดสะสมซึ่งเกี่ยวข้องกับการหมุนเวียนของความร้อนอย่างต่อเนื่องหรือความแตกต่างของอุณหภูมิที่สูง ความล้าจากความร้อนเกิดขึ้นเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างมากระหว่างตัวเรือนและท่อ

ความล้าจากความร้อนอาจทำให้ท่อบิดงอ ทำให้เกิดความเค้นที่เกินค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ (Material's Tensile Strength) และจะทำให้ท่อแตกในที่สุด



รูปที่ 2.8 การฉีกขาดในท่อทองแดงเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่มาก [3]

ผลลัพธ์อีกประการหนึ่งของความแตกต่างของอุณหภูมิสูงคือการขยายตัวทางความร้อนทางกายภาพและการหดตัวของท่อตามความยาวของท่อ ซึ่งในที่สุดอาจกระทบต่อความสมบูรณ์ของการเชื่อมต่อของท่อกับแผ่นท่อ ทำให้เกิดการรั่วไหล และแทบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่จะวินิจฉัยการเกิดความเสียหายจากความล้าเนื่องจากความร้อนจนกว่าจะเกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.9 ท่อที่ได้รับ ความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงของไฮโดรเจน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.7 การสั่นสะเทือน/การสั่นพ้อง (Vibration/Resonance)

การสั่นสะเทือนและการสั่นพ้องจากแหล่งกำเนิดใดก็ตาม ไม่ว่าจะเป็นการเกิดจากภายนอกหรือภายในสามารถทำให้เกิดแรงจำนวนมากบนตัวท่อความร้อน และเมื่อการสั่นสะเทือนหรือการสั่นพ้องได้เริ่มขึ้นมันสามารถเพิ่มความเข้มข้น ณ จุดที่เกิดความเสียหายหรือเกิดการรั่วไหลจากการเชื่อมของท่อนั้นๆ

แผ่นกั้นช่วยรองรับท่อในตัวเรือน Oil Cooler และช่วยควบคุมทิศทางการไหลของของไหลภายในท่อเพื่อช่วยแลกเปลี่ยนความร้อน ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยปกติแล้วจะใช้วิธีการเชื่อมหรือรัดให้แน่นด้วยลูกกลิ้งขยายเข้าไปที่ตำแหน่งต่อท่อเพื่อทำให้มั่นใจว่าไม่เกิดการรั่วไหล ทั้งบริเวณที่ท่อสัมผัสกับแผ่นกั้นและแผ่นท่อเป็นจุดอ่อน ความเร็วที่มากเกินไปที่ด้านข้างท่อก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนหรือการสั่นพ้องที่ความถี่สูงส่งผลให้รอยขีดข่วนระหว่างตัวท่อและมุมของแผ่นกั้น ซึ่งอาจทำให้ท่อแตกหรือการเชื่อมกันของท่อไม่สนิท อุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่ติดตัวแลกเปลี่ยนความร้อนอาจส่งแรงสั่นสะเทือนมาสู่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและส่งผลให้เกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.10 แผ่นกั้นและท่อชำรุดจากกัดเซาะจากความถี่สูง [3]

## 2.2.8 การเกิดหลุมของท่อ

การกัดกร่อนที่เกิดจากสารเคมีอาจส่งผลให้เกิดรูพรุนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจนถึงจุดที่รูเชื่อมก่อดัวและท่อขาดและรั่ว การเกิดหลุมเป็นผลมาจากศักย์ไฟฟ้าภายในเคมีที่เกิดจากความแตกต่างภายในและภายนอก ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่าเซลล์ความเข้มข้น สภาพแวดล้อมที่อุดมด้วยออกซิเจนในเซลล์นี้ทำหน้าที่เป็นแอโนดและพื้นผิวโลหะเป็นแคโทด ส่งผลให้พื้นผิวโลหะค่อยๆ เกิดการหลุดขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาเคมี การไล่ระดับออกซิเจนแบบเข้มข้นด้วยไฟฟ้าเคมี ( $O_2$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) มักเป็นสาเหตุของการเกิดรูพรุนของผนังท่อ เช่นเดียวกับการมีอยู่ของสารประกอบทางเคมีมากเกินไป เช่น คลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งมักพบในน้ำหล่อเย็นที่บำบัดไม่เพียงพอ



รูปที่ 2.11 การเกิดหลุมขนาดใหญ่บนท่อทองแดง [3]

## 2.3 การทดสอบการรั่วไหลของ Oil Cooler

การทดสอบการรั่วไหลของ Oil Cooler [4] มีไว้เพื่อตรวจสอบการรั่วไหลของ Oil Cooler ถ้าพบว่า Oil Cooler นั้นๆ พบการรั่วไหลก็จะสามารถแก้ไขและป้องกันสิ่งที่จะตามมาได้ ซึ่งการทดสอบการรั่วไหลของ Oil Cooler มี 3 ประเภท ดังนี้

1. การทดสอบรอยรั่วแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Leak Detector Test) เป็นการตรวจสอบรอยรั่วด้วยวิธีการทางไฟฟ้า ซึ่งจะมีข้อจำกัดอยู่ค่อนข้างมากเนื่องจากจำเป็นต้องสัมผัสกับตัวชิ้นงาน และไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดรอยรั่วขึ้นที่ตำแหน่งไหน รวมถึงมีราคาแพง

2. การทดสอบรอยรั่วโดยไนโตรเจนและการทดสอบฟองอากาศ (Nitrogen Leak Detector Test and Bubble Test) หลักการคือ การอัดไนโตรเจนเข้าไปในท่อ Oil Cooler ถ้า Oil Cooler มีการรั่วไหลจะมีเสียงดังออกมาและมีฟองอากาศ เนื่องจากไนโตรเจนมีความดันสูง

3 การทดสอบด้วยวิธีการย้อมสี (Dye Testing for a Freon Leak) หลักการคือ การนำสีย้อมอัลตราไวโอเล็ตเข้าสู่ Oil Cooler สีย้อมอัลตราไวโอเล็ตจะผสมกับสารหล่อลื่น และจะออกมาทางรอยรั่วที่เล็กที่สุด ช่างผู้เชี่ยวชาญจะใช้ไฟสีฟ้าและสีดำในการส่องหารอยรั่ว

## 2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการรั่วไหลด้วยฟองอากาศ [5]

### 2.4.1 หลักการของการทดสอบการรั่วไหลด้วยฟองอากาศ

ในการทดสอบการรั่วโดยเทคนิคฟองอากาศ ความแตกต่างของความดันแก๊สเกิดขึ้นเป็นครั้งแรกในขอบเขตความดันที่จะทำการทดสอบ ของเหลวทดสอบถูกตั้งโดยสัมผัสกับด้านความดันต่ำของขอบเขตความดัน (ขั้นตอนนี้ป้องกันการเข้าของการรั่วไหลและการอุดตันของการรั่วไหลโดยของเหลวทดสอบ) แก๊สรั่วไหลผ่านขอบเขตความดันจะสามารถตรวจพบได้โดยสังเกตจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นในของเหลวทดสอบที่จุดออกของการรั่วไหลผ่านขอบเขตความดัน เทคนิคนี้ทำให้เห็นได้ชัดเจนของการรั่วไหลและตำแหน่งของการรั่วไหลขนาดใหญ่ที่มีอัตราการรั่วไหล  $10^{-3}$  ถึง  $10^{-5}$   $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  ระยะเวลาการตรวจสอบนานขึ้นอาจจำเป็นสำหรับการตรวจจับการรั่วไหลขนาดเล็กที่มีอัตราการรั่วไหล  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-6}$   $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  ซึ่งฟองอากาศมีการก่อตัวช้า

ในการทดสอบฟองอากาศ สื่อที่ใช้ตรวจสอบคือแก๊สที่ไหลผ่านการรั่วไหลเนื่องจากความแตกต่างของความดัน การชี้วัดการทดสอบคือการมองเห็นฟองอากาศในของเหลวตรวจจับที่จุดรั่วไหล อัตราฟองการก่อตัว ขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้น และอัตราของการขยายขนาดของฟองอากาศแต่ละฟองจัดให้มีวิธีการประมาณขนาดของการรั่วไหล (อัตราการไหลของแก๊สผ่านการรั่วไหล)

## 2.4.2 ชนิดของเทคนิคการทดสอบฟองอากาศโดยแบ่งตามของเหลวทดสอบ

เทคนิคการทดสอบฟองอากาศเพื่อตรวจจับหรือระบุตำแหน่งการรั่วไหลสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักที่เกี่ยวข้องกับการใช้ของเหลวทดสอบ

1. เทคนิคการแช่วัตถุในของเหลวหรือระบบทดสอบความดัน (The Liquid Immersion) คือ การจุ่มลงในของเหลวทดสอบ ฟองอากาศจะก่อตัวขึ้นที่จุดที่มีการรั่วไหลของแก๊ส และมีแนวโน้มที่จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำของอ่างแช่

2. เทคนิคการทำฟิล์มของเหลว (The Liquid Film Application) ชั้นบางๆ ของของเหลวทดสอบไหลผ่านพื้นผิวความดันต่ำของวัตถุทดสอบ ตัวอย่างของวิธีการทดสอบด้วยฟิล์มก็คือ เทคนิคฟองอากาศที่ใช้ในการตรวจสอบแก๊สรั่วในช่างประปา ฟิล์มของน้ำยาตรวจจับสามารถนำไปใช้ได้กับส่วนประกอบและโครงสร้างต่างๆ มากมายที่ไม่สามารถแช่น้ำได้ในของเหลวตรวจจับ สำหรับการตรวจจับรอยรั่วเล็กน้อย ของเหลวนี้ควรก่อตัวเป็นฟิล์มเคลือบบางต่อเนื่องและเปียกทุกพื้นที่ที่จะตรวจสอบ

3. เทคนิคการทำโฟม (The Foam Application) ใช้สำหรับตรวจจับการรั่วไหลขนาดใหญ่ในซึ่งของเหลวที่ทาแล้วจะมีความหนาฟองหรือโฟม เมื่อมีการรั่วไหลขนาดใหญ่ถูกพบ การไหลอย่างรวดเร็วของแก๊สเป่าเป็นรูผ่านโฟมที่ห่อหุ้ม ซึ่งจะเผยตำแหน่งการรั่วไหล

### 2.4.3 จุดเด่นของการทดสอบการรั่วไหลด้วยฟองอากาศ

การทดสอบฟองอากาศมีจุดเด่นที่ชัดเจน ได้แก่ ค่อนข้างง่าย รวดเร็ว และราคาไม่แพง วิธีนี้เป็นเทคนิคในการตรวจจับการรั่วไหลที่ค่อนข้างละเอียดและผู้สังเกตการณ์สามารถเห็นตำแหน่งจุดออกของการรั่วไหลแม่นยำมาก (จุดออกอาจไม่อยู่ตรงข้ามกับจุดเข้าของรอยรั่วโดยเฉพาะในรอยเชื่อมหรือการหล่อ) ข้อดีที่สำคัญอีกอย่างของการทดสอบฟองอากาศคือการรั่วไหลขนาดใหญ่สามารถตรวจพบได้ง่าย และยังให้การตอบสนองที่รวดเร็วมากแม้กระทั่งการรั่วไหลเล็กน้อย (บางการทดสอบการรั่วไหลที่ละเอียดอ่อนมากขึ้นมักจะมีการตอบสนองช้าจนอาจไม่เห็นการรั่วไหลในขณะการทดสอบ)

การทดสอบฟองอากาศไม่จำเป็นในการเคลื่อนย้ายหัววัดติดตาม (Prob) ตรวจจับจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง ในการทดสอบฟองอากาศด้วยการแช่ ส่วนประกอบที่อัดความดันมักจะเป็นการตรวจสอบพร้อมกันของการรั่วไหลบนผิวสัมผัสที่ผู้สังเกตมองเห็นได้ ในบางกรณีการทดสอบในส่วนประกอบอาจต้องให้พลิกกลับให้เห็นด้านล่างเพื่อให้เห็นการรั่วไหลจากบริเวณนี้เห็น การรั่วไหลทั้งหมดจะถูกเปิดเผยอย่างอิสระในการทดสอบฟองอากาศด้วยการแช่ หากต้องการสามารถตรวจพบการรั่วไหลขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็วในเทคนิคการทดสอบฟองอากาศ การรั่วไหลเหล่านี้สามารถปิดผนึกก่อนปรับแต่งเครื่องมือการทดสอบการรั่วไหลอย่างละเอียดที่ใช้ในการตรวจจับการรั่วไหลที่มีขนาดเล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการทดสอบฟองช่วยให้ผู้สังเกตแยกแยะการรั่วไหลจากการรั่วไหลเสมือน (การรั่วไหลเสมือนเป็นปัญหาหลักในการทดสอบการรั่วของระบบสุญญากาศ แต่อาจยังพบเจอเมื่อทำการทดสอบฟองอากาศ) นอกจากนี้ ในระหว่างการทดสอบฟองอากาศไม่จำเป็นต้องต่อท่อเชื่อมต่อและวาล์วที่ปราศจากการรั่วไหล อย่างไรก็ตามการตรวจจ็บบรอยรั่วขนาดเล็กต้องใช้ความอดทนของผู้ปฏิบัติงานและเพิ่มเวลาทดสอบสำหรับตัวบ่งชี้ฟองหรือโฟมในการก่อตัว การทดสอบเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้แน่ใจว่าตัวบ่งชี้ฟองอากาศที่ตรวจพบได้ทั้งหมดถูกสังเกต การทดสอบฟองอากาศเป็นที่น่าพอใจสำหรับการตรวจจ็บบการรั่วไหลโดยรวมด้วยแก๊สทดสอบเฉื่อยและของเหลวทดสอบ การทดสอบฟองอากาศค่อนข้างปลอดภัยในสารที่ติดไฟได้ในอากาศ อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ขึ้นอยู่กับ การเลือกแก๊สที่เหมาะสมและการทดสอบของเหลวไม่จำเป็นต้องใช้ทักษะและการฝึกอบรมของผู้ปฏิบัติงานมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคที่ซับซ้อนบางอย่างของการทดสอบการรั่วไหล

#### 2.4.4 ข้อจำกัดของการทดสอบการรั่วไหลด้วยฟองอากาศ

สถานะที่รบกวนเทคนิคการปล่อยฟองอากาศของการทดสอบการรั่วไหลหรือจำกัดประสิทธิภาพ ได้แก่

1. การปนเปื้อนของพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ
2. ความไม่เหมาะสมของอุณหภูมิพื้นผิวชิ้นงานทดสอบ
3. ของเหลวทดสอบที่ปนเปื้อนหรือเกิดฟอง
4. ความหนืดที่ไม่เหมาะสมของของเหลวทดสอบ
5. สุญญากาศมากเกินไปเหนือพื้นผิวของการทดสอบของเหลว
6. แรงตึงผิวต่ำของของเหลวทดสอบนำไปสู่การอุดตันของการรั่วไหล
7. ไม่ได้ทำความสะอาดของเหลวทดสอบก่อนทำการทดสอบ
8. อากาศระเหยในของเหลวทดสอบหรือการปล่อยแก๊สออกจากพื้นผิวทดสอบที่สีกก่อนทำให้เกิดฟองอากาศปลอม
9. การรั่วไหลลักษณะไม่ต่อเนื่องหรือการรั่วไหลที่ช้ามากหรือการรั่วไหลแบบรูพรุน

การไม่ทำความสะอาดก่อนการทดสอบฟองอากาศหรือการปนเปื้อนอาจอุดตันการรั่วไหลและลดความไวของการทดสอบการรั่วไหลภายหลังโดยเทคนิคความไวที่มากขึ้น

## 2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความไวของการทดสอบฟองอากาศ

พื้นฐานหลักการของการทดสอบฟองอากาศคือการสร้างความแตกต่างของความดันระหว่างการรั่วไหลและการสังเกตฟองอากาศที่เกิดขึ้นในของเหลวอยู่ที่ระดับต่ำด้านความดันของรอยรั่วหรือขอบเขตความดัน ปัจจัยที่มีผลต่อความไวของการทดสอบฟองอากาศ มีดังนี้

1. ความดันต่างของความดันที่เกิดขึ้นบริเวณรอยรั่ว
2. ความหนืดของแก๊สที่ใช้ในการทดสอบ
3. ของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ
4. สิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวทดสอบ (เช่น สี สิ่งสกปรก น้ำมัน ฯลฯ บนพื้นผิวด้านในหรือด้านนอกของอุปกรณ์ที่กำลังทดสอบ)
5. สภาพอุณหภูมิตัว (เช่น ฝน อุณหภูมิ ความชื้น หรือลม)
6. แสงในพื้นที่ทดสอบ
7. อุปกรณ์ทดสอบ
8. เทคนิคและทัศนคติของผู้ของผู้สังเกต

## 2.4.6 สิ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของวิธีการสังเกตการรั่วไหล

1. ความเร็วและขนาดของการผลิตฟองอากาศได้รับอิทธิพลจากแรงตึงผิว ของเหลวที่มีแรงตึงผิวต่ำจะทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก รวมทั้งการเกิดฟองใหม่ได้ง่าย ของเหลวที่มีแรงตึงผิวสูงจะทำให้เกิดฟองขนาดใหญ่ขึ้น จะสร้างฟองน้ำใหม่ได้ยากกว่า ซึ่งแรงตึงผิวจะสามารถลดลงได้โดยใช้น้ำยาปรับสภาพน้ำ
2. แรงตึงผิวที่มีค่าต่ำส่งผลให้เกิดการเป็ยกที่ดีและมุมสัมผัสที่กว้าง แรงตึงผิวที่มีค่าสูงทำให้เกิดการเป็ยกที่ไม่ดีและมุมสัมผัสที่แคบ
3. ขนาดของการขยายตัวของฟองอากาศได้รับผลกระทบจากความหนืด ฟองอากาศขนาดเล็กเกิดจากของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ฟองอากาศขนาดใหญ่เกิดจากของเหลวที่มีความหนืดสูง โดย Glycerine สามารถใช้เพื่อปรับความหนืดได้
4. ปริมาณของพื้นที่ทดสอบที่สามารถปกคลุมด้วยสารละลายเครื่องตรวจจับรอยรั่วได้ก่อน การตรวจสอบขั้นสุดท้ายจะกำหนดโดยอัตราการระเหย เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทดสอบมากขึ้นควรใช้สารละลายที่มีอัตราการระเหยช้า ซึ่งอัตราการระเหยมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอีกด้วย และในทางกลับกันอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้อัตราการระเหยสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.7 ปัจจัยที่สามารถพัฒนาการทดสอบเพื่อความสะดวกต่อการสังเกตของผู้ทำการทดสอบ

ค่าความไวของการทดสอบการรั่วไหล สามารถพัฒนาเพื่อเพิ่มความสะดวกในการสังเกต โดยสามารถพัฒนาได้โดยวิธีดังนี้

1. ตำแหน่งของผิวน้ำที่ใช้ในการทดสอบมีตำแหน่งที่เหมาะสม
2. เพิ่มความสว่างเพื่อให้สังเกตฟองอากาศที่ลอยขึ้นมาได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น และใช้ของเหลวที่มีความใสในการทดสอบ
3. เพิ่มระยะเวลาในการทดสอบการก่อตัวของฟองอากาศและเพิ่มเวลาในการสังเกตของผู้ทำการทดสอบ
4. กำจัดฟองอากาศที่ไม่เกี่ยวข้องกับการรั่วไหล ซึ่งอาจเกิดจากความร้อนของของเหลว
5. ลดความตึงผิวของของเหลวที่ใช้ในการทดสอบซึ่งจะส่งผลให้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กสามารถก่อตัวได้
6. ลดความดันด้านบนของของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งทำให้ฟองอากาศที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อง่ายต่อการสังเกต
7. เลือกสถานที่และเวลาที่ใช้ในการทดสอบให้เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ ลม และ แสง
8. ใช้ของเหลวที่มีสารละลายประเภท fluorescent และ ของเหลวที่มีสี เพื่อให้สามารถมองเห็นฟองอากาศได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสะดวกในการสังเกตและความสามารถของผู้สังเกตจำเป็นที่จะต้องนำมาพิจารณาด้วย การทดสอบอาจจะถูกเลื่อนออกไปจนกระทั่งเงื่อนไขต่างๆ ในการทดสอบเหมาะสม

ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้ผู้ที่ทำการทดสอบสามารถสังเกตฟองอากาศที่รั่วไหลออกมาได้ง่ายมากขึ้นและลดโอกาสในการเกิดข้อผิดพลาดจากการทดสอบฟองอากาศ

#### 2.4.8 หลักการของการทดสอบการรั่วไหลของฟองอากาศด้วยวิธีการแช่น้ำ

ในการทดสอบการรั่วไหลของฟองอากาศด้วยวิธีการแช่น้ำนั้น จำเป็นจะต้องให้ขนาดของอุปกรณ์ทดสอบมีขนาดเพียงพอต่อการแช่น้ำ วิธีการนี้เหมาะสมสำหรับการใช้แก๊สในการอัดความดันเข้าไปในระบบหรือส่วนประกอบที่ต้องการจะทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบขึ้นส่วนที่ต้องการทดสอบจะต้องแช่อยู่ในของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ แหล่งกำเนิดของรอยรั่วจะสามารถสังเกตได้จากตำแหน่งของฟองอากาศที่ก่อตัวขึ้นสู่วิถีของของเหลวในการทดสอบเนื่องจากความแตกต่างของความดัน อุปกรณ์ในการทดสอบควรออกแบบให้ไม่มีการปกปิดการรั่วไหล

#### 2.4.9 สมการทางคณิตศาสตร์เนื่องจากการก่ตัวของฟองอากาศ

การเกิดฟองอากาศนั้นเกิดจากการที่รอยรั่วของวัตถุทดสอบถูกนำไปแช่ในของเหลวทดสอบเมื่อความดันของแก๊สภายในที่ต้องการลอดออกมามีค่ามากกว่าผลรวมของความดันเนื่องจากความสูงของน้ำและแรงตึงผิวสูงสุดจะได้ดังสมการที่ 2-1 ดังนี้

$$P = P_a + \rho gh + \frac{2\sigma}{r} \quad (2-1)$$

โดยที่

P คือค่าความดันของแก๊สที่เกิดจากรอยรั่วขนาดเล็ก มีหน่วยเป็น กิโลปาสคาล

$P_a$  คือค่าความดันสัมบูรณ์เหนือผิวของของเหลวทดสอบ (ความดันบรรยากาศ หรือ สุญญากาศ) มีหน่วยเป็น กิโลปาสคาล

$\rho$  คือค่าความหนาแน่นของของเหลวทดสอบ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

g คือค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที<sup>2</sup>

H คือค่าความลึกของของเหลวทดสอบ ณ ตำแหน่งที่เกิดการรั่วไหล มีหน่วยเป็น เมตร

r คือรัศมีของรอยรั่ว (กำหนดให้เป็นรูทรงกระบอก) มีหน่วยเป็น เมตร

$\sigma$  คือความตึงผิวของของเหลวทดสอบ มีหน่วยเป็น นิวตัน/เมตร

#### 2.4.10 หลักการในการเกิดฟองอากาศสำหรับการทดสอบด้วยการแช่น้ำ

หลังจากที่แก๊สออกจากรอยร้าว ฟองอากาศจะก่อตัวและขยายออกดังรูป 2.12-2.14 สังเกตได้ว่าฟองอากาศจะอยู่ที่บริเวณคอ (Neck) ของรอยร้าว ซึ่งสมมติว่าฟองอากาศมีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของทรงกลม หลังจากฟองอากาศได้ก่อตัวแล้ว รัศมีของฟองอากาศจะลดลงก่อนดังรูปที่ 2.12 ค่ารัศมีที่น้อยที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อฟองอากาศมีลักษณะใกล้เคียงกับครึ่งทรงกลม ซึ่งฟองอากาศจะมีค่ารัศมีเท่ากับรัศมีของรอยร้าวดังรูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้เกิดค่าความดันเนื่องจากแรงตึงผิว ( $2\sigma/r$ ) ที่มากที่สุด ดังนั้นค่าความดันรวมจึงมีค่ามากที่สุด หลังจากนั้นรัศมีของฟองอากาศจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นและขยายตัวจนมีลักษณะเป็นทรงกลมโดยมีปริมาตรเป็น  $(4\pi r^3)/(3)$  ดังรูปที่ 2.14 จนกระทั่งแรงลอยตัวของฟองอากาศมีขนาดมากกว่าแรงตึงผิว ( $2\pi r\sigma$ ) ที่ตำแหน่งคอของรอยร้าวจะทำให้ฟองอากาศหลุดออกและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ เงื่อนไขของการที่ฟองอากาศจะหลุดออกและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำสามารถเขียนเป็นสมการที่ 2-2 ได้ดังนี้

$$\frac{4\pi}{3}R^3\rho g = 2\pi r\sigma \quad (2-2)$$

โดยที่

R เป็นรัศมีของฟองอากาศ ขณะที่ฟองอากาศกำลังหลุดออกจากรอยร้าว มีหน่วยเป็น เมตร

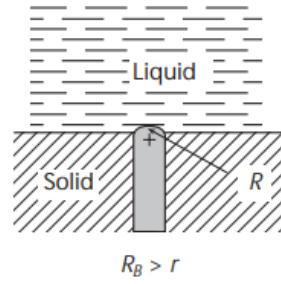
$\rho$  คือค่าความหนาแน่นของของเหลวทดสอบ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

g คือค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที<sup>2</sup>

r คือค่ารัศมีของรอยร้าว (กำหนดให้เป็นรูทรงกระบอก) มีหน่วยเป็น เมตร

$\sigma$  คือความตึงผิวของของเหลวทดสอบ มีหน่วยเป็น นิวตัน/เมตร

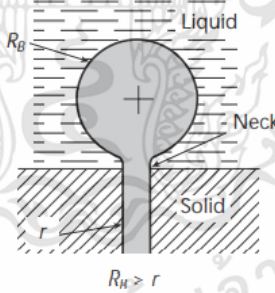
สมการที่ 2-1 และ 2-2 แสดงให้เห็นภาพของข้อมูลเบื้องต้นและการขยายตัวของฟองอากาศ ในความเป็นจริงแล้วความหนืดของของเหลวจะส่งผลกับขนาดของฟองอากาศ อย่างไรก็ตามเราสามารถละเว้นความหนืดของน้ำไปได้ เนื่องจากส่งผลน้อยมากเมื่อเทียบกับความตึงผิว



รูปที่ 2.12 แสดงถึงรัศมีของฟองอากาศน้อยกว่ารัศมีรอยร้าว [5]



รูปที่ 2.13 แสดงถึงรูปทรงของฟองอากาศเป็นครึ่งทรงกลม [5]



รูปที่ 2.14 แสดงถึงฟองอากาศที่เป็นทรงกลม [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.11 ความดันวิกฤติที่จำเป็นสำหรับการก่อตัวของฟองอากาศขนาดใหญ่ที่เสถียร

ความดันของบรรยากาศภายนอกและความดันของของไหลที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบฟองอากาศด้วยการแช่สามารถกำหนดให้เป็นค่าคงที่ได้ เมื่อค่าความดันสัมบูรณ์เนื่องจากความลึกของของเหลวมีค่าต่ำ ดังนั้นความดันสูงสุดภายในฟองอากาศที่เริ่มต้นออกมา จะเกิดขึ้นเมื่อฟองอากาศก่อตัวเกินครึ่งหนึ่งของทรงกลมของฟองอากาศนั้น ซึ่งรัศมีที่ขนาดเล็กที่สุดของฟองอากาศ  $R_{min}$  มีขนาดเท่ากับรัศมีของรอยรั่ว  $r$

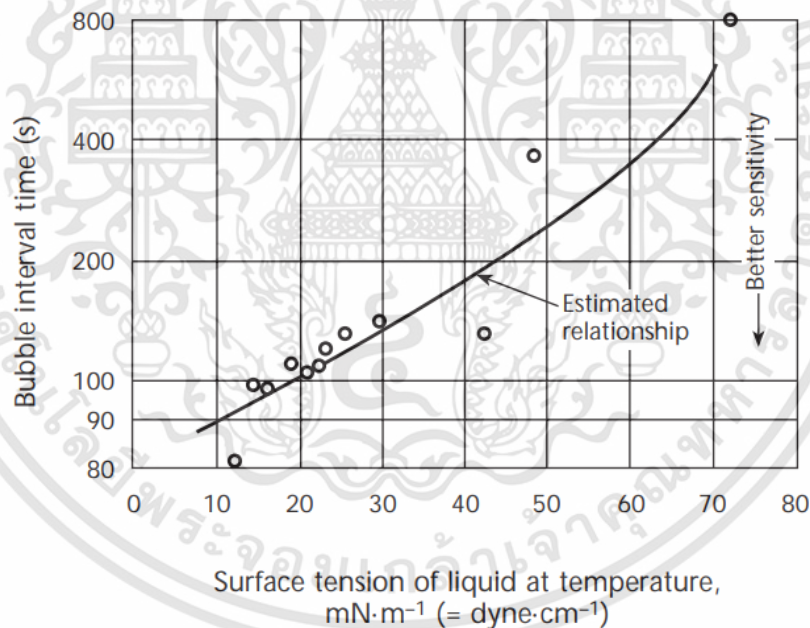
ในจุดนี้สื่อถึงข้อจำกัดในการทดสอบด้วยฟองอากาศ ดังนั้นเราควรพิจารณาอย่างง่าย ตัวอย่างเช่นตำแหน่งของรอยรั่วจุ่มอยู่ในน้ำ ณ ความดันบรรยากาศ 100 kPa สมมติว่าทำการอัดแก๊สซึ่งความดันเป็น 2 เท่าของความดันบรรยากาศ ถ้าแรงตึงผิวของน้ำมีค่า 0.073 นิวตันต่อเมตร และความต่างของความดันจะเท่ากับ 100 kPa ขนาดของรอยรั่วรัศมี  $r$  หาได้จากสมการที่ 2-3 ดังนี้

$$r = \frac{2\sigma}{\Delta P} = 2 \frac{0.073}{10^5} = 1.46 \mu m \quad (2-3)$$

รัศมี  $r$  นี้แสดงถึงขนาดรัศมีของรอยรั่วที่เล็กที่สุดที่สามารถตรวจจับได้โดยการทดสอบฟองอากาศด้วยความต่างของความดัน 100 kPa (1 atm) และของเหลวที่ใช้ในการทดสอบฟองอากาศด้วยการแช่เป็นน้ำที่ไม่ได้ผ่านปรับเปลี่ยนคุณสมบัติใดๆ

#### 2.4.12 ผลกระทบของแรงตึงผิวเนื่องจากการทดสอบด้วยการแช่น้ำด้วยแก๊สฮีเลียมที่ความดัน 200 kPa

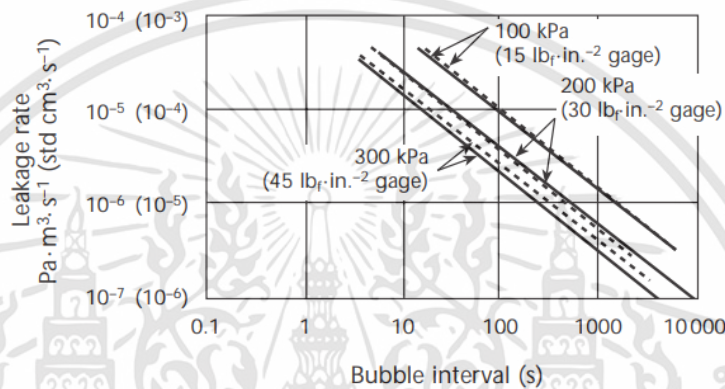
จากรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของแรงตึงผิวเมื่อเทียบกับความไวในการทดสอบ(ความถี่ที่ฟองอากาศจะลอยตัวออกมา) ด้วยการทดสอบบรอยรั่วด้วยแก๊สฮีเลียมที่ความดัน 200 kPa สำหรับกราฟลอการิทึมในแนวตั้งแสดงอัตราส่วนของเวลาที่ใช้ในการเกิดฟองอากาศ ถ้าค่าเวลาในการเกิดฟองอากาศมีค่าน้อยแสดงถึงค่าความไวในการทดสอบที่มากหรือมีความถี่ในการเกิดฟองน้ำที่ถี่มากขึ้น สำหรับกราฟเส้นตรงในแนวนอนจะแสดงค่าอัตราส่วนของแรงตึงผิวของของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ ( $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ) เมื่อแรงตึงผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการลอยตัวของฟองอากาศก็จะเพิ่มมากขึ้นตามอัตราที่แทบจะเป็นการเพิ่มอย่างทวีคูณ ที่ค่าความไวในการทดสอบสูงสุดจะได้ผลลัพธ์ของแรงตึงผิวที่ต่ำแหน่งต่ำที่สุด แรงตึงผิวของของเหลวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของของเหลวด้วย จากรูปที่ 2.15 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของแรงตึงผิวที่ของเหลวมีอุณหภูมิอยู่ที่อุณหภูมิห้องและใช้การทดสอบแบบการแช่



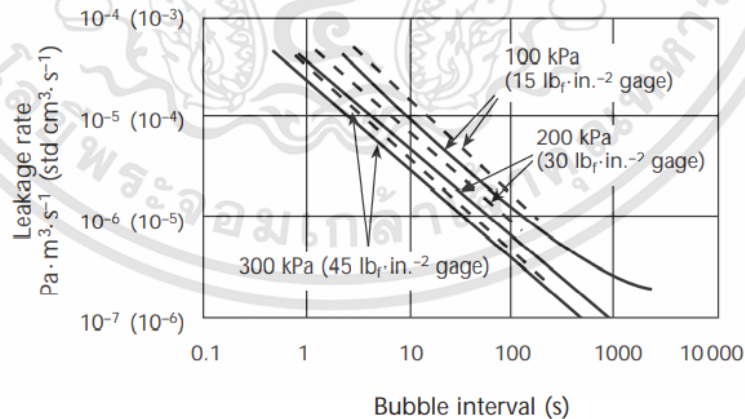
รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเวลาในการเดินฟองอากาศเทียบกับแรงตึงผิวที่อุณหภูมิของของเหลวที่มีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง [5]

### 2.4.13 ผลกระทบของความดันอากาศหรือความดันฮีเลียมบนการปล่อยฟองอากาศในของเหลวทดสอบที่แตกต่างกัน

รูปที่ 2.16-2.17 แสดงถึงแก๊สทดสอบอากาศและฮีเลียมด้วยความแตกต่างของความดันเกจที่ 100, 200 และ 300 kPa ด้วยของเหลวทดสอบในอ่างแช่ที่แตกต่างกัน การเลื่อนของเส้นโค้งไปทางซ้ายในรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงความไวในการทดสอบที่เพิ่มขึ้นโดยการเติมสารลดแรงตึงผิวในน้ำ



รูปที่ 2.16 ผลของความดันและแก๊สทดสอบที่ใช้น้ำอุณหภูมิ 25 °C [5]

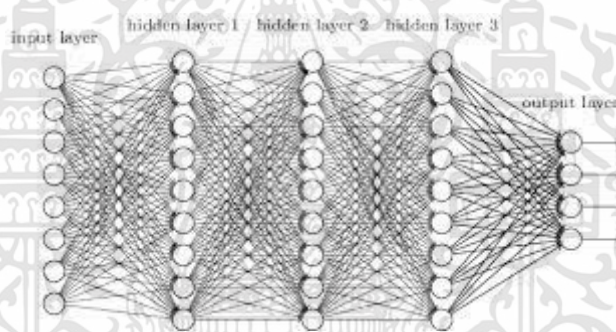


รูปที่ 2.17 ผลของความดันและแก๊สทดสอบที่ใช้น้ำเติมสารลดแรงตึงผิว 1-2 % อุณหภูมิ 25 °C [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning)

Deep Learning [6] หรือการเรียนรู้เชิงลึกคือการพัฒนาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ให้สามารถเลียนแบบการทำงานของมนุษย์ซึ่ง Deep Learning จะมีกระบวนการคิดคำนวณคล้ายกับระบบโครงข่ายประสาท(Neurons) ของสมองมนุษย์เรียกว่าโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network: NN) ซึ่งข้อดีของ Deep Learning คือเมื่อต้องการใช้งานอย่างเช่น การประมวลผลวิดีโอเพื่อตรวจจับรอยร้าวใน Oil Cooler การใช้งานไม่จำเป็นต้องให้ความรู้พื้นฐานกับระบบล่วงหน้า ความสามารถของ Deep Learning คือสามารถสร้างแบบจำลองและหาคำตอบได้ด้วยการนำ NN หลายๆ ชั้นเรียกว่า Hidden Layer มาใช้วิเคราะห์และหาคำตอบดังรูปที่ 2.15 ซึ่งคำว่า Deep Learning ก็มาจากการใช้ Neural Network มากกว่า 2 ชั้นเพื่อให้เกิดการเรียนรู้และสร้างแบบจำลองดังนั้นจึงเปรียบเทียบได้ว่าแต่ละชั้นของ Neural Network ยิ่งถูกใช้จำนวนมากในขั้นตอนการประมวลผลยิ่งทำให้มีโครงสร้างการเรียนรู้ที่ลึก (Deep) มากขึ้น ในการเรียนรู้เชิงลึกมีตัวดำเนินการที่สำคัญได้แก่ Max Pooling, Mean Pooling และ Convolution



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของ Deep Learning [6]

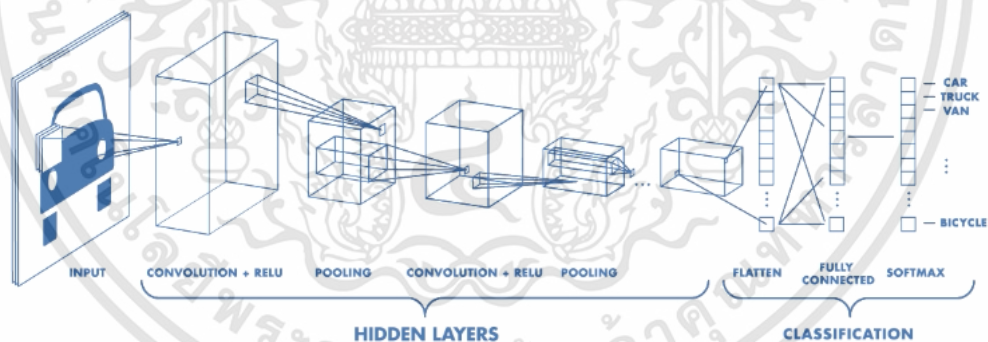
### 2.5.1 การทำ Max Pooling

เป็นการนำเอา Pooling Layer มาเทียบกับคุณลักษณะเพื่อให้ได้ภาพที่มีขนาดเล็กลง โดยการ Max Pooling [7] จะนำเอาค่าสูงสุดของแต่ละ Pixel ขณะที่ยกกับแผนผังคุณลักษณะและผลลัพธ์ที่ได้คือภาพจะมีขนาดเล็กลง

## 2.5.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network - CNN)

CNN เป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่เลียนแบบการมองเห็นของมนุษย์ในการแบ่งแยกคุณลักษณะ โดยปกติแล้ว CNN จะประกอบด้วย 3 ชั้น ได้แก่

1. ชั้น Convolutional เป็นการดำเนินการเพื่อสกัดเอาคุณลักษณะที่สำคัญออกมา ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากผ่านชั้นนี้จะได้แผนผังคุณลักษณะ
2. ชั้น Pooling เป็นชั้นที่คั่นกลางระหว่างชั้น Convolutional โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดขนาดของแผนผังคุณลักษณะที่ได้จากชั้น Convolutional และฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ Max Pooling และ Mean Pooling
3. ชั้น Fully Connected เป็นชั้นที่เชื่อมโยงระหว่างแผนผังคุณลักษณะและเอาต์พุตแบบสมบูร์ณ โดยประสาทเทียมทุกๆ ตัวที่อยู่ในชั้นสุดท้ายของแผนผังคุณลักษณะจะถูกนำไปเปลี่ยนรูป หรือเรียกว่า Flatten เพื่อส่งไปคำนวณต่อในชั้นถัดไป ซึ่งก็คือชั้นของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ Multilayer Perceptron (MLP) ดังนั้นแผนผังคุณลักษณะในชั้นสุดท้ายจึงเปรียบเสมือนข้อมูล Input ไปยัง Artificial Neural Network (ANN) ดังรูปที่ 2.19



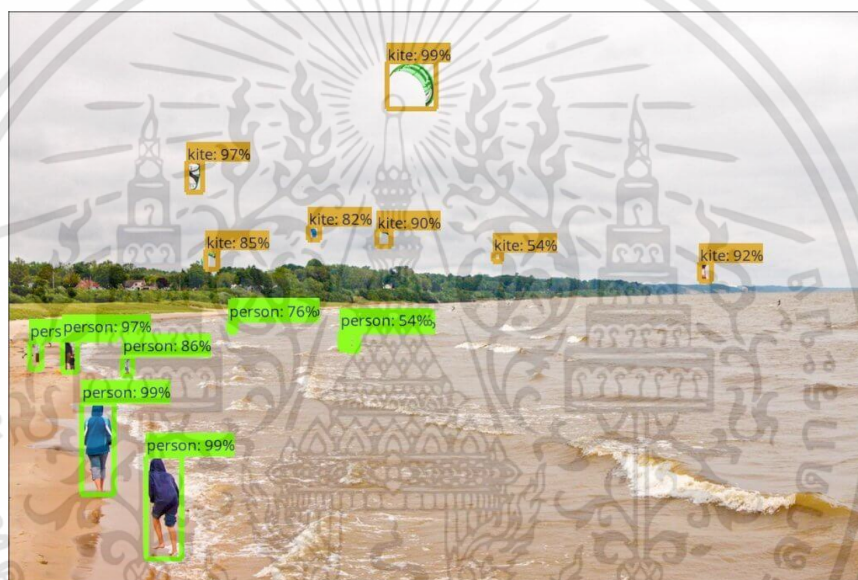
รูปที่ 2.19 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การตรวจจับวัตถุ (Object Detection)

การตรวจจับวัตถุ (Object Detection) [9] คือ เทคโนโลยีในทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้หลักการที่เกี่ยวข้องกับ Computer Vision และ Image Processing ที่ใช้ในงาน AI ตรวจจับวัตถุชนิดที่กำหนด เช่น มนุษย์ รถยนต์ อาคาร ที่อยู่ในรูปภาพ หรือวิดีโอ ซึ่งสามารถเจาะลึกลงไปได้อีกหลายแขนง เช่น การตรวจจับหน้าคน (Face Detection) การตรวจจับคนเดินถนน (Pedestrian Detection) และยังสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ใช้ในงานรักษาความปลอดภัยและรถยนต์ไร้คนขับ เป็นต้น

Object Detection โดยหลักการ สามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมได้แก่ การวาดกล่องรอบวัตถุ (Bounding Box) ดังรูปที่ 2.20 และการถมสีให้ทุก Pixel ของวัตถุนั้น (Segmentation) ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 การตรวจจับรูปภาพโดยการวาดกล่องวัตถุ [9]



รูปที่ 2.21 การตรวจจ็บบรูปภาพโดยใช้วิธีถมสีให้ทุก Pixel ของวัตถุนั้น [9]

## 2.7 ระบบการรู้จำวัตถุ (Object Recognition)

ระบบการรู้จำวัตถุ [10] หมายถึงกระบวนการในการระบุและตรวจจ็บบวัตถุภายในภาพ วิดีโอ หรือภาพนิ่ง ซึ่งความสามารถดังกล่าวทำให้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายรูปแบบ เช่น การใช้ การตรวจจ็บบการเคลื่อนไหวของใบหน้า ตรวจจ็บบตราสัญลักษณ์ หรือตัวอักษร ตัวอย่างของการใช้ ระบบการรู้จำวัตถุที่อยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น การนำภาพวัตถุมาค้นหาภาพที่ใกล้เคียงกันในระบบ สืบค้นของ Google เป็นต้น โดยอาศัยการสอนระบบโดยการเรียนรู้เชิงลึกและโครงข่ายประสาทเทียม ในการวิเคราะห์ภาพในแต่ละเฟรมแล้วนำไปใช้เปรียบเทียบกับชุดข้อมูลที่ระบุวัตถุชนิดเดียวกันและ คนละชนิดไว้จำนวนมาก ซึ่งวัตถุทั้งสองชนิดจะถูกนำมาใช้เพื่อให้ระบบสามารถทำการคาดเดาชนิด ของวัตถุที่ปรากฏอยู่บนภาพได้

## 2.8 กระบวนการสอนระบบการรู้จำวัตถุ

ในงานวิจัยอาศัยระบบการรู้จำวัตถุ YOLO (You Only Look Once) ซึ่งถูกพัฒนาโดย Redmon, Divvala, Girshick & Farhdi (2015) เป็น Real Time Object Detection Model มีความโดดเด่นเรื่องความเร็วและความถูกต้อง เป็นอัลกอริทึมที่นำแนวความคิดของการทำนายตำแหน่งและขนาดของกล่อง โดยมีหลักการทำงานคือ ถ้ามีรูปของวัตถุที่ได้ทำการเรียนรู้ไว้แล้วอยู่ในเฟรม YOLO จะพยายามสร้างกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบวัตถุนั้นเอาไว้ โดยหาจุดกึ่งกลางของวัตถุและทำนายชื่อวัตถุรวมถึงความน่าจะเป็นของวัตถุที่ได้ถูกเรียนรู้ด้วย โดยกระบวนการสอนประกอบด้วยขั้นตอนที่มีความจำเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

### 2.8.1 การถ่ายรูปภาพเพื่อนำไปประกอบการสอนระบบ

ภาพถ่ายที่ใช้ในการสอนระบบถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

1 ภาพถ่ายโดยธรรมชาติ หมายถึง ภาพถ่ายของวัตถุที่หาได้โดยไม่ต้องสร้างขึ้นมาหรือภาพตามอินเทอร์เน็ต ก็นับเป็นภาพถ่ายโดยธรรมชาติ

2 ภาพถ่ายโดยสังเคราะห์ หมายถึง ภาพถ่ายของวัตถุที่หาได้โดยการสร้างขึ้นมาและถูกควบคุมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ซึ่งอาจหมายถึงการกำหนด ตำแหน่งการถ่ายภาพที่ตกกระทบ และขนาดของวัตถุ

Pinto, Cox & DiCarlo (2008) [11] กล่าวถึงการสร้างชุดข้อมูลโดยใช้ภาพถ่ายโดยธรรมชาติแทนที่การสอนโดยภาพถ่ายโดยสังเคราะห์ เพราะบางครั้งการนำภาพถ่ายโดยสังเคราะห์มาใช้ในการสร้างชุดข้อมูลแม้จะใช้จำนวนภาพน้อยลงมาก แต่ก็ต้องแลกกับประสิทธิภาพในการใช้งานจริงที่อาจไม่ดีเท่าที่ควร เพราะในสถานการณ์จริงภาพที่ถูกแสดงบนจอแสดงผลผ่านกล้องนั้น แม้ว่าจะแสดงภาพของวัตถุเดียว แต่ตำแหน่งการยืน สภาพแสง หรือแม้กระทั่งความสูงของผู้ใช้งานระบบก็ส่งผลให้ภาพที่ได้นั้นมีความเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีที่สิ้นสุด

ดังนั้น การเลือกรูปภาพจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัดในการใช้งาน ซึ่งจะต้องวางแผนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบได้ตามที่ต้องการ

## 2.8.2 การกำหนดป้ายกำกับให้วัตถุบนภาพถ่าย (Image Annotations)

ในการสอบระบบ การกำหนดป้ายกำกับนั้นคือการติดป้ายบอกระบบว่าวัตถุที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้คือวัตถุอะไร เพื่อให้ระบบค้นหาแบบแผนบางอย่างในขอบเขตนั้นๆ และเป็นการเพิ่มข้อมูลอภิปันธุ์ (Metadata) ให้แก่ภาพนั้นๆ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลที่จำเป็นต่อการสอนใช้สอนระบบจำนวน 2 ชนิด คือ ชื่อของหมวดหมู่ของวัตถุและพิกัดตำแหน่งของกรอบแสดงขอบเขตของวัตถุ (Bounding Box) โดยในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ต้องทำด้วยมือในการกำหนดขอบเขตและระบุหมวดหมู่ของภาพทีละภาพ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ใช้ทรัพยากรมนุษย์และเวลามากที่สุดในการสร้างชุดข้อมูล



รูปที่ 2.22 แสดงการกำหนดป้ายกำกับให้วัตถุแต่ละหมวดหมู่บนรูปภาพด้วย LabelImg [12]

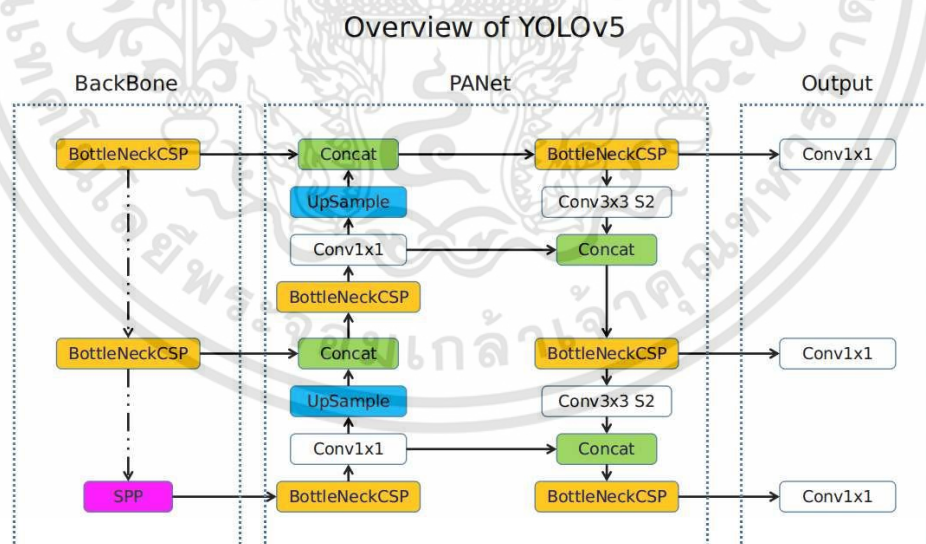
ขั้นตอนนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการระบุและตรวจจับวัตถุโดยตรงและต้องจัดทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากคอมพิวเตอร์ต้องค้นหาแบบแผนบางอย่างภายในขอบเขตที่ถูกกำหนดขึ้น ดังนั้นการกำหนดขอบเขตจึงต้องทำอย่างแม่นยำและให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการตรวจจับหรือนำไปสู่ความล้มเหลวในการสอนระบบ เช่น การกำหนดกรอบแสดงขอบเขตไม่กินขอบเขตของวัตถุที่ต้องการและไม่กินเข้าไปในส่วนของวัตถุมากเกินไป หรือภาพที่ถ่ายมานั้นเป็นภาพไม่เต็มของวัตถุ หากต้องการจะใช้ภาพดังกล่าวในการสอนระบบ ควรจะมีภาพประเภทเดียวกันจำนวนมากใช้ในการสอนระบบด้วยเช่นกัน ซึ่งเครื่องมือกำหนดป้ายกำกับมีหลากหลายให้เลือกใช้ตามความถนัด เช่น LabelLmg, RectLabel เป็นต้น

### 2.8.3 การสร้างชุดข้อมูลบนโครงข่ายประสาทเทียมดาร์คเน็ต

YOLO ถูกพัฒนาขึ้นบนแพลตฟอร์มดาร์คเน็ตซึ่งเป็นเฟรมเวิร์คสำหรับใช้สอนระบบ ปัญญาประดิษฐ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ดังนั้นในการสร้างชุดข้อมูลขึ้นมาใหม่สำหรับใช้งาน บน YOLO จึงจำเป็นต้องทำการสอนผ่านดาร์คเน็ตก่อนที่จะแปลงไฟล์สกุลดังกล่าวไปเป็นไฟล์สกุลอื่น ที่ต้องการ

### 2.9 ตัวแบบ YOLOv5

สถาปัตยกรรมของ YOLOv5 [7] จะคล้ายกับ YOLOv4 โดย YOLOv5 เป็นการตรวจจับวัตถุ แบบขั้นเดียว (Single State Object Detector) โดยจะมีส่วนสำคัญทั้งหมด 3 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ แแบ็คโบน (Backbone) โดยใน YOLOv5 จะใช้ซีเอสพี (Cross Stage Partial Network – CSP) เป็น แแบ็คโบนซึ่งทำหน้าที่ในการทำสกัดคุณลักษณะของภาพ ตัวแบบส่วนคอ (Model Neck) เป็นเลเยอร์ ที่อยู่ระหว่างแบ็คโบนและหัวที่ใช้ในการสกัดคุณลักษณะต่างๆ ของสถานะ (State) ที่ต่างกันภายใน แแบ็คโบน ซึ่งช่วยในการจัดการกับภาพที่มีสเกลของภาพที่ต่างกันได้ดีมากยิ่งขึ้น เช่น พีเจอร์พีรามิด เน็ตเวิร์ค (Feature Pyramid Network) ตัวแบบส่วนหัว (Model Head) เป็นส่วนสุดท้ายที่ใช้ในการตรวจจับวัตถุและใช้ในการทำนายภาพในกล่องล้อมรอบ (Bounding Box) รวมถึงใช้ในคำนวณ ค่าความมั่นใจ (Confidence Score)

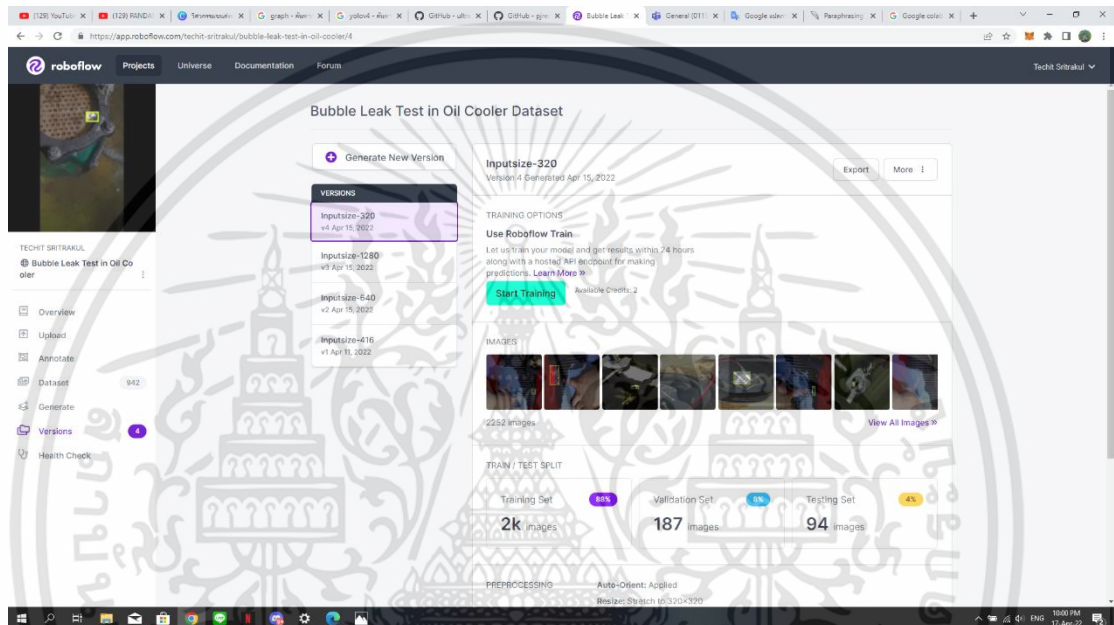


รูปที่ 2.23 สถาปัตยกรรมของ YOLOv5 [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 Roboflow

Roboflow [14] เป็นสตาร์ทอัพที่ให้บริการเครื่องมือสำหรับการทำการกำหนดป้ายกำกับให้วัตถุบนภาพถ่าย (Image Annotation) ที่เราสามารถแบ่งงานกับคนในกลุ่ม เพื่อมาเตรียมชุดข้อมูลของงานในกลุ่ม Computer Vision ได้พร้อมกันหลายคน นอกจากสามารถทำงานร่วมกันแล้ว ยังมีหมวดหมู่ในการแต่งรูปภาพ (Image Augmentation) และเครื่องมือที่ใช้ส่งออกชุดข้อมูล ซึ่งอำนวยความสะดวกและใช้งานง่าย



รูปที่ 2.24 หน้าต่างโปรแกรม Roboflow [15]

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัย บทความ และตำราต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้นำแนวทางมาประยุกต์ใช้ เพื่อทำการศึกษาเพิ่มจากงานวิจัย ดังนี้

ศุภพงศ์ สกกุลคุ , จุฑามาศ ภูยวงค์ , สันติ ทินตะนัย บุญทรัพย์ ไวกำ และ ธนพล ตั้งชูพงศ์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับการรู้จำอาหารไทยผ่านไลน์แชทบอท โดยผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียมในการจำแนกอาหารไทยระหว่างตัวแบบ YOLOv5 และ Faster RCNN [7] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการฝึกสอนตัวแบบตรวจจับอาหารไทยด้วยรูปภาพอาหารไทยจำนวนทั้งสิ้น 1,282 ภาพ แบ่งเป็น 10 คลาส ได้แก่ ไข่ตุ๋น ส้มตำ น้ำพริก ราดหน้า สุกี้ ผัดไทย ข้าวไข่เจียว ข้าวกะเพรา ยำและโจ๊ก จากการทดลองพบว่า YOLOv5 ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่า Faster RCNN ประมาณ 2 เท่า และในด้านความถูกต้อง YOLOv5 ให้ค่า Average Precision (AP) ที่ค่า IoU เป็น 0.5 เท่ากับ 0.88 ซึ่งมากกว่า Faster RCNN ที่ให้ค่า AP เท่ากับ 0.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงาน

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงาน ซึ่งจะเริ่มจากการเตรียมข้อมูล การสร้างและฝึกแบบจำลองโดยใช้อัลกอริทึม YOLOv5 และการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

### 3.2 การเตรียมข้อมูล

ขอบเขตของงานวิจัยคือการสร้างแบบจำลองเพื่อเรียนรู้ฟองอากาศที่เกิดจากการทดสอบการรั่วไหลของ Oil Cooler, Air Condition Coil และ Automotive Coil ด้วยวิธีการทดสอบการรั่วไหลด้วยฟองอากาศโดยเก็บข้อมูลจากการบันทึกวิดีโอจากการทดสอบการรั่วไหลของ Oil Cooler ณ โรงงานมักกะสัน และการบันทึกวิดีโอการทดสอบการรั่วไหลของ Air Condition Coil และ Automotive Coil จาก Search Engine โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. บันทึกวิดีโอการทดสอบการรั่วไหลใน Oil Cooler ณ โรงงานมักกะสัน และบันทึกวิดีโอการทดสอบการรั่วไหลของ Air Condition Coil และ Automotive Coil จาก Search Engine
2. ใช้โปรแกรมแปลงไฟล์วิดีโอเป็นไฟล์รูปภาพ (Free Video to JPG Converter) ซึ่งจะแปลงไฟล์วิดีโอเป็นไฟล์รูปภาพทุกๆ 1 วินาทีของความยาววิดีโอ
3. เลือกรูปภาพซึ่งสามารถสังเกตเห็นฟองอากาศได้
4. ใช้โปรแกรม Labellmg สร้าง Image Annotation ไปใช้เพื่อในการสร้างชุดข้อมูลโดยการกำหนดหมวดหมู่ (Class) ซึ่งได้กำหนดชื่อว่า Bubble จากขั้นตอนนี้จะได้ชุดข้อมูลรูปภาพ 942 รูป
5. ใช้โปรแกรม Roboflow เพิ่มรูปภาพและชุดข้อมูลด้วยวิธีการแต่งรูปภาพ (Image Augmentation) 3 วิธี ได้แก่ การกลับภาพตามแนวนอนและแนวตั้ง การปรับค่าความสว่างของรูปภาพ และการย่อขนาดรูปภาพ ซึ่งจะได้ชุดข้อมูลรูปภาพทั้งหมด 2,252 รูปภาพ
6. แบ่งชุดข้อมูลรูปภาพออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ชุดข้อมูลฝึกสอน (Training) 2,000 รูปภาพ ชุดข้อมูลทดสอบ (Validation) 187 รูปภาพ และชุดข้อมูลตรวจสอบ (Testing) 94 รูปภาพ ซึ่งชุดข้อมูลทดสอบและชุดข้อมูลตรวจสอบไม่ได้ถูกเพิ่มภาพด้วยวิธีการแต่งรูปภาพ

### 3.3 การสร้างและฝึกแบบจำลอง

ปริิณญาณินพณ์นี้ได้เลือกใช้ Library PyTorch ซึ่งเป็น Library สำหรับการสร้างแบบจำลอง โดยใช้อัลกอริทึม YOLOv5 ในการเรียนรู้รูปภาพจากชุดข้อมูลที่ได้เตรียมไว้ ซึ่งขนาด Input Size จะถูกปรับให้เป็น 640 x 640 พิกเซล จากนั้นนำมาฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบ (Validation) เพื่อวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองในแต่ละอีพอคซ์ (Epoch) โดยกำหนดเทอร์ชโฮลด์ (Threshold) เท่ากับ 0.2 และค่า IoU เท่ากับ 0.50 ฝึกสอนทั้งหมด 100 อีพอคซ์ จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ในแต่ละอีพอคซ์ มาเปรียบเทียบกับกัน แล้วเลือกแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจากอีพอคซ์ที่ได้คะแนนสูงสุด ออกมา โดยวัดจากค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ย (Average Precision) ของชุดข้อมูลทดสอบ (Validation)

### 3.4 การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง [16] ในปริิณญาณินพณ์นี้ใช้การวัดค่าความเที่ยงตรง (Precision) เป็นค่าที่ได้จากค่าที่แบบจำลองทายเป็นหมวดหมู่ที่กำลังพิจารณา ถูกต้องเทียบกับค่าที่แบบจำลองทำนายว่าเป็นหมวดหมู่ที่กำลังพิจารณาทั้งถูกต้องและผิด ค่าความไว (Sensitivity หรือ Recall) เป็นค่าที่ได้จากค่าที่แบบจำลองทายเป็นหมวดหมู่ที่กำลังพิจารณาถูกต้อง เทียบกับค่าเหตุการณ์จริงเป็นหมวดหมู่ที่กำลังพิจารณาทั้งถูกต้องและผิด มีสูตรการคำนวณดังสมการที่ 3-1 และ 3-2 ดังนี้

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3-1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3-2)$$

โดยที่

TP (True Positive) คือ จำนวนข้อมูลที่พยากรณ์ถูกต้องกับข้อมูลจริงในหมวดหมู่ที่กำลังพิจารณา

TN (True Negative) คือ จำนวนข้อมูลที่พยากรณ์ถูกต้องกับข้อมูลจริงในหมวดหมู่ที่ไม่ได้พิจารณา

FP (False Positive) คือ จำนวนข้อมูลที่พยากรณ์ผิดเป็นหมวดหมู่ที่กำลังพิจารณา

FN (False Negative) คือ จำนวนข้อมูลที่พยากรณ์ผิดเป็นหมวดหมู่ที่ไม่ได้พิจารณา

ค่าคะแนน F1 (F1-Score) เป็นค่าเฉลี่ยของค่าความเที่ยงตรงกับค่าความไวโดยเป็นค่าเฉลี่ยแบบฮาร์โมนิก และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ย (Average Precision) มีสูตรการคำนวณดังสมการที่ 3-3 และ 3-4 ดังนี้

$$F_1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (3-3)$$

$$Average\ Precision = \text{the area of precision - recall curve above} \quad (3-4)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

## 4.1 บทนำ

หลังจากที่ได้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ในการเกิดฟองอากาศของ Oil Cooler และได้ศึกษาวิธีการฝึกสอนแบบจำลองผ่านอัลกอริทึม YOLOv5 ใน Google Colab แล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงผลลัพธ์ของการฝึกสอนแบบจำลอง ผลลัพธ์ของการทดสอบแบบจำลอง และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเที่ยงตรง ค่าความไว และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ยเทียบกับจำนวนอีพ็อกซ์ในการฝึกสอน

## 4.2 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนและทดสอบแบบจำลอง

### 4.2.1 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนแบบจำลอง

```
Copy of Roboflow-Train-YOLOv5
File Edit View Insert Runtime Tools Help All changes saved
RAM 100%
Disk 39.41 GB available
Editing
+ Code + Text
Files
class      Images  Targets  p      R      mAP@.5  mAP@.5-.95  100%  6/6  [00:04:00:00]
all        187     189      0.849  0.804  0.833    0.391
Epoch 96/99  gpu_mem 4.526  0.03103  0.009189  0  0.04022  17  640: 100% 124/124 [01:49:00:00, 1.14it/s]
Class      Images  Targets  p      R      mAP@.5  mAP@.5-.95  100%  6/6  [00:04:00:00, 1.40it/s]
all        187     189      0.879  0.772  0.827    0.372
Epoch 97/99  gpu_mem 4.526  0.03132  0.008918  0  0.04026  9  640: 100% 124/124 [01:49:00:00, 1.13it/s]
Class      Images  Targets  p      R      mAP@.5  mAP@.5-.95  100%  6/6  [00:04:00:00, 1.41it/s]
all        187     189      0.855  0.783  0.842    0.391
Epoch 98/99  gpu_mem 4.526  0.0312  0.009283  0  0.04049  9  640: 100% 124/124 [01:49:00:00, 1.13it/s]
Class      Images  Targets  p      R      mAP@.5  mAP@.5-.95  100%  6/6  [00:04:00:00, 1.40it/s]
all        187     189      0.866  0.767  0.843    0.374
Epoch 99/99  gpu_mem 4.526  0.03061  0.008815  0  0.03943  12  640: 100% 124/124 [01:49:00:00, 1.13it/s]
Class      Images  Targets  p      R      mAP@.5  mAP@.5-.95  100%  6/6  [00:05:00:00, 1.02it/s]
all        187     189      0.889  0.804  0.855    0.394
Optimizer stripped from runs/train/yolov5s_results/weights/last.pt, 14.8MB
Optimizer stripped from runs/train/yolov5s_results/weights/best.pt, 14.8MB
100 epochs completed in 3.101 hours.
CPU times: user 1min 43s, sys: 16.1 s, total: 1min 59s
Wall time: 3h 10min 17s
Evaluate Custom YOLOv5 Detector Performance
3h 10m 17s completed at 5:15 PM
```

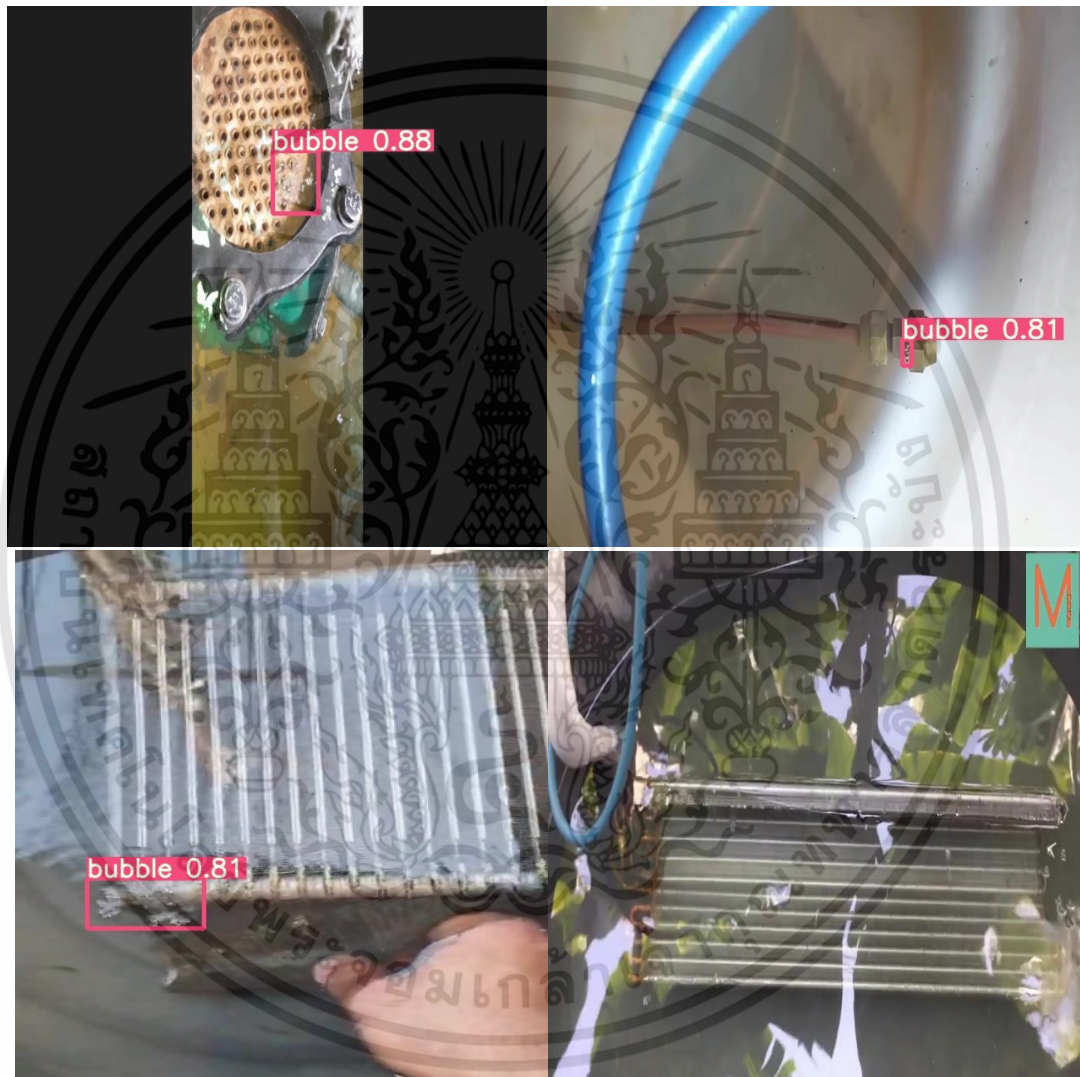
รูปที่ 4.1 แสดงผลลัพธ์ของการฝึกสอนแบบจำลองบนกูเกิลโคแล็บ

จากรูปที่ 4.1 ผลลัพธ์จากการฝึกสอนแบบจำลอง YOLOv5 ด้วยชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบฟองอากาศ 2,252 ภาพ บนกูเกิลโคแล็บ (Google Colab) ฝึกสอนโดยใช้ GPU (NVIDIA Tesla K80) อธิบายได้ว่าแบบจำลอง YOLOv5 ใช้เวลาฝึกสอนแบบจำลองทั้งหมด 3 ชั่วโมง 10 นาที 17 วินาที แบบจำลองมีค่าความเที่ยงตรง (Precision) เท่ากับ 0.889 ค่าความไว (Recall) เท่ากับ 0.804 ค่าคะแนน F-1 (F-1 score) เท่ากับ 0.844 และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ย (Average Precision) เท่ากับ 0.855

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลลัพธ์ของการทดสอบแบบจำลอง

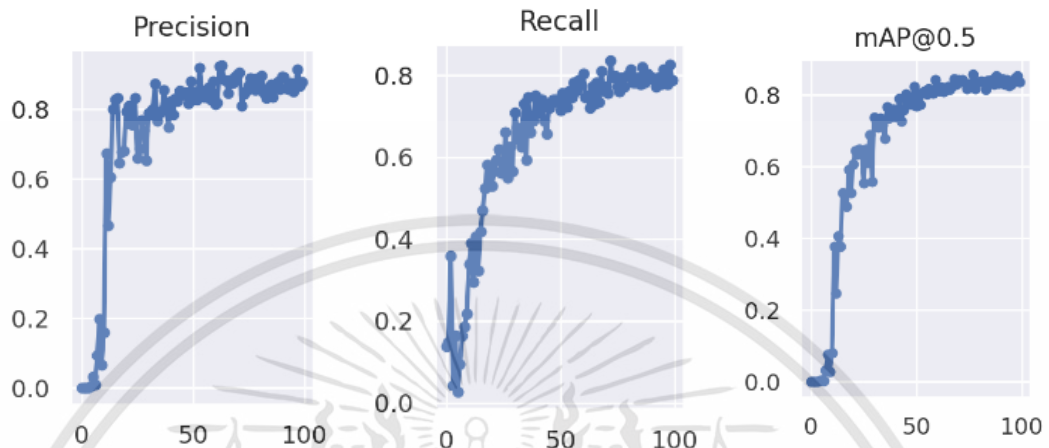
จากการนำแบบจำลองที่ผ่านการฝึกสอนมาตรวจสอบชุดข้อมูลตรวจสอบ (Testing) ทั้งหมด 94 รูปภาพซึ่งรูปภาพทั้งหมดมีการรั่วไหลที่มีฟองอากาศทั้งหมด ผลการทดลองพบว่าสามารถตรวจจับได้ 79 รูปภาพจาก 94 รูปภาพ คิดเป็น 84.04% ของรูปภาพทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ยจากผลลัพธ์ของการฝึกสอนแบบจำลอง



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างรูปจากการตรวจสอบของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเที่ยงตรง ค่าความไว และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ยเทียบกับจำนวนอีพอคซ์ในการฝึกสอน



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเที่ยงตรง ค่าความไว และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ยเทียบกับจำนวนอีพอคซ์ในการฝึกสอน

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเที่ยงตรง ค่าความไว และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ยเทียบกับจำนวนอีพอคซ์ในการฝึกสอนพบว่า ค่าความเที่ยงตรง ค่าความไว และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ย มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนอีพอคซ์ในการฝึกสอนเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อจำนวนอีพอคซ์เท่ากับ 50 จนถึงสิ้นสุดการฝึกฝนที่อีพอคซ์เท่ากับ 100

## 4.4 การคำนวณเพื่อหาอัตราการรั่วไหลของ Oil Cooler

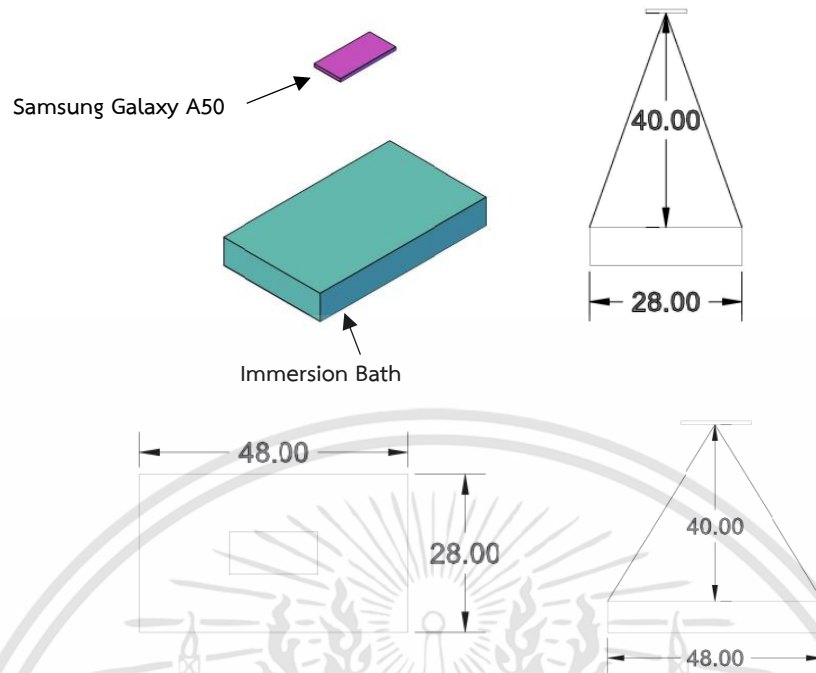
### 4.4.1 การคำนวณหาขนาดกลุ่มฟองอากาศจากรูปภาพ

ทางคณะได้จัดทำการศึกษาทดลองโดยง่ายเพื่อหาขนาดของรูปลุ่มฟองอากาศในหน่วย Pixel เทียบกับขนาดจริง โดยได้ออกแบบการทดลองดังนี้

เตรียมอ่างน้ำที่ใส่น้ำเอาไว้ภายใน โดยให้ความสูงของน้ำมีค่ามากกว่าขนาดของสายยางที่ใช้ในการทดสอบ นำอุปกรณ์อัดอากาศมาต่อเข้ากับสายยาง และนำดินน้ำมันมาอุดปลายสายยางไว้ เพื่อให้การรั่วไหลของอากาศมีค่าต่ำและทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กตามสมมติฐานของงานวิจัยนี้ จากนั้นนำกล้องที่ใช้ในการอัดวิดีโอมาถ่ายฟองอากาศที่ด้านบน ซึ่งตั้งไว้สูงจากระดับของผิวน้ำในอ่าง 40 เซนติเมตร ทำการวัดพื้นที่ที่กล้องสามารถถ่ายได้ที่ระดับเดียวกันกับผิวน้ำ จะได้พื้นที่มีความยาวเท่ากับ 48 เซนติเมตร และมีความกว้าง 28 เซนติเมตร จากนั้นเปิดเครื่องอัดอากาศทำการถ่ายวิดีโอของฟองอากาศที่เกิดขึ้น นำวิดีโอที่ได้มาแปลงเป็นไฟล์ภาพโดยมีความละเอียด Pixel เท่าเดิม และแบ่งภาพทุกๆ 1 วินาที เพื่อหาภาพที่เกิดฟองอากาศได้ชัดเจนมากที่สุด และนำมาคำนวณต่อเพื่อหาขนาดของฟองอากาศจากขนาดของ Pixel ดังนี้

จากภาพที่ได้ มีความละเอียดของภาพอยู่ที่ 1920 x 1080 Pixel และพื้นที่ของภาพที่กล้องสามารถบันทึกได้ที่ระดับเดียวกันกับผิวน้ำมีค่า 48 x 28 ตารางเซนติเมตร จากกฎของ สามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาอัตราส่วนของตารางเซนติเมตรต่อตาราง Pixel มีค่าเท่ากับ 1: 40 ดังนั้น ทุกๆ 1 ตารางเซนติเมตรจะมีขนาดเท่ากับ 40 ตาราง Pixel

หลังจากที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดภาพจริงกับขนาดของ Pixel แล้ว จะทำการหาขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้น ด้วยโปรแกรม Photoshop โดยทำการหาขนาด Pixel ของฟองอากาศจากภาพที่ได้ทำการแปลงมาจากวิดีโอจะได้ขนาดของฟองน้ำโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 26 x 27 ตาราง Pixel โดยวัดที่ตำแหน่งที่ยาวที่สุดของทั้งแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งสามารถแปลงเป็นขนาดภาพจริงได้เท่ากับ 0.674 x 0.675 ตารางเซนติเมตร เนื่องจากฟองอากาศมีลักษณะคล้ายทรงกลม จึงสามารถประมาณได้ว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.675 เซนติเมตร ทำการยืนยันความถูกต้องของผลการทดลองด้วยวิธีการคำนวณตัวเลขทางฟิสิกส์ และค่าที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าที่มาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายวิดีโอ ซึ่งอุปกรณ์ที่เราใช้คือกล้องหลังโทรศัพท์ Samsung Galaxy A50 มีความคมชัด 25 MP, Focal Range (at Image Size = 35mm) = 27.3 mm



รูปที่ 4.4 แบบจำลองการทดลองเพื่อหาขนาดของฟองอากาศ (หน่วยเซนติเมตร)

จากสมการกำลังขยาย

$$m = \frac{I}{O} = \frac{s'}{s} = \frac{f}{s-f} = \frac{s'-f}{f} \quad (4-1)$$

เลือกใช้สมการ

$$\frac{I}{O} = \frac{f}{s-f} \quad (4-2)$$

แทนค่า  $I = 35 \text{ mm}$   $f = 27.3 \text{ mm}$   $s = 40 \text{ cm}$

จะได้  $O = 47.78 \text{ cm}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริงที่ 48 เซนติเมตร

#### 4.4.2 การคำนวณอัตราการรั่วไหลเพื่อหาระยะเวลาในการสังเกตฟองอากาศ

สมการที่เกี่ยวข้อง

$$P = P_a + \rho gh + \frac{2\sigma}{r} \quad (4-3)$$

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \rho g = 2\pi r \sigma \quad (4-4)$$

$$Q = \Delta P * \frac{V}{t} \quad (4-5)$$

โดยที่  $\rho = 1,000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Delta P = 100 \text{ kPa}$ ,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  และ  $\sigma = 0.073 \text{ N/m}$

จากการเก็บข้อมูลจากชุดข้อมูลพบว่ากลุ่มฟองอากาศมีขนาดที่เล็กที่สุดมีขนาดเท่ากับ  $12 \times 14 \text{ pixel}$  กลุ่มฟองอากาศมีขนาดใหญ่ที่สุดมีขนาดเท่ากับ  $100 \times 240 \text{ pixel}$  และกลุ่มฟองอากาศมีขนาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $70 \times 110 \text{ pixel}$  ซึ่งจะคำนวณหาขนาดจริงในหน่วยเมตรของกลุ่มฟองอากาศด้วยวิธีการแปลงหน่วยของความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองเพื่อง่ายต่อการคำนวณดังนี้

1. กลุ่มฟองอากาศขนาดเล็กที่สุดมีขนาดเท่ากับ  $0.0030 \times 0.0035 \text{ m}$
2. กลุ่มฟองอากาศขนาดใหญ่ที่สุดมีขนาดเท่ากับ  $0.0250 \times 0.0600 \text{ m}$
3. กลุ่มฟองอากาศขนาดโดยเฉลี่ยมีขนาดเท่ากับ  $0.0175 \times 0.0275 \text{ m}$

เราจะสมมติว่า กลุ่มฟองอากาศสามารถสังเกตเห็นได้ประมาณ 1 วินาที และ  $\Delta P = 100 \text{ kPa}$  และ  $V = A \cdot h$  โดยที่  $h = 0.001 \text{ m}$  แทนค่าในสมการที่ 4-5 เพื่อหาอัตราการรั่วไหล หรือ  $Q$  ของกลุ่มฟองอากาศแต่ละขนาดได้ดังนี้

$$Q_{small} = 100 \times 10^3 (0.0030 \times 0.0035 \times 0.001) = 1.05 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

ในทำนองเดียวกันอัตราการรั่วไหลของกลุ่มฟองอากาศขนาดใหญ่สุดมีค่าเท่ากับ  $0.15 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  และอัตราการรั่วไหลของกลุ่มฟองอากาศขนาดโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ  $0.048 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ซึ่งอัตราการรั่วไหลของกลุ่มฟองอากาศ 3 ขนาด อยู่ในค่าเหมาะสมสำหรับการทดสอบด้วยการแช่ (Bhosale P.P. et al. (2017) [17] ค่าอัตราการรั่วไหลที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบด้วยการแช่อยู่ที่  $10^{-4} - 10 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

โดยทั่วไปแล้วเราจะไม่สามารถรู้ได้ว่าอัตราการรั่วไหลของอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบมีค่าเท่าไร ดังนั้นหากอัตราการรั่วไหลมีค่าต่ำถึง  $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  จะใช้เวลาประมาณ 17.5 นาที ในสังเกตเห็นกลุ่มฟองอากาศขนาดเล็กที่สุดที่ออกมาจากรอยรั่วครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปจะคำนวณหา  $P_{\min}$  ที่ต้องใช้ในการอัดความดันเพื่อทดสอบด้วยการแช่ โดยกำหนดให้ ปริมาตรของฟองอากาศมีค่าเท่ากับกลุ่มฟองอากาศที่ขนาดเล็กที่สุด ( $V = A \cdot h$ ) แทนค่าในสมการที่ 4-4 จะได้ดังนี้

$$(0.0030 \times 0.0035 \times 0.001)(1,000)(9.81) = 2\pi r(0.073)$$

คำนวณแล้วจะได้รัศมีรอยรั่ว ( $r$ ) เท่ากับ  $2.24 \times 10^{-4}$  เมตร หรือ 0.24 mm นำค่า  $r$  ที่ได้มา คำนวณหา  $P_{\min}$  โดยที่จุ่มอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบลึก 0.3 เมตร แทนค่าในสมการที่ 4-3 จะได้ดังนี้

$$100 \times 10^3 + (1,000 \times 9.81 \times 0.3) + \frac{2 \times 0.073}{2.24 \times 10^{-4}} = 103.59 \text{ kPa}$$

ดังนั้นจะต้องใช้ความดันมากกว่า 103.59 kPa เพื่อใช้ในการทดสอบด้วยการแช่ ถ้าหากต้องการความไวในการทดสอบที่มากขึ้น ต้องเพิ่มความดันในการทดสอบให้มีค่าสูงขึ้น ในกรณีนี้เราจะใช้ความดันที่ 203.53 kPa ( $\Delta P = 100 \text{ kPa}$  เพื่อจ่ายต่อการคำนวณ)

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 บทนำ

เมื่อทราบถึงผลการทดสอบแบบจำลองแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดลอง ปัญหาที่เกิดขึ้น และข้อเสนอแนะในการพัฒนาการตรวจสอบฟองอากาศให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไป

### 5.2 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า ผลลัพธ์จากการฝึกสอนแบบจำลอง YOLOv5 ด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน และทดสอบฟองอากาศ 2,252 ภาพ บนกูเกิลโคแล็บ (Google Colab) ฝึกสอนโดยใช้ GPU (NVIDIA Tesla K80) อธิบายได้ว่าแบบจำลอง YOLOv5 ใช้เวลาฝึกสอนแบบจำลองทั้งหมด 3 ชั่วโมง 10 นาที 17 วินาที แบบจำลองมีค่าความเที่ยงตรง (Precision) เท่ากับ 0.889 ค่าความไว (Recall) เท่ากับ 0.804 ค่าคะแนน F-1 (F-1 score) เท่ากับ 0.844 และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ย (Average Precision) เท่ากับ 0.855 ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเที่ยงตรง ค่าความไว และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ยเทียบกับจำนวนอีพอคซ์ในการฝึกสอนพบว่า ค่าความเที่ยงตรง ค่าความไว และค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ย มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนอีพอคซ์ในการฝึกสอนเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อจำนวนอีพอคซ์เท่ากับ 50 จนถึงสิ้นสุดการฝึกฝนที่อีพอคซ์เท่ากับ 100 จากนั้นนำแบบจำลองที่ผ่านการฝึกสอนมาตรวจสอบชุดข้อมูลตรวจสอบทั้งหมด 94 รูปภาพ โดยรูปภาพทั้งหมดมีการรั่วไหลที่มีฟองอากาศทั้งหมด ผลการทดลองพบว่าสามารถตรวจจับได้ 79 รูปภาพ จาก 94 รูปภาพ คิดเป็น 84.04% ของรูปภาพทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ยจากผลลัพธ์ของการฝึกสอนแบบจำลอง

### 5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้น

5.3.1 แบบจำลองแสดงค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ยมีค่าน้อยเกินไปไม่ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากขีดจำกัดด้านชุดข้อมูล และ ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง

5.3.2 ชุดข้อมูลของ Oil Cooler มีไม่หลากหลายเนื่องจากมีจำนวนของ Oil Cooler ที่เกิดความเสียหายมีจำนวนน้อย ส่งผลให้ชุดข้อมูลเกี่ยวกับ Oil Cooler มีจำกัด

5.3.3 Google Colab จำกัดในการ Runtime ด้วย GPU ไม่สามารถฝึกฝนแบบจำลองได้เกิน 8 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 แบบจำลองนี้ควรได้รับการฝึกสอนด้วยจำนวนอีพอคซ์เท่ากับ 50-100 เพื่อให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงสุดและใช้เวลาได้อย่างเหมาะสมในการฝึกฝนใน Google Colab

5.4.2 การลด Input Size ของแบบจำลอง YOLOv5 สามารถลดเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนแบบจำลองได้ แต่ประสิทธิภาพของแบบจำลองจะลดลง



## เอกสารอ้างอิง

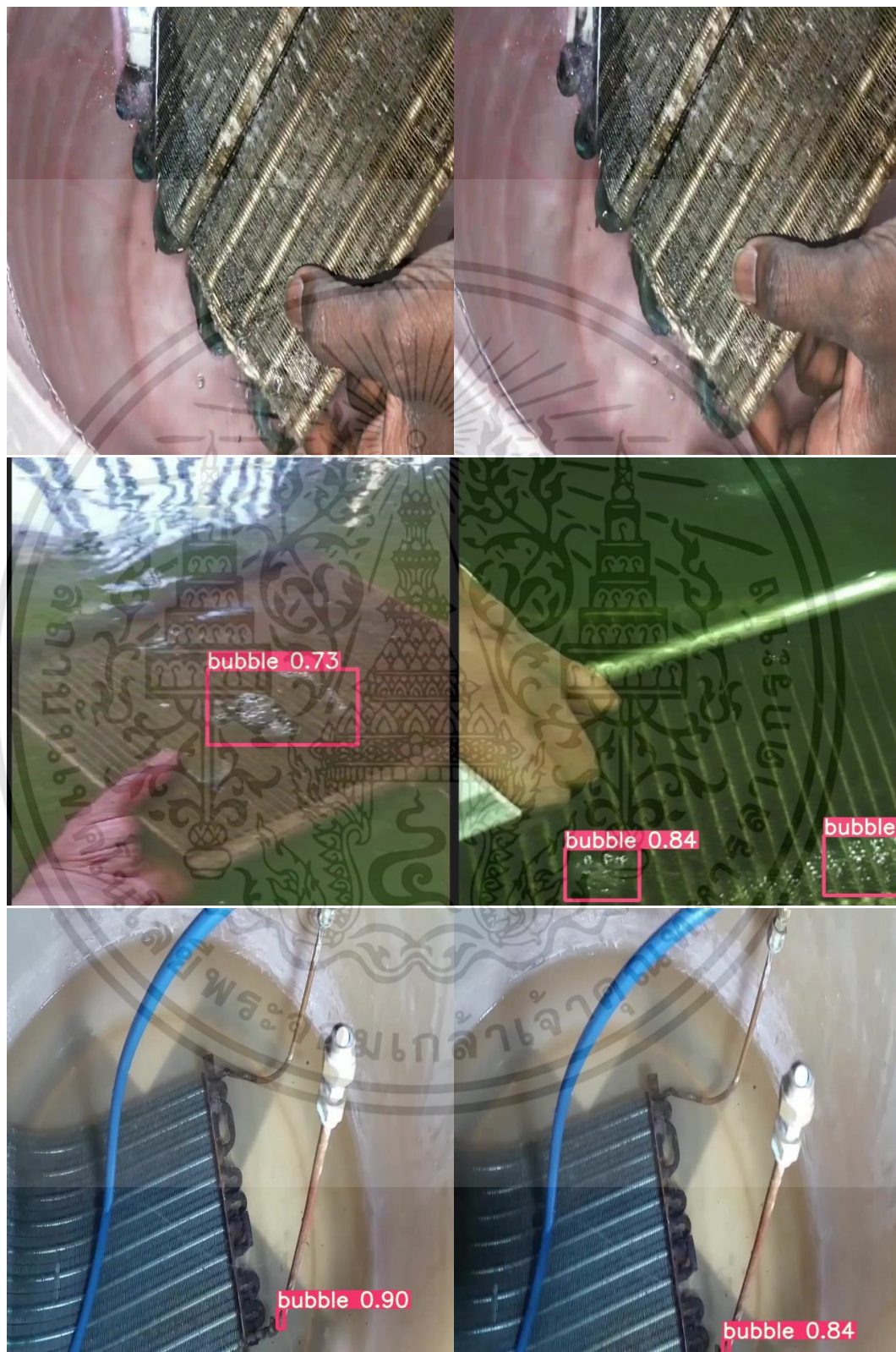
- [1] บริษัท คินโซคุ พรีซิชั่น จำกัด. (ม.ป.ป.). **ออยคูลเลอร์ (Oil Cooler) คืออะไร มารู้จักกัน.** สืบค้น 1 กันยายน 2564, จาก <https://kinzoku-precision.com/ออยคูลเลอร์oil-cooler-คืออะไร-มา/>
- [2] **Oil Cooler.** [Image]. (n.d.). Retrieved from <https://thai.alibaba.com/product-detail/Original-nta855-diesel-engine-parts-3052210-60744993153.html>
- [3] Fluid Dynamics Pty. Ltd. (n.d.). **Six Causes of Heat Exchanger Tube Failure.** Retrieved from <https://www.fluidynamics.com.au/case-studies-1/six-causes-of-heat-exchanger-tube-failure>
- [4] Brian, S. (2015). **3 Test for an Air Conditioner Freon Leak.** Retrieved from <https://trusthomesense.com/blog/3-tests-for-air-conditioner-refrigerant-leaks/>
- [5] Charles N. Jackson, Jr, Charles N. Sherlock, Patrick O. Moore. (2013). **Nondestructive testing handbook volume1** (3<sup>rd</sup> ed.). United States: American Society for Nondestructive Testing
- [6] นพรุจ พัฒนสาร และ ณัฐภูมิ ศรีวิบูลย์. (2563). การประมวลผลภาพสำหรับการจำแนกคุณภาพมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ โดยการจำลองการมองเห็นของมนุษย์ด้วยวิธีการเรียนรู้เชิงลึก. **วารสารวิทยาการและเทคโนโลยีสารสนเทศ, 10(1), 24-29.** สืบค้นจาก <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/JIST/article/download/234447/163970/>
- [7] ศุภพงศ์ สกฤต, จุฑามาศ ภูยวงศ์ และ สันติ ทินตะนัย. (2564). การรู้จำอาหารไทยบนไลน์ แชนบอทด้วย YoloV5 และ Faster RCNN. **การประชุมวิชาการระดับชาติด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ, 17, 366-372.** สืบค้นจาก <https://tdc.thailis.or.th/tdc/>
- [8] Natthawat, P. (2018). **Convolution Neural Network (CNN) คืออะไร.** [Image] Retrieved from <https://medium.com/@natthawatphongchit/มาลองดูวิธีการคิดของ-cnn-กัน-e3f5d73eebaa>
- [9] Surapong, K. (2020). **What is object detection.** Retrieved from <https://www.bualabs.com/archives/3453/what-is-object-detection-tutorial-tensorflow-js-build-object-detection-machine-learning-coco-ssd-tfjs-ep-8/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

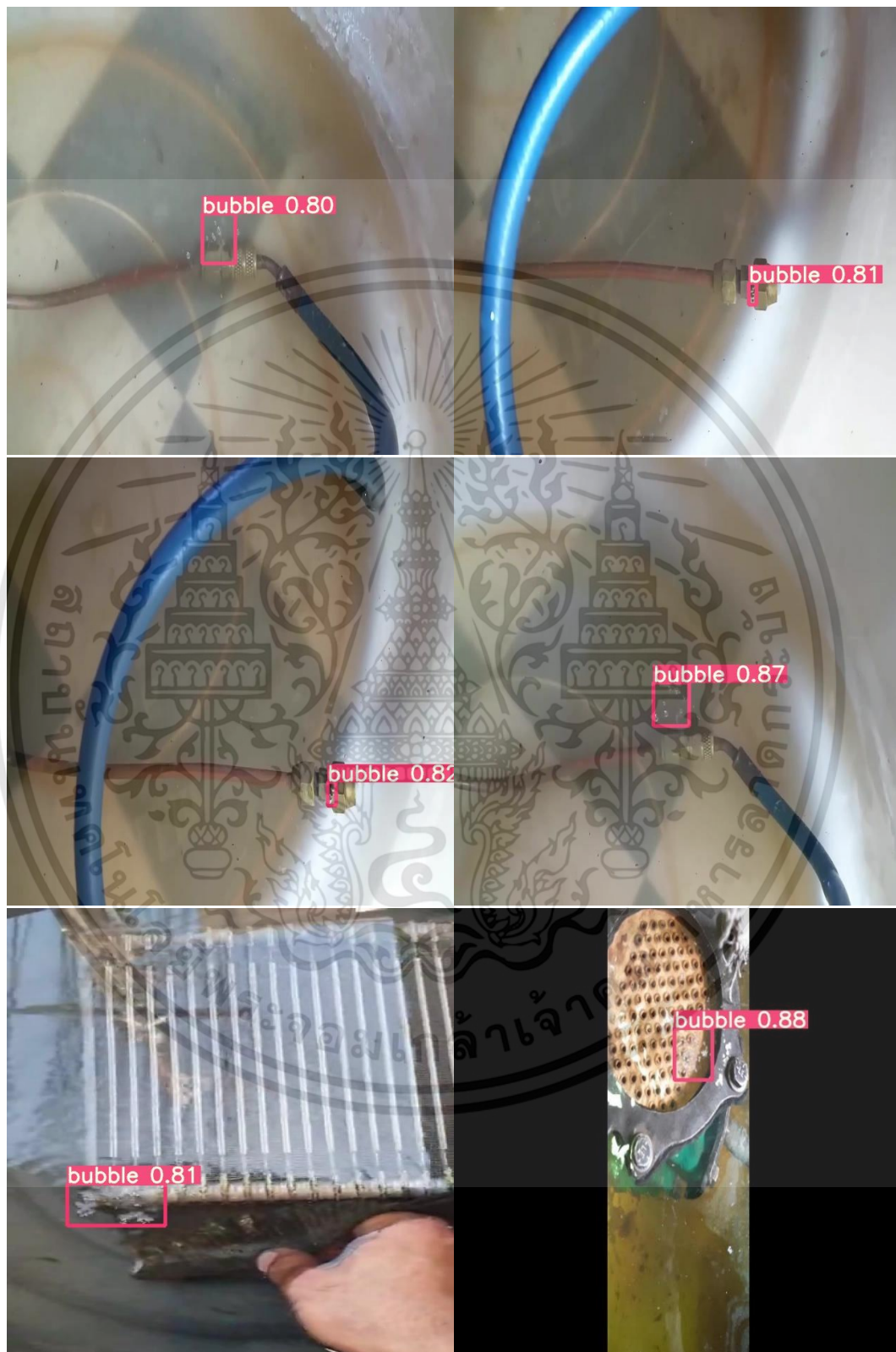
- [10] สิทธิชัย สุรบถโสภณ. (2560). การสร้างแบบจำลองทางสถาปัตยกรรมจากการตรวจจับรูปแบบกิจกรรมของ ผู้ใช้งานบนพื้นที่สาธารณะโดยระบบการรู้จำวัตถุกรณีศึกษา: การสร้างแบบจำลองสามมิติเชิงพารามетริกสำหรับ ป้ายรถโดยสารประจำทาง (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. สืบค้นจาก [http://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2017/TU\\_2017\\_5816030075\\_5377\\_8225.pdf](http://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2017/TU_2017_5816030075_5377_8225.pdf)
- [11] Pinto, N., Cox, D. D., DiCarlo, J. J. (2008). **Why is Real-World Visual Object Recognition Hard**. PLoS Comput Biol, Volume 4. 151-156. DOI:10.1371/journal.pcbi.0040027.
- [12] **LabelImg**. [Image]. (n.d.). Retrieved from <https://github.com/tzutalin/labelImg>
- [13] **Overview of model structure about YOLOv5**. (2020). [Image]. Retrieved from <https://github.com/ultralytics/yolov5/issues/280>
- [14] Chinnatip, T. (2021). **Train Object detections ด้วย Roboflow และ YoloV4 Pytorch [Part1]**. Retrieved from <https://medium.com/super-ai-engineer/train-object-detections-ด้วย-roboflow-และ-yolov4-pytorch-part1-b6b3cb5f4718>
- [15] **Roboflow**. [Image]. (n.d.). Retrieved from <https://universe.roboflow.com/techtit-sritrakul/bubble-leak-test-in-oil-cooler/4>
- [16] **ทำความเข้าใจ accuracy, precision, recall, f1-score**. (2020) สืบค้น 16 พฤศจิกายน 2564 จาก <http://www.ninenox.com/2020/09/24/ทำความเข้าใจ-accuracyprecisionrecallf1-score/>
- [17] R.S. Bhosale, P.P. Kumbhar, K.S. Mahajan, A.K. Yachkal. (2017). Study on Leak Testing Methods, **IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development**, 5(1), 1618-1621. [https://www.researchgate.net/publication/323219717\\_Study\\_on\\_Leak\\_Testing\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/323219717_Study_on_Leak_Testing_Methods)



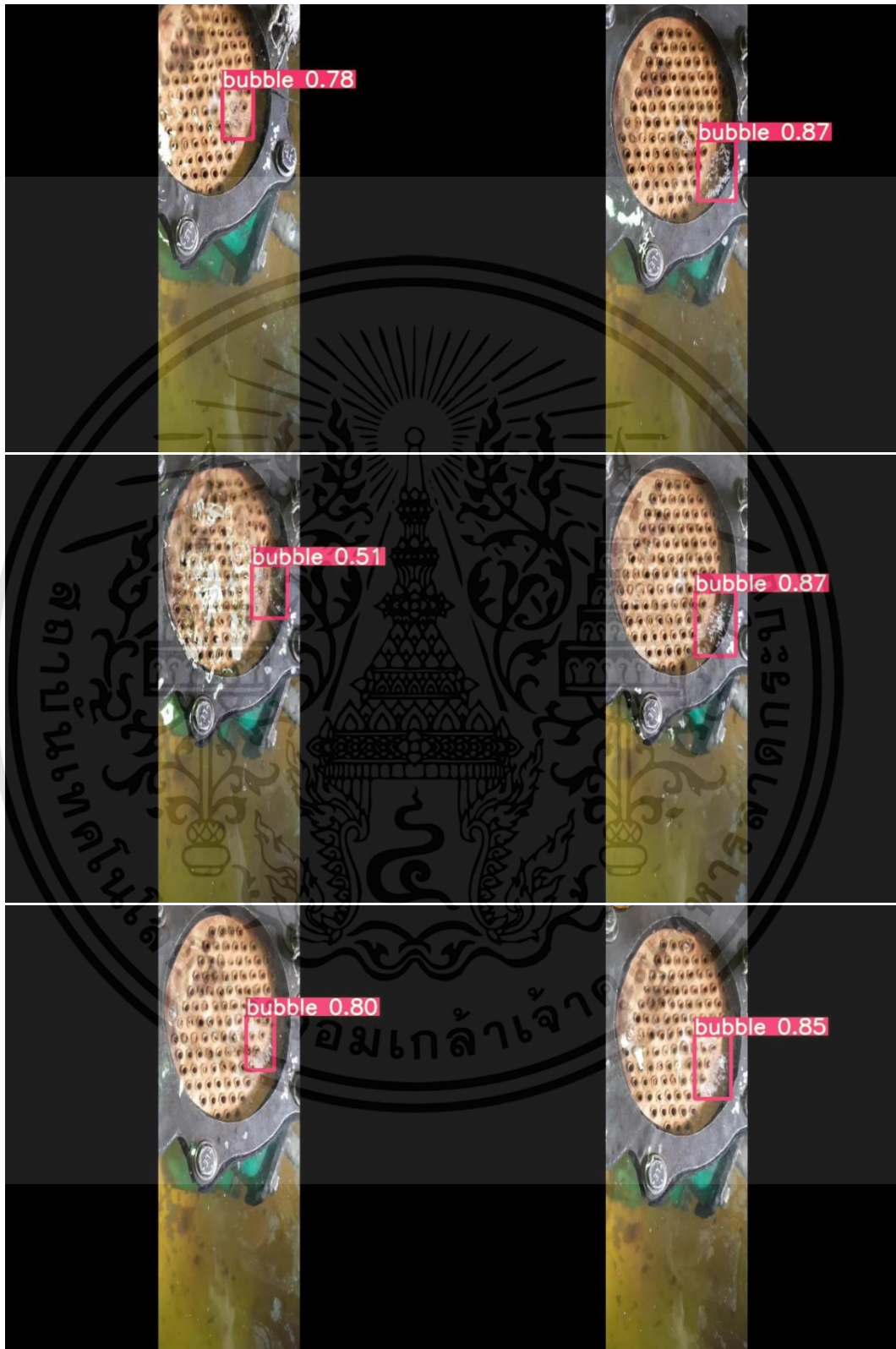
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



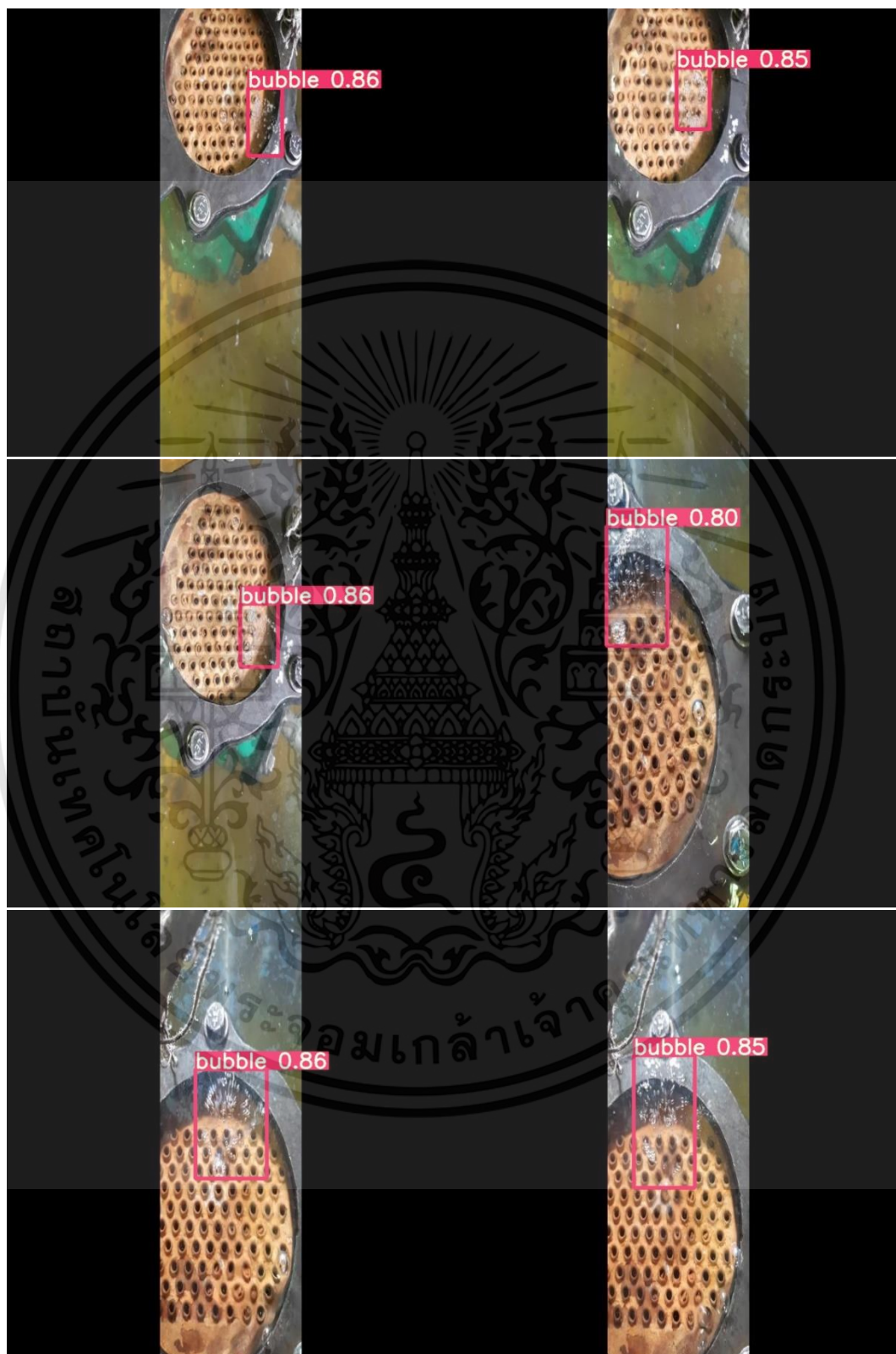
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



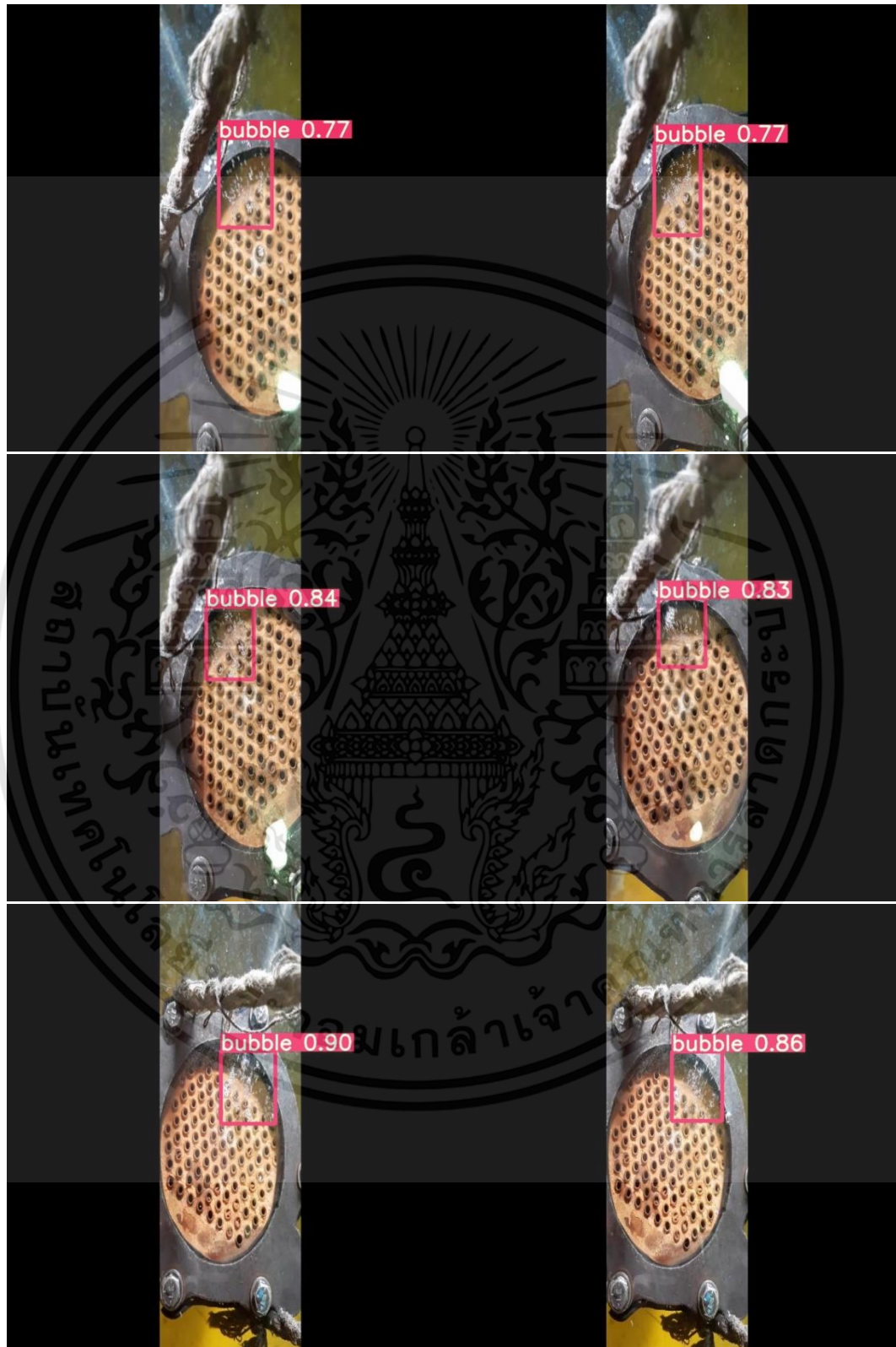
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



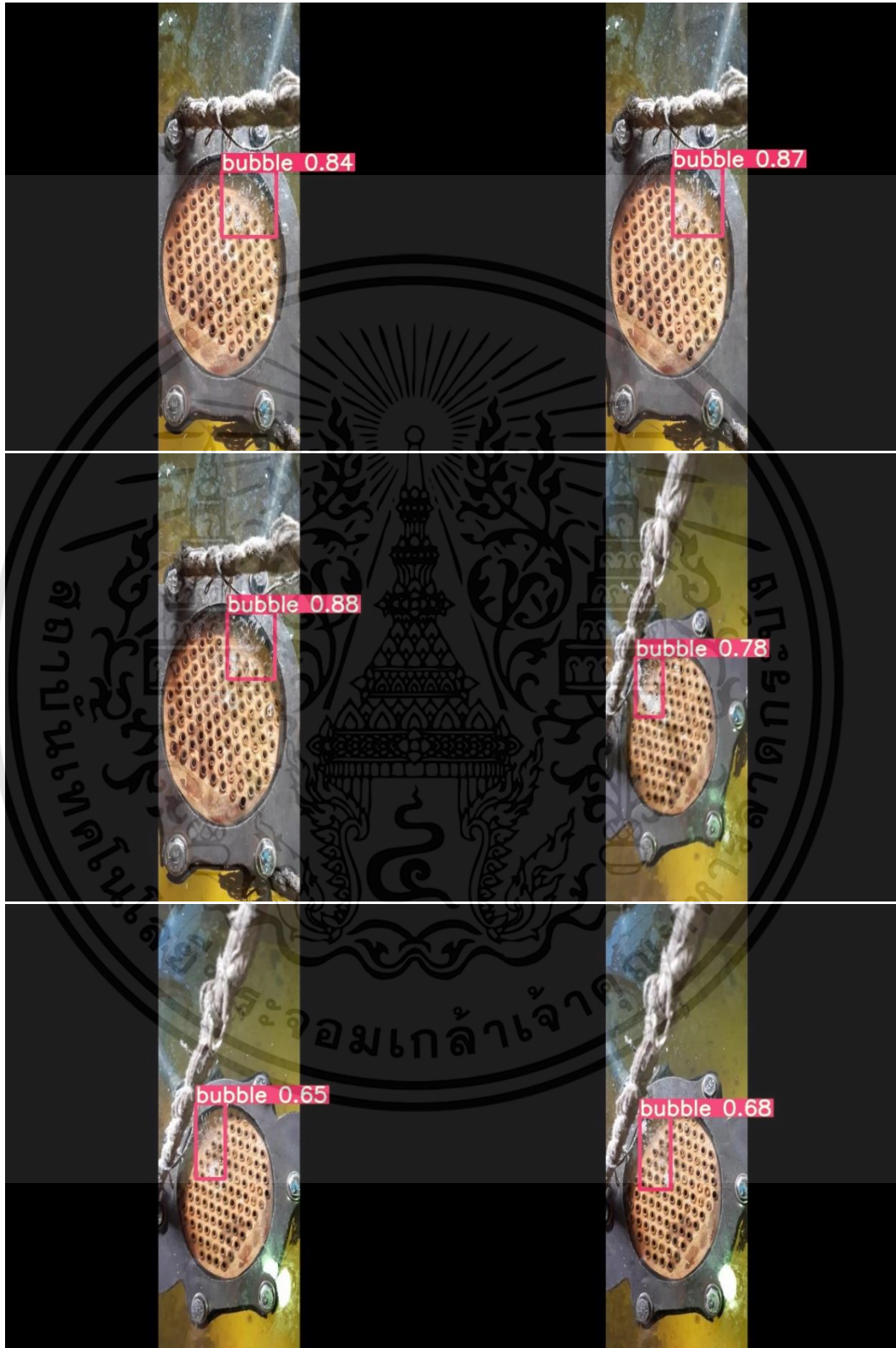
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



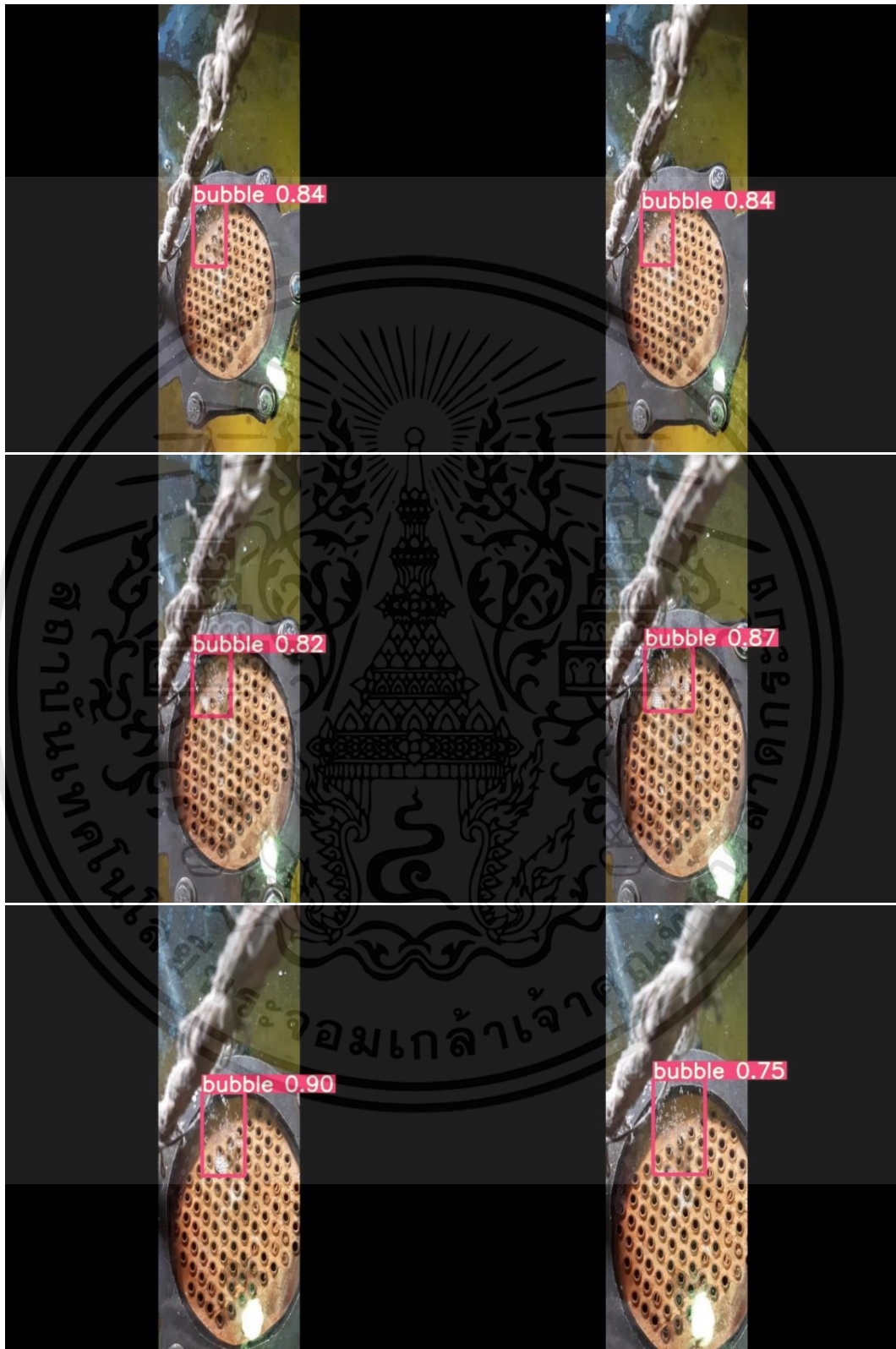
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



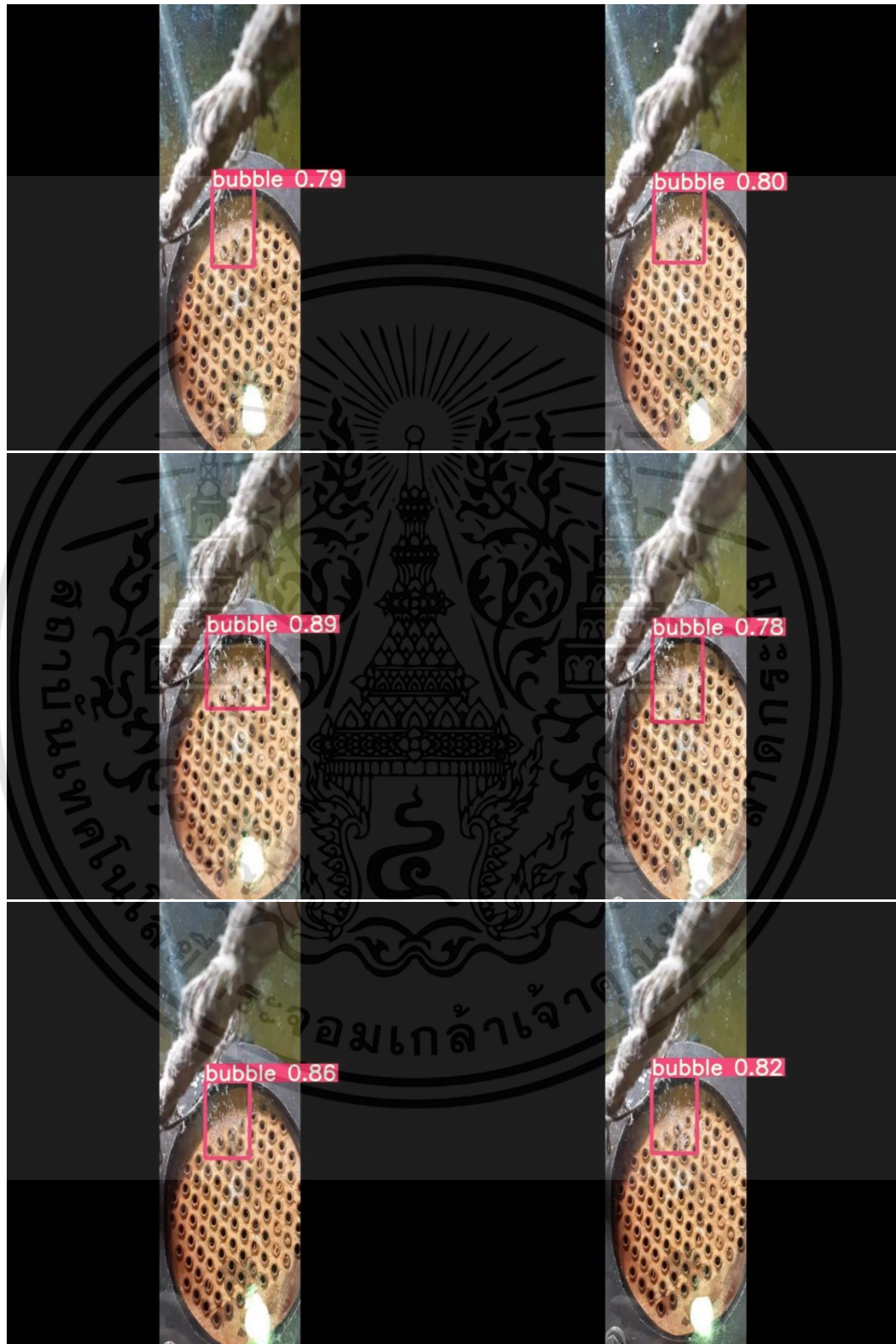
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



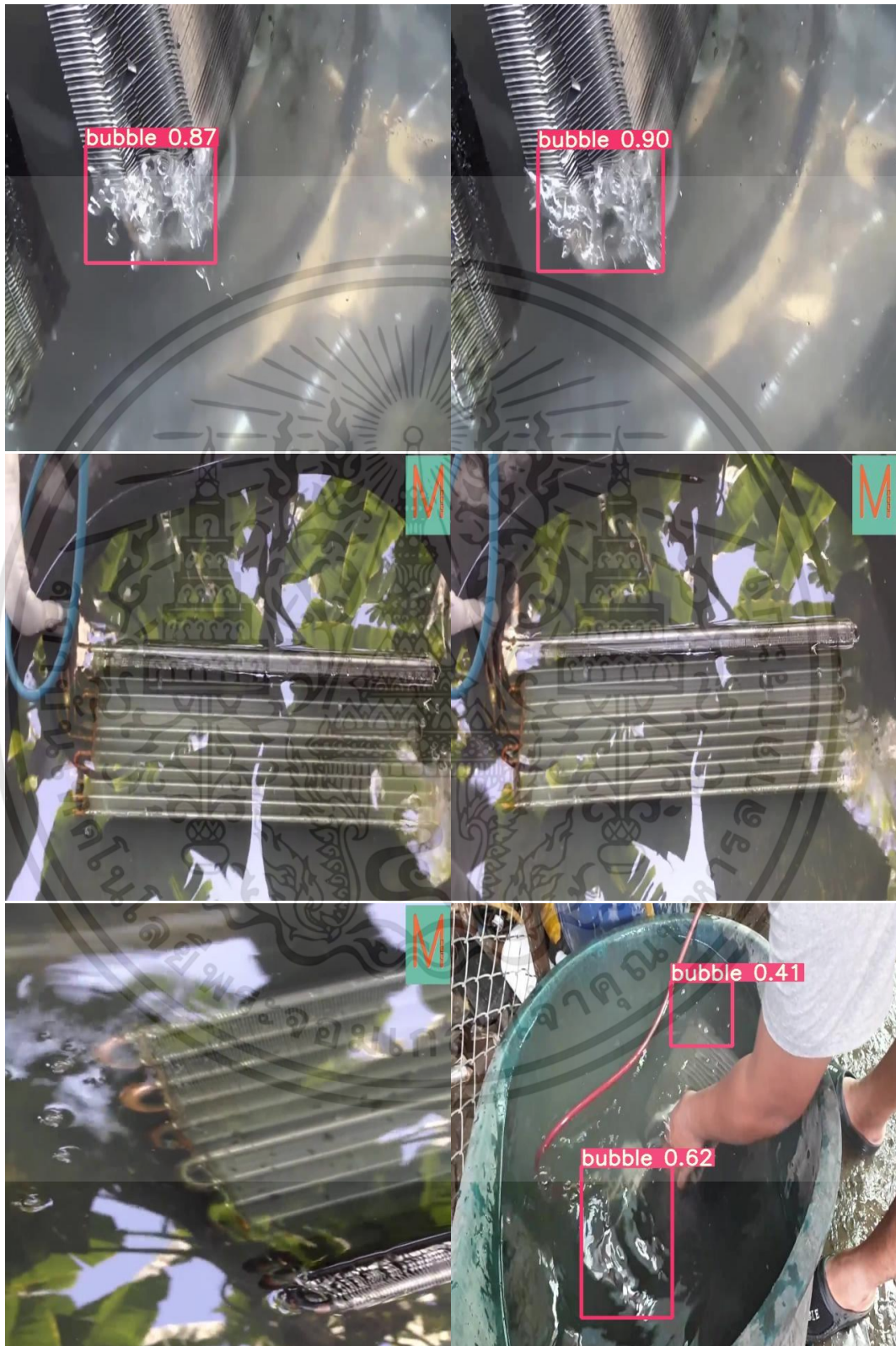
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้